

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

**EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD
INTRÍNSECA DEL ACUÍFERO SAHUARAL,
SONORA, MÉXICO POR EL METODO GODS Y
ANÁLISIS HIDROGEOQUÍMICOS**

TESIS

**Que para obtener el Grado de:
Maestro en Ciencias-Geología.**



PRESENTA:

RICARDO JOSÉ FERRER BAUZA.

Hermosillo, Sonora, Diciembre de 2016

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



“El saber de mis hijos
hará mi grandeza”



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Agradecimientos

+A mis padres porque siempre me apoyaron y compartieron todas mis metas

A mis hermanos aunque ya no estamos juntos es muy grato verlos y compartir estos momentos

A mi esposa Salomé por todo su amor y apoyo

A mi hija Lidia y mi hijo Ricardo por llenar mi vida de felicidad

A todos mis amigas y amigos por su valioso apoyo y espero sigamos cultivando esta amistad

A la UNISON y al Dpto. de Geología y en especial al área de Maestría porque me han dado la oportunidad de crecer como profesionalista

A mis asesores Lourdes y Alfredo por todo su apoyo y orientación para la realización de esta tesis

A mis sinodales por sus valiosos comentarios

A todos aquellos que de una u otra forma me han influenciado para ser mejor

ÍNDICE

Informe

Cap.	Tema	Pág.
I	GENERALIDADES	
I.1	Introducción.....	1
I.1.1	Antecedentes y/o problemática del acuífero.....	1
I.2	Objetivos.....	2
I.2.1	Objetivos generales.....	2
I.2.2	Específicos.....	2
I.2.3	Justificación.....	2
I.2.4	Descripción general del trabajo.....	3
I.3	Ubicación del área de estudio.....	3
I.3.1	Localización.....	3
I.3.2	Poligonal simplificada.....	4
I.3.3	Vías de comunicación.....	5
I.4	Hidrografía.....	5
I.5	Climatología.....	7
I.5.1	Análisis climatológico.....	7
I.6	Edafología.....	8
I.7	Uso de suelo y vegetación.....	10
I.8	Actividades económicas.....	11
I.9	Volúmenes y usos de agua.....	11
II	MATERIALES Y MÉTODOS	
II.1	Metodología de trabajo.....	15
II.2	Estudios técnicos realizados con anterioridad.....	15
II.3	Cartografía.....	17
III	GEOLOGÍA	
III.1	Geomorfología.....	18
III.2	Fisiografía.....	18
III.2.1	Provincia fisiográfica de la Llanura Sonorense II.....	19
III.2.2	Subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses 08.....	20
III.3	Geología.....	21
III.3.1	Estratigrafía y litología.....	21

III.3.2	Geología estructural.....	25
III.4	Geología del subsuelo.....	26
III.4.1	Secciones geohidrológicas.....	26
III.4.1.1	Sección geohidrológica A-A´.....	27
III.4.1.2	Sección geohidrológica B-B´.....	28
III.4.2	Unidades hidrogeológicas.....	29
III.4.3	Gravimetría.....	31
IV	HIDROGEOLOGÍA	
IV.1	Introducción.....	34
IV.2	Comportamiento hidráulico del sistema.....	34
IV.3	Piezometría.....	35
IV.3.1	Profundidad al nivel estático.....	35
IV.3.2	Elevación del nivel estático.....	38
IV.3.2.1	Dirección del flujo subterráneo.....	41
IV.3.3	Evolución del nivel estático.....	42
IV.4	Disponibilidad de agua subterránea.....	44
IV.5	Vedas.....	45
V	HIDROGEOQUÍMICA	
V.1	Introducción.....	47
V.2	Trabajo de campo.....	47
V.3	Metodología para la representación hidrogeoquímica.....	48
V.4	Información de campo.....	48
V.4.1	Temperatura del agua subterránea.....	48
V.5	Información y/o resultados de laboratorio.....	49
V.5.1	Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 modificada el año 2000.....	49
V.5.2	Potencial de hidrógeno (pH).....	50
V.5.3	Conductividad eléctrica (CE).....	51
V.5.4	Sólidos totales disueltos (STD).....	52
V.5.4.1	Evolución de los sólidos totales disueltos.....	52
V.5.4.2	Límite de los sólidos totales disueltos.....	55
V.5.4.3	Relación entre conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos.....	56
V.5.5	Calcio.....	57
V.5.6	Magnesio.....	58
V.5.7	Potasio.....	60
V.5.8	Sodio.....	61
V.5.9	Cloruros.....	62
V.5.10	Sulfatos.....	64
V.5.11	Nitratos.....	66
V.5.12	Bicarbonatos.....	67
V.5.13	Dureza total CaCO ₃	69
V.5.13.1	Límite de la dureza CaCO ₃	69
V.6	Tipos de agua subterránea.....	70
V.6.1	Clasificación del agua subterránea por Conductividad eléctrica (CE).....	70

V.6.2	Clasificación del agua subterránea por concentración de CaCO ₃	72
V.6.3	Clasificación de Frezee y Cherry.....	73
V.7	Clasificación de familias de agua subterránea.....	74
V.7.1	Clasificación de Piper.....	75
V.7.1.1	Distribución de las familias de agua en el acuífero.....	76
V.7.2	Clasificación de Stiff.....	78
V.8	Calidad del agua para riego.....	79
V.8.1	El origen de las sales disueltas en el agua de riego.....	81
V.8.2	Clasificación del agua de riego en el acuífero.....	81
V.8.3	Distribución de la calidad de agua de riego en el acuífero.....	82
V.8.4	Parámetros utilizados para determinar la calidad del agua para riego.....	83
V.9	Calidad del agua Subterránea para identificar Intrusión marina.....	85

VI VULNERABILIDAD

VI.1	Antecedentes.....	87
VI.2	Método GODS.....	87
VI.2.1	Características del método.....	88
VI.2.2	Descripción de cada uno de los parámetros (variables).....	89
VI.3	Analogía para generar el mapa Índice de Vulnerabilidad GODS.....	90
VI.4	Asignación de valores (pesos) para cada una de las variables.....	91
VI.4.1	Fuentes de información.....	91
VI.4.2	Valor (peso) que toma cada una de las variables.....	91
VI.4.2.1	Determinación de la variable “G” ocurrencia del agua subterránea.....	91
VI.4.2.2	Determinación de la variable “O” substrato litológico.....	93
VI.4.2.3	Determinación de la variable “D” profundidad de la zona no saturada.....	95
VI.4.2.4	Determinación de la variable “S” suelo.....	96
VI.4.2.5	Determinación del Índice de Vulnerabilidad GODS.....	97
VI.5	Índice de Vulnerabilidad GODS.....	97
VI.5.1	Definición de las clases de vulnerabilidad a la contaminación.....	97
VI.5.2	Clases de vulnerabilidad a la contaminación.....	98
VI.5.2.1	Vulnerabilidad Media.....	98
VI.5.2.2	Vulnerabilidad Baja.....	99
VI.5.2.3	Vulnerabilidad Despreciable.....	99
VI.6	Intrusión marina.....	100
VI.6.1	Vulnerabilidad a la intrusión marina.....	102
VI.6.1.1	Metodología SEA-GIndex.....	102

VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VII.1	Conclusiones.....	104
VII.2	Recomendaciones.....	107

VIII BIBLIOGRAFÍA

VIII.1	Bibliografía.....	109
--------	-------------------	-----

Figuras

No.	Título	Pág.
I.1	Localización del acuífero Sahuaral.....	4
I.2	Poligonal simplificada del acuífero Sahuaral.....	5
I.3	Subcuencas.....	6
I.4	Distribución espacial de los subtipos de climas.....	8
I.5	Distribución espacial de los suelos.....	9
I.6	Distribución espacial de uso del suelo y vegetación.....	11
I.7	Volumen de extracción por uso y en porcentaje para el año 2010.....	12
I.8	Localización de los aprovechamientos muestreados en 2011.....	13
I.9	Usos por aprovechamiento en 2011.....	14
III.1	Provincias Fisiográficas, INEGI 1981.....	18
III.2	Subprovincias y discontinuidad a nivel regional, INEGI 1981.....	19
III.3	Topoformas, INEGI 1981.....	21
III.4	Columna estratigráfica del acuífero Sahuaral.....	22
III.5	Geología.....	23
III.6	Parte de la sección geológica B-B' tomada de la cartografía del SGM (2000).....	25
III.7	Localización de las secciones geohidrológicas A-A' y B-B'.....	27
III.8	Sección geohidrológica A-A'.....	28
III.9	Sección geohidrológica B-B'.....	29
III.10	Localización del perfil y sondeo eléctrico de resistividad.....	30
III.11	Sección hidroestratigráfica (sección No.3).....	31
III.12	El mapa residual de anomalías gravimétricas.....	32
III.13	Perfil gravimétrico.....	33
IV.1	Isotransmisividades de las pruebas de bombeo (GEOCALLI, S.A, 1978).....	35
IV.2	Profundidad al nivel estático 1967.....	36
IV.3	Profundidad al nivel estático 1978.....	36
IV.4	Profundidad al nivel estático 1987.....	37
IV.5	Profundidad al nivel estático 2009.....	37
IV.6	Profundidad al nivel estático 2011.....	38
IV.7	Profundidad al nivel estático 2014.....	38
IV.8	Elevación del nivel estático y dirección del flujo subterráneo originales.....	39
IV.9	Elevación del nivel estático y dirección del flujo subterráneo 1967.....	39
IV.10	Elevación del nivel estático y dirección del flujo subterráneo 1978.....	40
IV.11	Elevación del nivel estático y dirección del flujo subterráneo 1987.....	40
IV.12	Elevación del nivel estático y dirección del flujo subterráneo 1977.....	40
IV.13	Elevación del nivel estático y dirección del flujo subterráneo 2009.....	40
IV.14	Elevación del nivel estático y dirección del flujo subterráneo 2011.....	41
IV.15	Elevación del nivel estático y dirección del flujo subterráneo 2014.....	41
IV.16	Evolución del nivel estático 1967-1968.....	42
IV.17	Evolución del nivel estático 1975-1987.....	42

IV.18	Evolución del nivel estático 2005-2009.....	43
IV.19	Evolución del nivel estático 2000-2011.....	43
IV.20	Evolución del nivel estático 2010-2014.....	44
IV.21	Áreas de veda publicadas en el Diario Oficial de la Federación.....	46
V.1	Aprovechamientos muestreados en el acuífero Sahuaral en el año 2011.....	47
V.2	Temperatura de las muestras de agua subterránea.....	48
V.3	Distribución de las temperaturas de las muestras de agua subterránea.....	49
V.4	Distribución espacial del pH conforme a la NOM-127.....	51
V.5	Distribución espacial de la CE de laboratorio.....	52
V.6	Sólidos totales disueltos 1967.....	53
V.7	Sólidos totales disueltos 1978.....	53
V.8	Sólidos totales disueltos 1997.....	54
V.9	Sólidos totales disueltos 2009.....	54
V.10	Sólidos totales disueltos 2011.....	54
V.11	Concentraciones de STD y su límite conforme a la NOM-127.....	55
V.12	Distribución espacial de los STD conforme a la NOM-127.....	56
V.13	Relación entre la CE-STD de laboratorio.....	57
V.14	Distribución espacial del ion calcio.....	58
V.15	Distribución espacial del ion magnesio.....	59
V.16	Distribución espacial del ion potasio.....	60
V.17	Concentraciones de sodio y su límite conforme a la NOM-127.....	61
V.18	Distribución espacial del límite del sodio conforme a la NOM-127.....	62
V.19	Concentraciones de cloruro y su límite conforme a la NOM-127.....	63
V.20	Distribución espacial del límite del cloruro conforme a la NOM-127.....	64
V.21	Concentraciones de sulfato y su límite conforme a la NOM-127.....	65
V.22	Distribución espacial del límite del sulfato conforme a la NOM-127.....	65
V.23	Concentraciones de nitrato y su límite conforme a la NOM-127.....	66
V.24	Distribución espacial del límite del nitrato conforme a la NOM-127.....	67
V.25	Distribución espacial del ion bicarbonato.....	68
V.26	Concentraciones de dureza (CaCO ₃) y su límite conforme a la NOM-127.....	69
V.27	Límite de la dureza del agua conforme a la NOM-127.....	70
V.28	Clasificación de APHA (1995).....	71
V.29	Dureza en porcentaje de acuerdo al número de muestras.....	72
V.30	Clasificación de la dureza del agua de acuerdo a la OMS.....	73
V.31	Clasificación del agua de Frezee y Cherry (1974).....	74
V.32	Clasificación de familias de agua de Piper para el año 2011.....	75
V.33	Tipos de familias de agua en el acuífero Sahuaral.....	76
V.34	Distribución de las familias de agua en el acuífero Sahuaral.....	77
V.35	Ejemplos de diagramas típicos de Stiff.....	78
V.36	Diagramas de Stiff para el año 2011.....	79
V.37	Clasificación USLS para las aguas de riego (RIVERSIDE, 1954).....	80
V.38	Clases de agua para riego.....	81
V.39	Calidad del agua para riego (RIVERSIDE).....	82
V.40	Distribución de la calidad del agua para riego en el acuífero Sahuaral.....	83
V.41	Diagrama de Kelly asociado a intrusión marina.....	85

VI.1	Diagrama del método GODS.....	89
VI.2	Analogía del mapa Índice de Vulnerabilidad GODS.....	90
VI.3	Tipos de acuíferos.....	92
VI.4	Ubicación de perfiles de pozos.....	93
VI.5	Sustrato litológico.....	94
VI.6	Profundidad al nivel estático del agua subterránea (2014).....	95
VI.7	Textura de los suelos.....	96
VI.8	Mapa Índice de Vulnerabilidad GODS.....	100
VI.9	Intrusión marina.....	101
VI.10	Método SEA-GIndex (2004).....	102
VI.11	Vulnerabilidad a la intrusión marina.....	103

Tablas

No.	Título	Pág.
V.1	Límites máximos permisible conforme a la NOM-127 (año 2000).....	50
V.2	Clasificación de salinidad American Potability and Health Asociation (1995).....	71
V.3	Clasificación del agua por su dureza (CaCO3) de acuerdo a la OMS.....	72
V.4	Clasificación de aguas de Frezee y Cherry.....	73
VI.1	Fuentes de información.....	91
VI.2	Tipos de acuíferos.....	92
VI.3	Sustrato litológico.....	94
VI.4	Valores de profundidad.....	96
VI.5	Valores de textura de los suelos.....	97
VI.6	Índice de vulnerabilidad GODS.....	97
VI.7	Clases de vulnerabilidad GODS.....	98

Anexos

No.	Título	Pág.
A	Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero Sahuaral.....	114
B	Características de los aprovechamientos muestreados en el año 2011 (INEGI, 2013).....	115
C	Resultados de la interpretación de las pruebas de bombeo (GEOCALLI S.A, 1978).....	117
D	Profundidad al nivel estático (CONAGUA, 2014).....	119
E	Elevación del nivel estático (CONAGUA, 2014).....	120
F	Evolución del nivel estático (CONAGUA, 2010-2014).....	121
G	Parámetros físico-químicos medidos en campo en el año 2011 (INEGI, 2013).....	122
H	Análisis físico-químicos del laboratorio del año 2011 (INEGI, 2013).....	124
I	Clasificación del diagrama de Kelly.....	127
J	Perfiles de pozos.....	129

RESUMEN

El uso del agua subterránea como única fuente para el desarrollo de las actividades humanas en esta zona, es de gran importancia para la población y el entorno que lo rodea, ya que es utilizada en su mayoría para la agricultura, consumo humano, entre otras actividades y también es importante para el balance ecológico natural.

Sin duda alguna, para llevar a cabo el mejor manejo del acuífero en un futuro y que este sea sostenible de un recurso como es del agua subterránea, es necesario contar con estudios hidrológicos que expongan las condiciones pasadas y presentes del recurso; como es el propósito de esta tesis de que sirva como un elemento más para toma de decisiones, que conlleven a la utilización racional de dicho recurso.

Se han realizado pocos estudios hidrológicos sobre el Acuífero Sahuaral, estos se han llevado a cabo por CONAGUA y por universidades; sin embargo, se cuenta con muy pocos trabajos enfocados explícitamente a la vulnerabilidad acuífera. En esta tesis se proponen ocho capítulos, son los siguientes: 1) generalidades, 2) materiales y métodos, 3) geología, 4) hidrogeología, 5) hidrogeoquímica, 6) vulnerabilidad, 7) conclusiones y recomendaciones, 8) bibliografía.

Dentro de los objetivos que pretende alcanzar esta tesis es la determinar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero utilizando la metodología **GODS** y obtener el mapa de Índice de Vulnerabilidad así como determinar el avance de la intrusión marina por el método SEA-GIndex; esto por medio de la ayuda de software en Sistema de Información Geográfica (SIG).

CAPÍTULO I.- GENERALIDADES

I.1.- Introducción

El agua es un recurso natural imprescindible para la vida y el desarrollo de la sociedad. El agua de los océanos representa el 97% del volumen total de agua en el planeta; sólo aproximadamente el 3% del agua disponible en la tierra es agua dulce. Del agua dulce el 79% está en los casquetes polares y solo el 21% representa los recursos hídricos aprovechables, de los cuales el 20% es agua subterránea y el 1% es agua superficial (www.infoagua.org).

En el mundo existen al menos 1,500 millones de personas para quienes las aguas subterráneas constituyen la fuente principal de agua dulce. Sin embargo, en muchas regiones la sobreexplotación y la contaminación están amenazando éstas fuentes de abasto y se hace imprescindible la protección de las mismas (Vulnerabilidad del Acuífero Valle Ica, 2009).

En los últimos años la sociedad ha tomado conciencia de la degradación de la calidad de los recursos hídricos subterráneos, debido a esta situación, actualmente se generaliza el uso de técnicas para cartografiar la vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación (métodos: GODS, AVI, DRASTIC, etc.), como una herramienta para compatibilizar la carga contaminante generada por actividades antrópicas y la capacidad del medio acuífero para soportar la misma sin perjuicio de la calidad del agua subterránea.

En el estado existen muy pocas investigaciones relacionadas al tema de vulnerabilidad de acuífero u otros métodos que conlleven a la prevención, conservación y preservación de este recurso.

I.1.1.- Antecedentes y/o problemática del acuífero

El acuífero Sahuaral pertenece al Organismo de Cuenca "Noroeste" con clave 2620.

Acuífero se empezó a explotar desde los años 50's, donde no había un control de tomas de lecturas piezométricas, estas empezaron hasta el año de 1967 debido a que se estaba llevando a cabo un estudio hidrológico para el Acuífero Costa de Hermosillo y por necesidad tuvieron que tomar en cuenta al acuífero en cuestión; se puede decir que a partir de este estudio se tiene la primera información oficial. Desde las primeras lecturas se pone de manifiesto que las líneas piezométricas ya se encuentran ligeramente bajo el nivel del mar.

El acuífero Sahuaral únicamente se abastece de agua subterránea y en donde la agricultura es uno de los polos principales para el desarrollo de esta zona.

Por otro lado, a la fecha no se sabe en qué medida se esté degradando el recurso debido principalmente al uso de fertilizantes y pesticidas.

El único fenómeno de degradación del recurso conocido es el de sobreexplotación; por lo que el acuífero se encuentra bajo las disposiciones de tres decretos de veda, el primero de ellos se da en el año de 1956, seguido por de 1963 y el de 1967.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua, vigente para el año 2014, los municipios de Hermosillo y Guaymas, se ubican en la zona de disponibilidad IV "Cultivos sensibles 500-1000 mg/l; cultivos con manejo especial 1,000-2,000 mg/l; cultivos tolerantes en suelos permeables 2,000-5,000 mg/l; para frutas sensibles relación se absorción de sodio $RAS \leq 4$, y para forrajes de 8-18, cuando la descarga sea directamente a suelo con uso en riego agrícola.

En la actualidad el acuífero no se engloba en un distrito de riego o unidad de riego, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

I.2.- Objetivos

El propósito de este trabajo es de colaborar con un tema en espacial que es el de Vulnerabilidad de Acuíferos, ya que actualmente en nuestro Estado es poco investigado y desarrollado.

I.2.1.- Objetivos generales

Que el documento sirva de consulta tanto a estudiantes, como a profesionales interesados en el tema de recursos naturales.

Presentar información de procesos de degradación que pueden afectar al acuífero, principalmente en lo relativo a la calidad del agua subterránea.

Crear conciencia acerca de la importancia, magnitud y severidad de los problemas de la degradación que amenazan al agua subterránea. El cual ayude implementar áreas de protección para la conservación de la calidad del recurso subterráneo.

I.2.2.- Específicos

- Determinar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero utilizando la metodología **GODS**.
- Obtener el mapa de Índice de vulnerabilidad para el acuífero.
- Caracterizar hidrogeoquímicamente las aguas subterráneas, a través de mapas, isolíneas y gráficos.
- Determinar el avance de la intrusión marina por el diagrama de Kelly y el método SEA-GIndex.

I.2.3.- Justificación

Se propone la presente investigación, como un aporte al desarrollo de las investigaciones hidrogeológicas y que además se tome como una investigación preventiva que ayude al desarrollo del área.

Se seleccionó el área de estudio debido a que la única fuente de abastecimiento es el agua subterránea, y que el mayor porcentaje de agua se utiliza para la agricultura, por lo que puede ser una fuente de contaminación al acuífero debido a los agroquímicos (fertilizantes, insecticidas,

fungicidas, herbicidas, etc.) que puedan ser utilizados. Además de ser un acuífero sobreexplotado, presenta problemas de intrusión marina y problemas de calidad de agua debido a su constitución geológica.

No olvidar que en esta zona se encuentran pequeños centros poblacionales los cuales demandan agua de buena calidad.

En conclusión el agua subterránea se ha visto modificada por las actividades antropogénicas mencionadas en el párrafo anterior, siendo las más importantes: la sobreexplotación del acuífero, la posible contaminación del agua por agroquímicos y por intrusión marina.

I.2.4.- Descripción general del trabajo

El trabajo a desarrollar consta de cuatro partes:

1. Recopilación de las variables hidrogeológicas y elaboración de perfiles estratigráficos a partir de los informes de perforación de pozos.
2. Clasificación de las aguas subterráneas a través de análisis hidrogeoquímicos.
3. Avance de la intrusión marina.
4. Aplicación de los sistemas de información geográfica para la elaboración del mapa de vulnerabilidad del acuífero. Utilizando la metodología GODS (GOD modificado).

I.3.- Ubicación del área de estudio

I.3.1.- Localización

El acuífero Sahuaral, definido con la clave 2620 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza al Noroeste de la República Mexicana, en la porción Suroeste del estado de Sonora (Figura I.1).

Geográficamente se ubica entre los paralelos 27° 59' y 28° 34' de latitud norte y entre los meridianos 111° 27' y 110° 57' de longitud oeste. Además se encuentra a unos 80 km al sur de la ciudad de Hermosillo. Sus límites son: al norte por el acuífero Costa de Hermosillo, al este por el acuífero Valle de Guaymas, al sureste por el acuífero San José de Guaymas y al Oeste por el Golfo de California. Su forma tiende a ser redonda, con un ligero alargamiento NE-SW, y cubre una superficie de 1,500 Km².

La parte sur del acuífero se encuentra dentro del municipio de Guaymas y la parte norte dentro del municipio de Hermosillo. Los poblados considerados de importancia en el acuífero son: al Norte Ejido San Juanico, Los Arrieros al Oriente El Diamante, localizado en el centro del mismo, y sobre la línea de costa de Norte a Sur: El Choyudo, El Colorado, Cerro Prieto, Peña Blanca y Ensenada Chica; en el Plano 1.2 se encuentran algunas de las localidades mencionadas.



Figura I.1.- Localización del acuífero Sahuaral.

I.3.2.- Poligonal simplificada

El acuífero Sahuaral está delimitado por una poligonal simplificada, definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la Anexo A. Los límites del acuífero se publicaron en el Diario Oficial de la Federación el 28 de agosto de 2009 (CONAGUA, 2010) y en la Figura I.2 se observa la poligonal del acuífero.

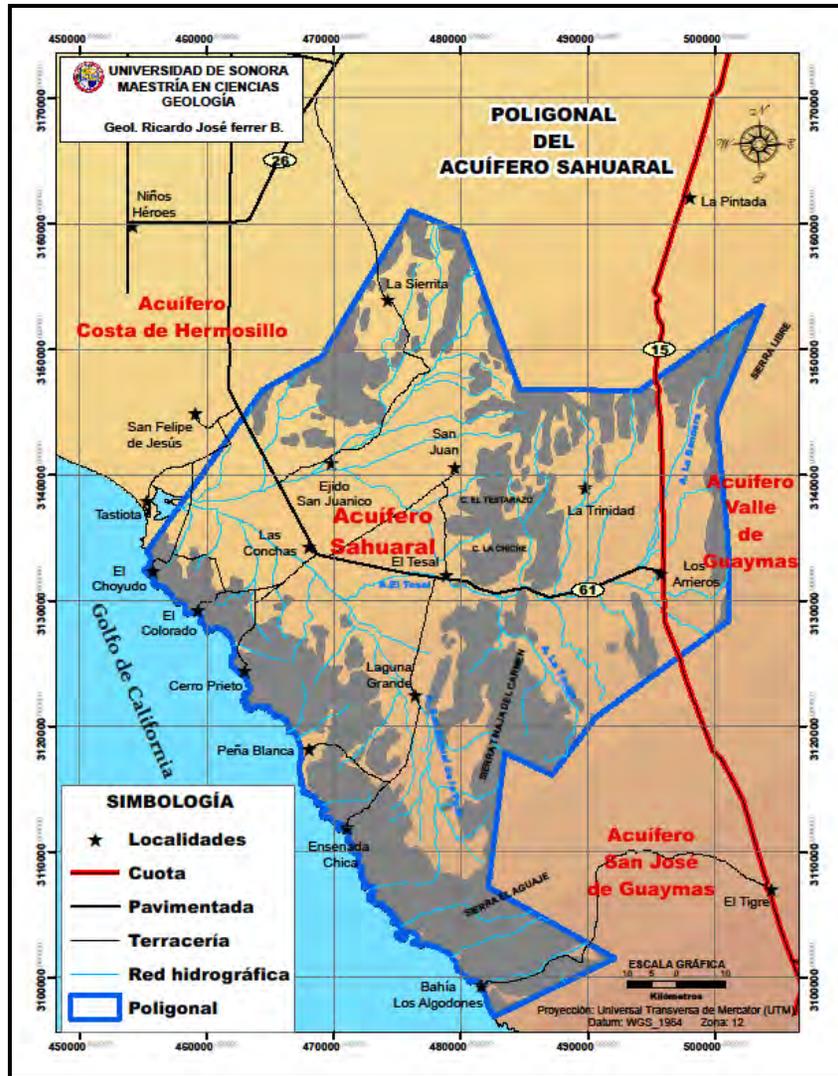


Figura I.2.- Poligonal simplificada del acuífero Sahuaral.

I.3.3.- Vías de comunicación

Existen dos vías de acceso al acuífero saliendo de la ciudad de Hermosillo: una es al sur por la carretera internacional México 15, hasta entroncar con la carretera estatal 61 esto en la localidad Los Arrieros; el segundo acceso es saliendo de Hermosillo por el suroeste por la carretera estatal 110 hasta encontrarse con la carretera 61 y continuar hacia el sur. El acceso a los ranchos, campos agrícolas y ejidos, se realiza por medio de caminos de terracería y brechas que son transitables todo el año (Figura I.2).

I.4.- Hidrografía

El acuífero Sahuaral se sitúa al extremo suroeste de la Región Hidrológica 09 (Sonora Sur) y hacia la misma localización de la cuenca Río Sonora, además al sur y al oriente el acuífero toma parte de la cuenca Río Mátape.

Más del 90% de la superficie del acuífero se encuentra contenida en la subcuenca A. La Bandera y en menor proporción también comparte al norte en sus límites con el Arroyo El Bajío; y de la cuenca Río Mátape toma parte de las subcuencas R. Mátape-Empalme al oriente y al sur con el A. Guaymas (Figura I.3).

La parte baja de la cuenca del Río Sonora tiene un comportamiento de tipo árido, por lo que los escasos volúmenes que escurren generalmente se infiltran en las zonas arenosas antes de llegar a su desembocadura en el Golfo de California, de modo que prácticamente no existen aprovechamientos de aguas superficiales.

El patrón de drenaje que se desarrolla en el área es del tipo dendrítico.

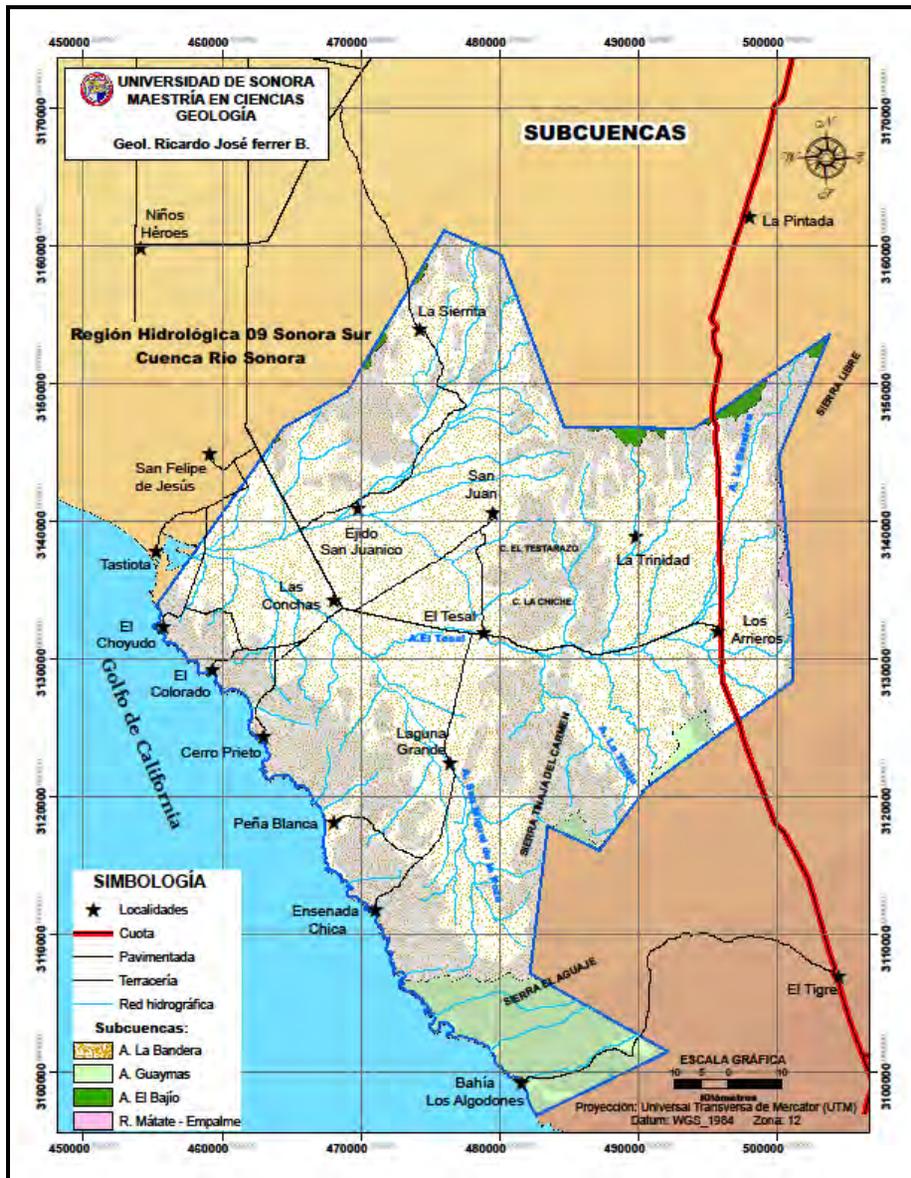


Figura I.3.- Subcuencas.

I.5.- Climatología

El acuífero se encuentra dominado por el tipo de climas Muy Secos, que pertenece al grupo de los Secos. Este clima se encuentra representado en el área de estudio por tres subtipos (Figura I.4); según la carta de climas de INEGI (1980), la cual utilizó la metodología de la clasificación de W. Köppen (1936), modificada para la República Mexicana por Enriqueta García (1973).

El primer subtipo $BW(h)hw$ es Muy Seco Muy Cálido y Cálido, con un régimen de lluvias en verano y con una precipitación invernal entre 5 y 10.2% y cálido; este es el subtipo predominante ya que ocupa el 55% de la superficie del acuífero. Se presenta en la franja oriente del área de estudio.

Es el segundo subtipo $BW(h)hw(x)$ es igual que el primero pero con la diferencia que presenta una precipitación invernal mayor de 10.2%. Se localiza en la franja poniente del acuífero y ocupa el 38% del área.

El tercer subtipo $BWhw$ Muy Seco Semicálido, presenta un régimen de lluvias de verano y un porcentaje de precipitación invernal entre 5 y 10.2% e invierno fresco; se localiza en las sierras Libre y Tinaja del Carmen. Representa el 7% del área total del acuífero.

I.5.1.- Análisis climatológico

El análisis climatológico es un resumen del estudio “Disponibilidad Media Anual del Agua Subterránea” presentado por SEMARNAT-CONAGUA, en 2010.

Las estaciones climatológicas consideradas fueron San Isidro y Empalme, ambas se encuentran fuera del acuífero, pero son las más cercanas y las que presentan la mayor información climatológica.

La temperatura media anual en el acuífero es de 24.4 °C. La temperaturas medias anuales en las estaciones de: San Isidro 22.5 °C y Empalme 25.2 °C, estas temperaturas se registran en los meses de julio y agosto. Las temperaturas medias mínimas se presentan en diciembre y enero, con 4.5 °C y 4.4 °C respectivamente.

La precipitación media anual en el acuífero es de 248.9 mm; en la estación San Isidro la precipitación media anual es de 178.0 mm, en tanto que en la estación Empalme es de 280.9 mm.

Los valores correspondientes a la evaporación potencial son tomados únicamente de la estación San Isidro. La evaporación potencial media anual en el acuífero es de 2,217.3 mm. En el período de mayo a agosto es cuando ocurren las mayores láminas de evaporación siendo estas superiores a 75 mm mensuales. La evaporación más alta se registra en el mes de julio con 87 mm, mientras que la mínima se presenta en enero con 27.8 mm.



Figura I.4.- Distribución espacial de los subtipos de climas.

I.6.- Edafología

Los suelos para este apartado son tomados de la cartografía de INEGI (2013) la cual se basó en la clasificación del Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (World Reference Base for Soil Resources WRB), estos se describen de mayor a menor porcentaje de ocupación en el área.

El Leptosol representa el 36.79% del total del área del acuífero como se observa en la Figura I.5, este suelo anteriormente se conocía como Litosol. El Leptosol en general es de poco espesor ya que debajo de él se encuentra el estrato rocoso. Es un suelo donde más del 40% de su volumen se encuentra ocupado por piedras, gravas y guijarros hasta una profundidad de 100 cm. La textura del suelo varía de gruesa a media y sobre la superficie es común encontrarse piedras con diámetro mayor a 25 cm. Este suelo se localiza básicamente sobre lomeríos y sierras. El uso principal de este suelo es para agostadero.

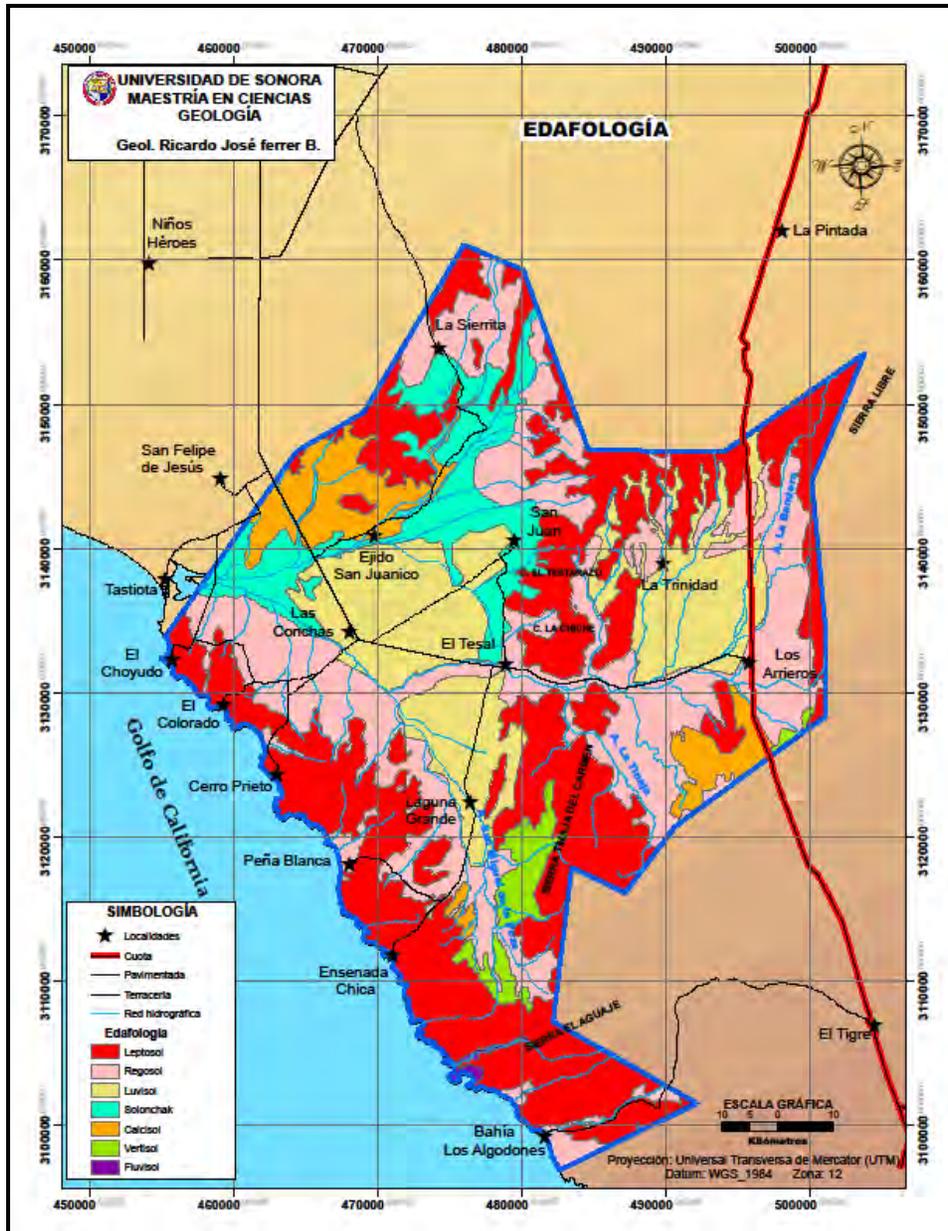


Figura I.5.- Distribución espacial de los suelos.

El Regosol ocupa el 28.69% del área del acuífero, es un suelo muy poco desarrollado, es decir es muy parecido al material de origen, por esto es un suelo que frecuentemente se encuentra asociado al Leptosol. En general son de color claro y pedregosos. La textura del suelo varía de gruesa a media. Se localizan en el área en la parte baja de lomeríos y sierras.

Como tercer suelo en abundancia se tiene el Luvisol, suelo de color rojo al oriente del área de estudio, en el resto del área varía de gris a pardo claro, es un suelo que contiene limo y/o arcilla, es susceptible a la erosión, este suelo es bueno para la agricultura. La textura del suelo varía de media a gruesa. Superficialmente se observa gravas y guijarros en la localidad La Trinidad.

El siguiente suelo Solonchak constituye el 8.43% de la superficie del acuífero y ocupa la porción noroeste del área. Es un suelo rico en sales fácilmente solubles (dentro de los primeros 50 cm de profundidad) en algún momento del año, esto se da debido a la elevada evapotranspiración o por influencia marina cuando se encuentra cercano a la costa. Las sales son apreciables cuando el suelo está seco y en la mayoría de las veces precipitan en la superficie formando una costra de sal, como se observa desde el Ejido San Juanico hasta Tastiota. La textura del suelo varía desde gruesa a fina, presentándose esta última hacia la línea de costa y la gruesa en las partes altas como por ejemplo en La Sierrita y San Juan.

El resto de los suelos en conjunto no suman el 10% y estos son:

- Calcisol.- Suelo generalmente de color claro, que presenta una acumulación secundaria de carbonatos de calcio (CaCO_3) y/o una capa cementada con (CaCO_3) mayor de 10 cm de espesor, dentro de los primeros 100 cm de profundidad del suelo. Este suelo se localiza en varias partes del área de estudio y dependiendo de esta la textura varía de gruesa a fina y puede o no presentar una fase gravosa o pedregosa sobre la superficie.
- Vertisol.- Suelo que tiene más de 30% de arcillas expandibles en todas sus capas dentro de los primeros 100 cm de espesor, son duros y masivos, con grietas anchas, abundantes y profundas cuando están secos. Son bastantes estables frente a la erosión. Se localiza principalmente al sur del acuífero y es un suelo de textura fina.
- Fluvisol.- este suelo se caracteriza por presentar una capa gruesa de arena, generalmente mayor a 30 cm de espesor, tiene un drenaje excesivamente rápido y es propenso a la erosión eólica cuando la capa arenosa está muy próxima a la superficie. Es de textura gruesa y exhibe sobre la superficie una fase gravosa. Se localiza al sur de la zona de estudio.

I.7.- Uso del suelo y vegetación

Según la cartografía de INEGI (2013), las comunidades vegetales presentes en la zona son (Figura I.6): Matorral Sarcocaula ocupa alrededor de 50% de la superficie del acuífero; Matorral Desértico Micrófilo con el 14%; Mezquital Xerófilo el 15%; Agricultura de Riego Anual y Semipermanente 10%; Vegetación Halófila Xerófila 4%, Pastizal Inducido 3% y Pastizal Cultivado 2%; y el resto lo ocupan otras comunidades.

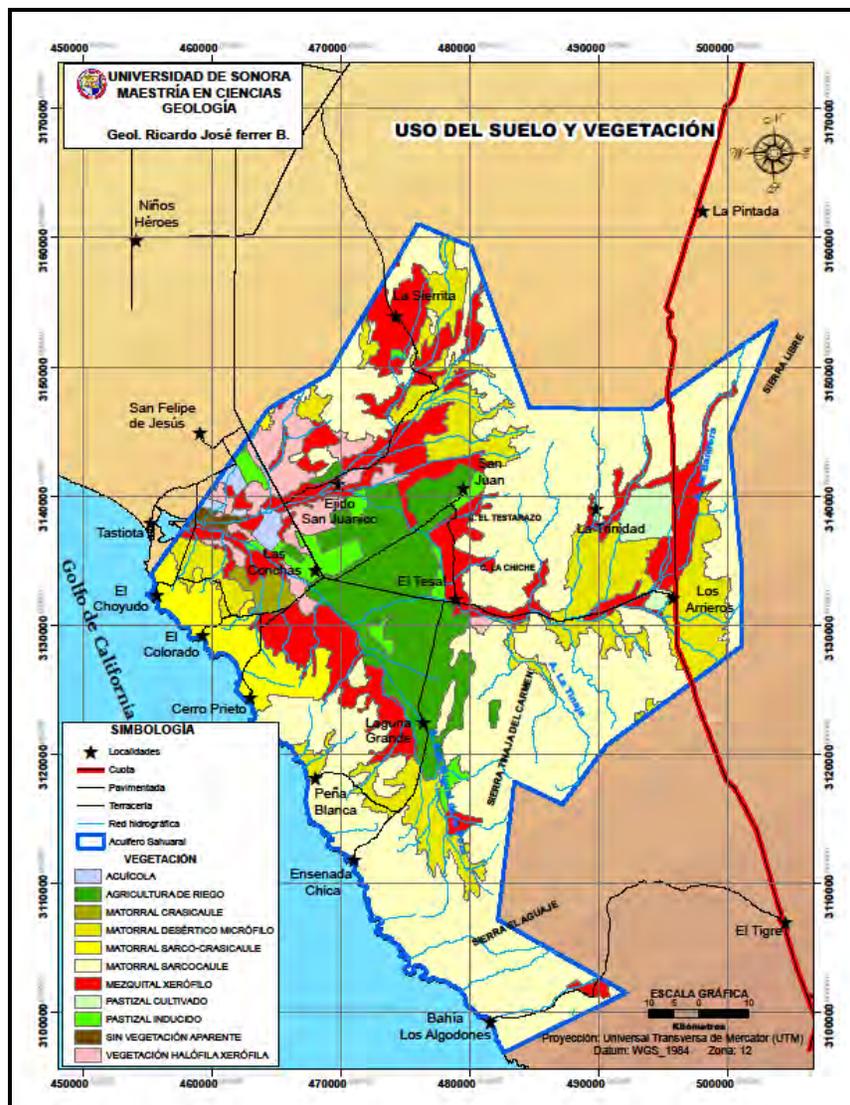


Figura I.6.- Distribución espacial de uso del suelo y vegetación.

I.8.- Actividades económicas

La principal actividad económica en la zona es la agricultura, que es la que demanda la mayor cantidad de agua; posteriormente en las granjas acuícolas, pesca y pecuaria.

I.9.- Volúmenes y usos del agua

De acuerdo al estudio de CONAGUA (2010) el volumen de extracción calculado para esta fecha es de 58.6 Hm³/año, de los cuales 57.0 Hm³/año (97.3%) se destinan al uso agrícola, 1.1 Hm³/año (1.9%) al uso público-urbano, 0.2 Hm³/año (0.3%) para uso doméstico y pecuario, y el restante 0.3 Hm³/año (0.5%) para otros usos (Figura I.7).

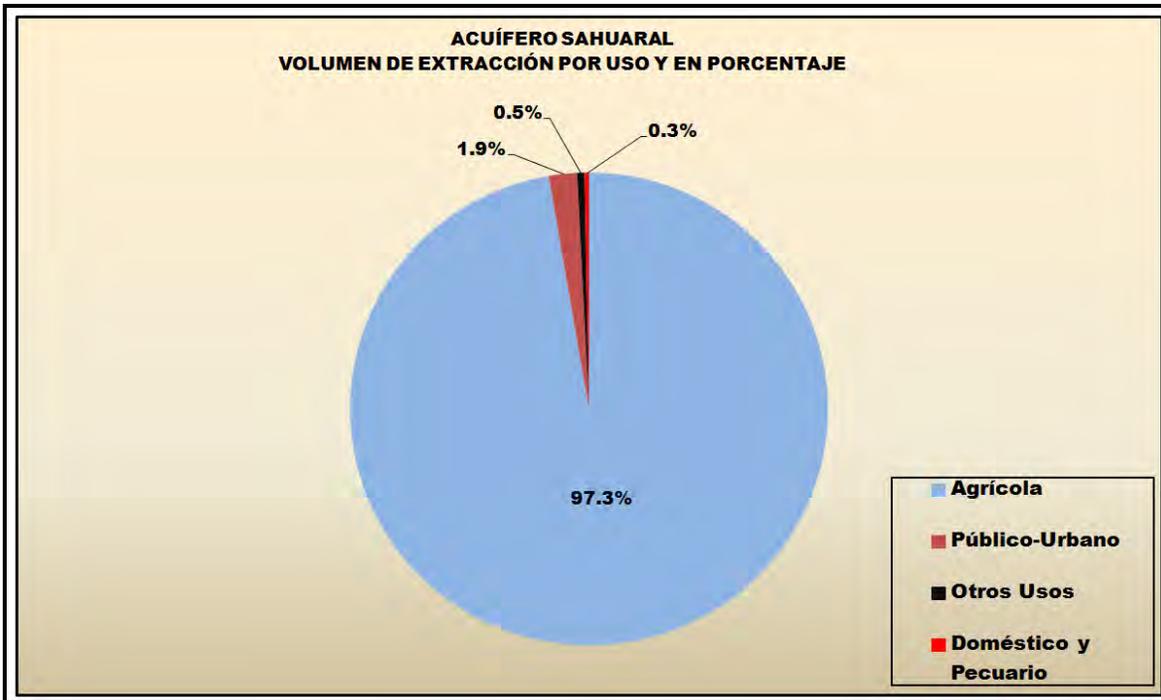


Figura I.7.- Volumen de extracción por uso y en porcentaje para el año 2010.

INEGI (2013) reporta 55 aprovechamientos muestreados en 2011, de estos son 53 pozos y dos norias (Anexo B); en el acuífero la mayoría de las obras se encuentran en la porción central (Figura I.8). También se obtuvo la siguiente información: la profundidad de los aprovechamientos va desde unos cuantos metros hasta los 366 m; en tanto el agua subterránea se extrae entre 14.7 a 92.3 m; estas obras tienen diámetros de descarga entre 1 y 12" y producen gastos de 1 a 163 lps.

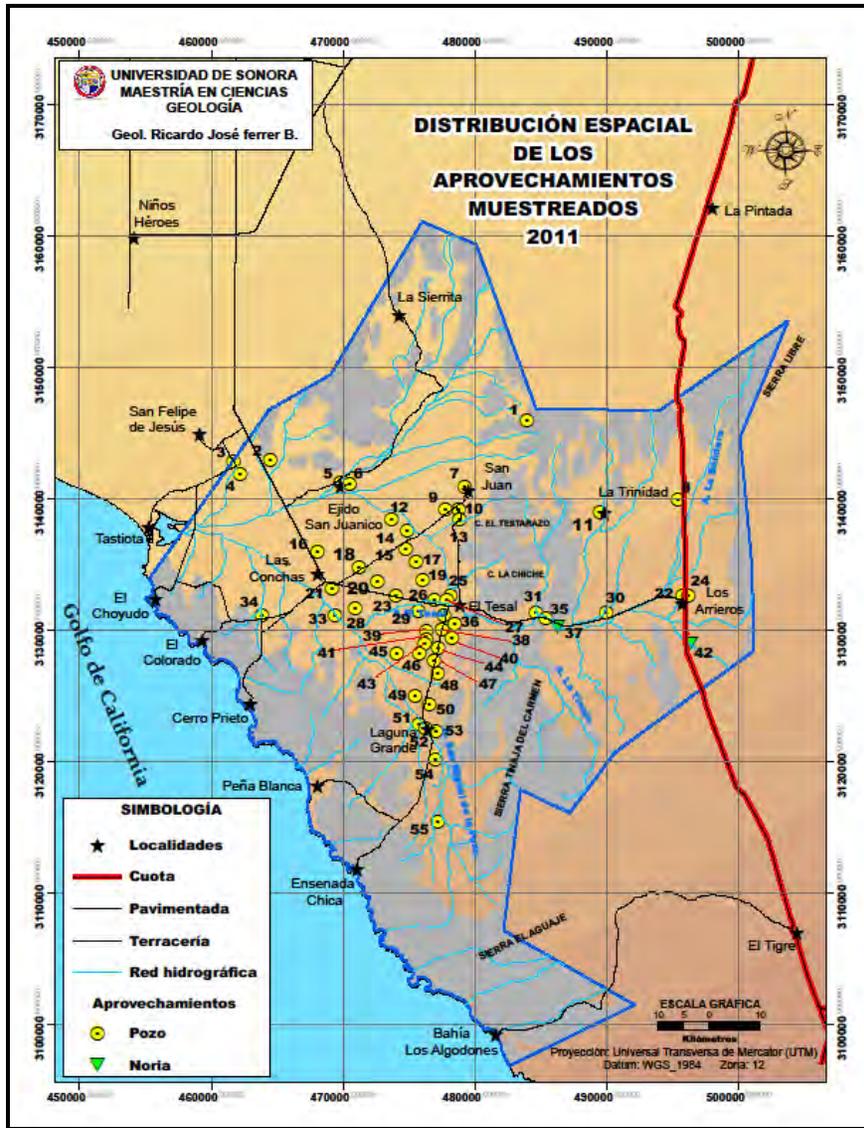


Figura I.8.- Localización de los aprovechamientos muestreados en 2011.

Estos aprovechamientos por uso se distribuyen de la siguiente forma: agrícola 35, pecuario 11, público-urbano cuatro, doméstico dos y sin uso alguno tres (Figura I.9).

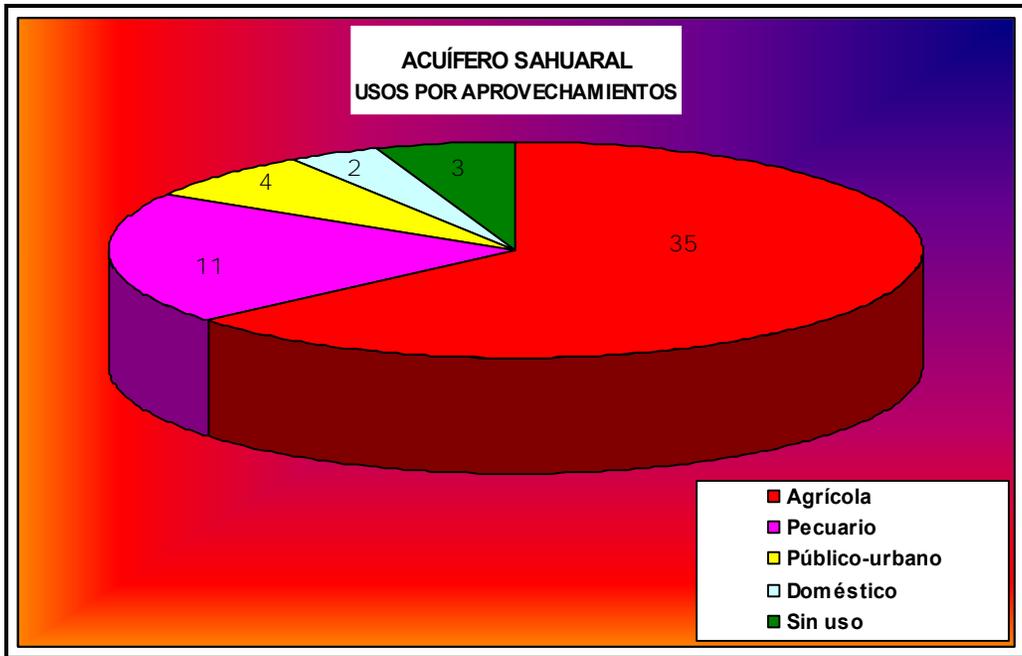


Figura I.9.- Usos por aprovechamientos para el año 2011.

CAPÍTULO II.- MATERIALES Y MÉTODOS

II.1.- Metodología de trabajo

Los métodos de trabajo utilizados para la realización de este proyecto de investigación, se basaron en la recopilación de información y de actividad de campo. Se toman como apoyo trabajos previos realizados por otras dependencias oficiales y no oficiales como son: Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Servicio Geológico Mexicano (SGM), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI); Universidad de Sonora (UNISON) y otras.

Entre estos métodos se pueden mencionar:

La recopilación e integración de la información se obtuvo tanto de documentos (informes, boletines, tesis, resúmenes, presentaciones, etc.) como de productos cartográficos; estos fueron de forma analógica y digital; de lo cual da lugar al conocimiento geológico e hidrológico actual del acuífero en estudio.

Posteriormente se analizó, se interpretó y se seleccionó, aquella información útil para el desarrollo de este trabajo; como por ejemplo: levantamientos geológicos y geomorfológicos, perfiles geofísicos, cortes de pozos, piezometría, muestreo de agua, etc.

II.2.- Estudios técnicos realizados con anterioridad

En la superficie que cubre el acuífero se ha llevado a cabo diversos estudios geohidrológicos de evaluación, pero desafortunadamente en esta hay ausencia de información específica sobre vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación. Entre los estudios más importantes podemos mencionar los siguientes:

Estudio Geohidrológico del Valle del Sahuaral, Sonora". Realizado para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos en diciembre de 1978. Entre lo más sobresaliente: es que el acuífero del Valle del Sahuaral se encuentra constituido por una interdigitación de arcillas, arenas y gravas; el volumen de extracción anual de los pozos existentes es superior a los 1,500 Hm³/año; los gastos de los pozos son superior a los 80 lps; el volumen de agua que almacena el acuífero es de 10,000 Hm³/año, dicho volumen se obtuvo considerando un área de 400 km² hasta una profundidad de 250 m, con una profundidad media al nivel estático para octubre de 1978 de 40 m y un coeficiente de almacenamiento de 0.12.

Informe final del "Estudio de la intrusión salina en la franja costera en el valle de Hermosillo y El Sahuaral, Sonora". Realizado por la Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, en Junio 1997. Este estudio se basa en los resultados de 51 sondeos eléctricos verticales con arreglo tipo Schlumberger, por medio de los cuales se identificó que el límite de la zona vadosa hacia la costa es una superficie ondulada, lo cual está relacionado con variaciones en la permeabilidad de las capas someras. Esta zona presenta resistividades iguales o mayores a los 100 Ω -m, la zona con resistividades menores a los 5 Ω -m corresponden a las regiones del acuífero

invasadas por el agua de mar y las zonas con resistencias hasta 25 Ω -m como la zona de mezcla de agua dulce del acuífero con agua salada del mar.

“Atlas de aguas subterráneas y red de monitoreo piezométrico del Estado de Sonora”, que fue realizado por la Universidad de Sonora, para la Comisión Nacional del Agua, en el 2005. El estudio consistió en establecer una red de monitoreo piezométrico para cada acuífero que se encuentra bajo la administración de la gerencia regional noroeste, que incluye la totalidad del estado de Sonora y parte del Estado de Chihuahua. A parte de planos temáticos (clima, precipitación, temperatura, geomorfología, vegetación, etc.), se incluyen planos de profundidad y elevación (mostrando las direcciones de flujo subterráneo) y las tablas que dieron origen a dichos planos. Constituye una buena obra de consulta general de los acuíferos.

Actualización geohidrológica de los acuíferos: Los Vidrios, Río Alisos, Arroyo Sahuaro, Sahuaral y Cuitaca en el Estado de Sonora. Elaborado por la empresa IDEAS, para la Comisión Nacional del Agua, en 2009. El estudio incluye actividades de campo como censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones; retoma apartados de estudios anteriores y los actualiza aplicando software, como es la estimación de parámetros hidráulicos, con lo cual fue posible plantear el balance de aguas subterráneas en los cinco acuíferos. Además de los planos temáticos, se incluyen los de configuración del nivel estático, así como las tablas de resultados obtenidos, el balance de aguas subterráneas y la estimación de la disponibilidad de aguas subterráneas para cada acuífero. También incluye un apartado de la química del agua subterránea, bastante amplio.

“Análisis de vulnerabilidad en zonas áridas y semiáridas con énfasis en las condiciones de Mátape, Sonora” (2001). En la cuenca del Río Mátape, Sonora, México, se adaptó el método estandarizado DRASTIC al sistema acuífero regional cuyas condiciones desérticas con baja precipitación de lluvia (250-500 mm/año) y escaso o nulo espesor de suelo lo hacen un medio sensible a la contaminación. Se muestra la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación por plaguicidas y a cargas contaminantes al subsuelo como los nitratos, provenientes de fuentes puntuales. A pesar de que se requiere un buen nivel de conocimiento del ambiente hidrogeológico, los resultados pueden ser cuestionables y los mapas de vulnerabilidad resultantes deben tomarse con precaución.

Hydrogeology and groundwater pollution of Yaqui Valley, Sonora, Mexico en 1994. El uso del sistema GOD fue empleado en la evaluación de la vulnerabilidad del acuífero del Valle del Yaqui, partiendo de datos de pozos perforados y de planos de niveles freáticos. Las descargas de contaminantes fueron identificadas y cuantificadas y el riesgo de contaminación fue calculado analizando la vulnerabilidad del acuífero y las descargas de contaminantes. Las zonas más vulnerable está en el Oeste y las principales fuentes contaminantes son de origen industrial, agrícola, ganadería y de centros de población. Las áreas de más alto riesgo de contaminación están en la Central, Oeste y Este.

Determinación de la vulnerabilidad a la intrusión marina de acuíferos costeros en el Pacífico Norte Mexicano; un caso, el acuífero Costa de Hermosillo, Sonora, México (Rangel-Medina, 2002). La caracterización de la zona de interface muestra que el espesor promedio de agua salobre y/o salina es de al menos 80 m en la zona intrusionada (2,900 y 40,800 m S/cm). Además de los métodos hidráulicos e hidrogeofísicos, con los que se obtuvo la geometría del basamento y propiedades del acuífero, se emplearon métodos hidrogeoquímicos con apoyo isotópico para

obtener la distribución espacial de la posición actual del agua salina y las zonas vulnerables por donde ha penetrado preferencialmente el agua de mar. Además se obtuvo la geoquímica del agua del acuífero aluvial y se identificó la existencia de paleoagua, entrampada en sedimentos detríticos marinos y rocas volcánicas. La edad del agua del acuífero varía en un intervalo de entre 2,751 a 4,630 años \pm 30 a 50 años. Mientras que la paleoagua tiene una edad de entre 26,800 y 30,000 años.

Los tres últimos estudios hablan sobre vulnerabilidad del acuífero, los dos primeros toman las fuentes (estas pueden ser puntual o dispersa) de contaminación en sentido vertical y el tercero en sentido horizontal (intrusión salina), este último únicamente se utiliza en acuíferos costeros.

La información de estos estudios constituye la base para la elaboración de este documento.

II.3.- Cartografía

Del INEGI:

Cartas topográficas a escala 1:50,000 y 1:250,000 en formato digital y analógico, las cuales se utilizan como base para los trabajos de campo y se enlistan a continuación:

- La Pimienta (H12-C69), Esc. 1:50,000.
- Tastiota (H12-C78), Esc. 1:50,000.
- Los Arrieros (H12-C79), Esc. 1:50,000.
- San Alfonso (H12-C79), Esc. 1:50,000.
- Sierra Libre (H12-11), Esc. 1:250,000.

- Carta Geológica: Sierra Libre (H12-11), Esc. 1:250,000.
- Carta de Aguas Subterráneas Sierra Libre (H12-11), esc. 1:250,000.
- Carta de Aguas Subterráneas (Zona Hidrogeológica Sahuaral), esc. 1:150,000.
- Carta de Aguas Subterráneas Serie I y II Tijuana y Hermosillo, Esc. 1:1,000,000.
- Carta de Climas Serie I Tijuana, Esc. 1:1,000,000.

Del Servicio Geológico Mexicano (SGM):

- Carta Geológico-Minera Sierra Libre (H12-11), Esc. 1:250,000.

En el muestreo de pozos y norias se midieron en el lugar potencial de hidrógeno, temperatura, sólidos totales disueltos y conductividad eléctrica. Las muestras se tomaron en envases de plástico, de capacidad de un litro, con tapadera de cierre hermético y posteriormente se envió a laboratorio para su análisis químico.

La información obtenida se sistematizó y procesó por medio de sistemas computacionales (Excel, Word, ArcView, ArcGis) para observar los patrones de comportamiento del agua subterránea y para la obtención del índice de vulnerabilidad.

CAPÍTULO III.- GEOLOGÍA

III.1.- Geomorfología

De acuerdo a la carta de unidades Geomorfológicas de México (Lugo, 1990), el acuífero Sahuaral presenta diversas formas morfológicas, donde predominan los lomeríos; planicies de tipo aluvial y costera; piedemonte; y por último las laderas montañosas. En general, los lomeríos están constituidos por rocas volcánicas ácidas a intermedias, rocas plutónicas y conglomerados con edades que varían desde el Cretácico superior, Terciario y Cuaternario. Las planicies se caracterizan por la presencia de gravas, arenas, limos y arcillas del Cuaternario. Los piedemonte poseen rocas volcánicas ácidas a intermedias y rocas plutónicas, del Cretácico superior, Terciario y Cuaternario. Las laderas montañosas están constituidas por rocas volcánicas intermedias y ácidas del Terciario.

III.2.- Fisiografía

En el estado de Sonora se distinguen cuatro provincias fisiográficas según cartografía de INEGI (1981) estas son: Llanura Sonorense, Sierra Madre Occidental, Llanura Costera del Pacífico y Sierras y Llanuras del Norte (Figura III.1).

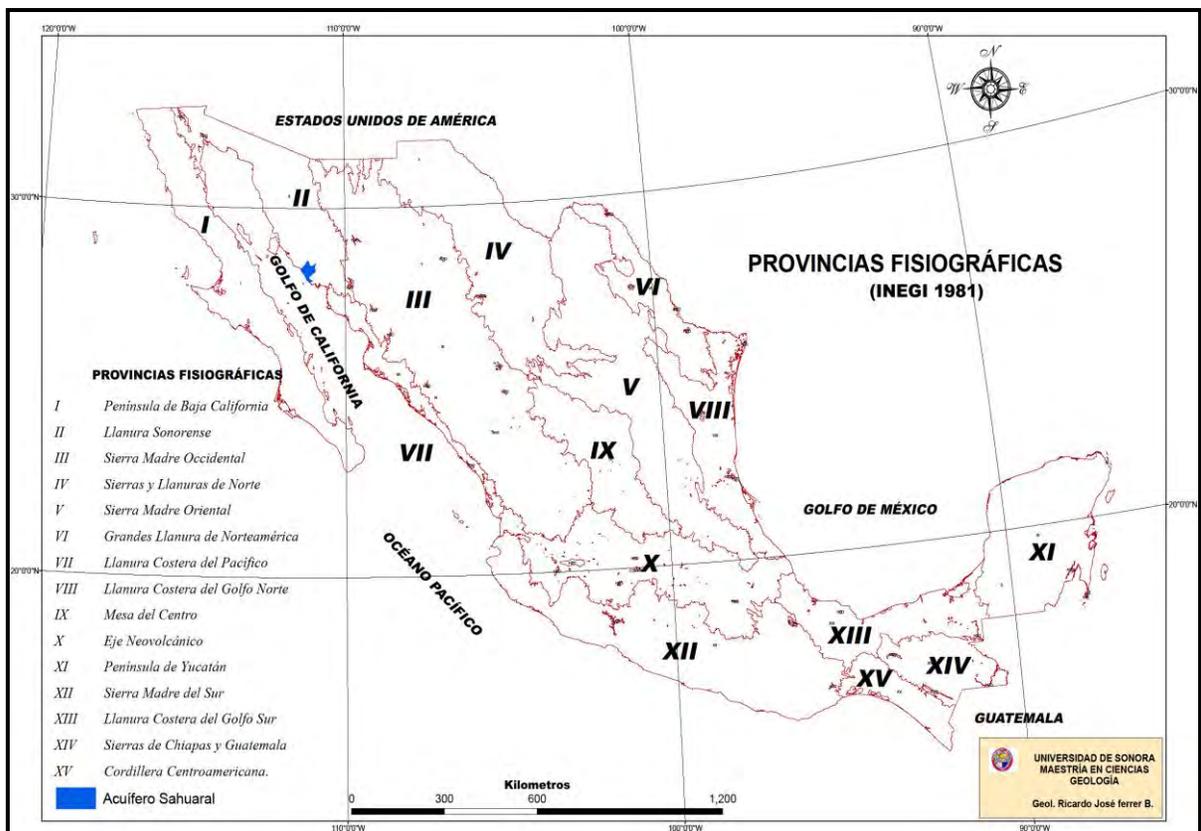


Figura III.1.- Provincias fisiográficas, INEGI 1981.

El área de estudio se ubica en la provincia fisiográfica de la Llanura Sonorense (II). La provincia se extiende hacia el norte en territorio de Estados Unidos, donde abarca la cuenca del río Gila, afluente más austral del río Colorado, en el estado de Arizona. Dentro del territorio de México adopta forma de cuña orientada hacia el sur, colindando con las provincias: en el extremo noroeste con la Península de Baja California (I), en el oriente con la Sierra Madre Occidental (III) y en su extremo sur con la Llanura costera del Pacífico (VII).

III.2.1.- Provincia fisiográfica de la Llanura Sonorense II

La provincia Llanura Sonorense se divide en dos subprovincias y una discontinuidad: hacia el norte se encuentra la discontinuidad fisiográfica Sierra del Pinacate (07) y la subprovincia Desierto de Altar (06); el resto del área que es la de mayor extensión recibe el nombre de subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses (08); en ésta última subprovincia es donde se encuentra el acuífero Sahuaral (Figura III.2).

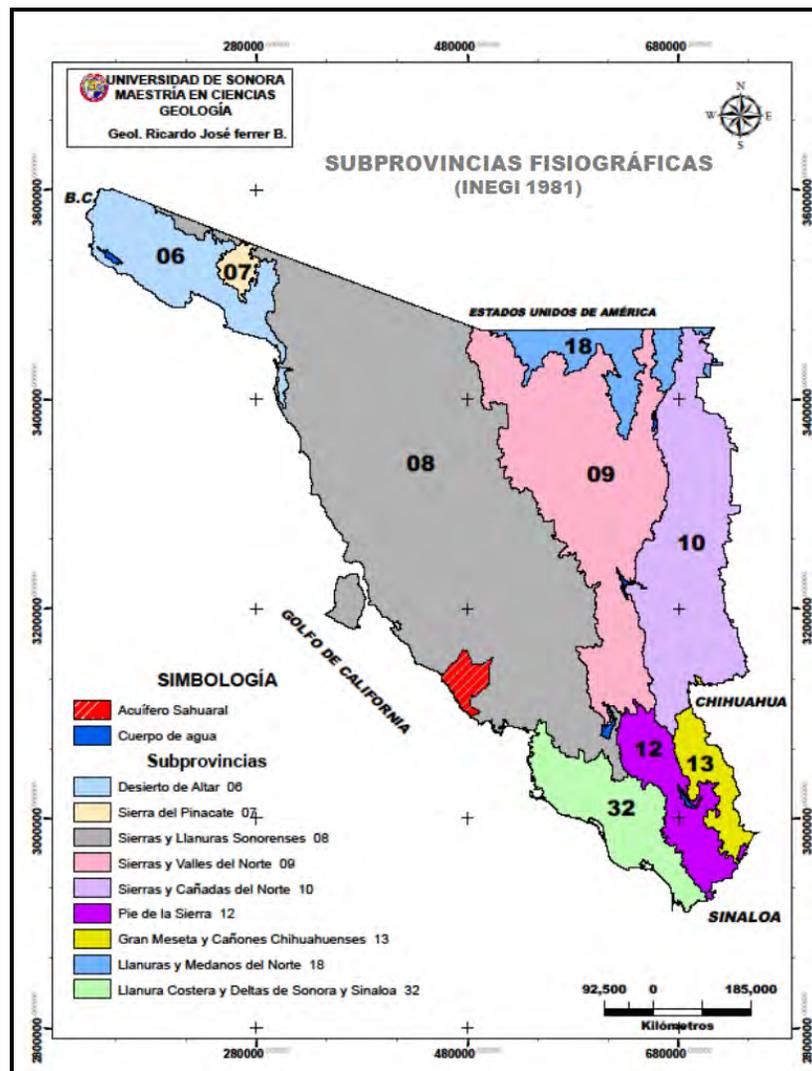


Figura III.2.- Subprovincias y discontinuidad a nivel regional, INEGI 1981.

III.2.2.- Subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses 08

La subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses consta en gran parte de sierras bajas paralelas de bloques fallados orientados NNW-SSE, separadas unas de otras por llanuras. Estas son más elevadas (700 a 1,400 msnm) y más estrechas (rara vez más de 6 km de ancho) en el oriente y más bajas (de 700 msnm para abajo) y más amplias (13 a 24 km) en el occidente.

En casi todos los casos las sierras son más angostas que estas llanuras, que están cubiertas en la mayor parte o toda su extensión de amplios abanicos aluviales (bajadas) y son de pendientes suaves. En algunos casos la roca basal aún aflora en la parte central.

Estas llanuras, más la aluvial de Hermosillo representan juntas alrededor de un 80% del área de la subprovincia. En ellas predominan rocas ígneas intrusivas ácidas, aunque también son importantes, particularmente en la parte central de la subprovincia, rocas lávicas, rocas metamórficas, calizas antiguas y conglomerados del Terciario. La isla Tiburón forma parte de este sistema de sierras cuyas cimas son bajas y muy uniformes. Las pendientes son bastante abruptas, siendo frecuentes, especialmente en las rocas intrusivas, lávicas y metamórficas las mayores a los 45°. Las menores a 20° son raras. En general, las cimas son almenadas. Los arroyos efectúan una fuerte erosión que ha producido espolones laterales que proyectan en las llanuras.

El río más grande de la subprovincia es el Sonora que nace en Cananea en la provincia de la sierra Madre Occidental, donde fluye hacia el sur. A la altura de Hermosillo se une el Sonora con el San Miguel de Horcasitas, también procedente de esa provincia y con el Zanjón, igualmente procedente del norte pero con nacimiento dentro de la subprovincia. De Hermosillo al golfo el sistema de canales del Distrito de Riego No. 51 ha borrado el cauce del Sonora que también produjo una llanura deltaica en su desembocadura al Sur de la bahía de Kino. La llanura aluvial de Hermosillo (200 msnm) baja hacia la costa ensanchándose en sentido NE-SW. Tiene unos 125 km. de largo y unos 60 de anchura máxima en la costa.

En el área de estudio se pueden apreciar siete topografía (Figura III.3):

a).- Bajada con lomeríos, es la topografía de mayor superficie con un 45.29%, ubicándose en la zona poniente y norte, así como en las porciones centro-sur y centro-poniente del acuífero.

b).- Sierra escarpada compleja, cuenta con una superficie de 25.66%, se localiza al poniente de sierra Libre, sobre la línea de costa, en los cerros El Testarazo y La Chiche y al norte del acuífero.

c).- Llanura aluvial salina, esta tercera topografía representa el 10.84% del área total; y se ubica en la parte central ligeramente cargada al oeste.

d).- Meseta basáltica asociada a sierras con un porcentaje de 6.75, se encuentra al sureste de la zona, en la sierra Tinaja del Carmen.

e).- Lomerío complejo con una representatividad de 3.48%, situándose al oriente de la sierra Tinaja del Carmen.

f).- Llanura deltaica salina con el 6.58% de superficie, se encuentra colindando con el estero de Tastiota.

g).- Llanura aluvial, es la topoforma de menor tamaño en el acuífero y cuenta con el 1.39% de representatividad, situándose al norte del la topoforma anterior.

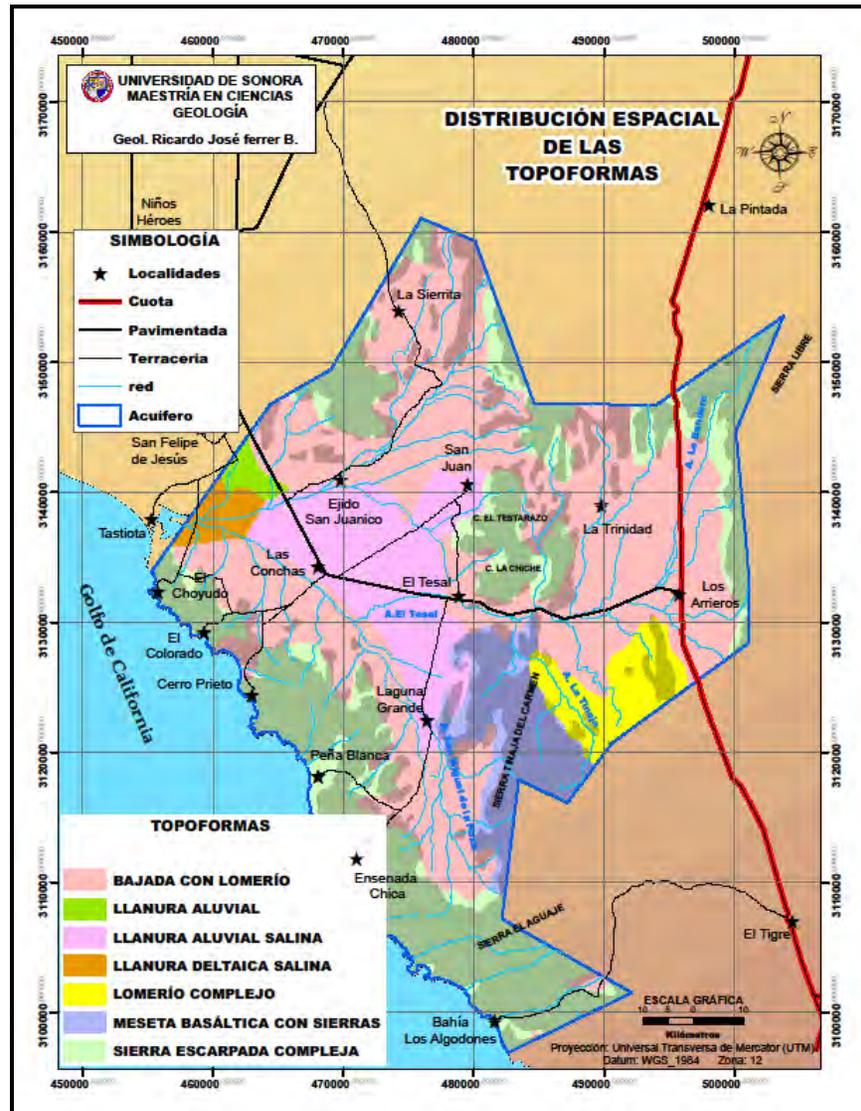


Figura III.3.- Topoformas, INEGI 1981.

III.3.- Geología

III.3.1.- Estratigrafía y litología

Existen levantamientos cartográficos elaborados por varios autores, cada uno de los cuales presenta atributos favorables, por lo que se consideró conveniente incluir varias de estas cartografías, ya que entre ellas se complementan y dan mayor conocimiento geológico de la región.

Del Servicio Geológico Mexicano (SGM) se tomo las formaciones geológicas, litología, edad, fallas, fracturas y la sección geológica; de la cartografía geológica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) los contactos entre las diferentes litologías, ya que en esta mejor definidos, a demás complementa a la descripción litológica y a las estructuras geológicas.

El registro estratigráfico del acuífero abarca desde el Paleozoico al Cuaternario (Figura III.4); a continuación se describen las diez unidades en un orden cronoestratigráfico de la más antigua a la más reciente.

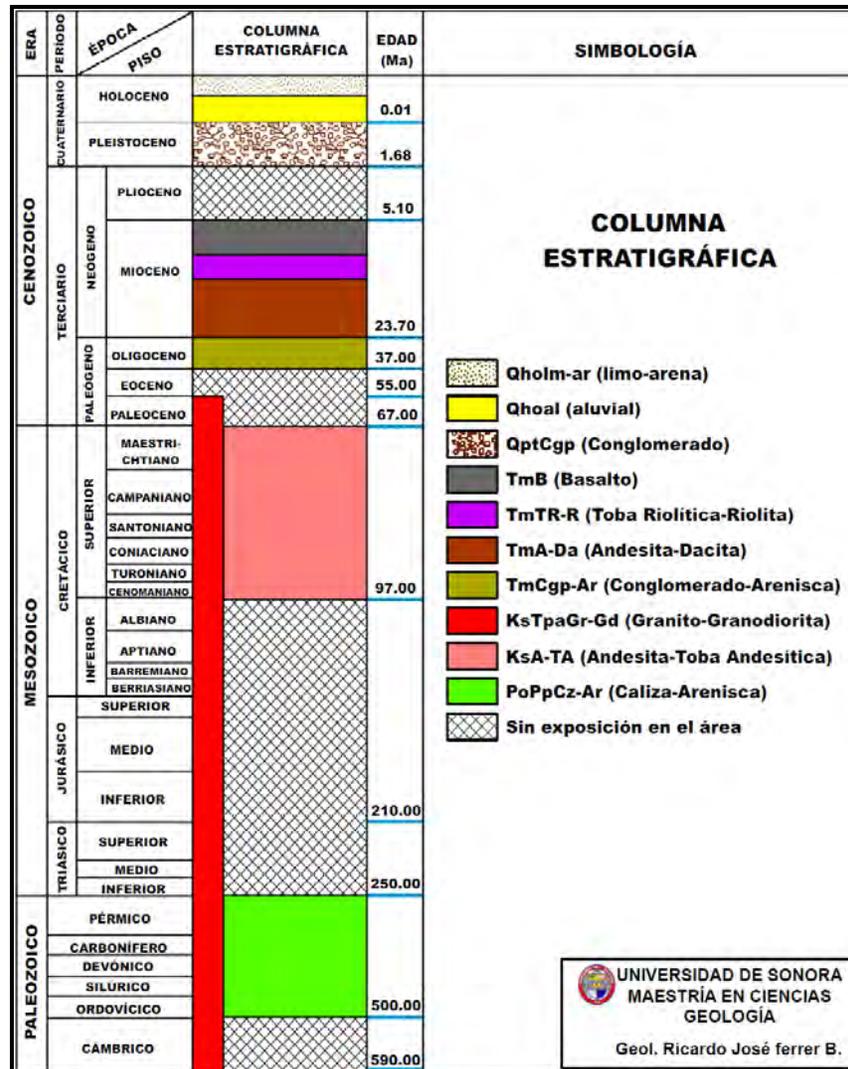


Figura III.4.- Columna estratigráfica del acuífero Sahuaral.

Paleozoico

El Paleozoico corresponde a la unidad más antigua de la región. Se caracteriza por rocas sedimentarias (PoPpCz-Ar) principalmente carbonatadas (calizas-areniscas) con edades que van del Devónico al Pérmico, pero afloran fuera de los límites de la zona hidrogeológica.

Mesozoico

Las unidades de rocas mesozoicas que afloran dentro del área de estudio, corresponden a la parte final del Mesozoico y principios del Cenozoico.

El Cretácico Superior-Paleoceno se presenta al noreste del cerro El Testero y en el cerro La Morada (Figura III.5), en donde afloran secuencias vulcanosedimentarias de andesitas y tobas andesíticas (KsA-TA). Estas unidades se diferencian fácilmente de las unidades circundantes más recientes por sus afloramientos poco abruptas. También se tienen afloramientos de cuerpos intrusivos del Cretácico Superior-Paleoceno, al sur del estero Tastiota y al norte del cerro La Chiche (Figura III.5), estos son de composición granítica-granodiorítica (KiTpaGr-Gd); en general son cubiertas por unidades volcánicas y volcanoclásticas más recientes; sin embargo, al noreste del cerro El Testero están sobre las unidades volcánicas andesíticas del Cretácico Superior.

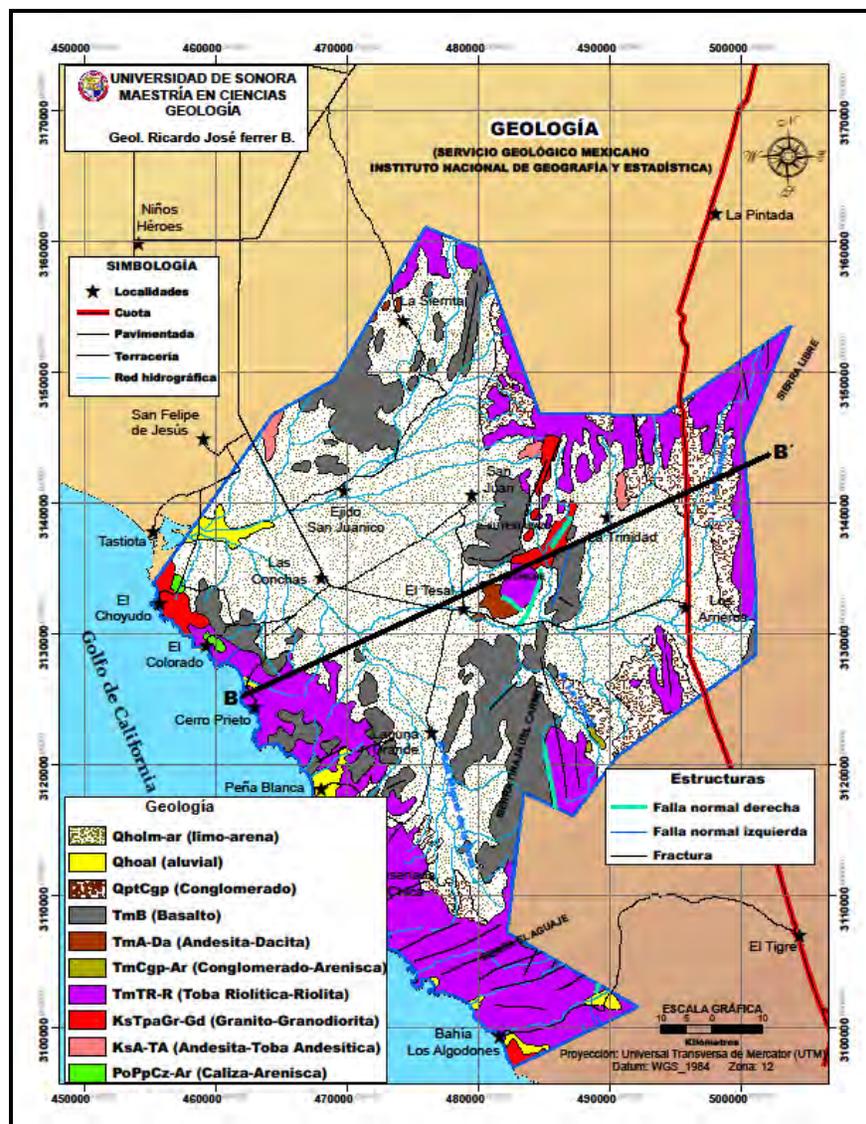


Figura III.5.- Geología.

Cenozoico

Las unidades volcánicas emplazadas durante el Mioceno representan las unidades de mayor distribución espacial (Figura III.5) y construyen el contexto geológico regional (Mora-Álvarez, 1992). Diversos autores que han trabajado estas zonas (Till et al., 2007; Mora-Álvarez, 1992; Mora-Álvarez y McDowell, 2000), han definido que las secuencias volcánicas de composición dacítica-riolítica del Mioceno (TmA-Da y TmTR-R), son una expresión de un cambio de régimen tectónico compresivo (subducción) a un régimen extensivo (Basin and Range), sin embargo, es un volcanismo con características químicas y mineralógicas que muestran que aún existía influencia de los procesos de subducción.

La unidad basáltica del Mioceno (TmB) es de amplia ocurrencia dentro del acuífero (Figura III.5) y se distingue muy fácilmente por que desarrolla elementos geomorfológicos típicos de mesetas y su coloración es en tonos oscuros. Estos basaltos y brechas basálticas, son posteriores a las unidades volcánicas dacíticas-riolíticas, a las cuales cubren en discordancia.

La unidad conglomerado polimíctico y arenisca del Mioceno (TmCg-Ar) por lo general está asociada a los procesos tectónicos de extensión que afectan a los afloramientos rocosos pre-Mioceno, los cuales son erosionados según la tasa de subsidencia estructural regional. La unidad es correlacionada crono estratigráficamente con la Formación Báucarit (Figura III.5).

Cuaternario

Las unidades cuaternarias son de diversos tipos según el ambiente genético sedimentario en el que fueron depositadas.

La unidad de conglomerado polimíctico del Pleistoceno (QptCgp), se desarrolla en los piedemonte de manera regular (Figura III.5), se componen de conglomerados–brecha granulométricamente mal clasificada y compuestos en su mayoría por clastos angulosos cuya composición varía según la zona de la cual derivan.

Depósitos no consolidados (suelos)

Las unidades de suelos representan a la edad del Holoceno.

La unidad aluvial (Qhoal), representa al material aluvial típico que puede encontrarse como sedimentos de arroyos, que solamente representa sedimento en proceso de transporte fluvial (Figura III.5).

La unidad de limo-arena (Qholm-ar), ocurre principalmente en las llanuras intermontanas y en las planicies costeras, su distribución es muy amplia (Figura III.5), su ambiente de depósito no es muy claro ya que pueden corresponder con depósitos aluviales–fluviales o con unidades formadas en su totalidad por procesos aluviales, siendo en este último caso, solo una remoción de material sedimentario por cualquier agente erosivo y de transporte.

III.3.2.- Geología estructural

Los diferentes eventos geológicos-estructurales que han ocurrido a través del tiempo en el estado, se ven reflejados en la zona hidrogeológica, en general los afloramientos son alargados y con orientaciones NNW-SSE y otros con orientación casi N-S (Figura III.5), separados por planicies aluviales y eólicas.

Esta distribución está controlada por estructuras con una misma distribución general NNW-SSE con buzamientos al NE y al SW que en algunas ocasiones muestran lineamientos secundarios representados por fallas y fracturas orientadas NNE-SSW. Esto es, que las sierras están delimitadas por estructuras limítrofes que le otorgan su orientación general, lo que ayuda concebir la presencia de altos y bajos estructurales (horst y graben), como por ejemplo como se presenta en la sierra Tinaja del Carmen. La situación estructural en el área que abarca la zona hidrogeológica, ocurren estructuras con una orientación N-S y buzamientos al W, evidencia de la zona de influencia estructural de la Provincia Extensional del Golfo.

La presencia de abundantes rocas volcánicas, habla de una corteza fuertemente tectonizada, considerando que para el ascenso de estos líquidos es necesario un medio propicio y con presencia de estructuras (fallas) profundas (Figura III.6). Incluso es claramente observable que algunas unidades volcánicas, el cual tienen un modo de emplazamiento controlado por estructuras, como es el caso del cerro El Testero. Estas relaciones cortantes mediante estructuras limítrofes primarias pueden ser observadas en la distribución de los intrusivos de composición granítica-granodiorítica del Cretácico Superior-Paleógeno, ya que se muestran seccionados bajo las mismas condicionantes que las secuencias sedimentarias y vulcanosedimentarias.

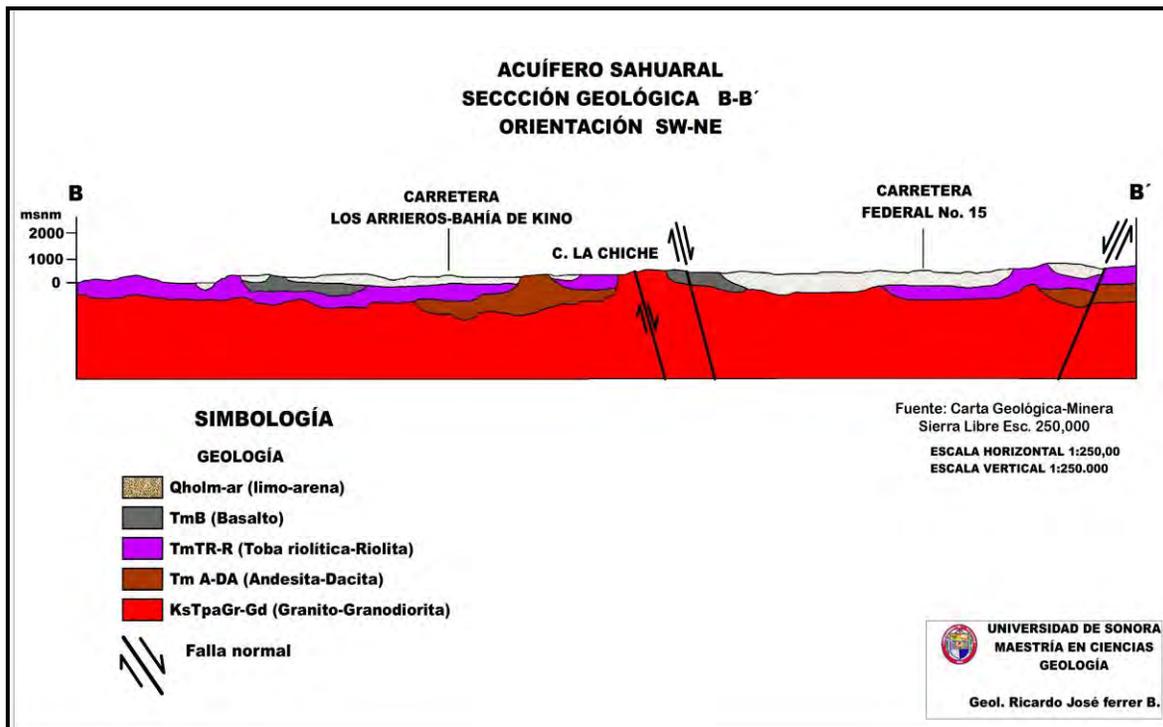


Figura III.6.- Parte de la sección geológica B-B' tomada de la cartografía del SGM (2000).

III.4.- Geología del subsuelo

Para el desarrollo del presente apartado se utilizó información de pozos con sus respectivos cortes hidroestratigráficos, y estudios geofísicos realizados en la región (GEOCALLI S.A. Consultores, 1978).

Es muy importante reconocer la geología del subsuelo ya que en ella se localiza el acuífero, para ello también la sección geológica (Figura III.6) proporciona información, esta cruza de SW-NE casi por el centro al área de estudio. En esta se observa las rocas que conforman el basamento, así como las estructuras y las unidades geológicas.

Los aprovechamientos básicamente se localizan en los depósitos cuaternarios que se encuentran en la parte superior de la sección geológica. Las profundidades de los pozos se distribuyen: alrededor del 70% tienen una profundidad menor a los 200 m, entre un 26 y 27% la profundidad está entre 200 a 300 m, y el resto varía dentro de los 300 m. Hay que hacer mención que algunos de los pozos presentan descripciones muy pobres, lo que dificulta diferenciar diferentes facies sedimentarias que pudiesen pertenecer a diferentes ambientes de depósito.

Lo anterior se ve reforzado con estudios geofísicos efectuados en el acuífero, aunque estos deben de ir acompañados de una excelente descripción geológica de los cortes de pozos, de no ser así la interpretación de los estudios geofísicos podría ser deficiente. Aun así se determinaron cuatro unidades, que más adelante se describen.

III.4.1- Secciones geohidrológicas

Las secciones geohidrológicas ilustran la conformación de los mantos acuíferos, así como el tipo de éste, espesor, sucesión de las formaciones subyacentes y por lo tanto las profundidades y espesores de estas capas.

Las secciones provienen de los estudios efectuados por GEOCALLI S. A. Consultores (1978) y de INEGI (2013), estas secciones se localizan básicamente sobre la porción occidental del acuífero (Figura III.7).

Las secciones se elaboraron en base a 44 cortes geológicos de pozos (Anexo I); la profundidad máxima sobre la que se obtuvo información sobre el subsuelo es de 240 m, en los pozos S-28 y S-51; en los pozos restantes, el promedio de profundidad es de 130 m y una mínima de 54 m (S-4), la mayoría de estos aprovechamientos se utilizaron en la construcción de las secciones A y B. Además se contó con el apoyo de 40 sondeos geoelectrónicos efectuados en el área.

En general el acuífero en explotación puede funcionar bajo ciertas características de semiconfinamiento, causadas por la gran alternancia de sedimentos finos con clásticos gruesos, originados y depositados como consecuencia de un medio ambiente muy inestable existente durante el Plioceno-Pleistoceno, así como la presencia de intercalaciones de sedimentos como derrames volcánicos.

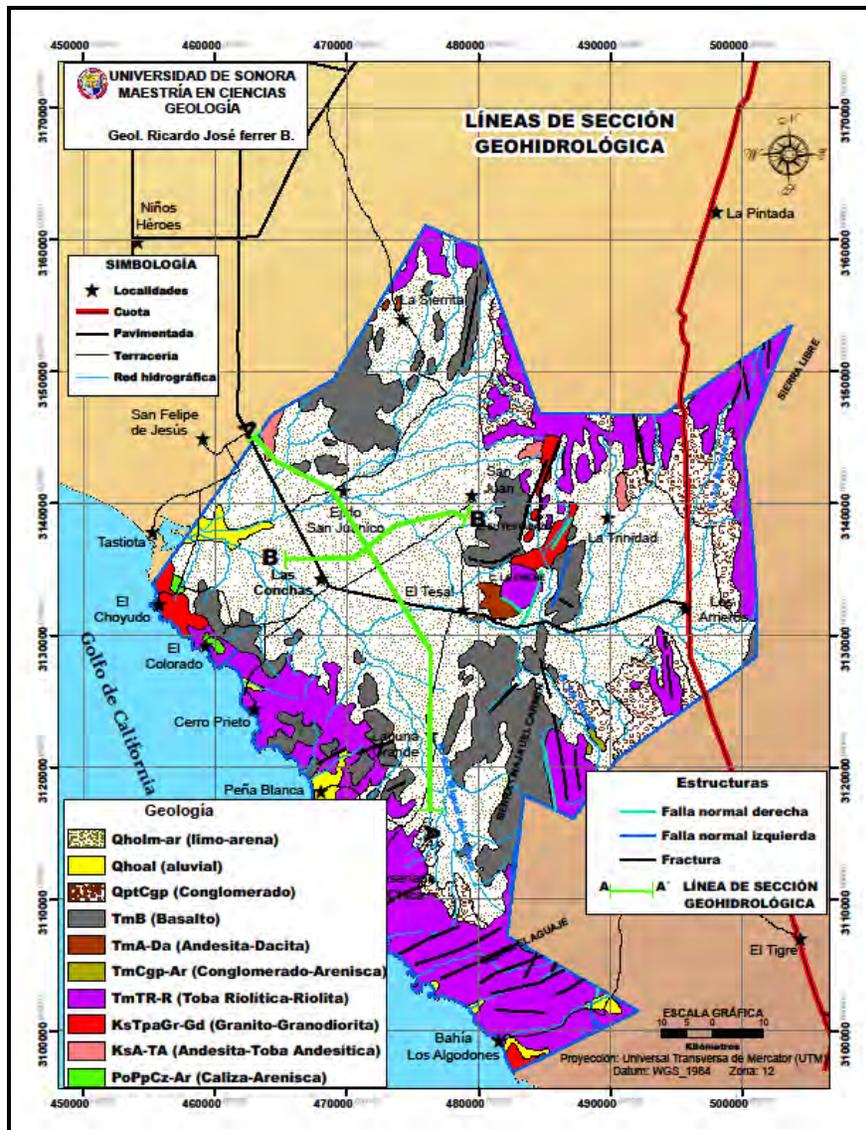


Figura III.7.- Localización de las secciones geohidrológicas A-A' y B-B'.

III.4.1.1.- Sección geohidrológica A-A'

Sección geohidrológica A-A' (Figura III.8).- Corta al acuífero longitudinalmente en la zona de mayor explotación y tiene una orientación NW-SE. Bajo la traza de esta sección en su porción noroccidental existe una capa con un espesor promedio de unos 90 m, formada por boleos, gravas y arenas con arcilla, aún así este paquete es de buena permeabilidad; bajo este cuerpo de sedimentos, los pozos S-42 y S-58 cortaron en todo su espesor un estrato de arcilla azul con gravas y fósiles marinos, ésta unidad posee una permeabilidad baja. El mayor espesor de este estrato es de 60 m, se manifiesta en el noroeste en dirección hacia la Costa de Hermosillo de donde provino la entrada del mar en el Mioceno; el cuerpo arcilloso se acuña en el pozo S-58 con un espesor de 30 m, en el pozo S-61 ya no se cortó este estrato, pudiéndose fijar a esta altura del valle el límite del mar Mioceno. Por otra parte, los sondeos geoelectrónicos ratifican la existencia de la arcilla azul. Bajo esta capa arcillosa se detectó la existencia de gravas con arcillas en el pozo S-42,

a demás con el apoyo de la geofísica llevada a cabo indican a esta profundidad de 150 m, la existencia de formaciones granulares (posiblemente sea el conglomerado Baúcarit), ésta unidad tienen una permeabilidad media.

La porción sureste de la sección, la formación del subsuelo es más compleja y no se puede delimitar con claridad los contactos entre gravas, boleos y arcillas que subyacen a la arcilla azul. Existen para esta misma porción coladas de basaltos del Paleoceno entre los materiales granulares, a estos derrames se le cataloga con una permeabilidad baja.

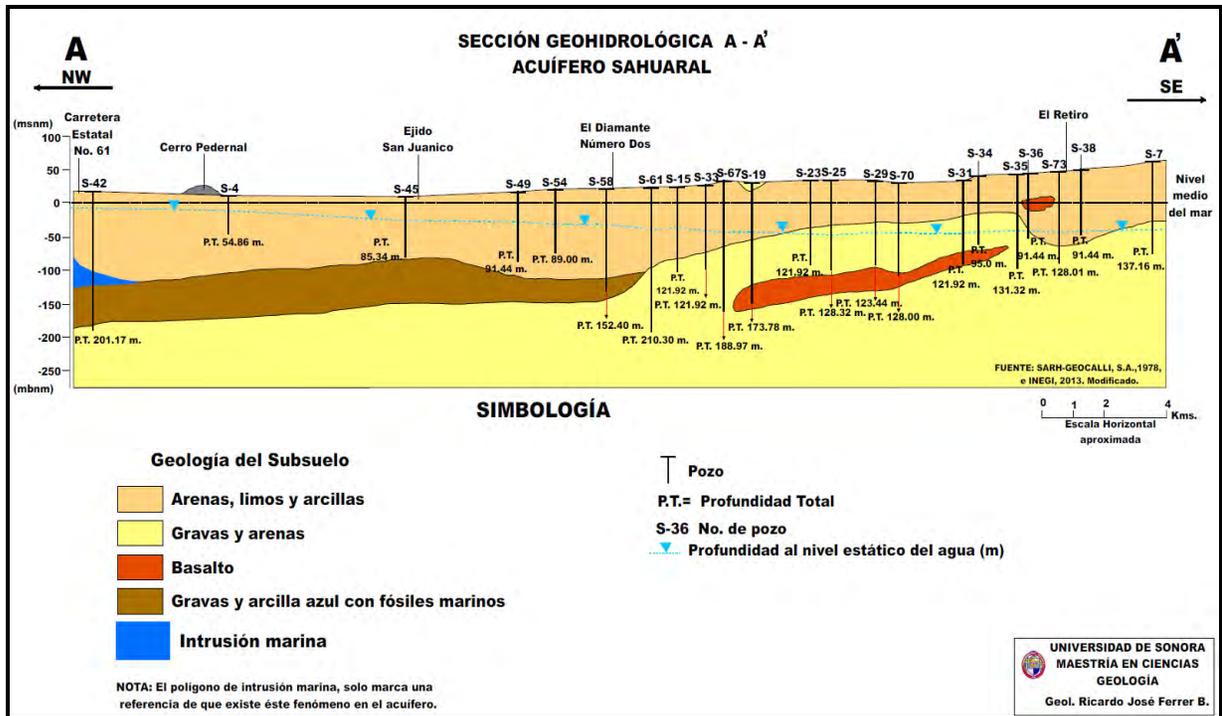


Figura III.8.- Sección geohidrológica A-A'.

III.4.1.2.- Sección geohidrológica B-B'

Sección geohidrológica B-B' (Figura III.9).- Corta a la zona de explotación de oriente a poniente y de igual forma a la sección A-A'. La distribución de los diferentes materiales que constituyen a esta sección es muy semejante a la que se tiene en la mitad noroccidental de la sección A-A'.

La capa de arcilla azul de permeabilidad baja, separa a boleos, gravas y arenas intercaladas con arcilla, de una unidad más antigua formada por gravas empacadas en arcilla. La lente de arcilla azul muestra un espesor máximo de 60 m en la vecindad de la actual línea de costa y un mínimo de 20 m en la porción oriental del valle, donde la transgresión marina del Mioceno tuvo como límite las sierras formadas por las rocas andesíticas del Cretácico.

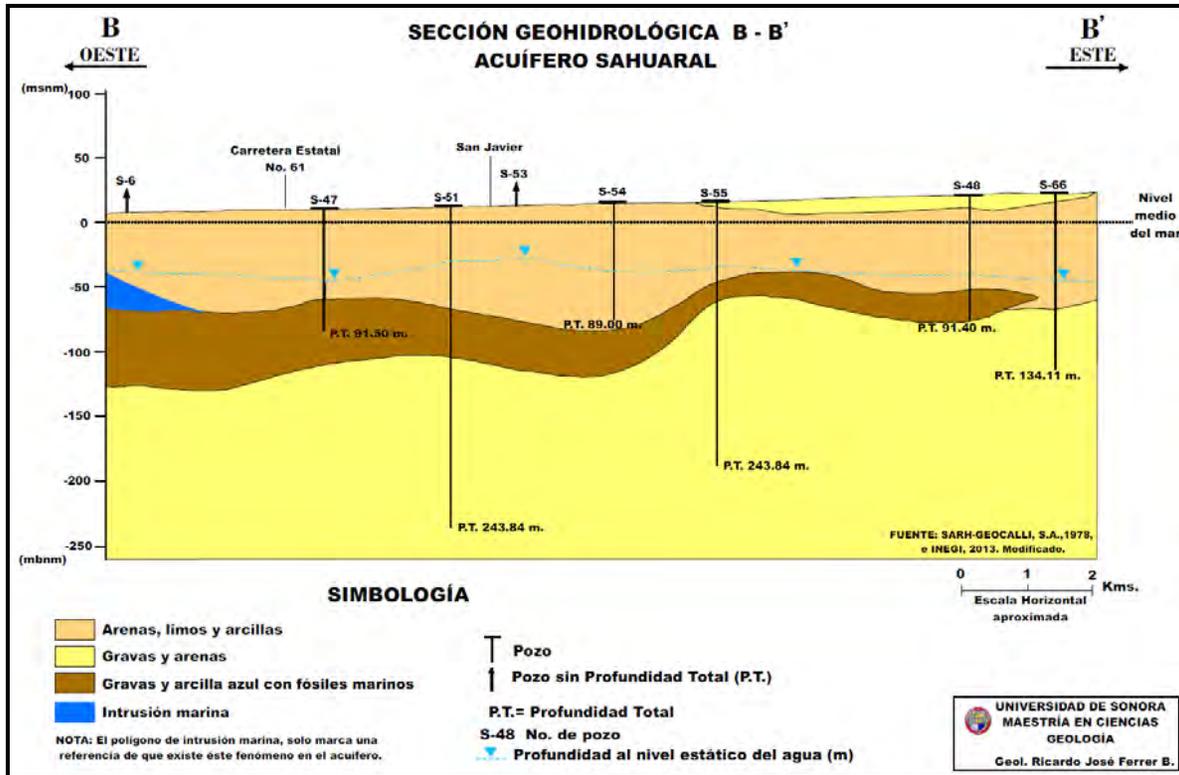


Figura III.9- Sección geohidrológica B-B´.

En conclusión es posible definir que el acuífero es de tipo libre, con presencia de condiciones locales de semiconfinamiento. Constituido el acuífero en su parte superior por una secuencia de depósitos aluviales de alta permeabilidad que corresponden a limos y arenas no consolidadas y semiconsolidadas, que contienen horizontes de agua salada-salobre y agua dulce. Su explotación se localiza principalmente en la región centro-oeste, donde presenta mayor espesor. Debajo de esta secuencia el acuífero está conformado por una secuencia de rocas volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

El Estudio Hidrológico (INEGI, 1993) apunta que el acuífero en explotación se considera de tipo libre; constituido por depósitos aluviales recientes cuya granulometría varía de grava y arena a limo y arcilla. A demás menciona que para este acuífero no existe la presencia del manto arcilloso de origen marino.

III.4.2.- Unidades hidrogeológicas

Como complemento de lo anterior, se tomo del estudio de CONAGUA (2009) la descripción de las unidades hidrogeológicas. Este a su vez retoma la información de los sondeos eléctricos verticales (SEV's) de GEOCALLI S. A. Consultores (1978) y la correlaciona con información geohidrológica; como resultado obtuvo cinco secciones hidroestratigráficas; ya con la información recopilada de: unidades geohidrológicas, resultados de sondeos electromagnéticos y de pruebas de bombeo; se determinaron cuatro unidades hidrogeológicas en el acuífero.

Las características que presenta cada unidad son descritas a continuación y se tomó como ejemplo la sección hidroestratigráfica No. 3, que se localiza en la porción central del área de estudio (Figura III.10).

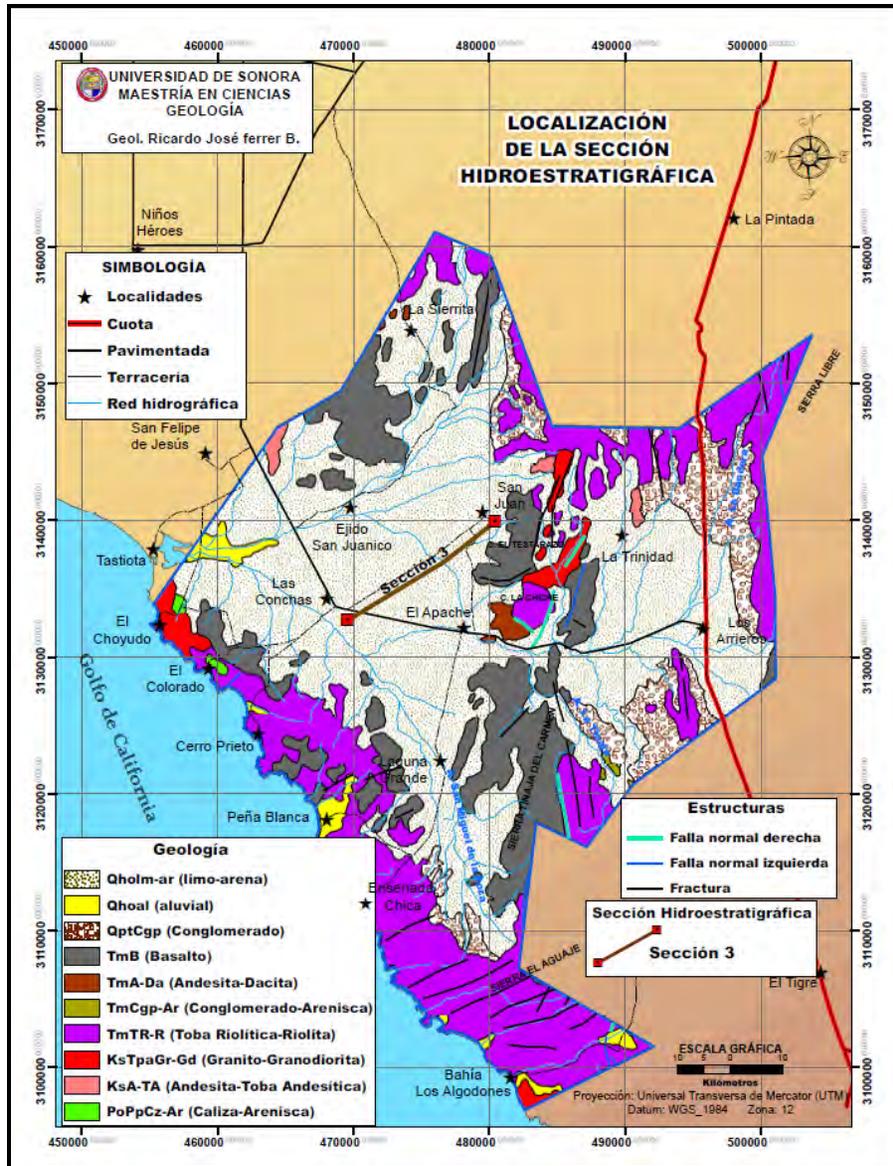


Figura III.10.- Localización del perfil y sondeo eléctrico de resistividad.

- Unidad I: Material granular, no saturado**
 Se encuentra distribuida en el cauce de los arroyos y en todo el valle del acuífero. Esta constituida mayormente por limos y arenas (Qholm-ar) y en menor cantidad se tienen depósitos aluviales (Qhoal), ambos del Cuaternario-Holoceno. Esta unidad presenta un espesor menor de 80 metros, y varía de una parte a otra Figura III.11. Su límite con la siguiente unidad es el nivel freático, el cual se determinó de acuerdo a la piezometría y a la interpretación hidrogeofísica.

- Unidad II: Material granular semiconsolidado, saturado de agua salobre-salada**
 Esta unidad es la continuación de la Unidad I (Figura III.11), solo que esta se encuentra saturada de agua salobre y salada, debido al avance de la intrusión marina en gran parte del acuífero. Presenta un espesor de 40 hasta 260 metros, se encuentra distribuida desde la línea de costa hasta la parte central del acuífero.
- Unidad III: Material granular semiconsolidado, saturado de agua dulce**
 Corresponde al mismo material descrito en las unidades anteriores, a diferencia de la Unidad II, esta se encuentra saturada de agua dulce. Se distribuye solo en la parte norte y este del acuífero, corresponde a la zona de recarga del acuífero, ya que no ha sido afectada por la intrusión marina, con espesores menores a los 200 metros (Figura III.11).
- Unidad IV: Roca volcánica fracturada**
 Se constituye por rocas volcánicas fracturadas, que conforman la zona montañosa que rodea a todo el valle. La integran derrames volcánicos andesíticos y tobas andesíticas interestratificadas con algunos sedimentos (KsA-TA). También, se tienen flujos de andesitas-dacitas, traquitas, tobas riolíticas y riolitas, algunos de ellos coronados por basaltos (TmTR-R y TmB), generalmente estas rocas se presentan hacia la porción sur del acuífero. Presenta un espesor que varía de 100 a 400 metros (Figura III.11).

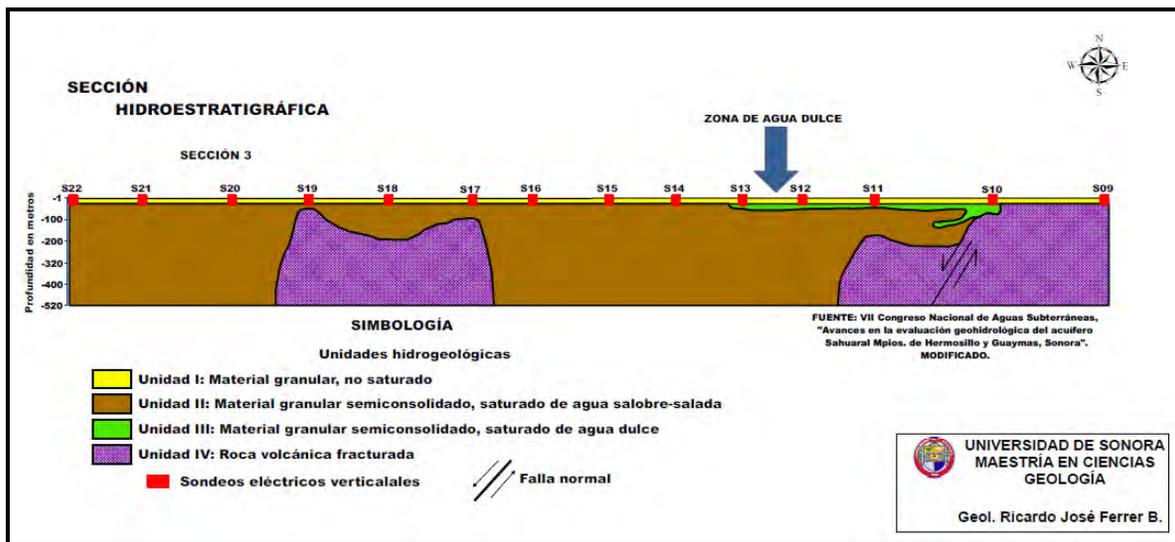


Figura III.11.- Sección hidroestratigráfica (sección No.3).

III.4.3.- Gravimetría

El modelo gravimétrico del área de estudio se generó con 208 estaciones gravimétricas (puntos gravimétricos), tomados del Sistema del Mapa Digital de México, publicadas en la página internet de INEGI. Se encuentran distribuidas en forma de malla y espaciadas homogéneamente (Figura III.12). Estos puntos se reprocesaron y se ajustaron a los datos de la base gravimétrica con gravedad absoluta, georreferenciada al Datum IGNS71 (Red internacional para la estandarización de la gravedad), además de estar ligadas al punto de control ubicado en el Aeropuerto Internacional de Hermosillo.

El mapa residual de anomalías gravimétricas tiene un rango de variación entre -64 a 8 mgal. Las zonas de mayor anomalía negativa de color azul se asocian a un defecto de masa que se puede relacionar a una cuenca, localizándose en la parte central y oriente del área, mientras que las zonas de anomalías positivas de color rojo sugieren un exceso de masa que se puede asociar a un levantamiento, presencia en la superficie o afloramientos, manifestándose en la costa, oriente y de menor intensidad en el centro del área de estudio (Figura III.12).

En resumen el mapa presenta regionalmente un contexto de cuencas y sierras, por lo que las zonas de anomalías de anomalías negativas (color azul) pueden asociarse a la acumulación de sedimentos. Existe una zona de transición entre las anomalías negativas y las positivas con tonalidad amarilla que indican posiblemente una pendiente mayor hacia el basamento, lo cual implica un adelgazamiento de la columna sedimentaria o espesor de cuenca. Finalmente, en la zona de anomalías positivas existe una diferencia de valores que pueden sugerir un cambio en el carácter de los sedimentos o un cambio estructural (Figura III.12).

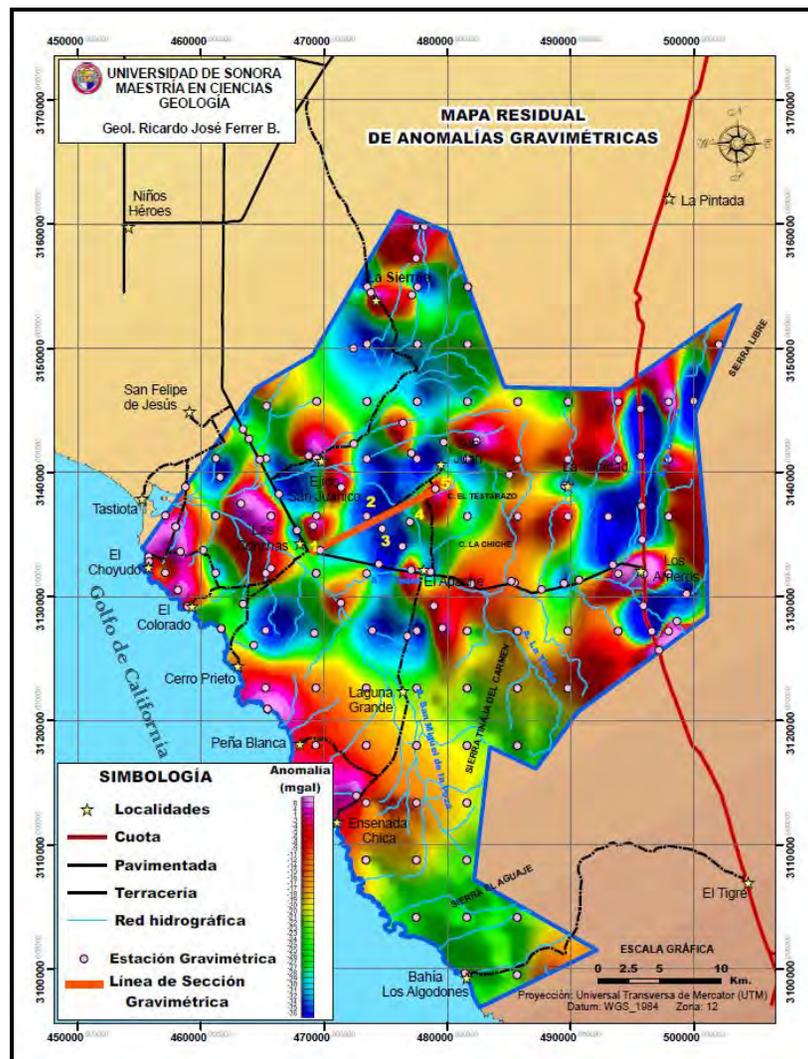


Figura III.12.- Mapa residual de anomalías gravimétricas.

En el centro del área se modela un perfil gravimétrico con orientación SW-NE (Figura III.13) con una longitud aproximada de 11 km para determinar el relleno sedimentario del basamento que intercepta la cuenca de mayor depresión, encontrando un espesor en la parte más baja aproximado de 380 mbnm.

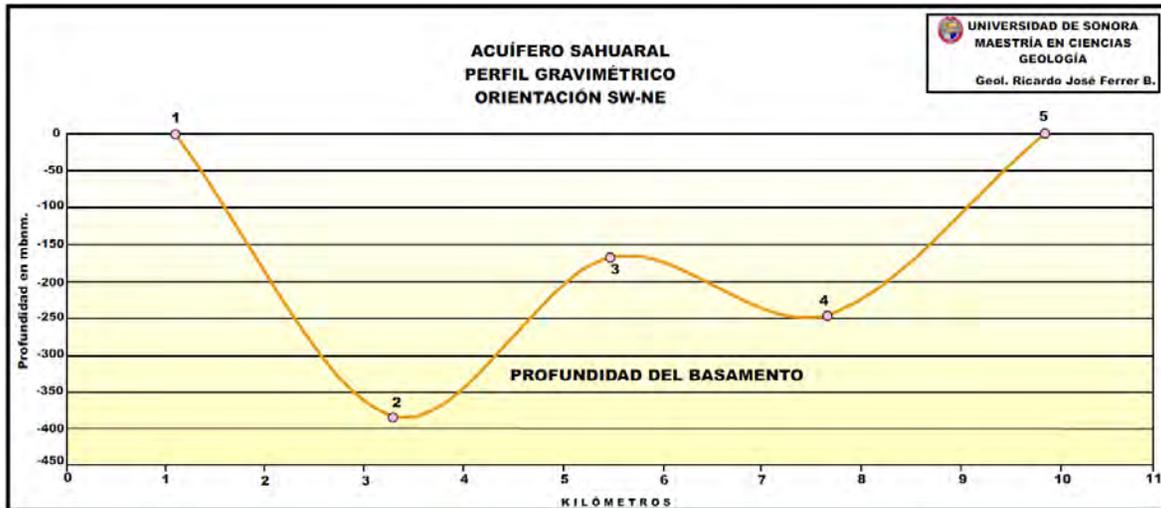


Figura III.13.- Perfil gravimétrico.

CAPÍTULO IV.- HIDROGEOLOGÍA

IV.1.- Introducción

El acuífero Sahuaral está constituido por dos fases físicas que interactúan que son: el depósito de sedimentos y el agua subterránea; los sedimentos interactúa con el agua subterránea como: depósito, conducto y medio de cambios geoquímicos del agua subterránea. Asimismo los sedimentos por su composición, estructura y ubicación, permite distinguir dos tipos de acuífero libre y semiconfinado.

IV.2.- Comportamiento hidráulico del sistema

Las pruebas de bombeo fueron recabadas del estudio efectuado por GEOCALLI S. A. Consultores (1978), en el Anexo C se presentan sus características principales y en la Figura IV.1 se muestra su distribución.

En 1978 se realizaron 27 pruebas de bombeo de corta duración; tanto para acuífero semiconfinado y confinado, por los métodos de Jacob y Hantush; en algunas pruebas se aplicaron los dos métodos de interpretación, siendo similares los resultados obtenidos; únicamente en tres de las pruebas de bombeo se dispuso de un pozo de observación próximo (S6, S-27 y S-63)

Los valores de transmisividad varían entre 0.265 y $129.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, representan en general la transmisividad del acuífero (Anexo C).

Mediante curvas de igual valor de transmisividad, donde los valores responden a la conformación del acuífero (litología de rellenos y al tamaño de los materiales); en general los valores disminuyen desde la porción central del acuífero hacia el noroeste (límite con el acuífero de la Costa de Hermosillo) y al poniente; en cambio, desde la zona central del acuífero hacia el sur estos valores aumentan.

Los caudales específicos varían entre 2.2 y 375 lps/m (Anexo C), con una distribución muy semejante a la de las transmisividades.

El coeficiente de almacenamiento en acuíferos libres, es casi igual a la cantidad de agua drenada por un volumen unitario de él, en general, este parámetro es difícil evaluarlo en pruebas de bombeo de corta duración: el retraso en el drenado ocasionado por lentes de material fino impiden su determinación. Los coeficientes de almacenamiento en los dos pozos de observación son: 5.3×10^{-2} (pozo S6-OBS) y 1.5×10^{-4} (pozo S63-OBS), ambos corresponden a tiempos cortos.

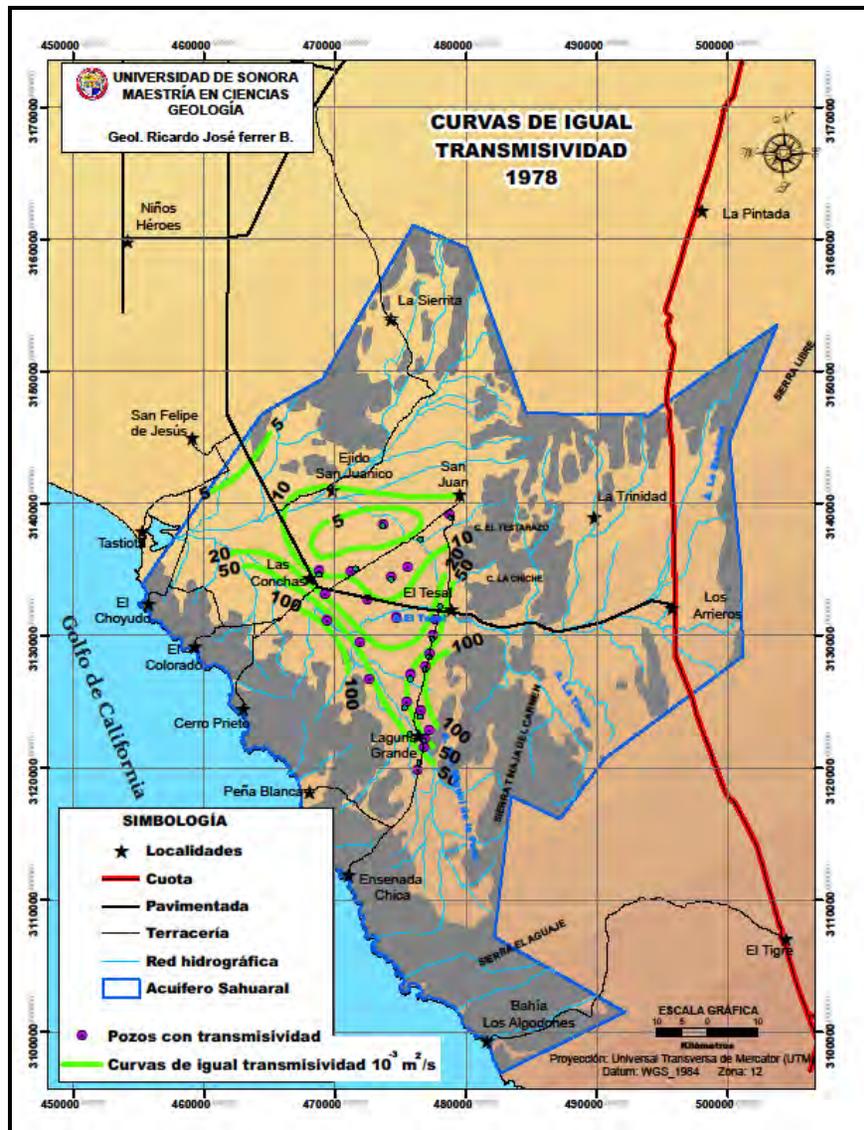


Figura IV.1.- Isotransmisividades de las pruebas de bombeo (GEOCALLI, 1978).

IV.3.- Piezometría

A continuación se presentan las piezometrías tomadas de varios estudios hidrológicos, el cual marca la evolución que ha tenido el acuífero en el tiempo y por consecuencia el agua subterránea; para ello se ha utilizado el trazo de líneas equipotenciales.

IV.3.1.-Profundidad al nivel estático

Para el acuífero Sahuaral, se realiza la configuración de profundidad al nivel estático para los años 1967, 1978, 1987, 2009, 2011 y 2014 los cuales se presentan en las figuras IV.2, IV.3, IV.4, IV.5, IV.6 y IV.7; respectivamente. Las configuraciones de 1967, 1978, 1987 y 2009 se baso en la digitalización del mapa de profundidad al nivel estático de varios estudios. Para los años de 2011 y

2014, las configuraciones se hicieron con los datos de 46 pozos de la red piezométrica de CONAGUA.

La profundidad al nivel estático para el año de 1967 (Figura IV.2), según el estudio hidrológico de Ariel Construcciones S.A. (1968); los valores oscilan de 9.18 a 46.02 m, los valores menos profundos se encuentran cerca a la línea de costa al poniente del acuífero (entre El Pedernal y Las Conchas); estos valores van creciendo al oriente y al sur del acuífero. Este primer levantamiento que se realizó en forma para el acuífero Sahuaral.

El estudio elaborado por GEOCALLI, S.A. Consultores (1978) reporta valores entre los 13.12 a 71.11 m; hacia la costa los valores más someros, al norte van de 16.79 a 57.15 m, estos aumentan conforme se avanza al sur de la zona de explotación, el valor máximo de 77.77 m se ubica al noreste del campo Santa Carmen (Figura IV.3).

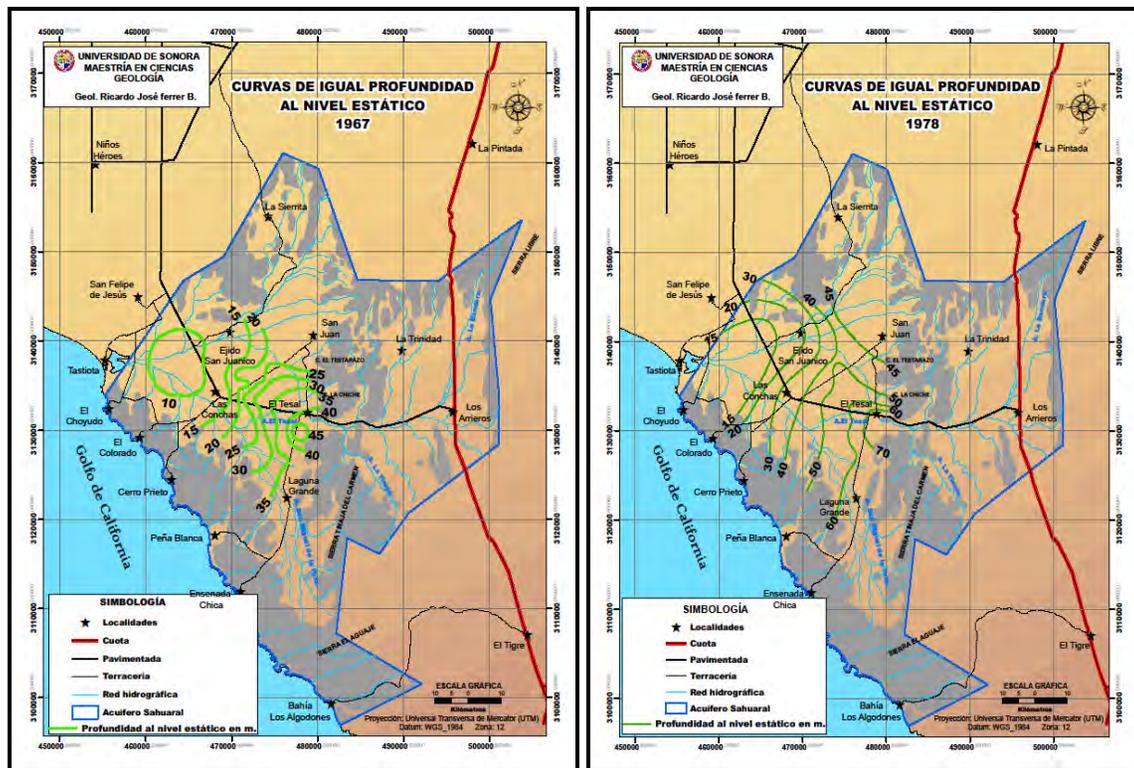


Figura IV.2.- Profundidad al nivel estático 1967. Figura IV.3.- Profundidad al nivel estático 1978.

El estudio llevado a cabo por INEGI (1993) menciona que la profundidad al nivel estático para el año de 1987 es de 20 m en la zona de El Pedernal y de 95 m al sur del acuífero (Figura IV.4).

El estudio hidrológico realizado por la empresa IDEAS (2009), señala que la profundidad al nivel estático varía entre 13 y 87 m. Las menores profundidades se encuentran en la parte noroeste, con valores entre 13 y 30 m y las mayores en la porción centro-sur con 70 a 87 m. Las profundidades medias van de 30 a 60 m, distribuidas principalmente en las porciones del centro, oeste y este de la zona de explotación (Figura IV.5).

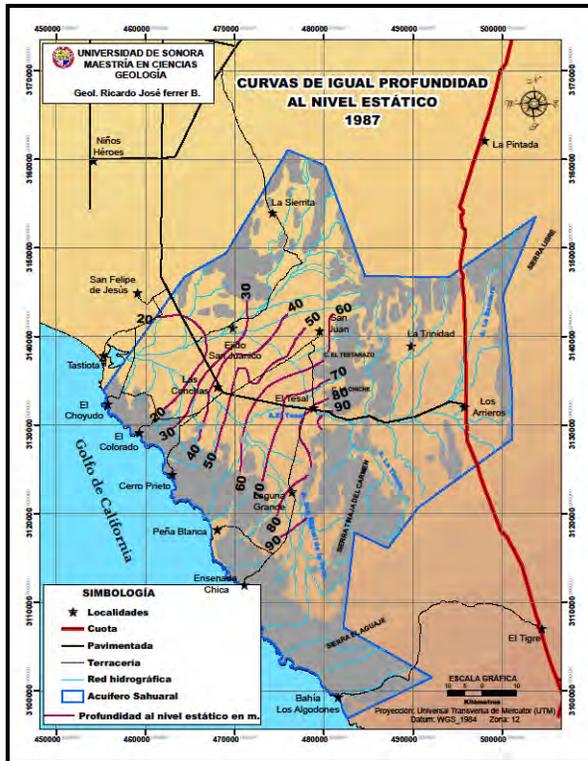


Figura IV.4.- Profundidad al nivel estático 1987.

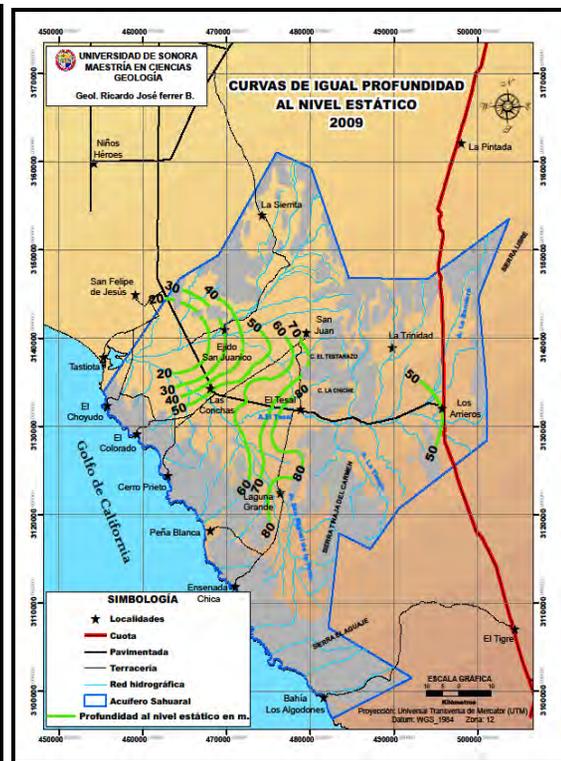


Figura IV.5.- Profundidad al nivel estático 2009.

Para el año 2011 (INEGI, 2013) y en 2014 se toma la información puntual de CONAGUA y elabora las curvas de igual profundidad al nivel estático.

- a) En el año 2011 (Figura IV.6) las profundidades menores se encuentran en la zona El Pedernal con 20 y 30 m (al noroeste del acuífero), donde actualmente los aprovechamientos se encuentran fuera de uso. La mayor profundidad se localiza al sur del acuífero.
- b) En el año 2014 la profundidad al nivel estático (Anexo D) es como sigue: hacia el noroeste del acuífero se encuentran profundidades entre los 20 y 30 m, las cuales van aumentando paulatinamente hacia la porción central del área de estudio (El Tesal) donde el nivel estático alcanza los 80 m, y así continua aumentando hasta llegar a los 100 m, al sur del acuífero (Figura IV.7).

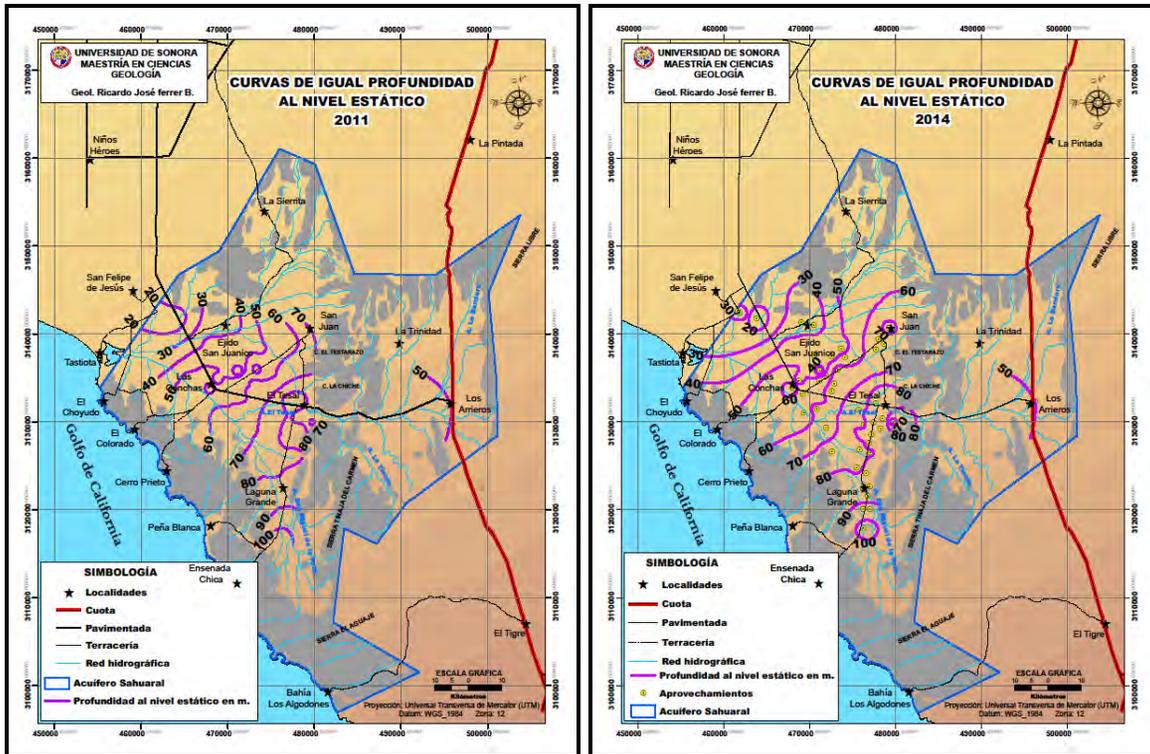


Figura IV.6.- Profundidad al nivel estático 2011. Figura IV.7.- Profundidad al nivel estático 2014.

IV.3.2.- Elevación del nivel estático

La Figura IV.8 muestra la elevación del nivel estático en condiciones originales, este plano fue hecho por GEOCALLI, S.A. Consultores (1978), en base en los niveles estáticos de los datos de perforación de los primeros pozos construidos en el valle, abarcando un periodo de 1952 a 1967. En la figura se observa claramente que el flujo subterráneo proviene del norte, sur y oriente para salir al poniente por el estero de Tastiota.

La elevación del nivel estático que se obtiene del estudio de Ariel Construcciones S.A. (1968), dice que los niveles del año de 1967 varían de -7.25 a 6.63 msnm (metros sobre el nivel del mar); el valor de -7.25 msnm se ubica al sur de El Pedernal; la "curva cero" aparece en la porción central de la zona de explotación y desde este lugar hacia al sur los valores son positivos (Figura IV.9).

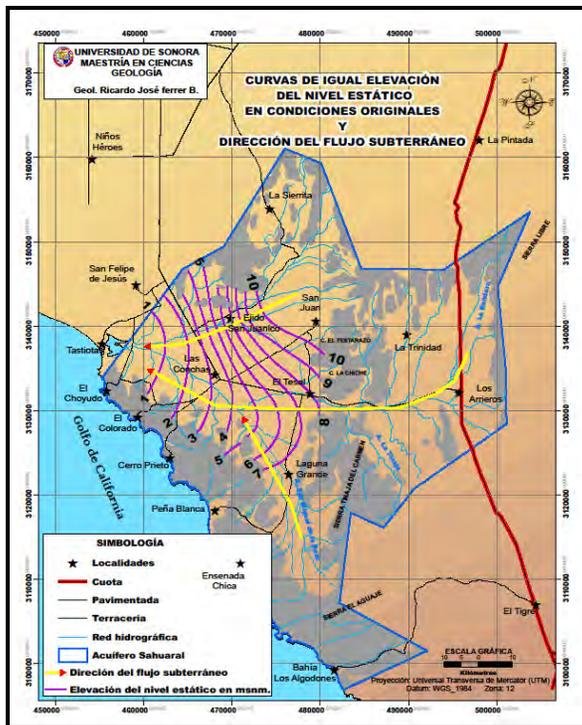


Figura IV.8.- Elevación del nivel estático y dirección del subterráneo originales.

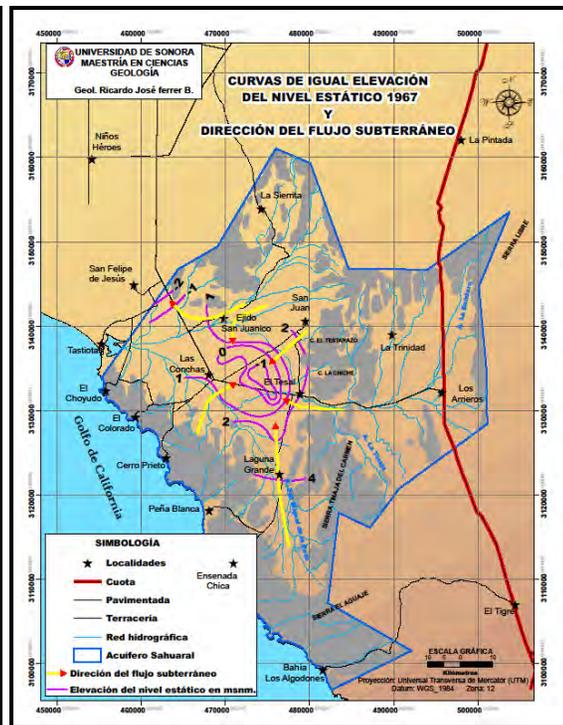


Figura IV.9.- Elevación del nivel estático y dirección del flujo subterráneo 1967.

En el estudio hidrológico de GEOCALLI, S.A. Consultores (1978) en su plano de curvas de igual elevación del nivel estático, se observa que toda la parte central y poniente del área de estudio se encuentra extrayendo el agua subterránea por debajo del nivel medio del mar, por lo que el flujo subterráneo se vuelve completamente radial hacia el centro del área (Figura IV.10). Posiblemente para esta fecha ya los pozos cercanos a la línea de costa empiezan hacer afectados por intrusión marina.

El estudio de INEGI (1993) dice que para el año de 1987, la elevación del nivel estático varía de -10 msnm en el área del El Pedernal y que para las zonas de El Tesal y Laguna Grande el valor es de -40 msnm (Figura IV.11); por lo que el flujo subterráneo se acentúa en la porción central y sur del acuífero, lo que significa que en estas porciones es donde se extrae la mayor cantidad de agua subterránea.

La cartografía hidrológica de aguas subterráneas de INEGI (1997), las curvas de igual elevación del nivel estático tienen el siguiente comportamiento: en la zona El Pedernal la curva tiene el valor de -15 msnm y en el sur por rumbo de San Miguel es de -45 msnm (Figura IV.12). Para esta fecha el flujo subterráneo se empieza a fraccionar en dos partes: uno rumbo a El Tesal y el otro hacia la Laguna Grande.

El estudio de la empresa IDEAS (2009) cita que los valores están entre -5 y -35 msnm. Los valores mayores se encuentran en la porción centro-sur del acuífero y los menores al noroeste. Todas las curvas de igual elevación del nivel estático están por debajo del nivel del mar, a excepción de una que se ubica en la parte oriente del área (fuera de la zona de explotación) en el predio de Los Arrieros (Figura IV.13). La dirección principal del flujo subterráneo es hacia la porción

central del acuífero; producto del bombeo excesivo al que ha sido sometido este y a la lenta estabilización de los niveles, debido a la presencia de capas de baja permeabilidad en la zona.

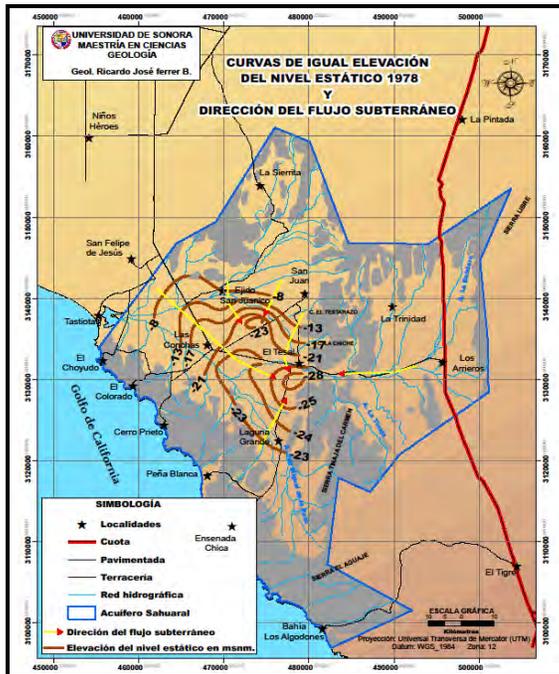


Figura IV.10.- Elevación del nivel estático y dirección del flujo subterráneo 1978.

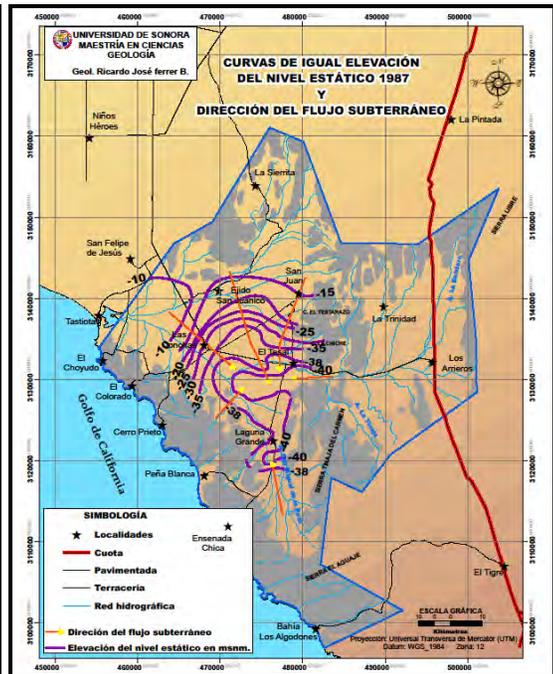


Figura IV.11.- Elevación del nivel estático y dirección del flujo subterráneo 1987.

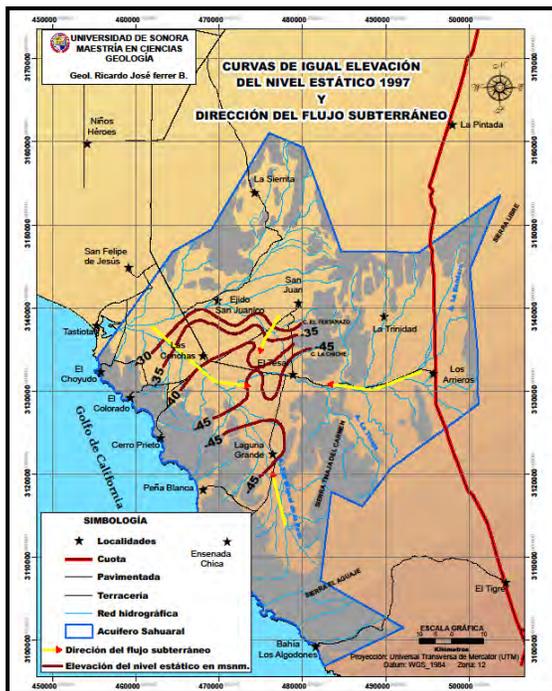


Figura IV.12.- Elevación del nivel estático y dirección del flujo subterráneo 1977.

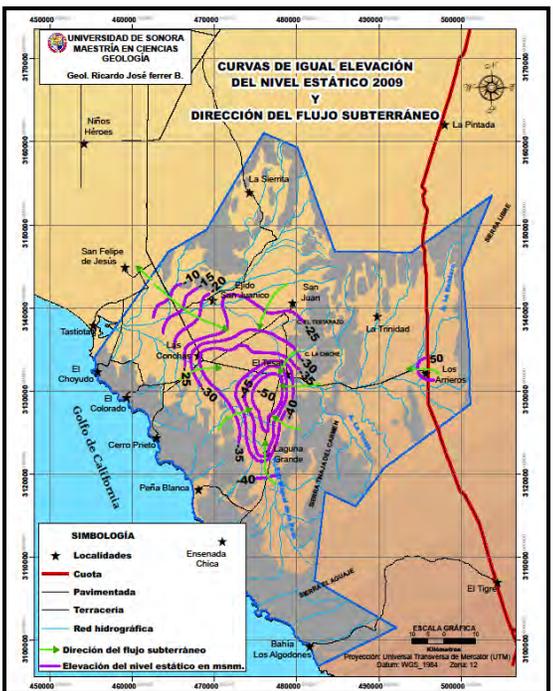


Figura IV.13.- Elevación del nivel estático y dirección del flujo subterráneo 2009.

INEGI (2013) en su cartografía las curvas de igual elevación del nivel estático (referidas al 2011) se distribuyen de la siguiente forma: al noroeste del acuífero las curvas varían de -10 a -25 msnm, en este sitio los pozos se encuentran fuera de uso; en el resto del área las curvas van de -25 a -50 msnm (Figura IV.14), concentrándose estos en los sitios Las Conchas y El Tesal, en este último lugar durante el recorrido de campo se observó que algunos pozos han dejado de operar, ya que están siendo relocalizados, por lo que aparentemente el área se encuentra en recuperación. La parte oriente del acuífero se retoma el valor de 50 msnm obtenido en el año 2009 por la empresa IDEAS.

Las curvas de elevación del nivel estático para el año de 2014 (Anexo E) presenta la siguiente distribución: las curvas de menor valor se localizan al noroeste del acuífero (Figura IV.15), las cuales aumentan al poniente (Las Conchas) y hacia al centro-sur del área de estudio. Comparando las curvas de este año con las del año 2011, se observa que la zona que se localiza al sur de El Tesal, es el área a donde se está dirigiendo actualmente la mayor parte del flujo subterráneo.

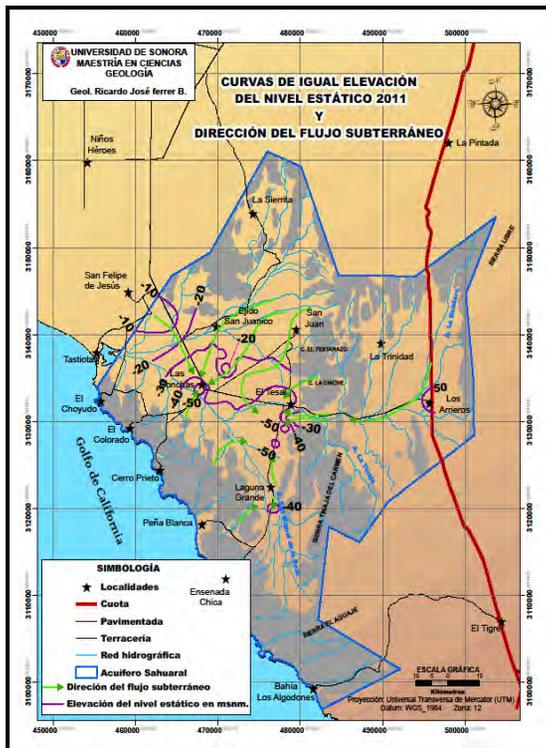


Figura IV.14.- Elevación del nivel estático y dirección del flujo subterráneo 2011.

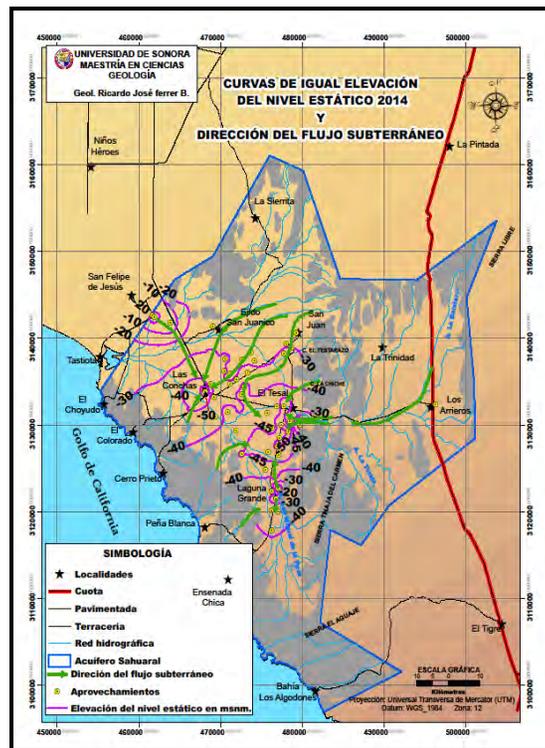


Figura IV.15.- Elevación del nivel estático y dirección del flujo subterráneo 2014.

IV.3.2.1.- Dirección del flujo subterráneo

En respuesta a las curvas de elevación del nivel estático expuestas en el apartado anterior, se observa claramente que desde el primer estudio hidrológico (1968), existe el abatimiento de los niveles estáticos, lo que ha propiciado el cambio de dirección del flujo subterráneo.

Actualmente la dirección del flujo subterráneo en general es hacia el centro-sur de la zona de explotación, donde se manifiestan varios conos de abatimiento producto del bombeo excesivo y a la lenta estabilización de los niveles (debido a la presencia de capas de baja permeabilidad).

Las direcciones principales de los flujos subterráneos provienen del noroeste, sur y del oriente, este último siguiendo el curso del arroyo La Bandera.

Por lo expuesto en párrafos anteriores como son: gradientes hidráulicos pequeños de mar a continente, debido a la barrera de rocas ígneas sobre la línea de costa que impide la entrada de agua marina y por la aparente nula recarga que recibe del acuífero Costa de Hermosillo; a consecuencia de la sobreexplotación que hay en ambos acuíferos y por lo reducido de las transmisibilidades que existe en la zona de comunicación; por estas condiciones el acuífero se considera como un área casi cerrada.

IV.3.3.- Evolución del nivel estático

La evolución del nivel estático para el periodo de 1967 a 1968 (Ariel Construcciones S.A., 1968) los abatimientos presentan el siguiente comportamiento: para la zona de El Pedernal (al noroeste del acuífero) es de 0.5 m, en la porción centro-norte (campo agrícola Las Vírgenes Número Uno) con 5 m y hacia el sur y centro el valor es de 6 m (Figura IV.16).

INEGI (1993) maneja una evolución del nivel estático de 1975 a 1987, la superficie freática experimento descensos que van de 5 a 30 m (Figura IV.17). El mayor descenso ocurrió al sur del acuífero y el menor al noroeste (El Pedernal).

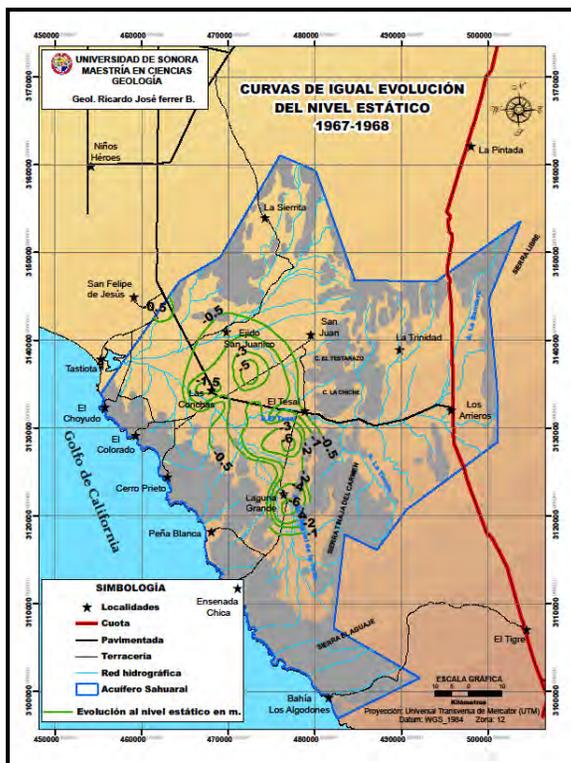


Figura IV.16.- Evolución del nivel estático 1967-1968.

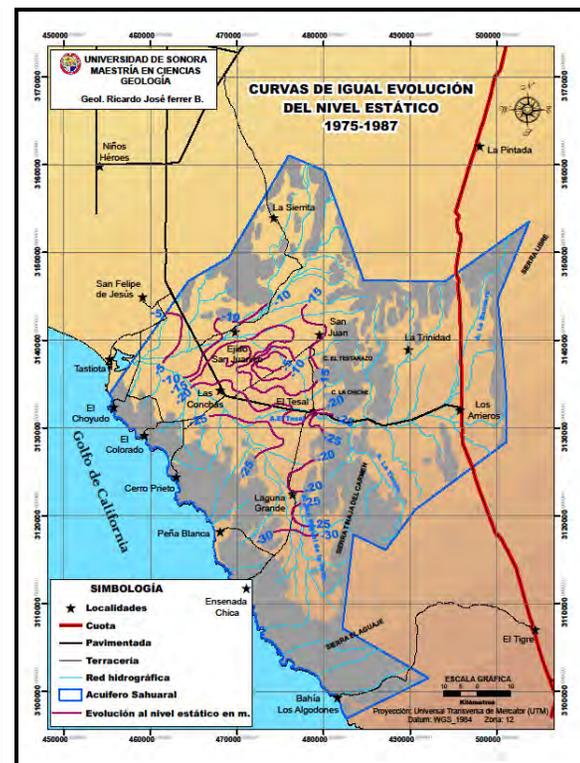


Figura IV.17.- Evolución del nivel estático 1975-1987.

El estudio de la empresa IDEAS (2009) reporta para el periodo de 2005-2009 un abatimiento de 3.30 m hacia el sur del área y de una recuperación máxima de 10.58 m al noroeste del campo agrícola La Hermosura; al el centro de la zona de explotación se observa el cono de abatimiento (Figura IV.18).

La evolución del nivel estático para el ciclo 2000-2011 (CONAGUA, 2011), el abatimiento mayor se localiza en el campo agrícola el Diamante Número Dos con 11.86 m y la recuperación máxima de 13.87 m en Las Vírgenes Número Cinco. Al noroeste de la zona de explotación se manifiesta una franca recuperación debido a que esta área se encuentra fuera de uso (Figura IV.19).

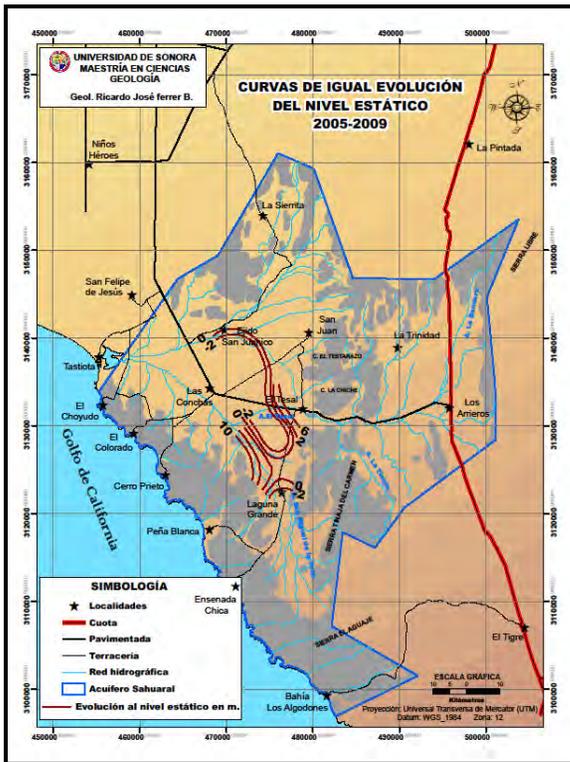


Figura IV.18.- Evolución del nivel estático 2005-2009.

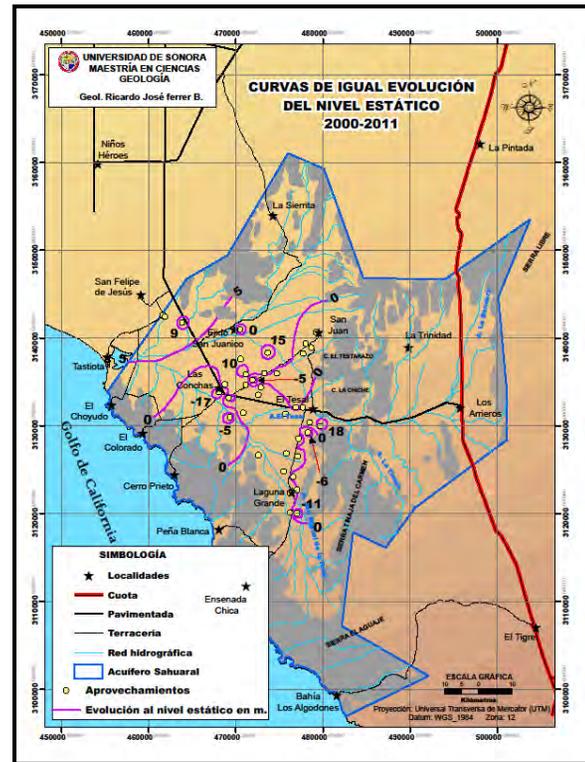


Figura IV.19.- Evolución del nivel estático 2000-2011.

Finalmente para el periodo 2010-2014 (Anexo F) se tiene un abatimiento máximo de 15 m en la porción central área (Figura IV.20), en el resto del área el abatimiento oscila desde unos cuantos centímetros hasta 5 m; en tanto las recuperaciones son más locales, como por ejemplo al oriente del acuífero en el campo agrícola San Carlos, donde el valor es de 7.45 m; en general las recuperaciones son entre 0.50 a 1.5 m.

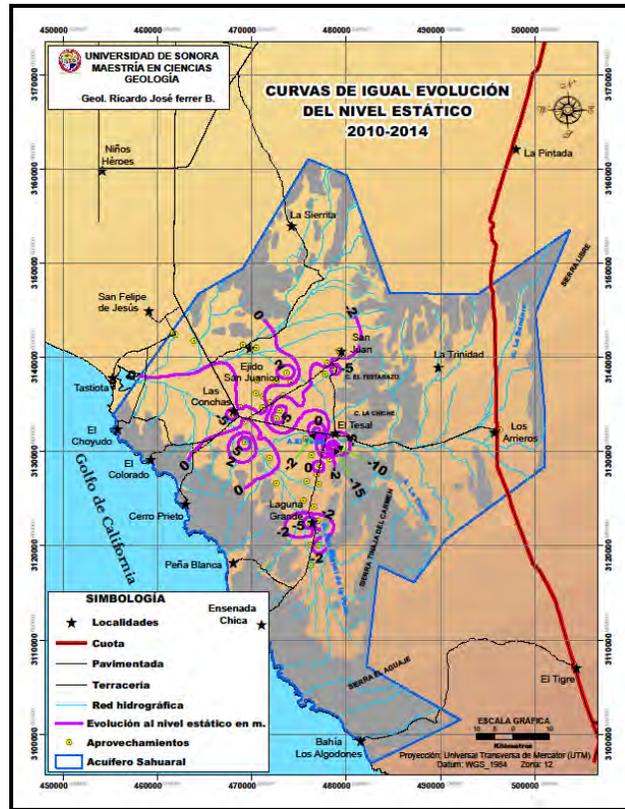


Figura IV.20.- Evolución del nivel estático 2010-2014.

IV.4.- Disponibilidad de agua subterránea

Este apartado se basa en el Diario Oficial de la Federación del año 2015.

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. En su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la siguiente expresión:

$$DAS = Rt - DNCOM - VCAS$$

Donde:

DAS= Disponibilidad media anual de agua subterránea

Rt= Recarga total media anual

DNCOM= Descarga natural comprometida

VCAS= Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA

❖ Recarga total media anual (Rt)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (Rt), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, su valor es de 58.6 Hm³/año.

❖ Descarga natural comprometida (DNCOM)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes, sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para este caso, se considera que no existen descargas naturales comprometidas. DNCOM = 0.0 Hm³/año.

❖ Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), de la Subdirección General de Administración del Agua, para esta fecha es de 63.65 Hm³/año.

❖ Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, de acuerdo con la expresión anterior, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPGA. DAS = 0.0 Hm³/año.

El resultado actual indica que no existe volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, el déficit es de 5.05 millones de m³/año, que se están extrayendo a costa del almacenamiento no renovable del acuífero.

Este déficit indica que en la zona de estudio no existe volumen disponible para nuevas concesiones, por lo que el acuífero está considerado como sobreexplotado.

Cabe hacer la aclaración de que el cálculo de la recarga media anual que recibe el acuífero, y por lo tanto de la disponibilidad, se refiere a la porción del acuífero granular en la que existen aprovechamientos del agua subterránea e información hidrogeológica para su evaluación.

IV.5.- Vedas

Para ésta zona hidrogeológica existen tres zonas de veda por Decreto Presidencial (Figura IV.21).

La primera veda se encuentra en la porción norte y es el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en los terrenos de la Zona de Cieneguillas, Son.”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 2 de Octubre de 1956. Este decreto es tipo III, en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones

limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. Esta veda también recibe el nombre de Zona de Cieneguillas. Número de veda 2604, clave con la que se identifica a nivel nacional.

La segunda veda toma las porciones norte y noroeste y es el “Decreto por el que se amplía el Distrito Nacional de Riego de la Costa de Hermosillo, Estado de Sonora”, que fue publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 2 de Marzo de 1963. Esta veda es tipo I, en la que no es posible aumentar las extracciones sin peligro de abatir peligrosamente o agotar los mantos acuíferos. Número de veda 2608, clave con la que se identifica a nivel nacional.

La tercera veda, la de mayor amplitud en área, comprende desde la porción central hasta al sur y ocupa todo el flanco oriental y el sur-poniente; se encuentra sujeto a las disposiciones del “Decreto por medio del cual se amplía la zona de veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la Costa de Hermosillo, Son.” publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 2 de Junio de 1967. Este decreto es tipo II, en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite la extracción para usos domésticos. A esta veda se le conoce también como Costa de Hermosillo. Número de veda 2610, clave con la que se identifica a nivel nacional.

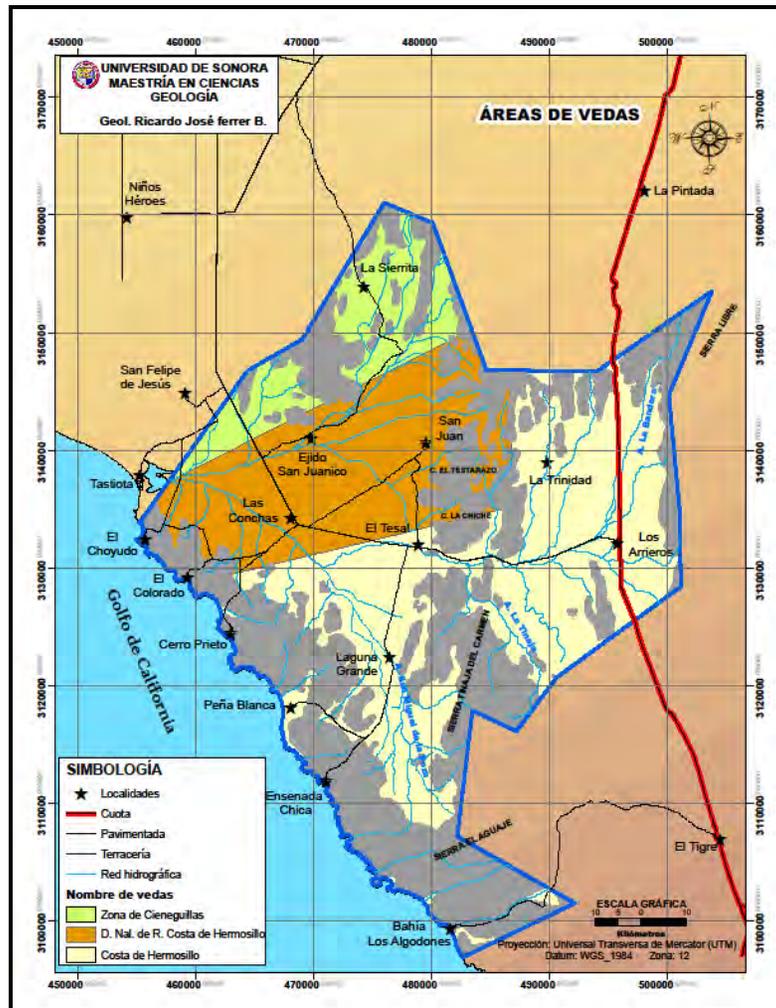


Figura IV.21.- Áreas de veda publicadas en el Diario Oficial de la Federación.

V.3.- Metodología para la representación hidrogeoquímica

La distribución espacial de los elementos obtenidos de laboratorio y de campo, son plasmados en mapas de isolíneas de igual concentración, que fueron elaborados en base al proceso de interpolación Inverse Distance Weighted, además se utilizaron mapas puntuales y tablas.

V.4.- Información de campo

La información de los parámetros de campo se encuentra representada en el Anexo G.

V.4.1.- Temperatura del agua subterránea

La temperatura es un parámetro físico que aumenta con la profundidad conocido como gradiente geotérmico; éste un promedio de 3 °C por cada 100 m de profundidad. Existen excepciones cuando el sistema hídrico esta en relación con sistemas extremos frío-calor, ya que por lo general la temperatura en el agua subterránea se mantiene en equilibrio con las rocas del acuífero. Por lo expuesto es muy útil llevar a cabo medidas de este parámetro en los aprovechamientos, estas medidas pueden servir de apoyo en la interpretación de la circulación del flujo subterráneo, inferir los tipos de rocas y como indicadores de las zonas de recarga (Mazor, 1997). Este factor también influye en la medición de la CE (conductividad eléctrica) y en la solubilidad de las sustancias. La temperatura normal para aguas subterráneas oscila entre 21 y 25 °C.

En el área de estudio las temperaturas registradas en las muestras de agua varían entre los 26.1 a 37.1 °C (Anexo G); la mayor parte de las muestras tienen una temperatura entre los 27 y 32 °C. Las temperaturas más altas se encuentran en los campos agrícolas El Diamante Número Tres (clave 17) y en El Apache (clave 19) con 37.1 y 36.0 °C respectivamente (Figura V.2).

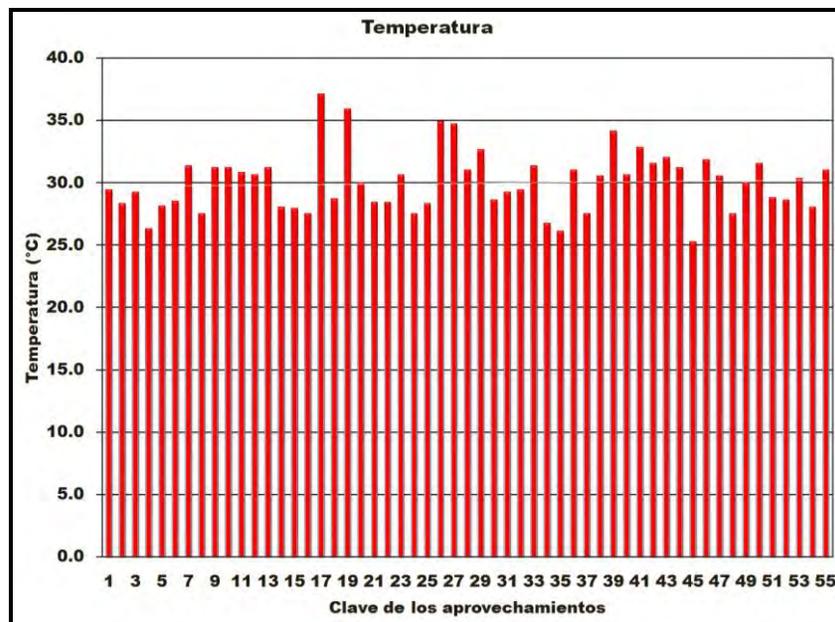


Figura V.2.- Temperatura de las muestras de agua subterránea.

En la Figura V.3 se observa la distribución espacial de las temperaturas, las máximas se localizan en la porción central de área de estudio, básicamente al noroeste de la localidad El Tesal; estas disminuyen hacia los límites del acuífero, donde varían entre los 28 y 30 °C.

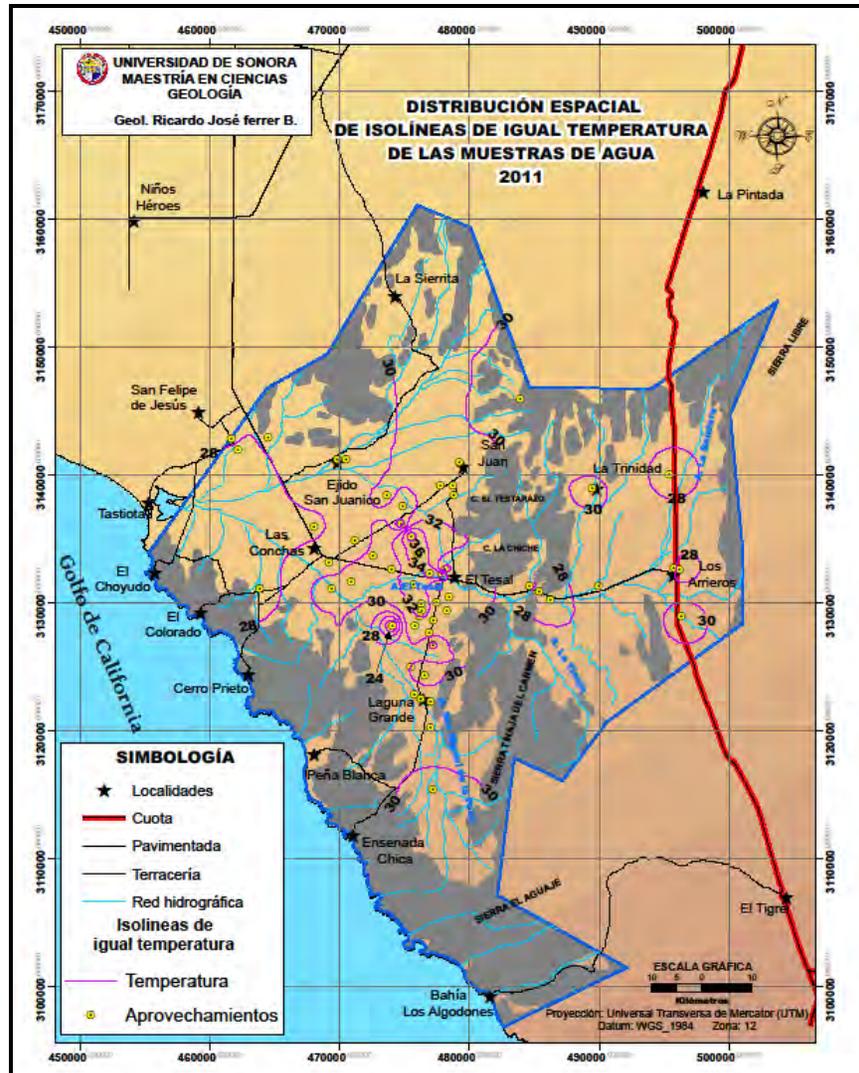


Figura V.3.- Distribución de las temperaturas de las muestras de agua subterránea.

V.5.- Información y/o resultados de laboratorio

Los datos de los análisis químicos se encuentran en el Anexo H; entre la información que se presenta en el anexo: iones mayores, dureza total, RAS, pH, CE, STD, calidad de riego, agresividad y familias de agua.

V.5.1.- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 modificada el año 2000

Algunos de los parámetros que a continuación se analizan poseen límites, que se encuentran especificados dentro de la Norma Oficial Mexicana (Tabla V.1).

La Norma Oficial Mexicana **NOM-127-SSA1-1994**, *Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*, es el documento regulatorio en la República Mexicana respecto a la calidad del agua, en donde se asientan algunos de los valores máximos permisibles. En la Tabla V.1 se presentan algunos de los límites de la norma modificada en el año 2000, ésta también es conocida como la **NOM-127**.

Parámetros	Unidades	Límites Máximos Permisibles NOM-127-SSA1-1994 (Modificada en el año 2000)
Físico-Químicos		
Potencial Hidrógeno	Unidades de pH	6.5 - 8.5
Temperatura	°C	N.C.
Conductividad Eléctrica	µS/cm-1	N.C.
Sólidos Totales Disueltos	mg/l	1000
Dureza Total	mg/l	500
Calcio	mg/l	N.C.
Sodio	mg/l	200
Magnesio	mg/l	N.C.
Bicarbonatos	mg/l	N.C.
Sulfatos	mg/l	400
Cloruros	mg/l	250
Nitratos	mg/l	10

Tabla V.1.- Límites máximos permisibles conforme a la NOM-127 (año 2000).

V.5.2.- Potencial de hidrógeno (pH)

La medición del pH debe realizarse *in situ* debido a los cambios que puede sufrir por la pérdida o ganancia de gases disueltos, tales como dióxido de carbono (CO₂), Oxígeno (O₂), Metano (CH₄), etc. El agua subterránea generalmente está en equilibrio a una presión parcial de CO₂ mucho más alta (10⁻¹ a 10⁻³ bar) que la de la atmósfera (10⁻³ a 10⁻⁵ bar), por lo que cuando está expuesta a la atmósfera, este gas escapa y el pH se incrementa (Freeze y Cherry, 1979).

El resultado de una medición de pH viene determinado por una consideración entre el número de protones (iones H⁺) y el número de iones de hidroxilo (OH⁻). Cuando el número de protones iguala al número de iones hidroxilo, el agua es neutra, tendrá entonces un pH alrededor de 7. El pH de agua puede variar entre 0 y 14, de manera que cuando es mayor de 7 es básica y cuando está por debajo de 7 es ácida.

El pH de laboratorio (Anexo H) da valores entre 7.33 y 8.56. El pH menor a 8.0 se ubica al sur y al poniente del acuífero.

En la Figura V.4 se observa la distribución espacial del pH conforme a los límites de la norma. Las muestras que están fuera del límite se ubican al centro y oriente del área de estudio.

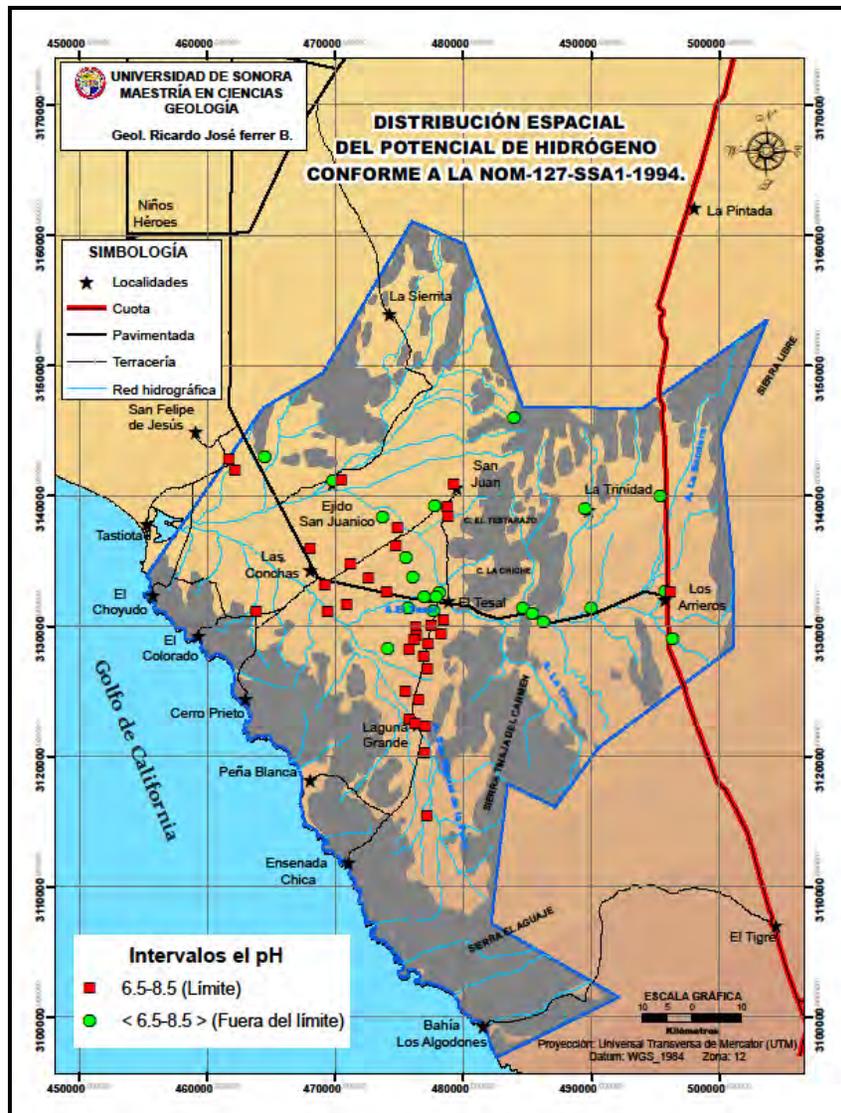


Figura V.4.- Distribución espacial del pH conforme a la NOM-127.

V.5.3.- Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica (CE) representa la capacidad del agua para conducir la electricidad, debido a las sales que contiene disueltas, por lo que a mayor disolución de sales es mayor la conductividad.

La conductividad eléctrica es altamente dependiente de la temperatura; se incrementa aproximadamente un 2% por cada °C de aumento de temperatura (Lloyd, 1985); la razón principal es que la viscosidad del agua decrece con el incremento de temperatura y por tanto la resistencia al movimiento de los iones disminuye.

Los valores de conductividad eléctrica que se obtuvieron del laboratorio van desde 439 a 20,380 $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ (Anexo H). En la Figura V.5 se observa que las isoconcentraciones mayores a 5,000

$\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ se localizan al noroeste del acuífero, mientras en la porción oriental los valores no llegan a $1,000 \mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$, en el resto del área los valores oscilan entre los $1,000$ y $5,000 \mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$.

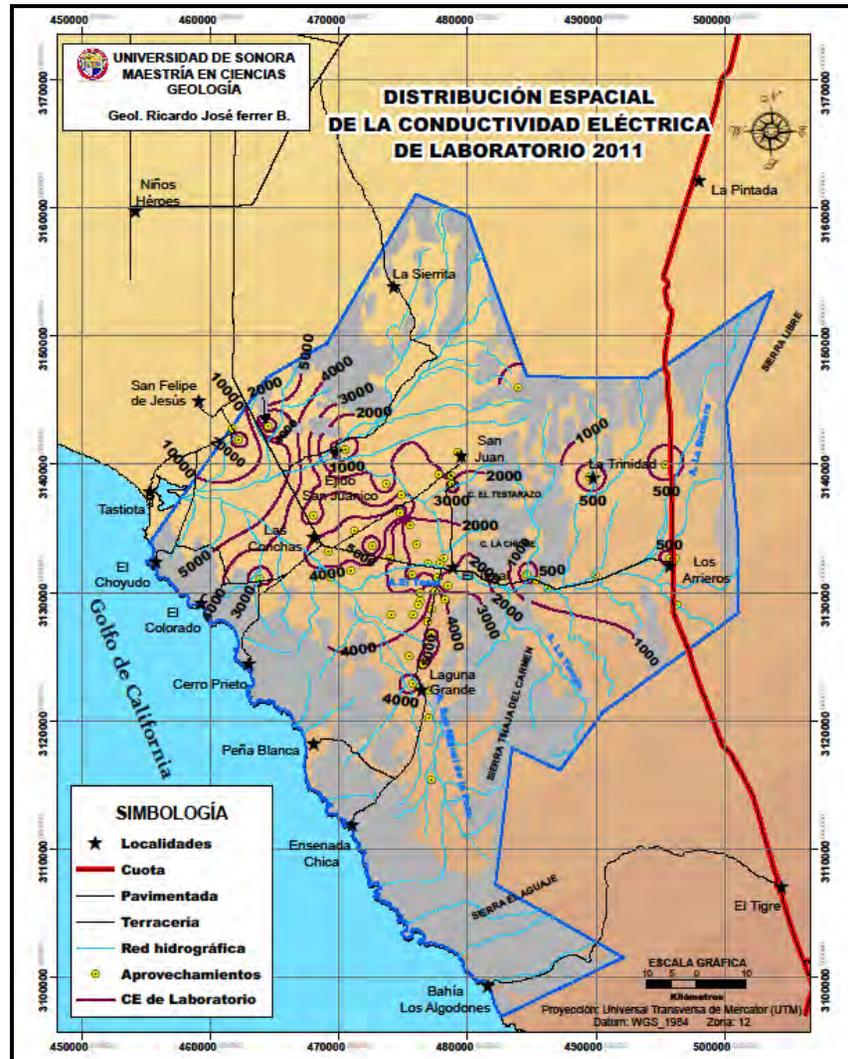


Figura V.5.- Distribución espacial de la CE de laboratorio.

V.5.4.- Sólidos totales disueltos (STD)

Para este apartado se han utilizado una serie de figuras, las cuales manifiestan a través del tiempo la evolución de los sólidos totales disueltos y la calidad del agua subterránea.

V.5.4.1.- Evolución de los sólidos totales disueltos

El estudio llevado a cabo por Ariel Construcciones S.A. (1968) es uno de los primeros que efectuó análisis ha esta zona. Los sólidos totales disueltos menores a $1,000 \text{ mg}/\text{l}$ se limitan a la porción centro-norte del acuífero, al centro están alrededor de los $1,500 \text{ mg}/\text{l}$, y en el sur y poniente estos valores aumentan hasta alcanzar los $2,000 \text{ mg}/\text{l}$ (Figura V.6).

El estudio de GEOCALLI, S.A. Consultores (1978), en el apartado de hidrogeoquímica menciona que en la parte central del valle se presentan concentraciones superiores a los 1,000 mg/l (Figura V.7).

Configurando los valores proporcionados por la cartografía de INEGI (1997), da como resultado que las curvas de igual concentración de sólidos totales disueltos tengan el siguiente comportamiento: al sur del acuífero se registran valores de 2,000 y 3,000 mg/l, al centro entre 1,000 y 1,500 mg/l, al poniente los valores son de 1,500 y 2,000 mg/l, y finalmente al oriente se encuentran las curvas de 500 y 1,000 mg/l (Figura V.8).

El estudio realizado por la empresa IDEAS (2009) levantó nueve muestras. La isolínea de menor concentración de sólidos totales disueltos se ubica en Los Arrieros (al oriente del acuífero) con valor de 500 mg/l y la mayor con 28,200 mg/l, esta se ubica al noroeste del área de estudio en el predio El Pedernal, y hacia el centro del área de estudio los valores van de 1,000 a 8,000 mg/l (Figura V.9).

Para el año 2011 (INEGI, 2013) los sólidos totales disueltos varían de 320 a 12,169 mg/l; los valores menores a 1,000 mg/l se ubican al centro, norte y oriente del acuífero; las concentraciones aumentan del centro al sur, alcanzando valores por arriba de los 2,500 mg/l; pero en la porción noroeste del acuífero los valores alcanzan los 10,000 mg/l (Figura V.10).

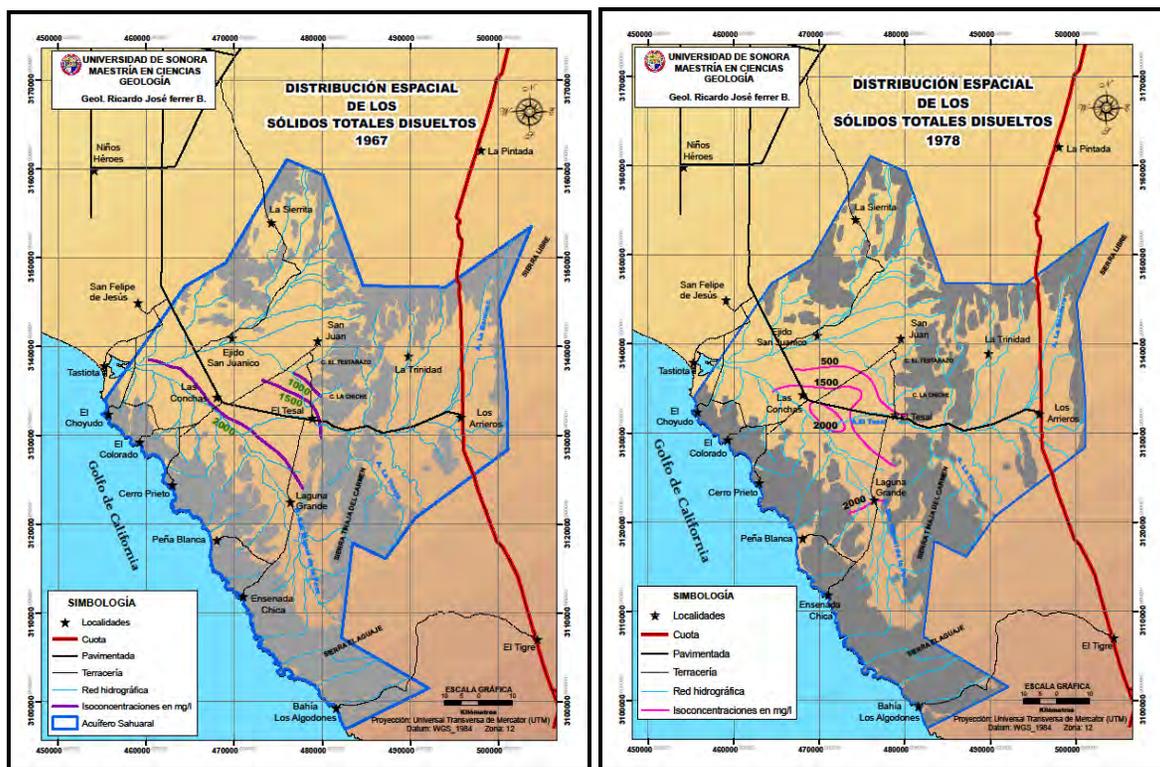


Figura V.6.- Sólidos totales disueltos 1967. Figura V.7.- Sólidos totales disueltos 1978.

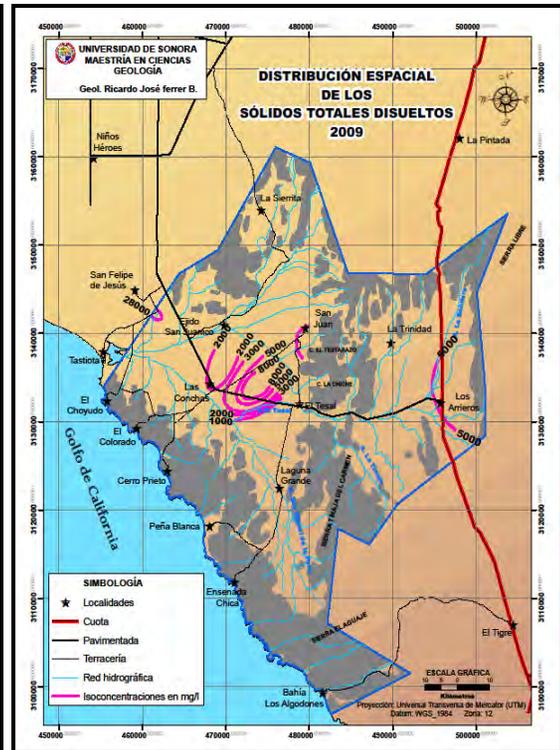
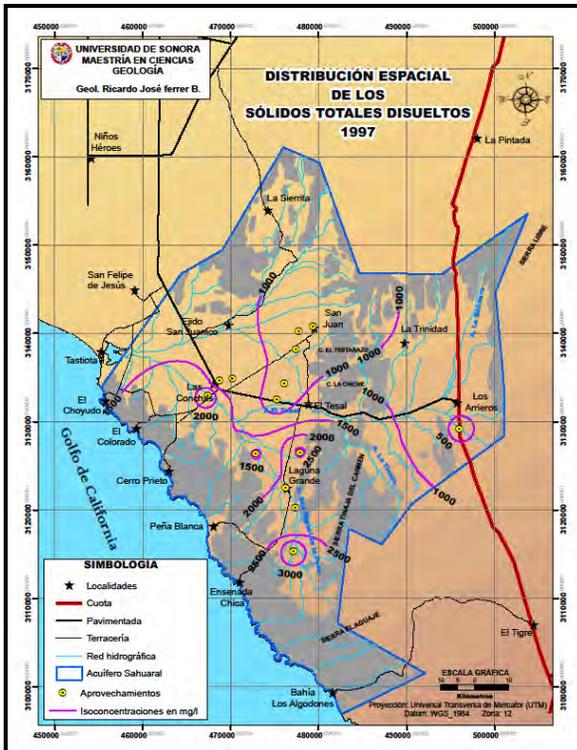


Figura V.8.- Sólidos totales disueltos 1997. Figura V.9.- Sólidos totales disueltos 2009.

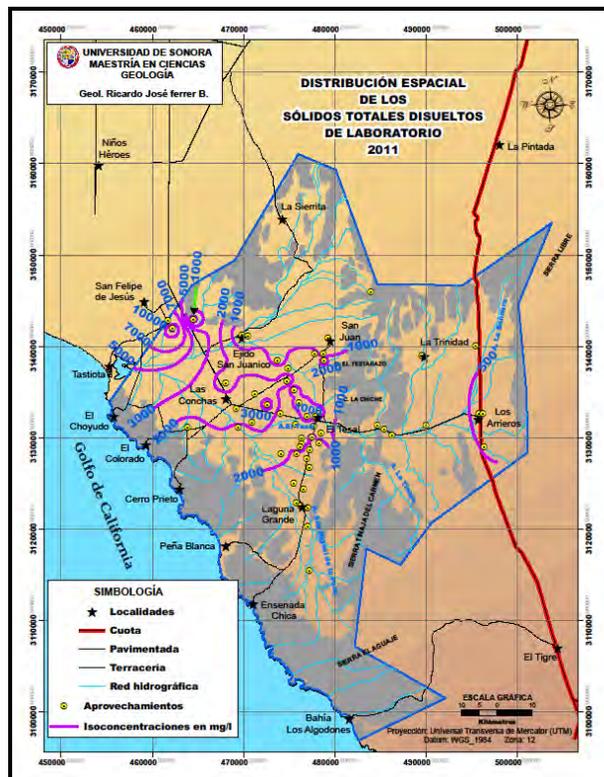


Figura V.10.- Sólidos totales disueltos 2011.

V.5.4.2.- Límite de los sólidos totales disueltos

Algunos procesos naturales y numerosas actividades humanas son fuentes potenciales del aporte de altas concentraciones de sólidos totales disueltos (STD); por lo que la "Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994" modificada en el año 2000, establece como límite máximo en agua para consumo humano 1,000 mg/l (Tabla V.1). El muestreo del año 2011 arroja como resultado que 21 de las 55 muestras poseen menos de 1,000 mg/l, es decir alrededor del 38% cumplen con la norma (Figura V.11).

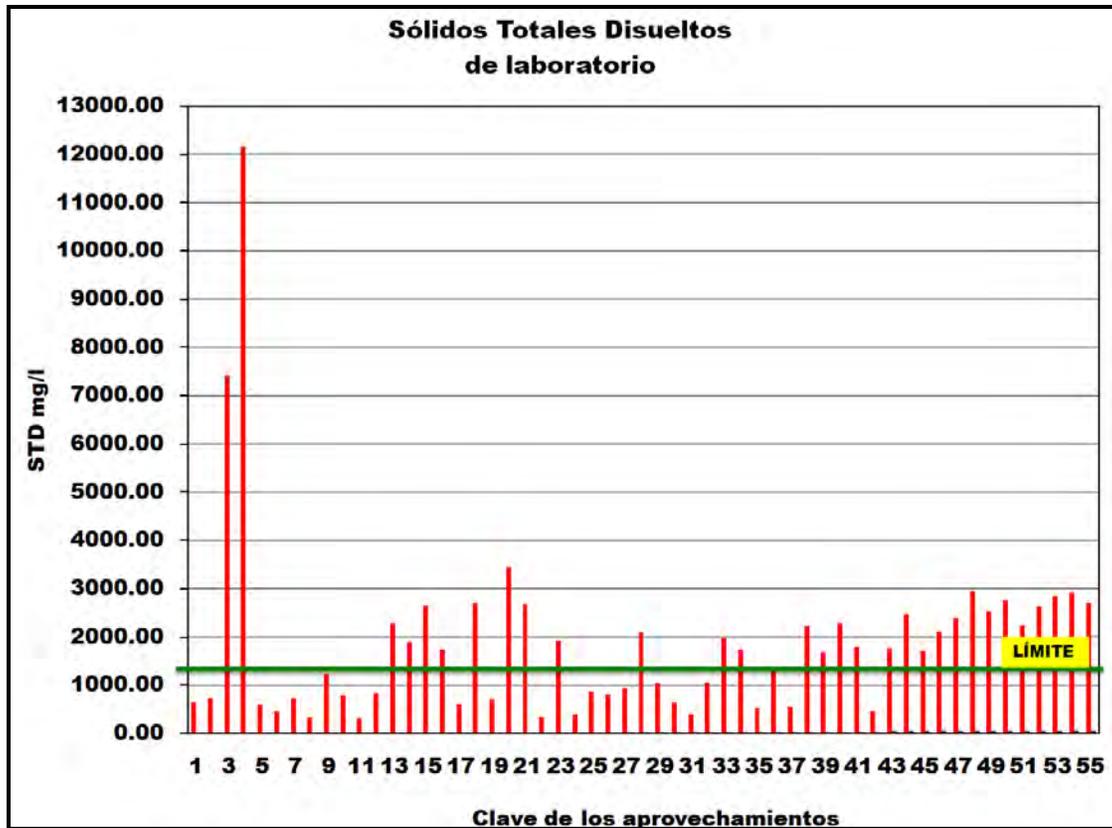


Figura V.11.- Concentraciones de STD y su límite conforme a la NOM-127.

En la Figura V.12 se observa que los sólidos totales disueltos menor a 1,000 mg/l se localizan al oriente y en pequeñas porciones al centro, norte y noroeste del área de estudio.

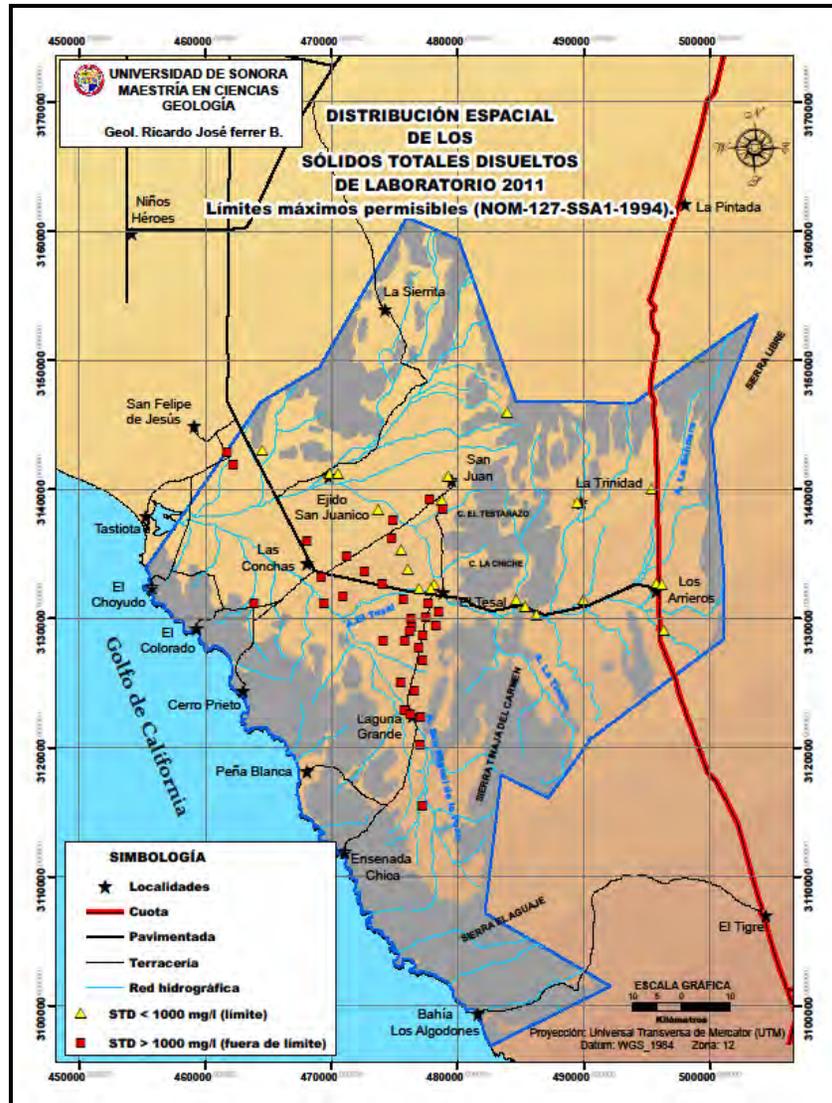


Figura V.12.- Distribución espacial de los STD conforme a la NOM-127.

V.5.4.3.- Relación entre conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos

Con los valores de conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos se formó un gráfico (Figura V.13) donde se observa que las muestras se concentran básicamente en dos grupos: el primer grupo, tiene una concentración de conductividad eléctrica entre 439 a 1,536 μScm^{-1} y de sólidos totales que van de 439 a 876 mg/l, y para el segundo grupo, la conductividad eléctrica varía de 2,738 a 5,120 μScm^{-1} , que le corresponden valores de sólidos totales disueltos de 1,743 a 5,120 mg/l; el aumento de la conductividad eléctrica en este segundo grupo posiblemente se deba a la presencia de evaporitas, que fueron depositadas durante los eventos geológicos que ocurrieron en el área.

Tomando en cuenta que el valor de la resistividad es inversamente proporcional al de la conductividad y en consecuencia a los sólidos totales disueltos, por lo anterior se tiene que los valores de menor resistividad le corresponden a los pozos 3 y 4 (Figura V.13), los cuales tienen

valores muy altos de conductividad ($12,440$ y $20,380 \mu\text{Scm}^{-1}$) y por consecuencia también valor altos de sólidos totales disueltos ($7,416$ y $12,170 \text{ mg/l}$). Estos altos valores son debido a la intrusión salina.

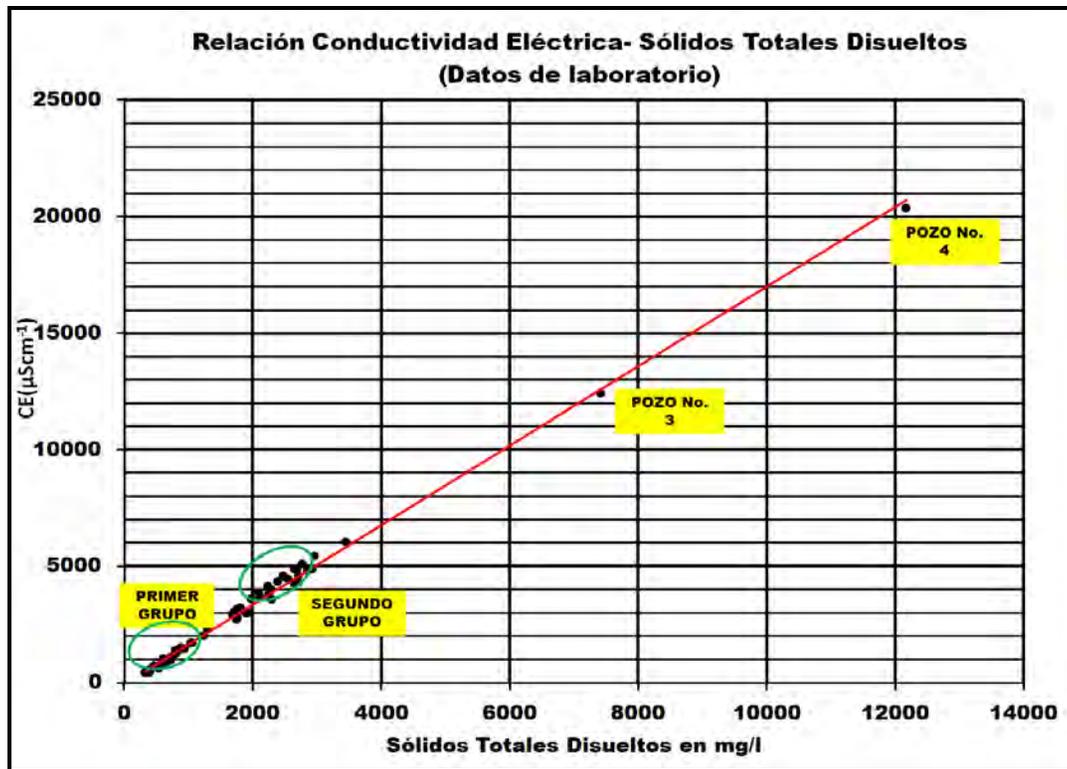


Figura V.13.- Relación entre la CE-STD de laboratorio.

V.5.5.- Calcio

Este elemento es el más abundante de los metales alcalino-térreos y es el constituyente mayor de los minerales comunes en las rocas, es un elemento esencial para las plantas y la vida animal, así como también es el componente mayor de los solutos en la mayoría de las aguas naturales, el calcio solo tiene un estado de oxidación, Ca^{2+} .

El calcio es componente de una gran variedad de rocas ígneas, también se presenta en rocas metamórficas y de esta manera, el agua que entra en contacto con este tipo de rocas se enriquece por este elemento; la forma común del calcio en las rocas sedimentarias son los carbonatos. Las dos formas cristalinas (calcita y aragonita) son CaCO_3 y la dolomita puede ser representada como $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. En los conglomerados y en otras rocas detríticas, el carbonato de calcio comúnmente está presente como un cementante entre las partículas o rellenando de manera parcial los intersticios.

El calcio es el elemento más abundante en las aguas dulces, generalmente va disuelto a favor de la cantidad de CO_2 (dióxido de carbono), la que varía con la presión y temperatura del líquido, por lo cual la solubilidad del calcio aumentará con la tensión del gas carbónico en el aire que esté en contacto con el agua y disminuirá con la elevación de la temperatura. Otra característica es que tiende a cambiar con facilidad a cambios de pH (Custodio & Llamas, 1983).

El principal problema de presencia de calcio en agua en concentraciones elevadas, es que fácilmente se puede incrustar en tuberías y en el ademe de los pozos.

Los valores del calcio van de 6.21 y 349.10 mg/l (Anexo H). Los valores menores a 100 mg/l se localizan al este, norte y centro del área de estudio. Los valores aumentan desde la porción central (50 mg/l) hacia el sur, hasta alcanzar los máximos valores que son de 323.04 y 349.10 mg/l, con clave 55 y 38 respectivamente (Figura V.14).

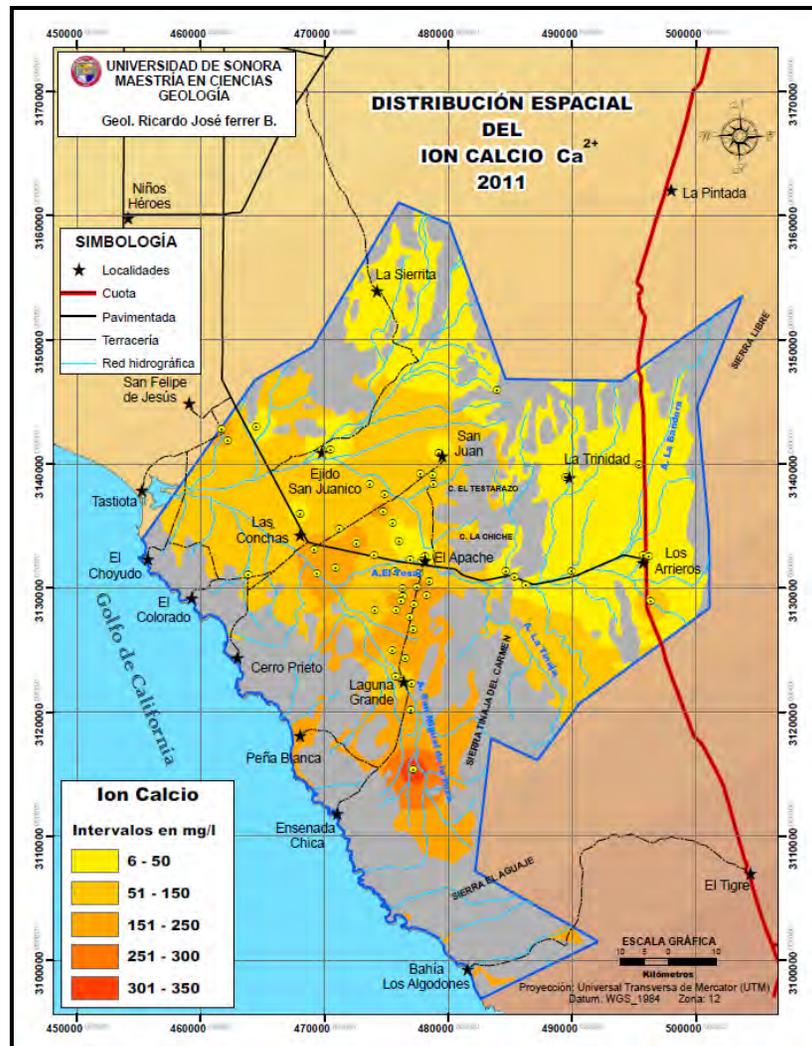


Figura V.14.- Distribución espacial del ion calcio.

V.5.6.- Magnesio

El Magnesio es muy abundante en la naturaleza, es el tercer metal de mayor abundancia disuelto en el agua de mar. Es un metal alcalino-térreo y tiene sólo un estado de oxidación Mg^{2+} , éste es un elemento común esencial en la nutrición de plantas y animales. En algunos aspectos de la química del agua, el calcio y magnesio pueden ser considerados como que tienen efectos similares, sin embargo el comportamiento geoquímico es diferente.

El magnesio se encuentra formando parte tanto de rocas ígneas como sedimentarias. La principal fuente de aportación de este catión es la disolución de dolomías y calizas dolomíticas y al ataque de silicatos magnésicos y ferromagnésicos. (Custodio y Llamas, 1996). Otras fuentes son el lavado de evaporitas y a la mezcla con agua de mar principalmente, la cual contiene hasta cinco veces más iones de magnesio que de calcio. En las aguas subterráneas poco mineralizadas, la relación del ion calcio y magnesio es de 6:1 a 2:1.

Las aguas dulces comúnmente tienen entre 1 y 100 mg/l. El agua de mar contiene alrededor de 1300 mg/l. Su aparición en el agua potable con varios centenares de mg/l provoca un sabor amargo y efectos laxantes. Contribuye a la dureza del agua y aún pH alcalino, puede formar incrustaciones de hidróxido.

Los valores de magnesio en la zona acuífera oscilan de 1.58 a 302.54 mg/l (Anexo H); la mayoría de los aprovechamientos no supera los 100 mg/l. Los máximos valores se encuentran al noroeste del área (El Pederal), con valores de 267.30 y 302.54 mg/l, con clave de los aprovechamientos 3 y 4; y la clave 11 pertenece al valor mínimo del magnesio (Figura V.15).

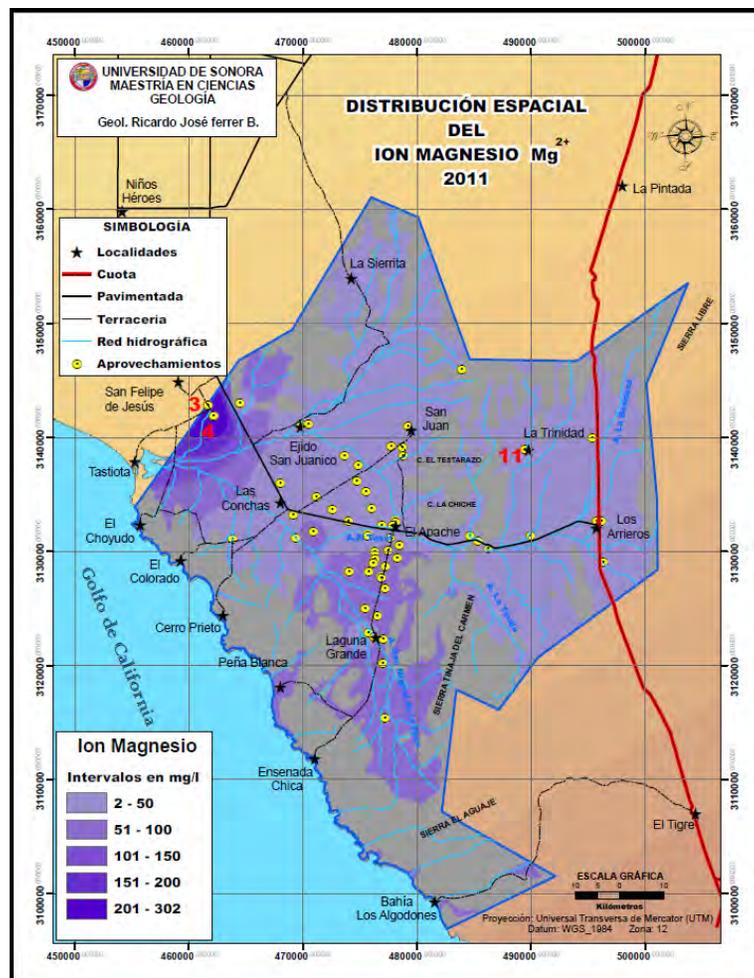


Figura V.15.- Distribución espacial del ion magnesio.

V.5.7.- Potasio

El ión potasio K^{+1} , corresponde a sales de muy alta solubilidad y difíciles de precipitar. La presencia de este ion es menos común que el sodio en las rocas ígneas, pero es más abundante en las rocas sedimentarias, su presencia se debe a la descomposición meteórica de las ortoclasas y nitratos de potasio, también puede provenir de algunas arcillas.

En la naturaleza se encuentra en porción inferior a 10 veces del sodio. La concentración normal en las aguas subterráneas suele ser inferior a 10 mg/l y en el agua de mar alrededor de 400 mg/l.

La Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) no establece un límite máximo permisible para uso y consumo humano de potasio. Sin embargo, Custodio y Llamas 1996, fija las concentraciones para agua potable hasta 10 mg/l de potasio.

En el área de estudio los valores de potasio van de 0.78 a 40.12 mg/l (Anexo H); tan solo 29 de los aprovechamientos sobrepasan los 10 mg/l; este valor disminuye hacia el norte de la zona de explotación y hacia el área de Los Arrieros. El valor máximo se ubica de nueva cuenta en el área El Pedernal con 104.40 mg/l y con la clave de campo 4 (Figura V.16).

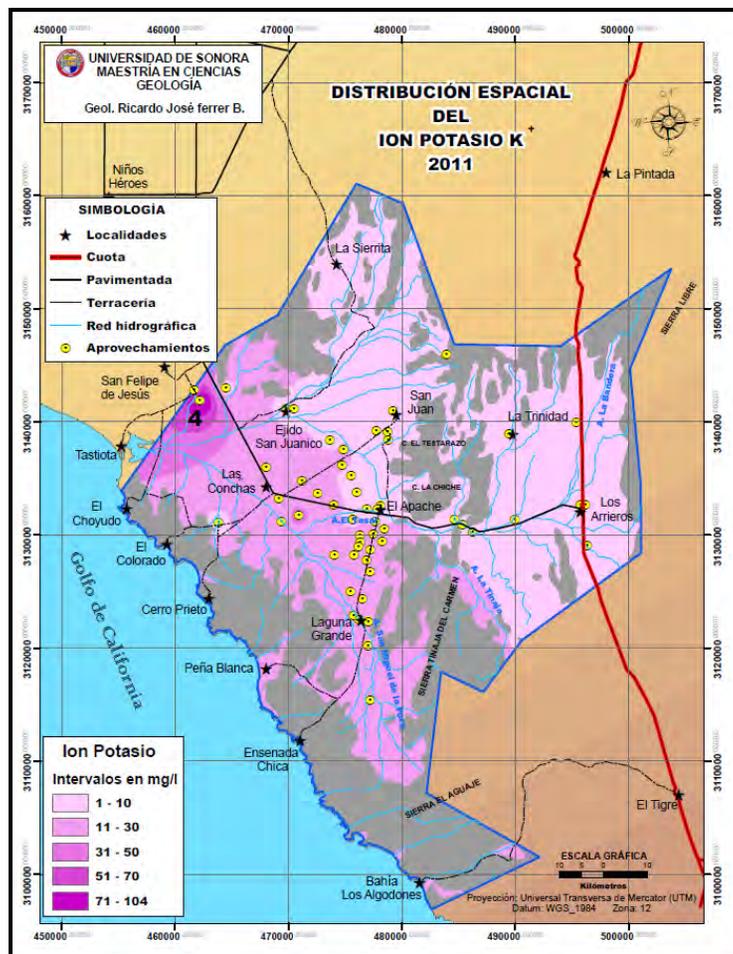


Figura V.16.- Distribución espacial del ion potasio.

V.5.8.- Sodio

El ion sodio (Na^{+1}) presenta una solubilidad muy elevada y muy difícil de precipitar, suele ir asociado a cloro, aunque no siempre (Custodio & Llamas, 1983). Este metal alcalino-térreo constituye uno de los más abundantes en la naturaleza, proviene de la disolución de la mayoría de las rocas y suelos, en altas concentraciones se encuentra en salmueras, agua de mar, desperdicios industriales y drenaje; se presenta como catión univalente y generalmente no participa en procesos de tipo redox, es afectado por reacciones de intercambio catiónico, especialmente cuando existe material litológico que contiene algún tipo de arcilla (Hem, 1985).

Las aguas con concentraciones elevadas de sodio son perjudiciales a las plantas al reducir la permeabilidad de los suelos. Aguas con contenidos elevados de bicarbonato de sodio origina problemas de espumas en calderas (Custodio & Llamas, 1983). El sodio es uno de los iones responsables de toxicidad específica en los cultivos.

El ion sodio para la zonas de recarga en ésta área de estudio, pudiese provenir de la liberación de algunos constituyentes de las rocas ígneas, principalmente basaltos y riolitas por el ataque a los minerales del grupo de los feldespatos y plagioclasas.

El contenido en el aguas subterránea según la NOM-127 que establece como límite 200 mg/l (Tabla V.1).

Las concentraciones de sodio para el acuífero van desde los 29.89 a 3,784.15 (Anexo H). De acuerdo a la norma mencionada, 42 muestras de agua de un total de 55 se pasan del límite, es decir el 76% se encuentran por encima de la norma (Figura V.17).

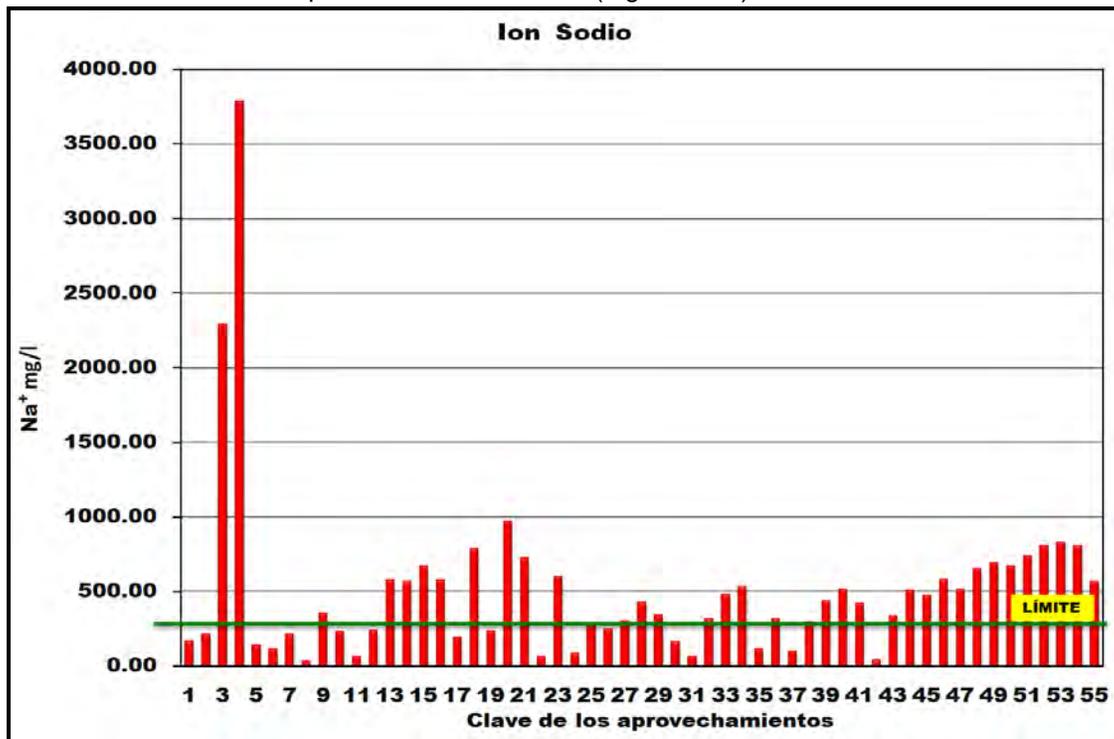


Figura V.17.- Concentraciones de sodio y su límite conforme a la NOM-127.

Las muestras que se encuentran por encima del límite de la norma, se observan más claramente en la Figura V.18. Se encuentran ampliamente distribuidas al poniente, noroeste, sur y centro del área de estudio. Los valores que no superan la norma, están entre 29.89 y 163.23 mg/l ubicándose principalmente en la parte este del acuífero y en forma aislada al centro. Los valores máximos se localizan al noroeste del acuífero, con valores de 2,289.80 y 3,784.15 mg/l, con clave de campo 3 y 4 respectivamente. Las aguas de mar contienen alrededor de 11,000 mg/l de este ion.

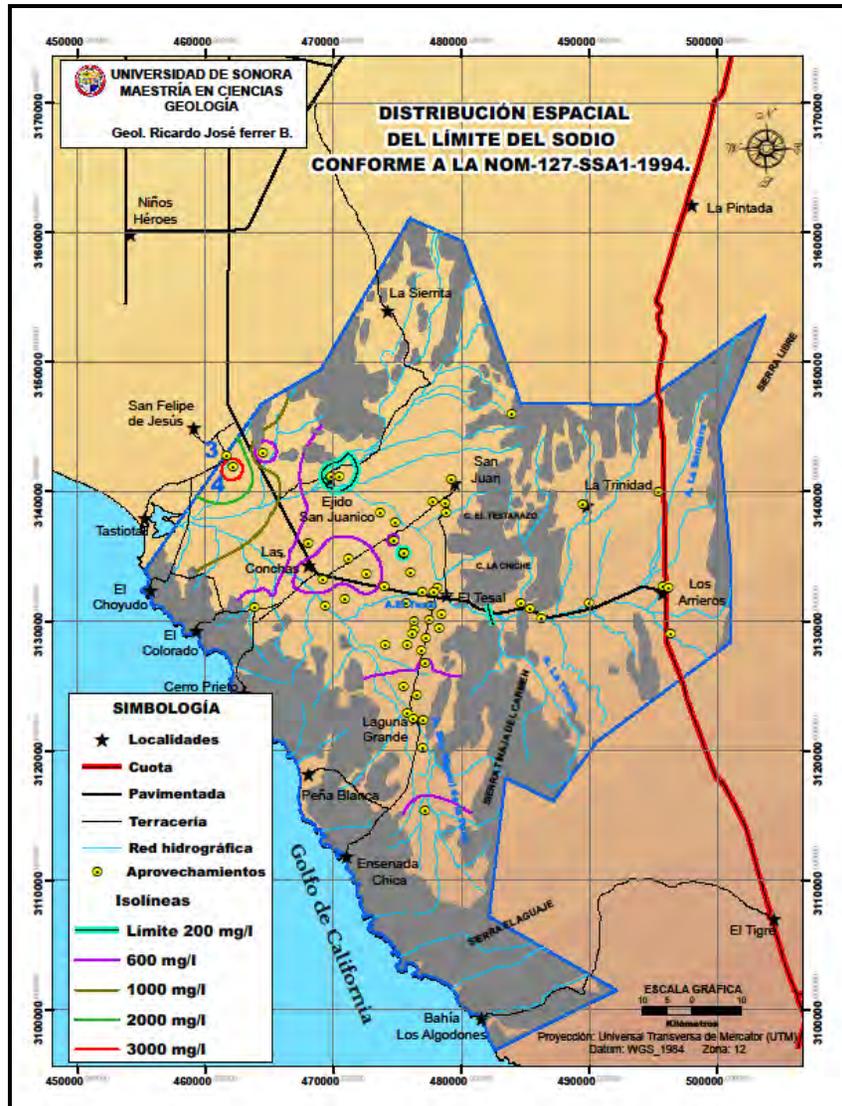


Figura V.18.- Distribución espacial del límite de sodio conforme a la NOM-127.

V.5.9.- Cloruros

El ion cloruro (Cl^{-1}) forma sales muy solubles, suele asociarse con el ión Na^{+1} , esto en aguas muy salinas.

Las aguas con cloruros pueden ser muy corrosivas debido al tamaño del ión que puede penetrar

la capa protectora en la inter-fase óxido-metal y reaccionar con el hierro estructural.

La mayor parte del ion cloruro que se encuentra en las aguas subterráneas suele proceder de cuatro fuentes principales: del agua marina atrapada en el interior de los sedimentos, de la disolución de la sal común de los minerales existentes en las formaciones evaporíticas, de la concentración por evaporación de los cloruros presentes en el agua de lluvia y por la disolución de las partículas de material sólido existentes en la atmósfera, especialmente en las zonas áridas, como fuente artificial pueden ser aguas negras procedentes de la industria y las ciudades (Hem, 1985; Custodio y Llamas, 1989).

El agua para uso y consumo humano conforme a “Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994” es de 250 mg/l (Tabla V.1). Las concentraciones de cloruro varían desde 3.55 a 6,345.55 mg/l (Anexo H). De las 55 muestras 39 presentan un valor superior a 250 mg/l y únicamente 16 están por debajo de la norma (Figura V.19).

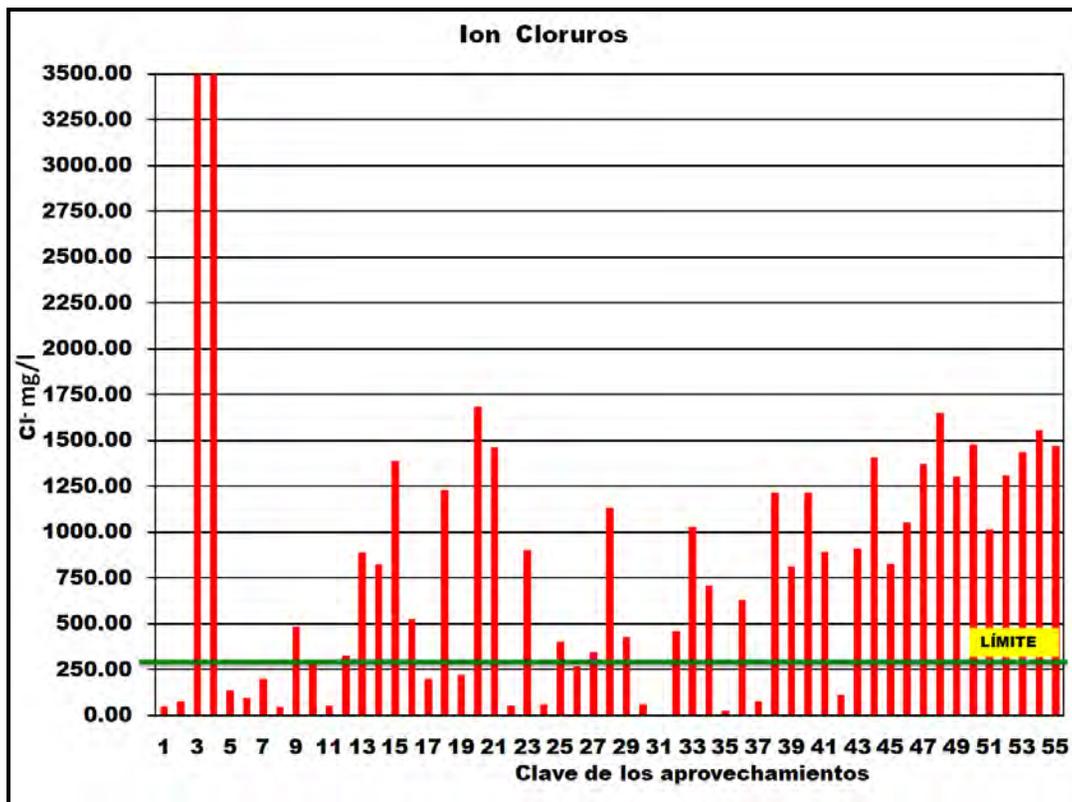


Figura V.19.- Concentraciones de cloruro y su límite conforme a la NOM-127.

La distribución en el área de estudio: porción oriental (zona de Los Arrieros), los valores van de 3.55 (clave de campo 31) a 114.65 mg/l; porción noroccidental (área de El Pedernal), es donde se encuentran los valores máximos de cloruro, estos son de 4,466.70 y 6,345.55 mg/l, los cuales están representados con la claves de campo 3 y 4 (Figura V.20); en el resto del acuífero los valores fluctúan de 98 a 1,684.94 mg/l.

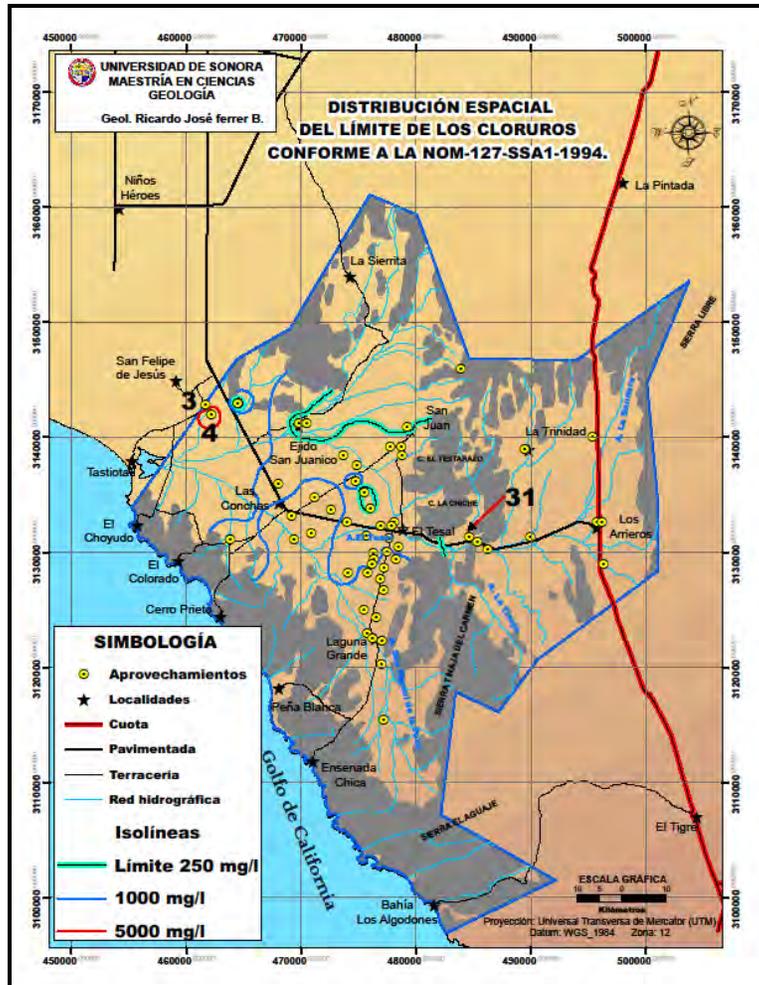


Figura V.20.- Distribución espacial del límite del cloruro conforme a la NOM-127.

V.5.10.- Sulfatos

La presencia de este elemento (SO_4^{2-}) tiene su origen principalmente en la disolución de rocas y suelos que contienen yesos, hierro y compuestos sulfurosos, comúnmente se presenta en aguas de drenaje de minas y algunos desechos industriales, así como por el uso de agroquímicos sulfatados (Hem, 1985); la concentración de este elemento puede causar problemas a la salud humana cuando se consume agua con valores superiores al límite permisible; por lo que la "Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994", establece como límite máximo para consumo humano de 400 mg/l (Tabla V.1). La concentración de este ion va desde 0 hasta 426.36 mg/l (Anexo H). Únicamente una muestra supera el límite permisible, cuyo valor es de 426.36 mg/l (Figura V.21).

La presencia de este elemento se encuentra en toda el área de estudio (Figura V.22) y se distribuye de la siguiente forma: las muestras con valores menores a 50 mg/l se ubican al oriente, centro-norte y noroeste del acuífero; el valor menor está en la zona de Los Arrieros (clave de campo numero 31); los valores entre 50-100 mg/l, se hallan porción central del acuífero; y para la parte sur de éste, los valores aumentan de 100 a 200 mg/l. El valor de mayor concentración se sitúa al sur del campo San Juan (clave de campo 13).

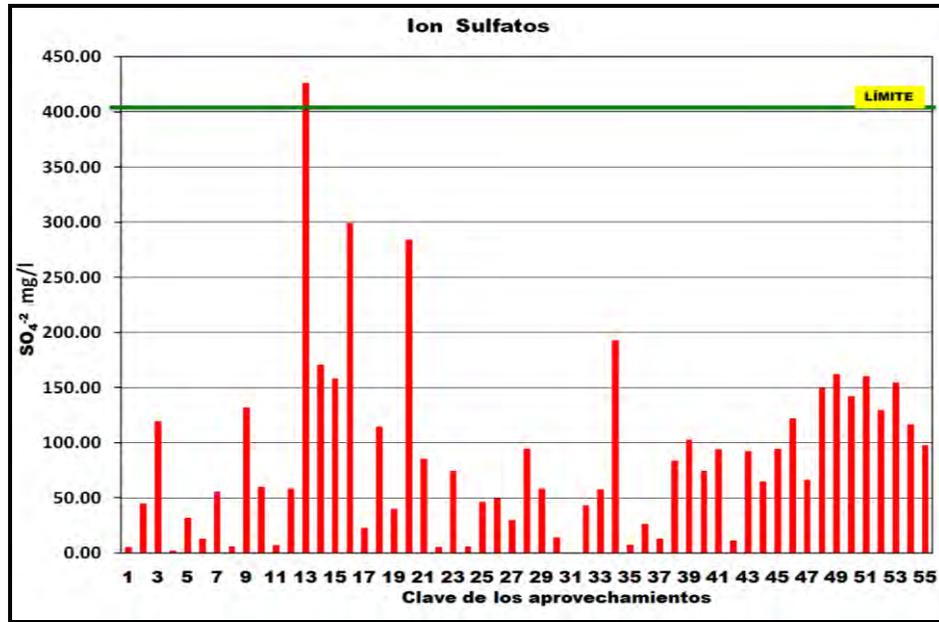


Figura V.21.- Concentraciones de sulfato y su límite conforme a la NOM-127.

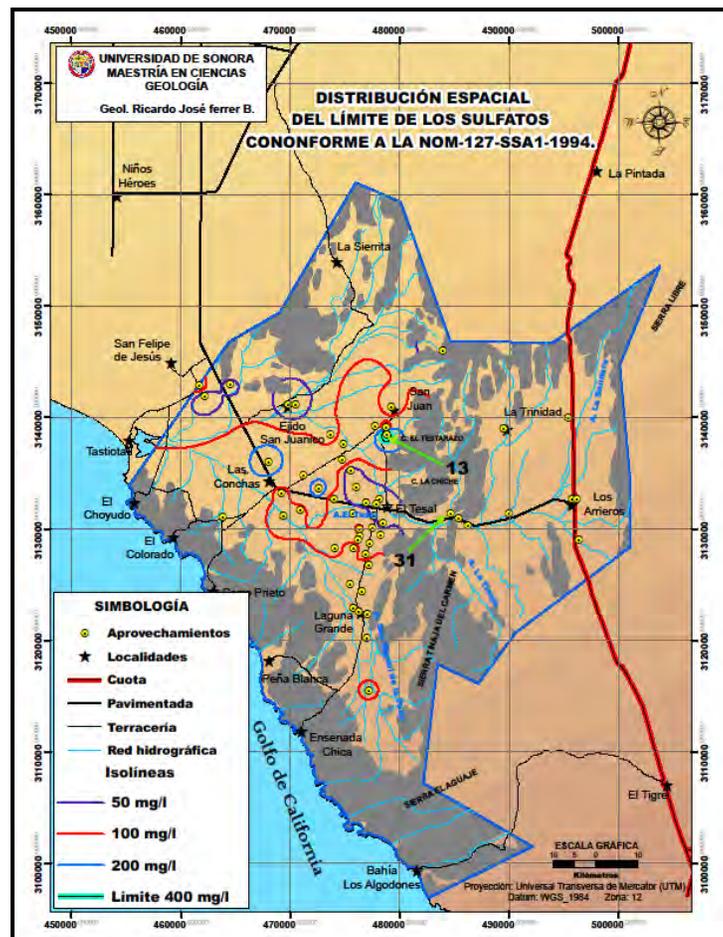


Figura V.22.- Distribución espacial del límite del sulfato conforme a la NOM-127.

V.5.11.- Nitratos

Aunque las rocas ígneas contienen pequeñas cantidades de nitrato soluble, la mayor parte de este elemento es de origen orgánico o proviene de contaminación industrial, agrícola, urbana y/o el uso de fertilizantes (Hem, 1985).

Las concentraciones de los nitratos en el acuífero varían desde 0 hasta 49.14 mg/l (Anexo H).

El ion nitrato NO_3^- , según la "Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994", establece como límite máximo en agua para uso y consumo humano de 10 mg/l (Tabla V.1). Esta anomalía abarca toda la zona hidrogeológica; ya que 42 de las 55 muestras pasan el límite de la norma (Figura V.23).

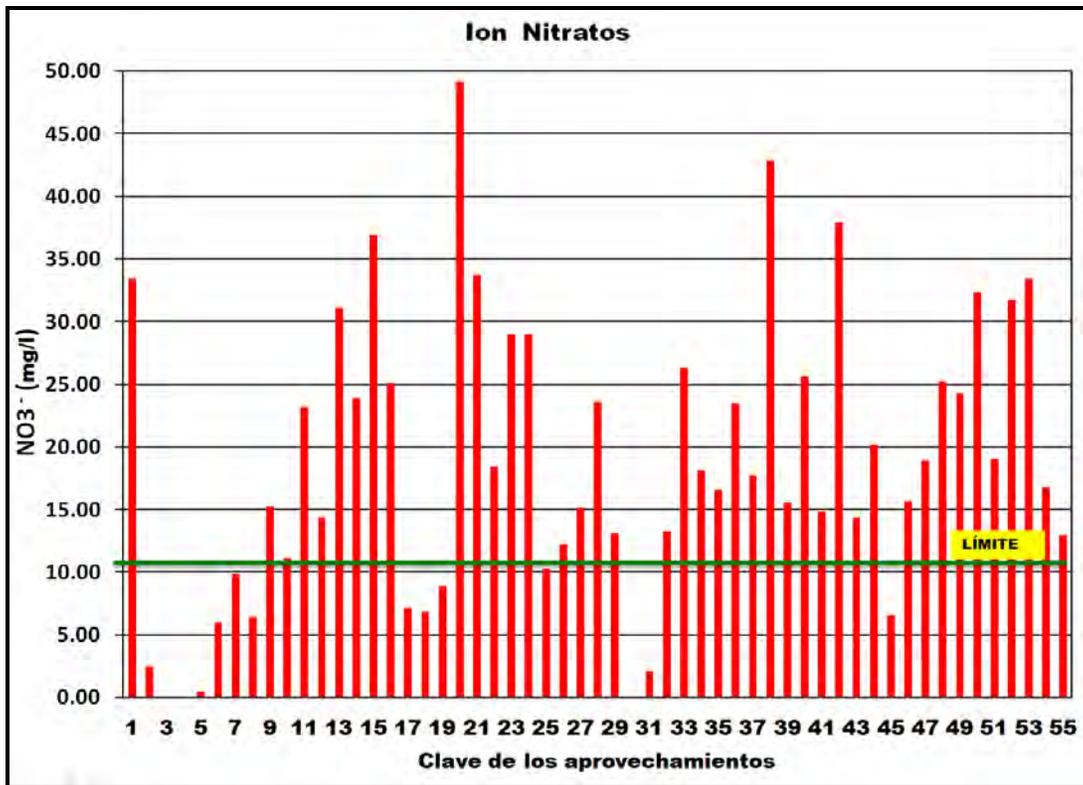


Figura V.23.- Concentraciones de nitrato y su límite conforme a la NOM-127.

Los valores máximos se localizan al centro del área de estudio, cuyos valores son 42.88 y 49.14 mg/l (claves de campo 38 y 20) y los valores mínimos se ubican en la zona de El Pedernal, esto en la parte occidental del acuífero, los valores van de 0 (claves de campo 3 y 4) a 2.48 mg/l con clave campo 2 (Figura V.24).

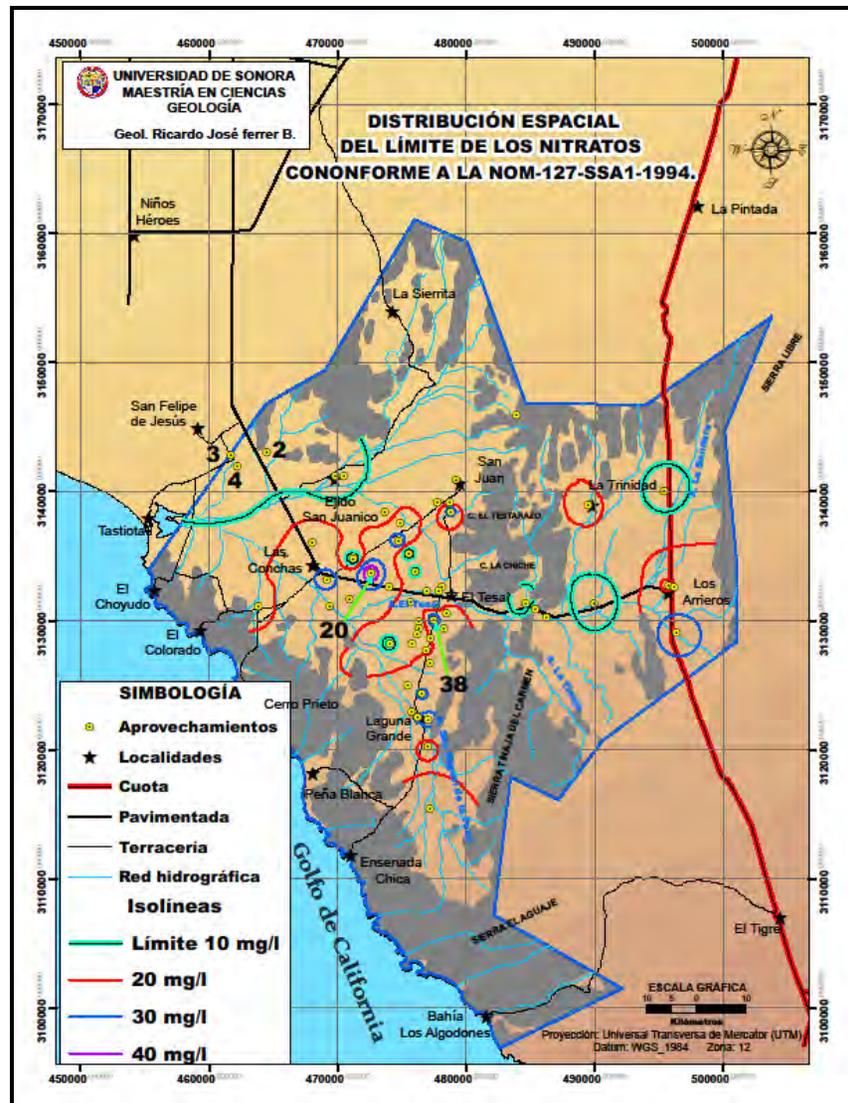


Figura V.24.- Distribución espacial del límite del nitrato conforme a la NOM-127.

V.5.12.- Bicarbonatos

El ion bicarbonato (HCO_3^{-1}), una de las fuentes principales de donde puede provenir son de la disolución de calizas y dolomías. En la mayoría de las aguas subterráneas naturales con pH inferior a 8.30, la especie carbonatada dominante es el ión bicarbonato. En general en estas aguas la concentración suele variar entre 50 y 400 mg/l, aunque puede alcanzar valores superiores. Concentraciones de hasta 1,000 mg/l pueden encontrarse en aguas pobres en Ca y Mg. El único inconveniente que puede surgir con las altas concentraciones de bicarbonatos, es que forman incrustaciones en las tuberías.

No se conocen efectos negativos en cuanto al contenido de bicarbonatos en agua para uso y consumo humano, por lo que la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SA1-1994) no establece un límite máximo permisible en este sentido.

En los resultados del laboratorio (Anexo H) las concentraciones de bicarbonato van de 52.17 y 1,405.90 mg/l. La mayoría de la muestras están por debajo de los 250 mg/l.

En la porción oriental del acuífero los valores van desde 142 a 351.48 mg/l; en esta zona de Los Arrieros los valores aumentan desde el área de recarga hacia el centro del área de estudio. Las porciones centro norte y sur, las concentraciones son muy semejantes y estos varían desde 104.34 a 216.74 mg/l. En el occidente los valores van desde 205.94 a 378.93. Finalmente, en la parte noroeste se localizan los valores extremos del acuífero, el mínimo es de 52.17 mg/l y el máximo de 1,405.90 mg/l, las claves de campo son 3 y 4 (Figura V.25).

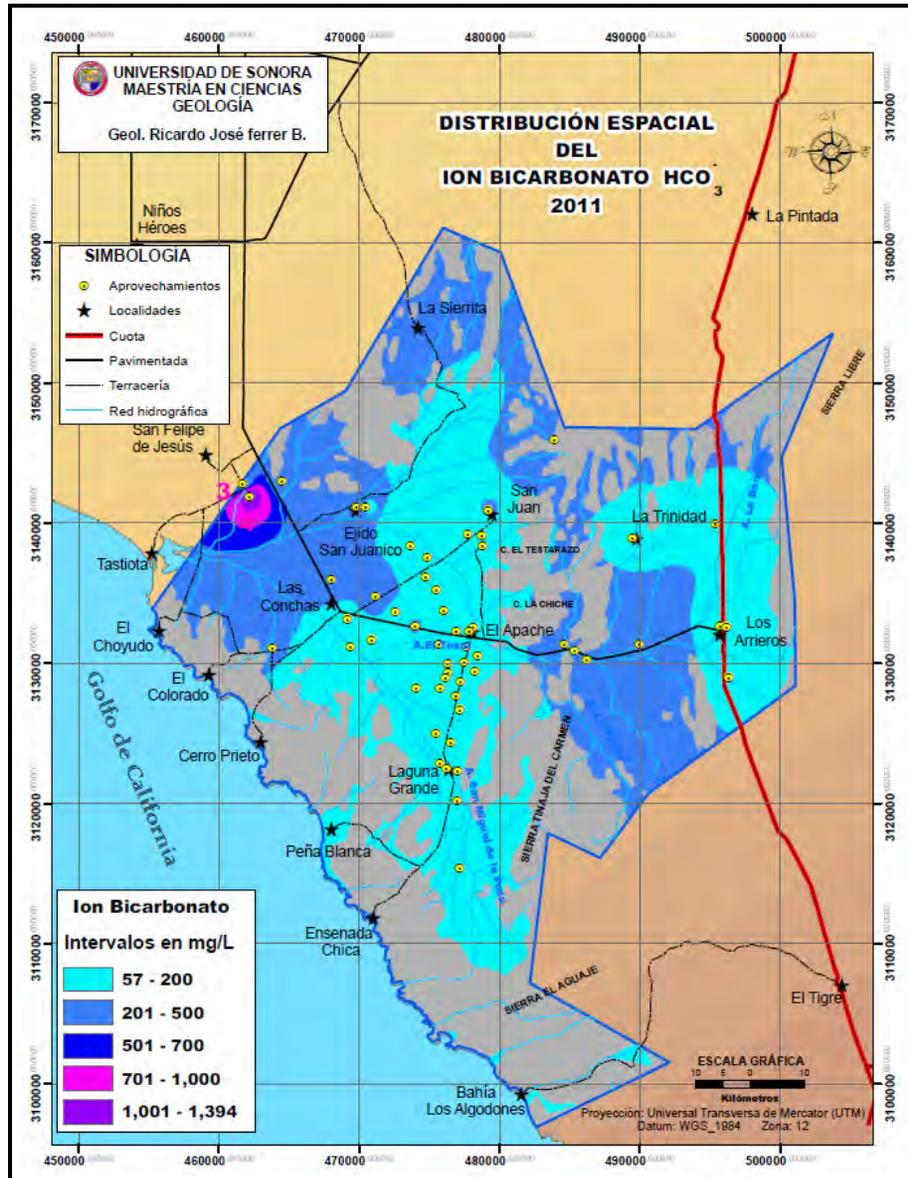


Figura V.25.- Distribución espacial del ion bicarbonato.

V.5.13.- Dureza total CaCO_3

Es la suma de la concentración de calcio y magnesio expresada en términos de CaCO_3 (Appelo y Postma, 1996). La dureza produce incrustaciones en tuberías, además de limitar la efectividad de los jabones o detergentes utilizados para la limpieza.

V.5.13.1.- Límite de la dureza CaCO_3

El límite máximo para agua de uso y consumo humano es de 500 mg/l, conforme a la Norma Oficial Mexicana "NOM-127-SSA1-1994" (Tabla V.1). Las concentraciones reportadas por el laboratorio varían de 24.02 a 1,627.30 mg/l (Anexo H), por lo que más de la mitad de las muestras superan este límite (Figura V.26).

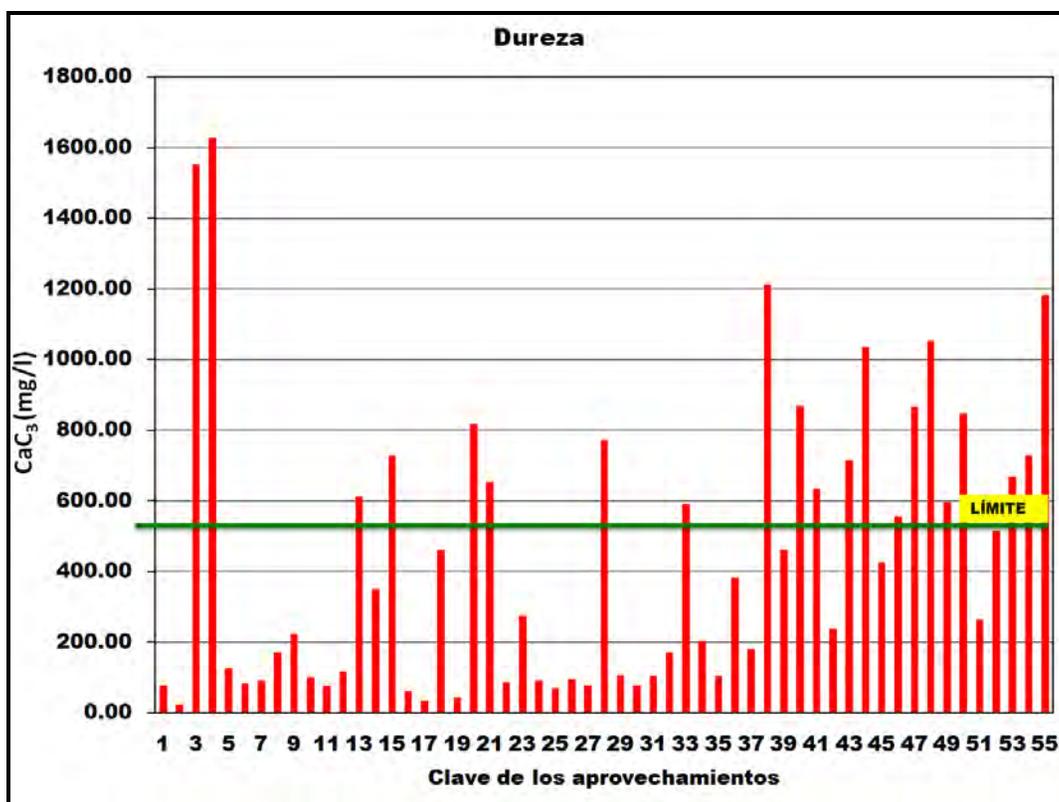


Figura V.26.- Concentraciones de dureza (CaCO_3) y su límite conforme a la NOM-127.

Los valores superiores a los 500 mg/l se localizan en las zonas centro-sur, centro-poniente, sur y noroeste, estos valores fluctúan desde los 514.41 a 1,627.30 mg/l. En la porción oriental los valores no superan el límite de la norma y estos van desde 76.56 a 237.54 mg/l. En cambio, en la parte noroeste del área se encuentra los valores extremos, el mínimo con clave de campo 2 y el máximo con clave 4 (Figura V.27).

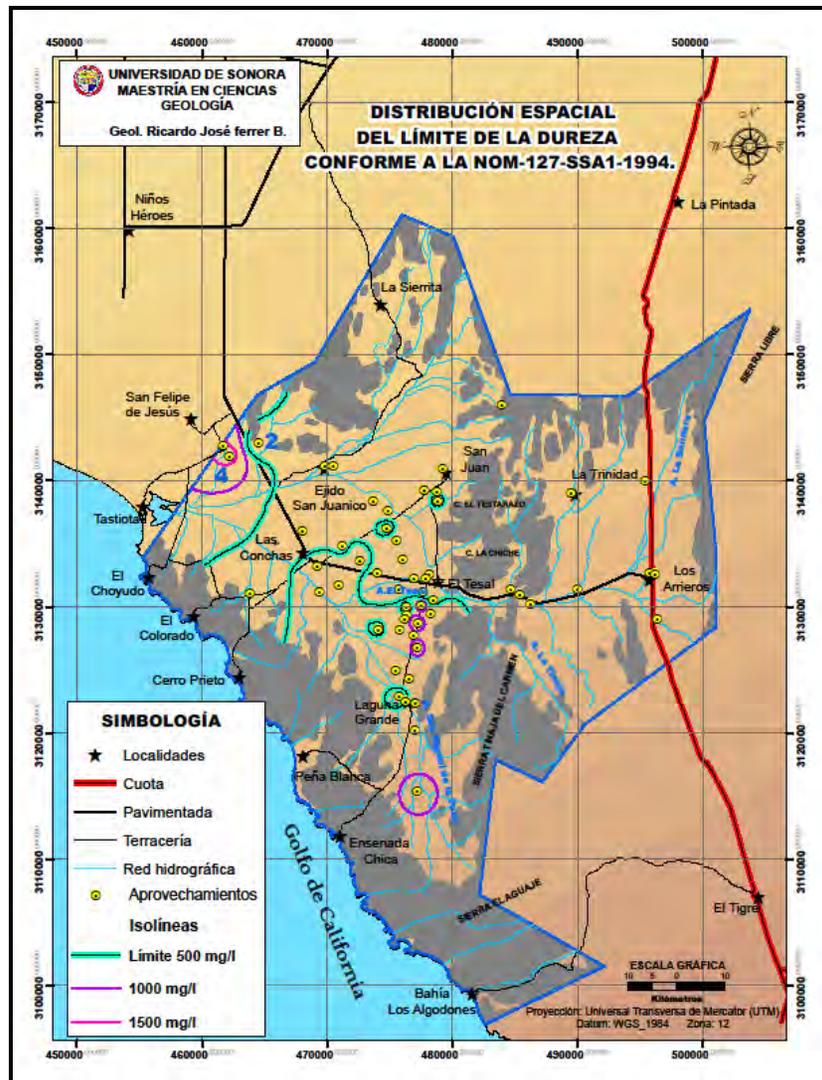


Figura V.27.- Límite de la dureza del agua conforme a la NOM-127.

V.6.- Tipos de agua subterránea

Existen diversos tipos de agua, los cuales se han clasificado de acuerdo a parámetros físico o químico.

V.6.1.- Clasificación del agua subterránea por conductividad eléctrica (CE)

Los valores de conductividad eléctrica que se obtuvieron del laboratorio van desde 439 a 20,380 $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ (Anexo H).

Hay un criterio representativo para la interpretación de la calidad del agua en función de la medición de la conductividad eléctrica, es el establecido por la American Potability and Health Association (APHA, 1995), que clasificó la calidad del agua en cuatro rangos y son: dulce, salobre, agua de mar y salmuera (Tabla V.2).

Clasificación	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ a 18 °C)
Agua Dulce	100 - 2,000
Agua Salobre	2,000 - 5,000
Agua de Mar	5,000 - 45,000
Salmuera	45,000 - 100,000

Tabla V.2.- Clasificación de salinidad American Potability and Health Asociation (1995).

Conforme a la clasificación de APHA la conductividad eléctrica queda comprendida en tres rangos: agua dulce, valores con concentraciones de 439 a 1,723 μScm^{-1} (microsiemens/centímetro), se ubican al centro, norte y oriente del acuífero (Figura V.28); el segundo rango agua salobre, con valores entre 2,019 a 4,900 μScm^{-1} , dominan las porciones centro, sur y poniente del área de estudio; el último rango agua de mar, tiene valores entre 5,120 y 20,380 μScm^{-1} , el último rango agua de mar, tiene valores entre 5,120 y 20,380 μScm^{-1} , se ubican en forma aislada en el acuífero, tiene presencia al noroeste, centro y centro sur del acuífero, el incremento de la conductividad eléctrica es debido a la influencia de la intrusión marina (Figura V.28).

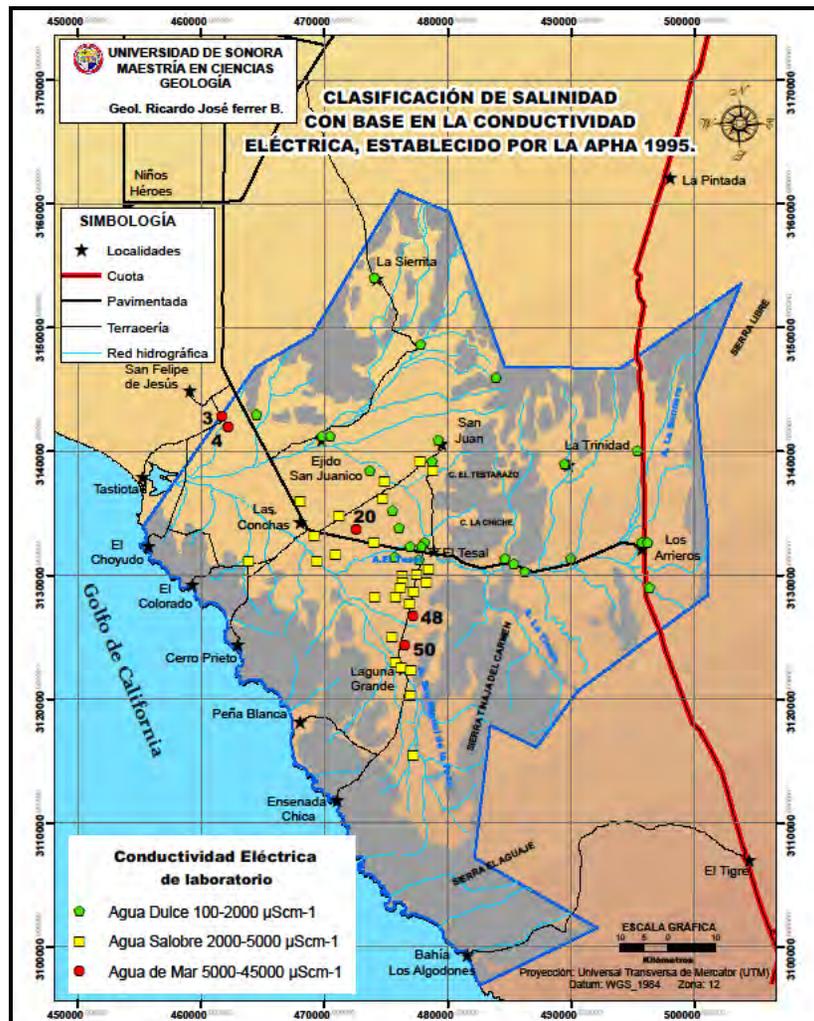


Figura V.28.- Clasificación de APHA (1995).

V.6.2.- Clasificación del agua subterránea por concentración de CaCO_3

Dentro de la clasificación del agua por su dureza que presenta la Organización Mundial de la Salud (OMS, 1987), esta clasificación se presenta en la Tabla V.3. En el área de estudio los valores de concentración de dureza van desde 24.02 a 1,627.30 mg/l.

Concentración (mg/l CaCO_3)	Tipos de agua
0 – 60	Blanda
61 – 120	Moderadamente dura
121 – 180	Dura
> 180	Muy dura

Tabla V.3.- Clasificación del agua por su dureza (CaCO_3) de acuerdo a la OMS.

En el acuífero existen toda esta gama de tipos de agua, pero sobresalen dos tipo: la primera de ellas con una representatividad del 60% (Figura V.29) son las aguas muy duras, ya que 33 de las 55 muestras de agua tienen concentraciones mayores a 180 mg/l, estas se ubican principalmente al sur y centro-oeste del acuífero; el segundo tipo agua es la moderadamente dura (15 muestras que representan el 27%), encontrándose desde el centro hacia el oriente y del centro hacia el norte del acuífero (Figura V.30).

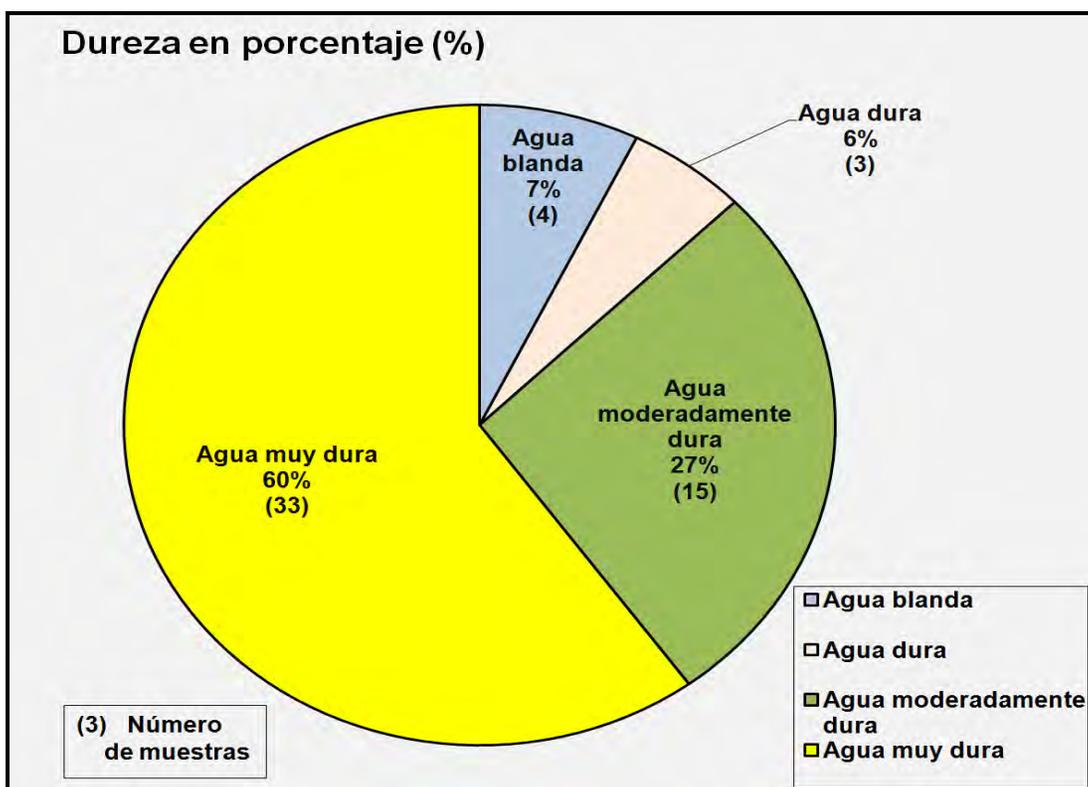


Figura V.29.- Dureza en porcentaje de acuerdo al número de muestras.

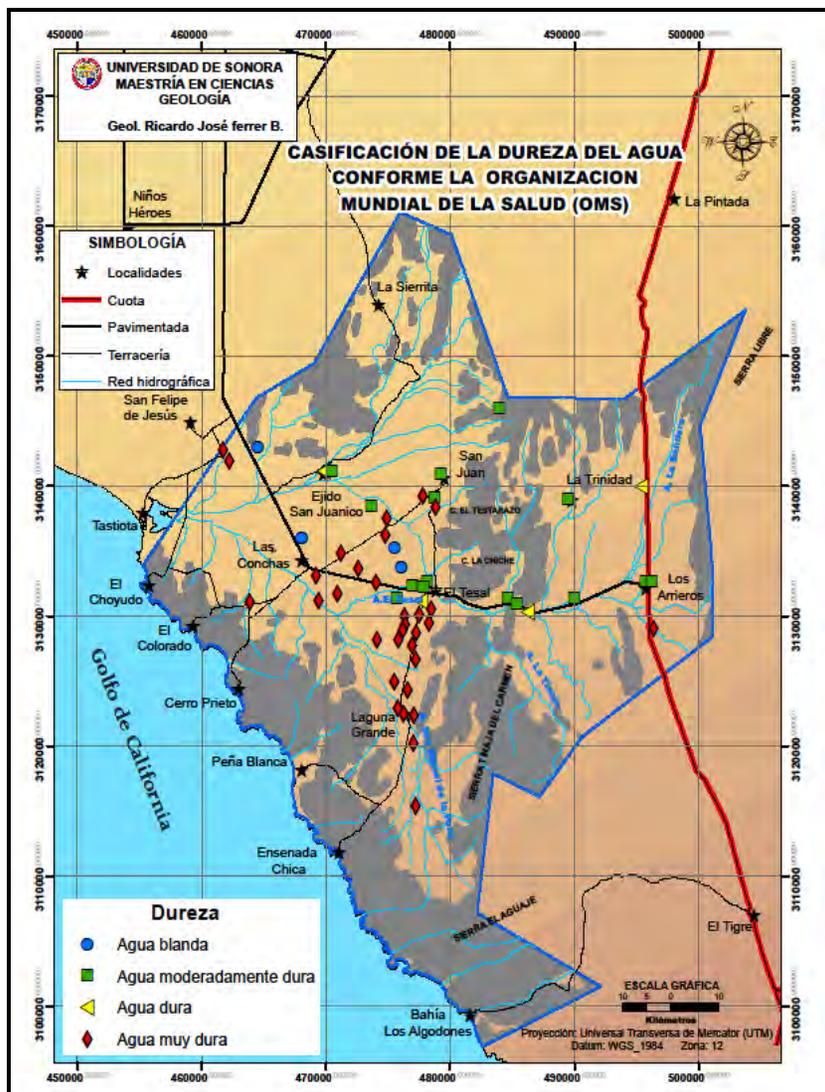


Figura V.30.- Clasificación de la dureza del agua de acuerdo a la OMS.

V.6.3.- Clasificación de Frezee y Cherry

La siguiente clasificación del agua que se muestra en la Tabla V.4 es de acuerdo a su contenido de sólidos totales disueltos o de su salinidad (Frezee y Cherry, 1979).

Clasificación	STD (mg/l)
Agua Dulce	0 – 1,000
Agua Salobre	1,000 - 10,000
Agua Salina	10,000 - 100,000
Salmuera	> 100,000

Tabla V.4.- Clasificación de aguas de Frezee y Cherry.

La distribución en el área de estudio es como sigue: el 60% de las muestra se clasifican como agua salobre, ocupan las porciones sur y oriente del acuífero; el 38% de las muestras son del tipo de agua dulce, estas se ubican principalmente al oriente, centro y norte; el porcentaje restante se localiza al noroeste y se clasifica como agua salina (Figura V.31).

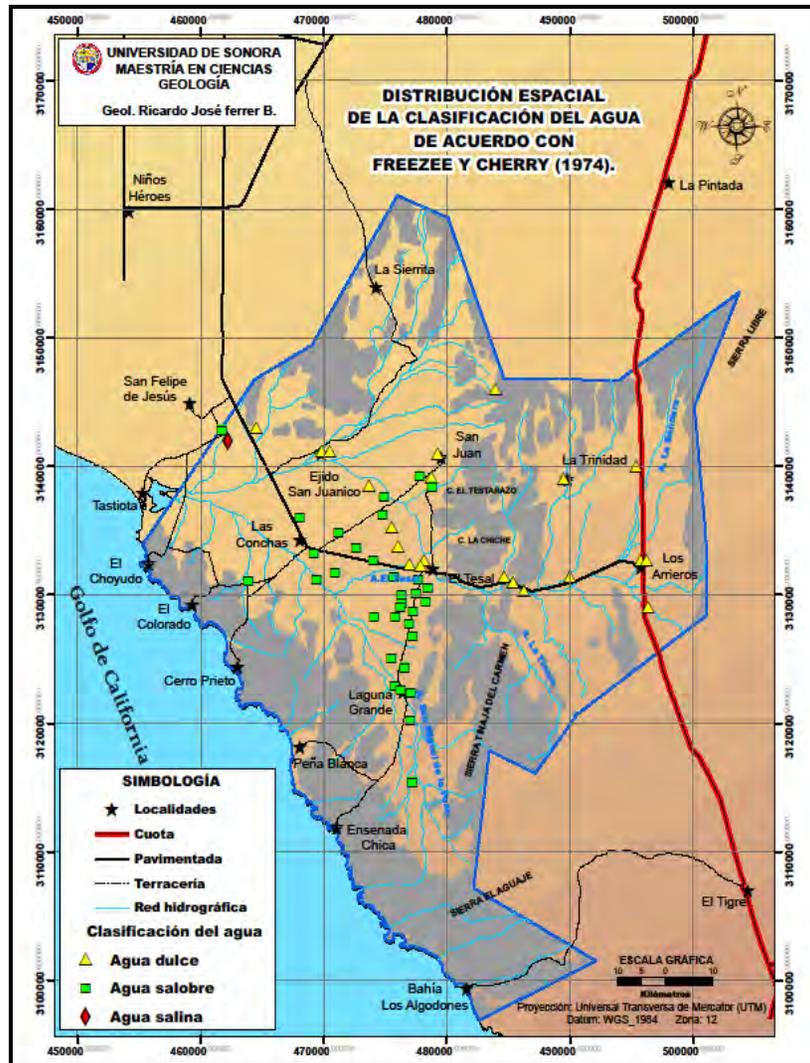


Figura V.31.- Clasificación del agua de Frezee y Cherry (1974).

En conclusión, la calidad del agua subterránea en área de estudio al paso del tiempo ha mostrado un deterioro progresivo, debido principalmente a tres factores: intrusión marina por la cercanía de la costa, depósitos evaporíticos y por la posible existencia de agua fósil.

V.7.- Clasificación de familias de agua subterránea

Con la información química reportada por el laboratorio, se procedió a identificar las familias de agua por diferentes métodos, además de su representación gráfica.

V.7.1.- Clasificación de Piper

Mediante la clasificación establecida por Piper en 1944. Esta clasificación permite zonificar la presencia de diferentes tipos de familias de agua, así como para acentuar las diferencias entre tipos de aguas aún del mismo acuífero.

En el Anexo H se muestra el tipo de familia de agua a la que pertenece cada uno de los aprovechamientos y en la Figura V.32 en el diagrama de Piper se observa la distribución y clasificación de las nuestras de agua. Esto da como resultado que las 55 las muestras se agrupan en nueve tipos familias de agua.

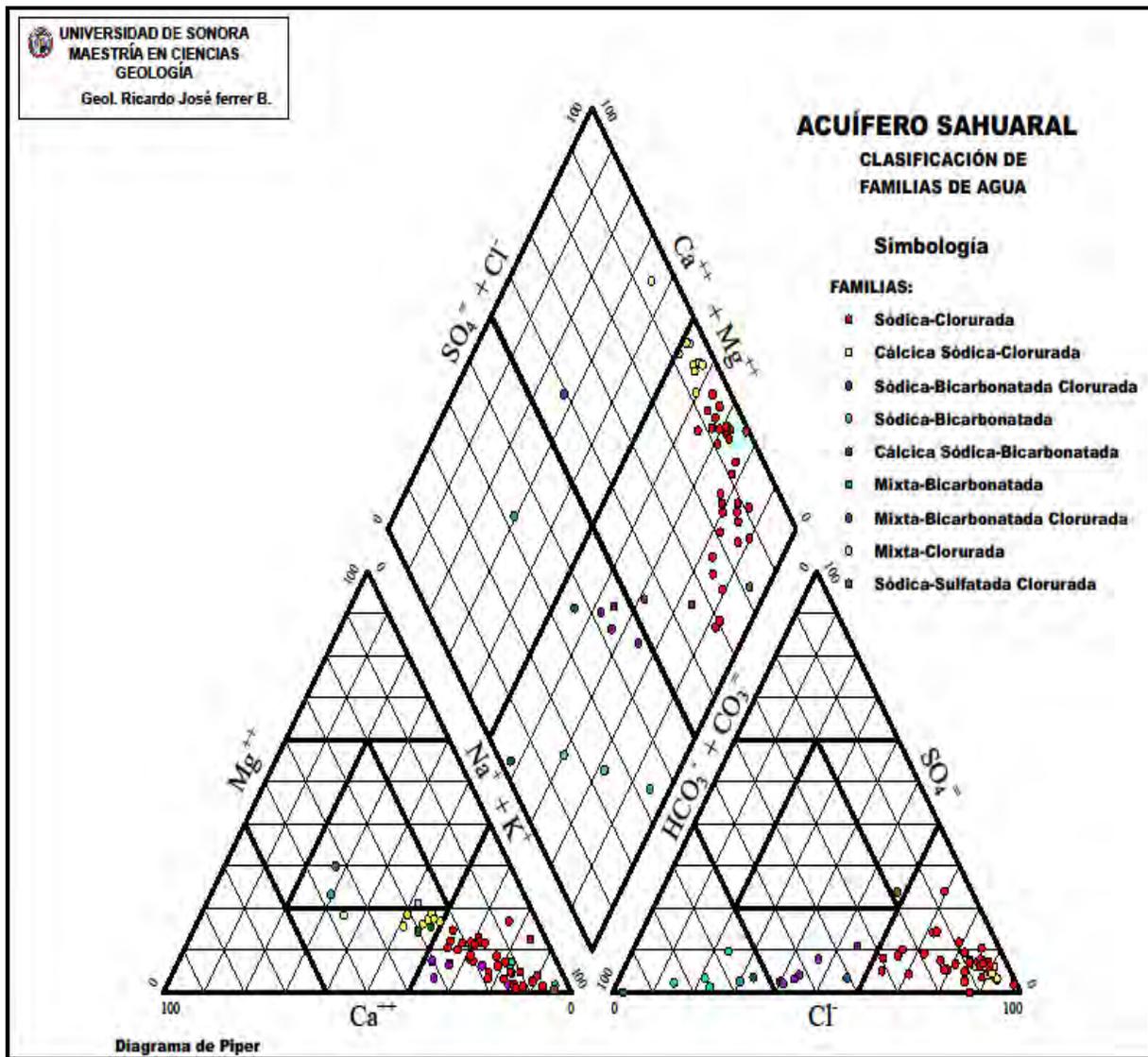


Figura V.32.- Clasificación de familias de agua de Piper para el año 2011.

En la siguiente figura (Figura V.33) se exhibe los nueve tipos de familia de agua que se tienen en el acuífero Sahuaral y el número de muestras que contienen la familia.

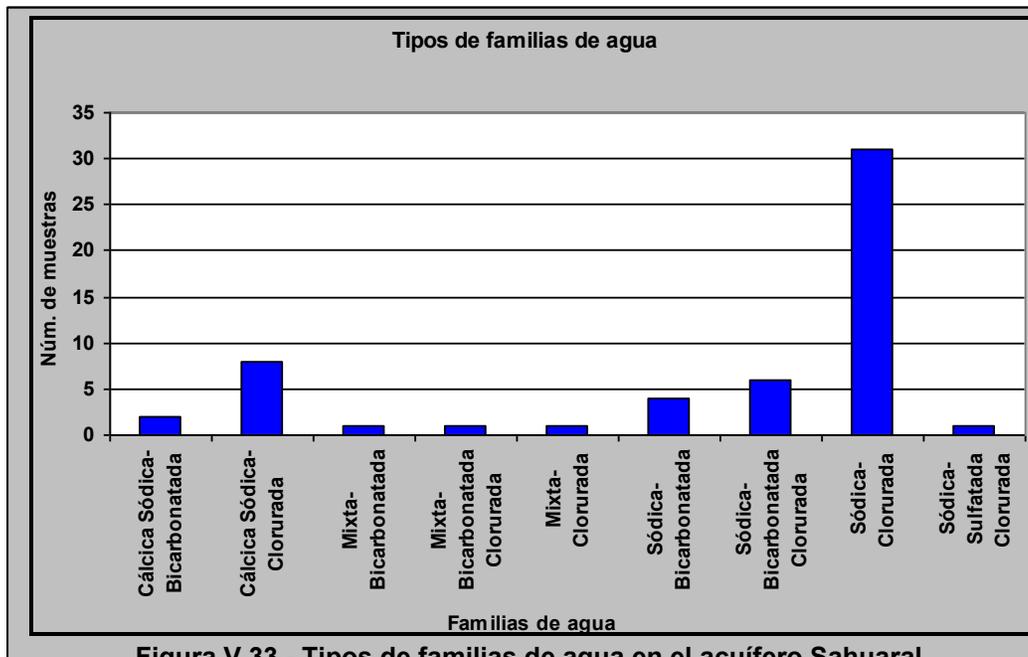


Figura V.33.- Tipos de familias de agua en el acuífero SahuaraI.

A continuación se nombran las familias en un orden de mayor a menor proporción:

- 1) Sódica-Clorurada 2) Cálctica Sódica-Clorurada 3) Sódica-Bicarbonatada Clorurada
- 4) Sódica-Bicarbonatada 5) Cálctica Sódica-Bicarbonatada 6) Mixta-Bicarbonatada
- 7) Mixta-Bicarbonatada Clorurada 8) Mixta-Clorurada 9) Sódica-Sulfatada Clorurada

V.7.1.1.- Distribución de las familias de agua en el acuífero

Como se mencionó hay nueve familias de agua en el acuífero, de estas hay cuatro familias que tienen la mayor representatividad y son (Figura V.34):

- La familia dominante en el área de estudio es la Sódica-Clorurada con 31 muestras que le corresponde el 56.36% del total de las muestras, esta familia se distribuye ampliamente en la zona de explotación, prácticamente abarca toda el área central y poniente del acuífero. Esta familia por su ubicación es posible que este influencia por dos factores: el primero sería por intrusión marina y el segundo le corresponde a un agua evolucionada por medio de intercambio iónico, que el agua sufrió a través de su paso por el medio geológico, sobre todo por los posiblemente flujos a través de horizontes evaporíticos y/o por ser aguas fósiles.
- La segunda familia es de tipo Cálctica Sódica-Clorurada con ocho muestras que equivalen el 14.55% del total de las muestras. La familia se encuentra al sureste del campo San León.
- Una tercera familia, es Sódica-Bicarbonatada Clorurada con seis muestras, le toca un porcentaje del 10.91, se halla al norte y oriente del acuífero, se encuentra cerca de las potenciales fuentes de recarga.

- La cuarta familia de agua representativa con tan solo cuatro muestras, que equivale el 7.27% del total de las muestras, es Sódica-Bicarbonatada. Ésta familia se encuentran aún más cerca de las áreas de recarga que la familia anterior.

Además de estas familias mencionadas se encuentran otras de menor proporción como son: Cálcica Sódica-Bicarbonatada con dos muestras y con una muestra, Mixta-Bicarbonatada, Mixta-Bicarbonatada Clorurada, Mixta-Clorurada y Sódica-Sulfatada Clorurada.

En la parte oriental del acuífero se tiene cinco familias de agua de las nueve presentes en área, estas son: Cálcica Sódica-Bicarbonatada, Mixta-Bicarbonatada, Mixta-Bicarbonatada Clorurada, Sódica-Bicarbonatada y Sódica-Bicarbonatada Clorurada lo que quiere decir que estas aguas provienen de varias zonas de recarga o que provienen de flujos regionales debido a que algunas de estas aguas se encuentran evolucionadas.

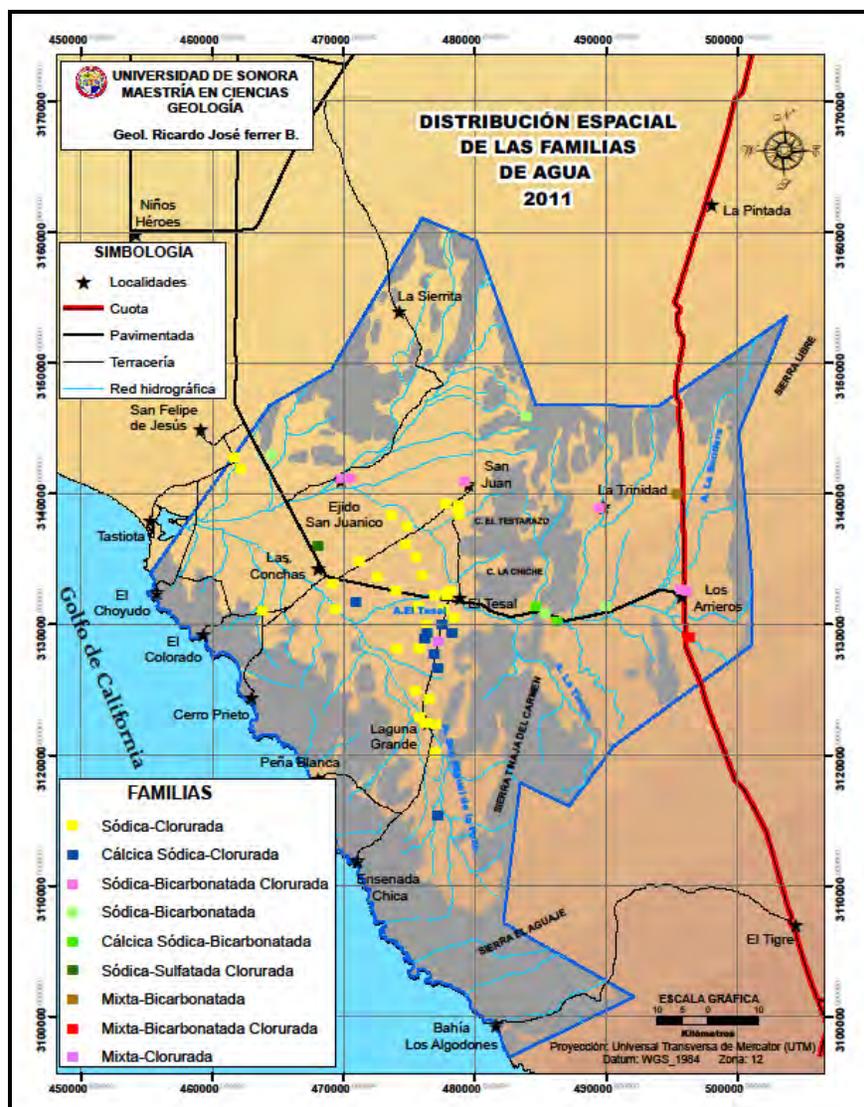


Figura V.34.- Distribución de las familias de agua en el acuífero Sahuaral.

V.7.2.- Clasificación de Stiff

La representación gráfica propuesta por Stiff (1951) permite comparar con rapidez los resultados de diferentes análisis, como se presenta en el siguiente ejemplo para diferentes tipos de agua (Figura 35).

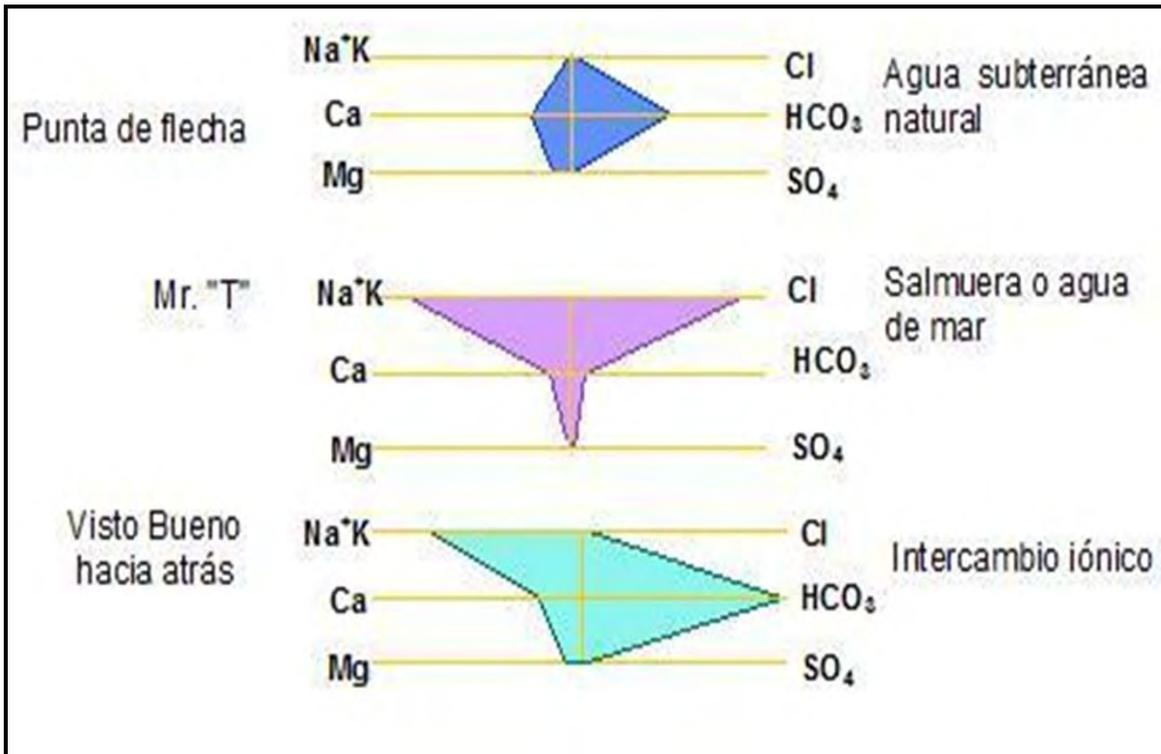


Figura V.35.- Ejemplos de diagramas típicos de Stiff.

En la Figura V.36 se presentan los polígonos de Stiff para las muestras seleccionadas de 2011. De las 31 muestras seleccionadas, once de ellas pasan de los 1,000 mg/l y 19 sobrepasan los 250 mg/l, que es el límite permisible según la NOM 127. Se observa que el pozo 4 presenta la mayor concentración de cloruro, esto debido a su cercanía a la costa, por lo que esta muestra se relaciona con intrusión marina; a diferencia de los que se ubican en las porciones poniente, centro, y sur, que aunque poseen altos índices de cloruro y sodio, estos están relacionados a posibles estratos evaporíticos, por lo que la familia dominante Sódica-Clorurada. La porción oriental del área de estudio donde se encuentra teóricamente la zona de recarga del acuífero, se aprecia en el mapa que los polígonos tienen una ligera tendencia al ion bicarbonato, por lo que debe esperarse, que las familias de agua sean de tipo bicarbonatadas.

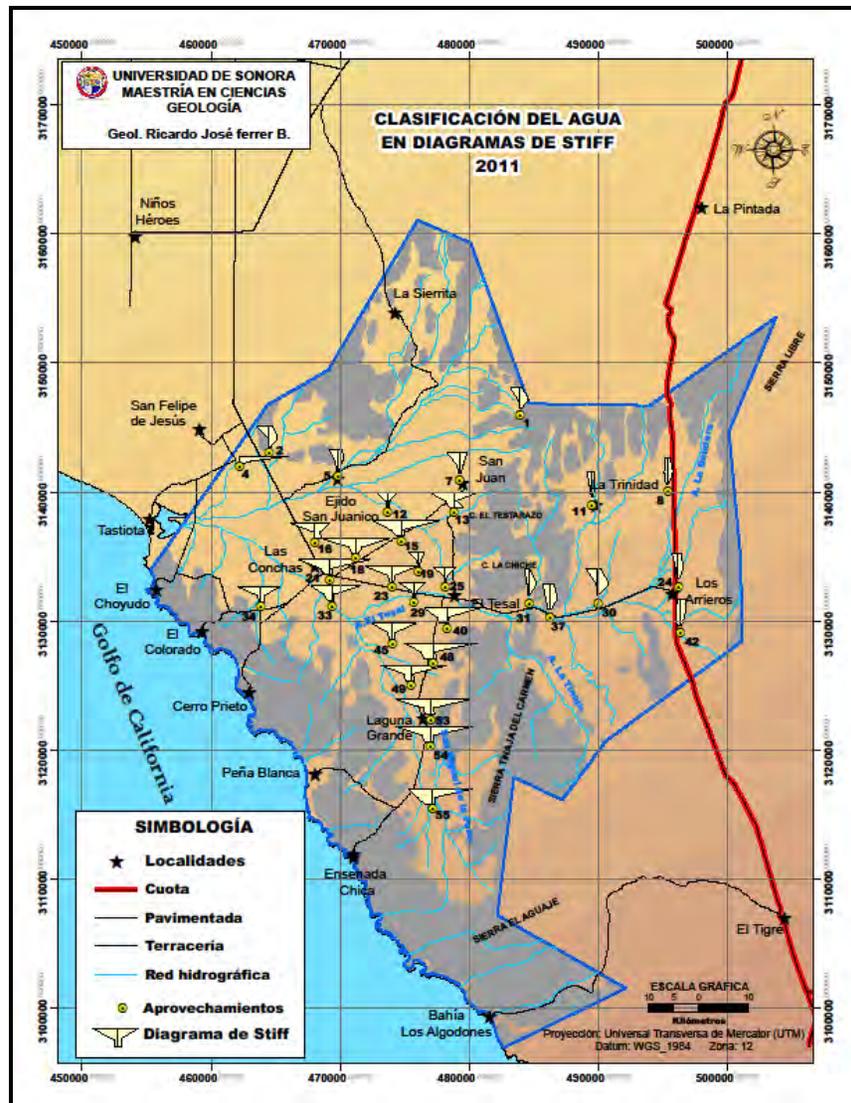


Figura V.36.- Diagramas de Stiff para el año 2011.

V.8.- Calidad del agua para riego

La CE y el Na^+ son dos parámetros fundamentales que definen la aptitud del agua para riego. El alto contenido de sales en el agua de irrigación genera un aumento de la presión osmótica en la solución del suelo, disminuyendo la adsorción de agua por parte de las plantas. Las sales, además de afectar directamente el crecimiento de las plantas, afecta la estructura del suelo, su permeabilidad y estructura, afectando indirectamente el crecimiento de la planta (Douchafour, 1984; M.L. Gómez, *op cit*).

El Na^+ en altas concentraciones en agua de riego genera una peligrosidad sódica dada por un aumento de este elemento en las posiciones de intercambio de las arcillas destruyendo la estructura del suelo, debido a la dispersión de las mismas (Douchafour, 1984). Como resultado, el suelo se vuelve relativamente impermeable y puede llegar a ser muy difícil su cultivo.

Una de las clasificaciones de agua para riego más usada en nuestro país es la de Richard (1954) para el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos (USLS, ubicado en Riverside, California). Este sistema se basa en la medida de la conductividad eléctrica del agua para determinar el riesgo de salinización del suelo y en el cálculo de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS ó, en inglés, SAR) para determinar el riesgo de sodificación o alcalinización, definido por la formula (M. Olías, J.C. Cerón, y I. Fernández, 2005; y M.L. Gómez, 2009):

$$RAS = (Na^+) / (Ca^{2+} + Mg^{2+}) / 2)^{1/2}$$

Donde: Na⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺ se expresan en meq/L.

Entonces la ecuación anterior determina el riesgo o peligro de la sodificación en base a las concentraciones absoluta y relativa de los cationes. Si la proporción de sodio (Na⁺) es alta, será mayor el peligro de sodificación; por el contrario, si predominan el calcio (Ca²⁺) y el magnesio (Mg²⁺), el peligro es menor.

Se definen cuatro clases de riesgo de salinización y otras cuatro de riesgo de sodificación (Figura V.37) resultando un total de 16 clases de agua, cada una de las cuales tiene unos condicionantes para ser utilizadas en regadío (Custodio Llamas, 1986). Ha esta clasificación también se conoce con el nombre de Normas Riverside (Orihuela-Calvo, J.C. Hernández Domínguez, S. Pérez-Mohedano y L. Marijuan de Santiago, 2005).

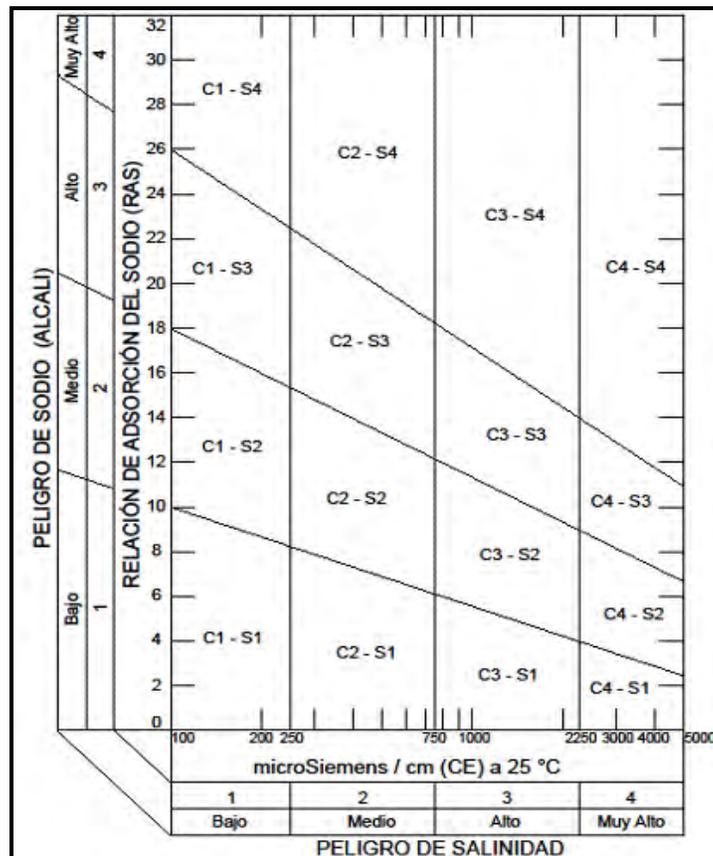


Figura V.37.- Clasificación USLS para las aguas de riego (RIVERSIDE, 1954).

Las normas Riverside se elaboraron en base dos índices, la conductividad eléctrica a 25°C (CE) y la relación de adsorción de sodio (RAS), para establecer los peligros de salinidad y sodicidad respectivamente, asociados al empleo de las aguas para riego.

Las aguas se dividen en cuatro clases con respecto a su conductividad, siendo los límites de división entre dichas clases, 250, 750 y 2,250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y otras cuatro clases con respecto a su sodicidad, basadas principalmente en el efecto que tiene el sodio intercambiable sobre la condición física del suelo.

La combinación de estos índices, CE y RAS, permite establecer 16 diferentes tipos o clases de agua (Figura V.38), cada una de las cuales tiene unas condicionantes para ser utilizada en regadío. Cada agua viene caracterizada por el índice C (conductividad eléctrica desde C1, baja; a C4, muy alta) y el índice S (contenido en sodio desde S1, bajo; a S4, muy alto).

C1S4	C2S4	C3S4	C4S4
C1S3	C2S3	C3S3	C4S3
C1S2	C2S2	C3S2	C4S2
C1S1	C2S1	C3S1	C4S1

Figura V.38.- Clases de agua para riego.

En síntesis altos niveles de RAS podrían resultar en un daño de la estructura del suelo y en problemas de infiltración de agua. El suelo se vuelve duro y compacto en condiciones secas y reduce la infiltración de agua y aire. Por lo que se recomienda tener en cuenta la calidad del agua para riego así como el manejo adecuado del riego, ya que son esenciales para la producción exitosa de cultivos; y al mismo tiempo evitar dañar las condiciones físicas del suelo.

V.8.1.- El origen de las sales disueltas en el agua de riego

La principal fuente natural de las sales minerales en el agua es la erosión de las rocas y minerales. Otras fuentes secundarias incluyen la deposición atmosférica de sales oceánicas (sales en el agua de lluvia), el agua salina de las aguas subterráneas y el aumento de la intrusión de agua de mar en los acuíferos de las aguas subterráneas. Productos químicos de fertilizantes, que lixivian a las fuentes de agua, también pueden afectar a la calidad del agua de riego.

V.8.2.- Clasificación del agua de riego en el acuífero

Conforme a los resultados de laboratorio, las muestras de agua se clasifican en ocho clases (Figura V.39): C2-S1, C3-S1, C3-S2, C3-S3, C3-S4, C4-S2, C4-S3 y C4-S4. El parámetro **C**, indica que el agua posee una salinidad que va desde media a muy altamente salina. El parámetro **S**, que es el sodio intercambiable sobre la condición física del suelo y en base a este parámetro el agua varía desde baja en sodio hasta muy alta.

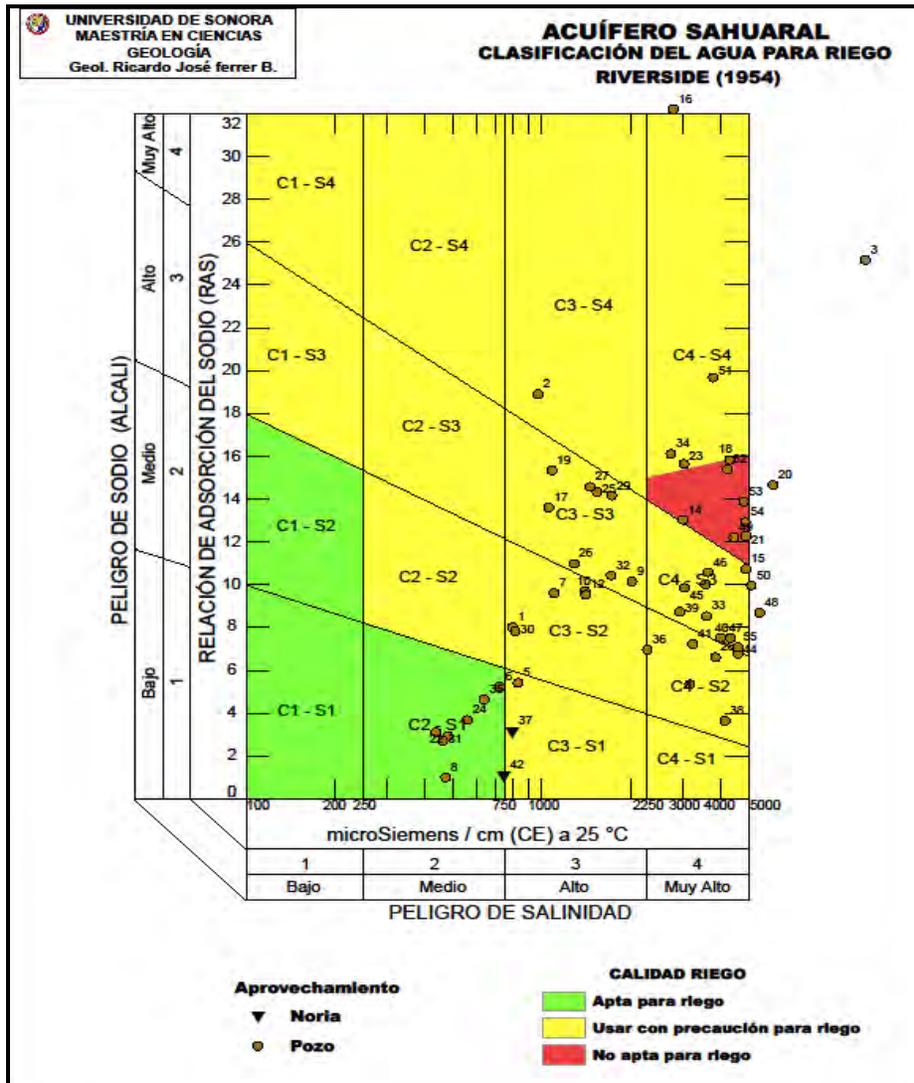


Figura V.39.- Clasificación calidad de agua para riego (RIVERSIDE).

V.8.3.- Distribución de la calidad de agua para riego en el acuífero

Las clases con mayor representatividad en el área de estudio son: la C4-S4 con 14 muestras por lo que es la clase dominante, se distribuye al poniente, noroeste y sur del acuífero; posteriormente está la clase C4-S3 con 11 muestras, la cual se ubica básicamente hacia la porción centro sur; con ocho muestras se presentan las clases C2-S1 y C3-S3, la primera abarca la porción oriental del acuífero y la segunda al centro oriente del área; las dos últimas clases son la C4-S2 (seis muestras) que también ocupa la porción centro sur y la C3-S2 (cinco muestras), esta no guarda una posición dominante sino que se encuentra en forma aislada al norte, centro y oriente (Figura V.40). Observando las clases dominantes así como su ubicación se concluye que la porción oriental es donde se encuentra la clase con mejor calidad.

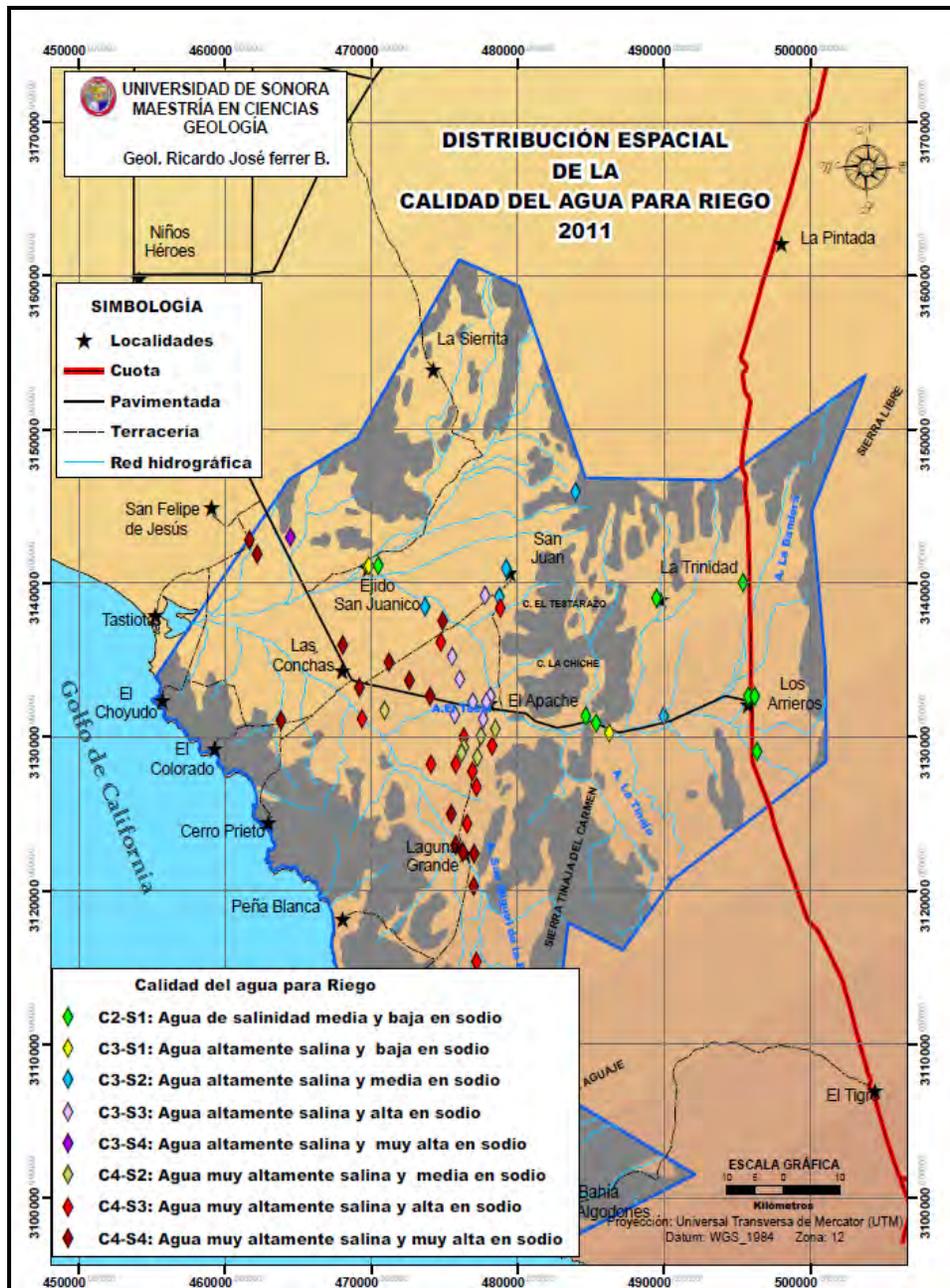


Figura V.40.- Distribución de la calidad del agua para riego en el acuífero Sahuaral.

V.8.4.- Parámetros utilizados para determinar la calidad del agua para riego

Conductividad

Agua de baja salinidad (C1)

Agua de baja salinidad; conductividad entre 100 y 250 micromhos/cm a 25°C que corresponde aproximadamente a 64-160 mg/L de sólidos disueltos. Puede usarse para el riego de la mayor parte de los cultivos en casi cualquier tipo de suelo con muy poca probabilidad de que se desarrolle

salinidad; se necesita algún lavado pero este se logra en condiciones normales de riego, excepto en suelos de muy baja permeabilidad.

Agua de salinidad media (C2)

Agua de salinidad media; conductividad entre 250 y 750 micromhos/cm a 25°C correspondiendo aproximadamente a 160-480 mg/L de sólidos disueltos. Puede utilizarse 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 tolerables a las sales.

Agua altamente salina (C3)

Agua altamente salina; conductividad entre 750 y 2,250 micromhos/cm a 25°C correspondiendo aproximadamente a 480-1440 mg/L de sólidos disueltos. No puede usarse en suelos cuyo drenaje sea deficiente, aún con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas especiales de control de la salinidad, se debe por lo tanto, seleccionar únicamente aquellas especies vegetales muy tolerantes a las sales.

Agua muy altamente salina (C4)

Agua muy altamente salina; conductividad superior a 2,250 micromhos/cm a 25°C aproximadamente 1,440 mg/L de sólidos disueltos. No es apropiada para riego en condiciones ordinarias, pero puede usarse ocasionalmente en circunstancias muy especiales; los suelos deben ser permeables y el drenaje adecuado, se requiere aplicar exceso de agua para lograr un buen lavado, en este caso deben seleccionarse cultivos altamente tolerantes a las sales.

Sodio

La clasificación de las aguas de riego respecto al RAS, se basa primordialmente en el efecto que tiene el sodio intercambiable sobre la condición física del suelo, no obstante, las plantas sensibles a este elemento pueden sufrir daños a consecuencia de la acumulación del sodio en sus tejidos, cuando los valores del sodio intercambiable son más bajos que los necesarios para deteriorar la condición física del suelo.

Agua baja en sodio (S1)

Puede utilizarse para el riego de los suelos con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. No obstante, los cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

Agua media en sodio (S2)

En suelos de textura fina, el sodio representa un peligro considerable, más aún, si dichos suelos poseen alta capacidad de intercambio catiónico, especialmente bajo condiciones de lavado deficiente, a menos que el suelo contenga yeso, estas aguas sólo pueden usarse en suelos de textura gruesa o en los orgánicos de buena permeabilidad.

Agua alta en sodio (S3)

Puede producir niveles tóxicos de sodio intercambiable en la mayor parte de los suelos, por lo que necesitarán prácticas especiales de manejo, buen drenaje, fácil lavado y adiciones de materia orgánica; los suelos yesíferos no siempre desarrollan niveles perjudiciales de sodio intercambiable cuando se riegan con este tipo de agua. Puede requerirse el uso de mejoradores químicos para

sustituir el sodio intercambiable, sin embargo, tales mejoradores no serán económicos si se emplean aguas de muy alta salinidad.

Agua muy alta en sodio (S4)

Es inadecuada para riego, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la disolución del calcio del suelo y/o la aplicación del yeso u otros mejoradores no hace antieconómico el empleo de esta clase de aguas.

V.9.- Calidad del agua subterránea para identificar intrusión marina

El diagrama de Piper además de ser empleado para determinar la clasificación del tipo de agua, también es utilizado para identificar la intrusión salina (Figura V.41). En general, las muestras de agua dulce se ubican en el vértice de la izquierda del rombo mientras que en el vértice de la derecha se tiene agua marina y corresponde a un mezclado conservativo. El vértice superior está asociado con la intrusión, mientras que en el vértice inferior se tiene agua que evoluciona hacia sódica bicarbonatada. La franja intermedia que se aprecia en la figura le corresponde a una zona de mezcla (Kelly, 2005).

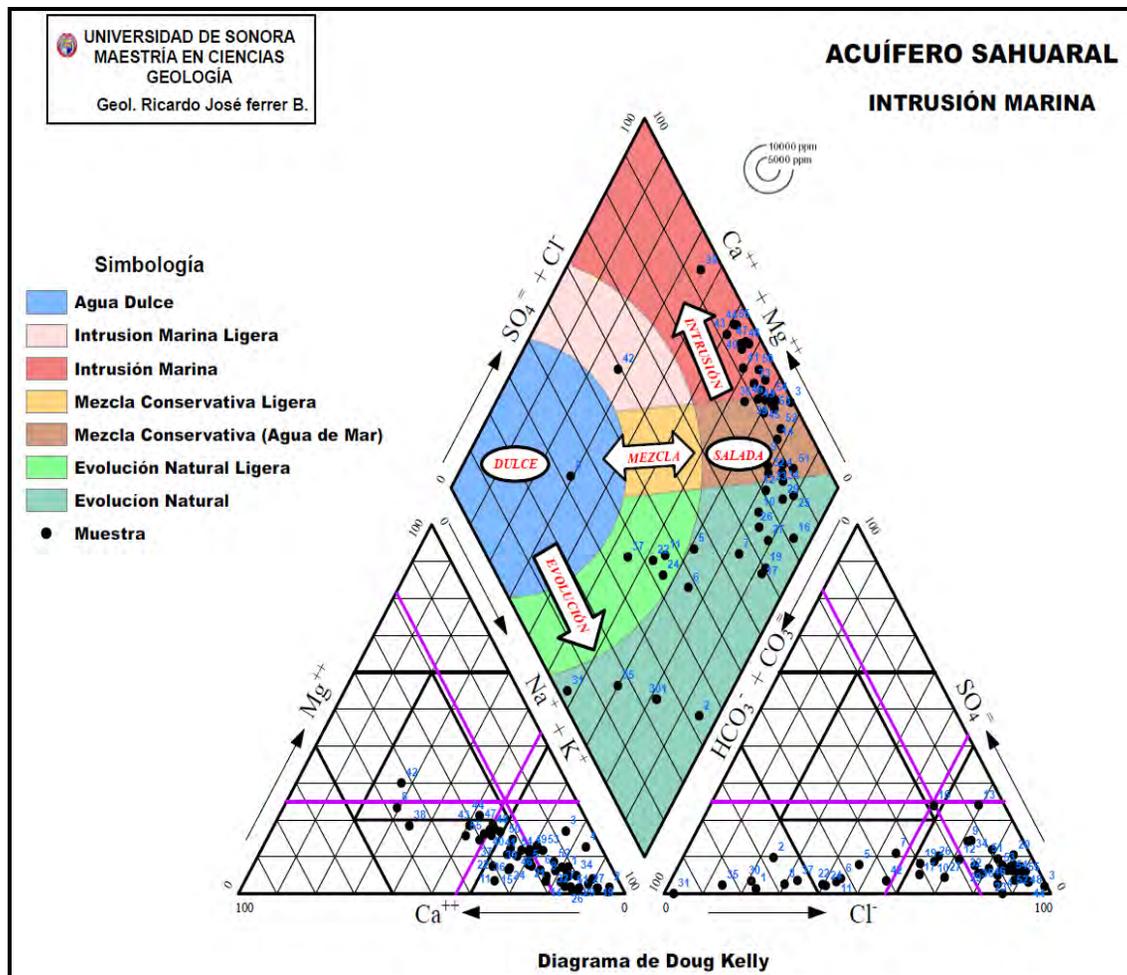


Figura V.41.- Diagrama de Kelly asociado a intrusión marina.

Como se aprecia en la figura, únicamente se tiene una muestra en el área de agua dulce y en la zona de mezcla ninguna. Ahora bien en las áreas de evolución natural ligera (4 muestras) y evolución natural (19 muestras), en la figura se ve que algunas muestras tienden a irse hacia las zonas de mezcla conservativa ligera y a la mezcla conservativa (agua de mar) salada, lo que quiere decir, que están siendo afectadas en su proceso natural ya sea por intrusión marina o por evaporitas. Por lo que se observa en el diagrama alrededor de la mitad de las muestras ya se encuentran en las zonas salada y de intrusión (Anexo I), estas muestras con relación a su ubicación dentro del área de estudio, confirman que la conformación del acuífero existen estratos evaporíticos o agua de mala calidad atrapada en estratos arcillosos.

CAPÍTULO VI.- VULNERABILIDAD

VI.1.- Antecedentes

El concepto de vulnerabilidad fue introducido por el hidrogeólogo francés Margat en 1968, basado en el hecho real, de que en cierta medida, el medio físico protege al acuífero de contaminantes que pueden infiltrarse desde la superficie.

Desde entonces, se han discutido y publicado diversos tratados al respecto, en la década de los noventa, se alcanza la mejor aproximación conceptual y técnica para la protección de los recursos hídricos subterráneos. A partir de entonces, las naciones interesadas en la preservación y evaluación de sus acuíferos han integrado cartografía regional y nacional sobre este tema. En 2004 cuando la UNESCO reconoce la contaminación de los acuíferos como un problema ambiental de alcance mundial.

La vulnerabilidad representa la sensibilidad de un acuífero para ser afectado por una carga contaminante; para fines prácticos se asume la siguiente definición:

“La evaluación de la capacidad natural que posee un acuífero para resistir a la contaminación, tomando en consideración las características de la roca y de los materiales que sobreyacen al mismo”

Es decir, son las características intrínsecas las que determinan la sensibilidad del acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante impuesta (Foster, 1987; Foster e Hirata 1988), o es la representación del riesgo potencial de contaminación del agua subterránea por contaminantes generados por actividades humanas y es independiente de la naturaleza del contaminante.

Los métodos existentes consideran las siguientes constantes, para evaluar la vulnerabilidad de un acuífero:

1. Todos los acuíferos son vulnerables a contaminantes persistentes.
2. Considerar la zona no saturada para la evaluación de la vulnerabilidad.
3. Grado de consolidación y fracturamiento de los elementos litológicos del sistema.

En este trabajo se considera que vulnerabilidad es una propiedad intrínseca de un sistema acuífero que depende de su sensibilidad a impactos naturales y/o antropogénicos (Vbra y Zaporezec, 1994).

VI.2.- Método GODS

Foster en 1987 desarrolló el método GOD (Auge, 2004), el cual se ha perfeccionado a partir de su aplicación en diversos países de Latinoamérica, en el sentido que el método original no incluye el factor de suelo; si no que el Banco Mundial (Foster, *et. al.*, 2002) se ha encargado publicar y

difundir el método GOD modificado; cuyo fundamento se centra en la ponderación de cuatro parámetros básicos que son GODS.

Es un método que se le considera de gran simplicidad, sistemático y de una gran claridad conceptual. Por éstas características se utilizará para esta área de estudio. Además desde los 90's se le considera como un primer paso para la determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas con el fin de establecer prioridades. El método determina la vulnerabilidad intrínseca por lo que no toma en cuenta el tipo de contaminante.

El método establece la vulnerabilidad del acuífero, como una función de la inaccesibilidad de la zona saturada, desde el punto de vista hidráulico a la penetración de contaminantes y la capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada como resultado de su retención física y la reacción química con los contaminantes.

VI.2.1.- Características del método

El método GODS consta de cuatro variables, las tres primeras variables se refiere al método GOD elaborado por Foster (1987), la inclusión y evaluación de la variable suelo debe a Foster y Luego de Páez Ortigón (1999); además en el apartado de la profundidad del agua subterránea se modificó conforme al diagrama de Foster e Hirata del año 1991.

El método GODS se basa en la asignación de valores entre 0 y 1.0 de acuerdo a la variable, que son las que nominan el acrónimo:

- **G: ground water ocurrence.** Tipo de acuífero o modo de confinamiento u ocurrencia del agua subterránea.
- **O: overall aquifer class.** Litología de la zona no saturada.
- **D: depth to groundwater.** Profundidad del agua subterránea.
- **S: soil.** Textura del suelo.

Estos parámetros se multiplican entre sí (**$G*O*D*S$**) y en consecuencia se obtiene la estimación del **Índice de Vulnerabilidad GODS**; el cual arroja como resultado valores entre 0 y 1.0, lo que significa que la vulnerabilidad puede variar desde despreciable a extrema (Figura VI.1).

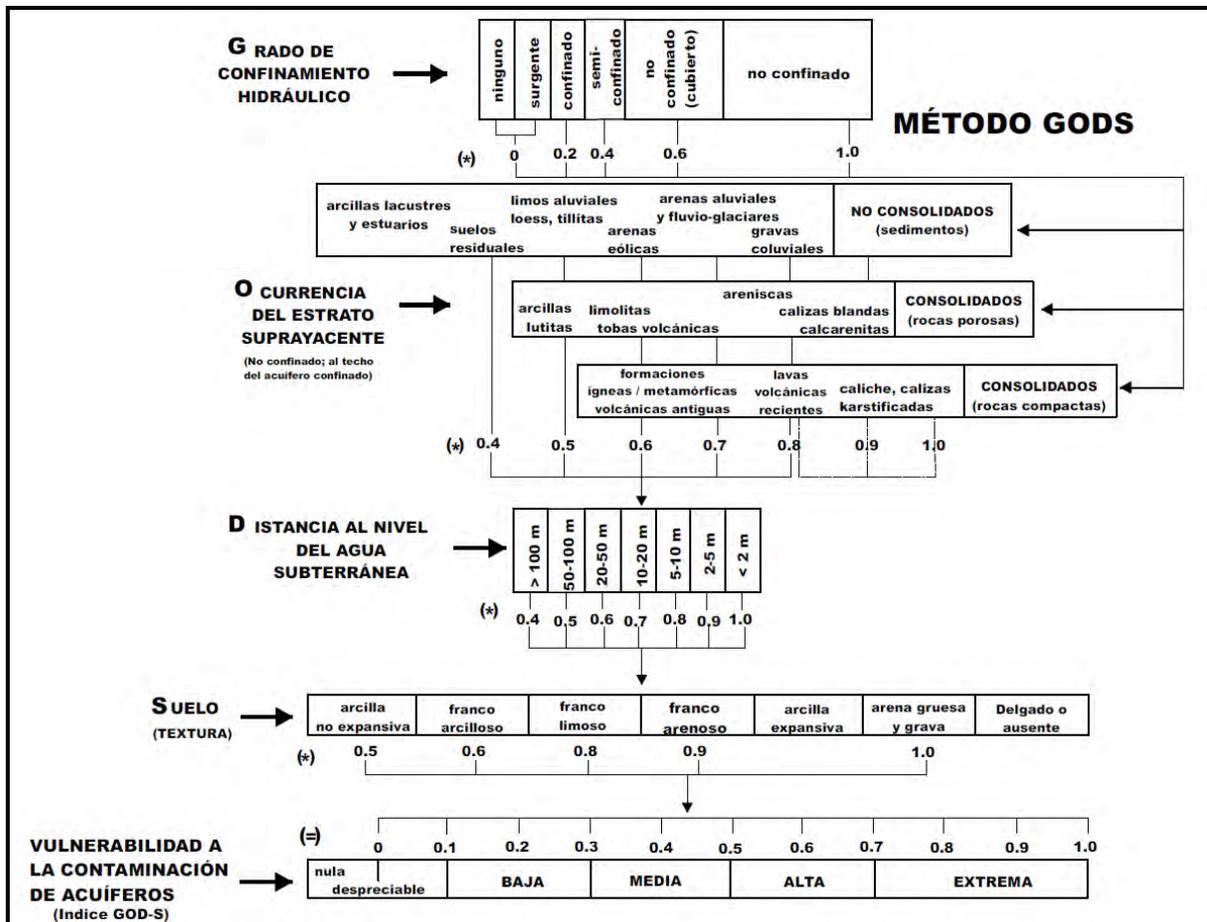


Figura VI.1.- Diagrama del método GODS.

VI.2.2.- Descripción de cada uno de los parámetros (variables)

Parámetro (G), corresponde a la identificación el grado de confinamiento hidráulico (tipo de acuífero), cuyo valor o índice puede variar entre 0 y 1.0. El modo de ocurrencia del embalse varía entre la inexistencia de acuíferos (evaluado con valor 0), en un extremo, y presencia de un acuífero libre o freático (evaluado con valor 1.0), en el otro extremo, pasando por acuíferos surgentes (artesianos), confinados y semiconfinados (Figura VI.1).

Parámetro (O), corresponde a la caracterización de la zona no saturada del acuífero o del sustrato suprayacente. Este se evalúa considerando dos características: el grado de consolidación (fracturamiento) y las características litológicas y como consecuencia, en forma directa y relativa, la porosidad y el contenido o retención específica de humedad de la zona no saturada (Foster e Hirata, 1991). Esta información se usa para obtener un valor que puede variar en un rango entre 0.4 y 1.0 (Figura VI.1).

Parámetro (D), consiste en determinar la profundidad del nivel freático en caso de acuíferos no confinados, o la profundidad al techo del acuífero en caso de acuíferos confinados. De acuerdo a la profundidad observada, este tercer parámetro puede tomar un valor entre 0.4 y 1.0 (Figura VI.1).

Parámetro (S), representa la textura de los materiales granulares preponderantes que conforman al suelo, a este acrónimo toma valores entre 0 y 1.0 (Figura VI.1).

VI.3.- Analogía para generar el mapa Índice de Vulnerabilidad GODS

La elaboración del mapa de índice de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos GODS, se lleva a cabo utilizando tecnología de SIG (Sistemas de Información Geográfica), el cual permite un proceso de multiplicación de mapas de tipo raster, generados a partir de las variables que constituyen al método GODS. La plataforma SIG utilizada fue el software de ArcGIS 10.3.1.

A continuación en la Figura VI.2 se exhibe la analogía del proceso de multiplicación de las diferentes variables o parámetros para obtener el Índice GODS o el Índice de Vulnerabilidad a la Contaminación del Acuífero.

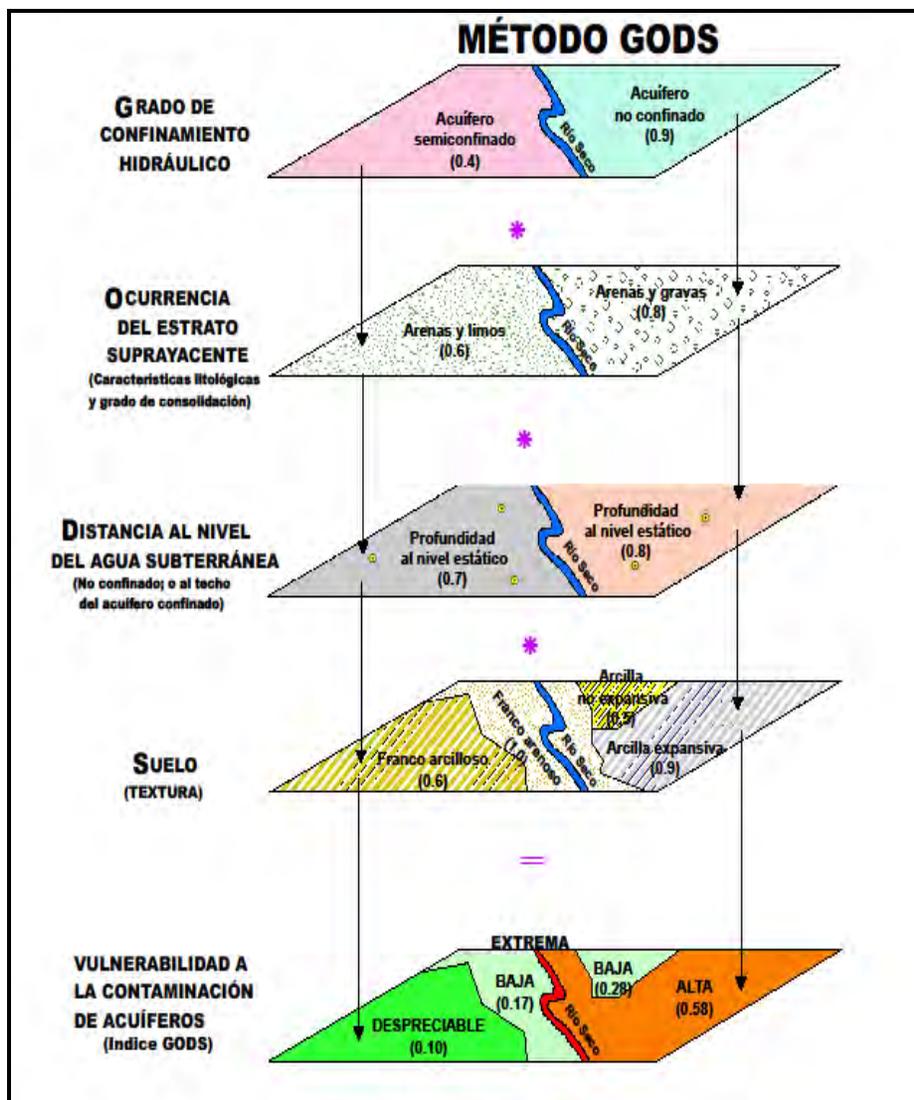


Figura VI.2.- Analogía del mapa Índice de Vulnerabilidad GODS.

VI.4.- Asignación de valores (pesos) para cada una de las variables

Para realizar la evaluación de la vulnerabilidad con la metodología propuesta, se debe contar con mapas hidrogeológicos y/o informes sobre los recursos hídricos subterráneos, los cuales generalmente contienen adecuada información básica; además de mapas geológicos, edafológicos, así como registros de perfiles de pozos y de inspecciones de campo.

VI.4.1.- Fuentes de información

En la Tabla VI.1 se muestra las diferentes fuentes a que se recurrió para conocer las propiedades y características de cada uno de los parámetros; con esto determinó el valor que le corresponde cada uno de ellos y se obtuvo como resultado el índice de vulnerabilidad.

PARÁMETRO	FUENTE
G.- Tipo de acuífero	Documentos hidrogeológicos (CONAGUA, INEGI, universidades, etc.) Cartografía de aguas subterráneas en diferentes escalas (INEGI)
O.- Sustrato litológico	Documentos hidrológicos, cortes de pozos, secciones hidrogeológicas, geofísicas (CONAGUA, INEGI, etc.) Cartografía geológica , Esc. 1:250 000 (INEGI y SGM)
D.- Profundidad al nivel estático del agua subterránea	Piezometría (CONAGUA)
S.- Edafología	Cartografía edafológica, Esc. 1:250 000 (INEGI)

Tabla VI.1.- Fuentes de información.

VI.4.2.- Valor (peso) que toma cada una de las variables

VI.4.2.1.- Determinación de variable "G" ocurrencia del agua subterránea

Los acuíferos presentes en este valle son de tipo no confinado y semiconfinado (Figura VI.3), es así que no se considera homogéneo y como consecuencia se tomo los valores de 0.4 y 1.0, como se indica en el Tabla VI.2.

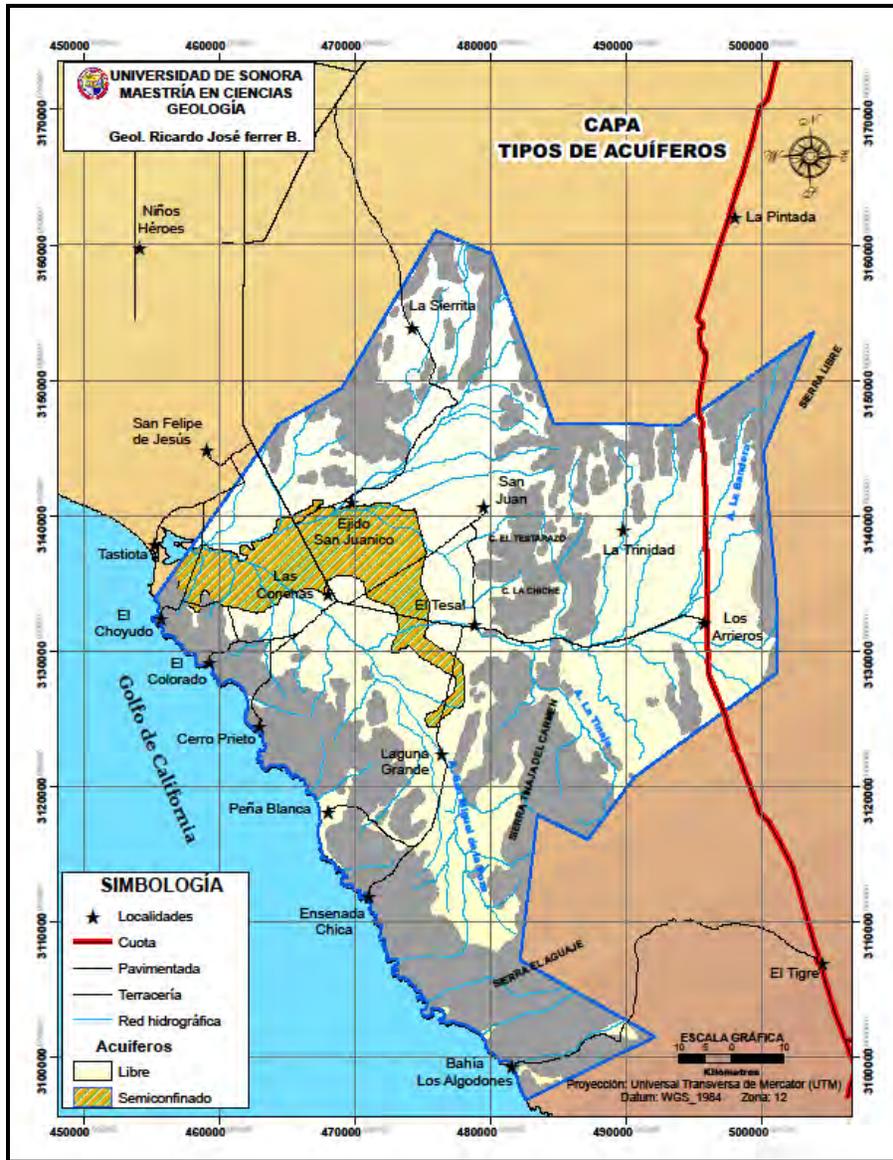


Figura VI.3.- Tipos de acuíferos.

VALORES	DESCRIPCIÓN
0	Ninguno-surgente
0.2	Confinado
0.4	Semi-confinado
0.6	No confinado (cubierto)
1.0	No confinado (no cubierto) o libre

Tabla VI.2.- Tipos de acuíferos.

VI.4.2.2.- Determinación de variable “O” sustrato litológico

El sustrato (zona no saturada) se evalúa teniendo en cuenta el grado de consolidación y las características litológicas del material conformante, lo que trae como consecuencia, de forma indirecta y relativa, la porosidad, permeabilidad y contenido o retención específica de humedad de la zona no saturada. Para ello se recopilaron los datos a partir de cortes y/o perfiles de pozos (Figura VI.4 y Anexo J), cartografía geológica y de las secciones geohidrológicas e hidroestratigráfica; a partir de esta información se conformo el mapa del sustrato litológico de la parte no saturada (Figura VI.5), ha esta litología se le asigno valores entre 0.4 y 1.0 de acuerdo a la Tabla VI.3.

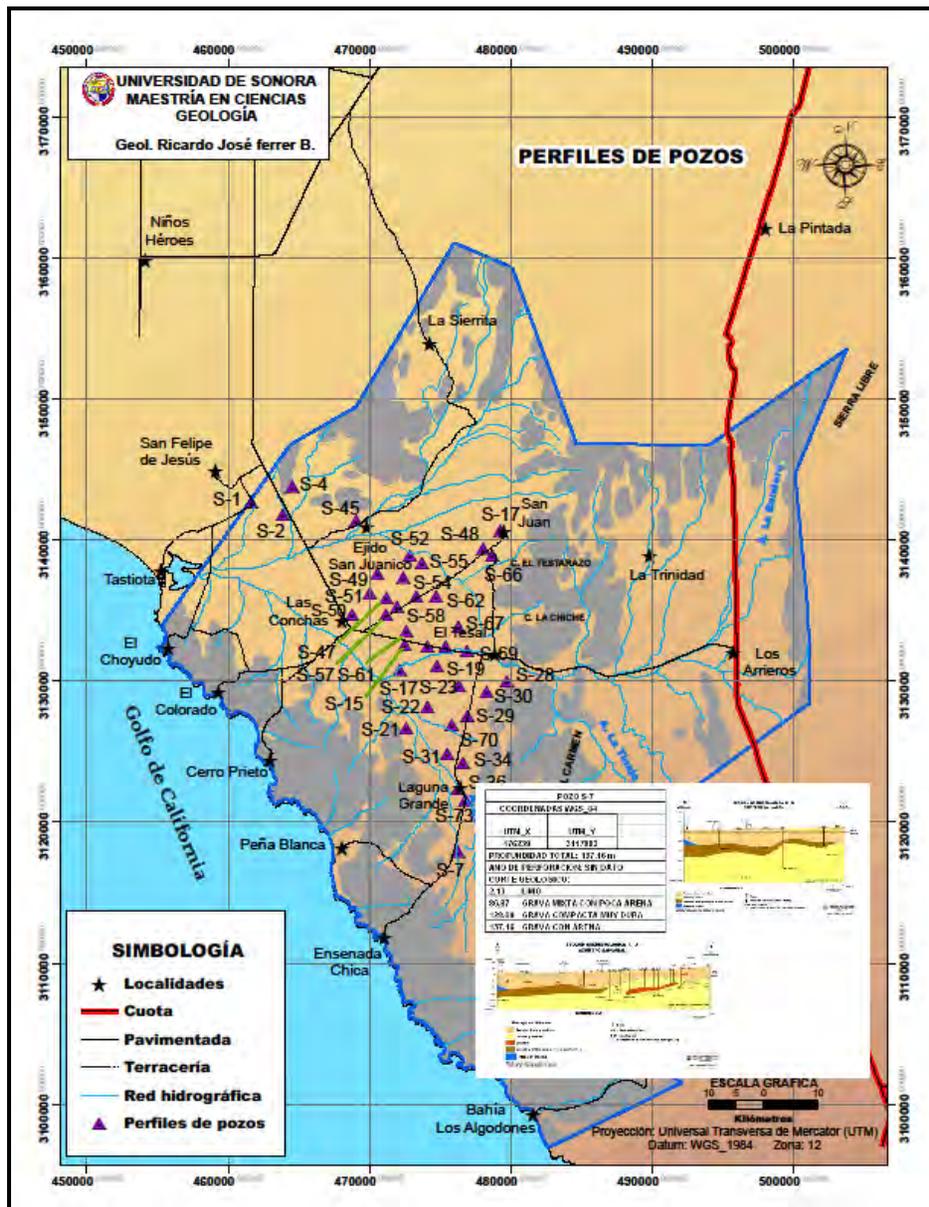


Figura VI.4.- Ubicación de perfiles de pozos.

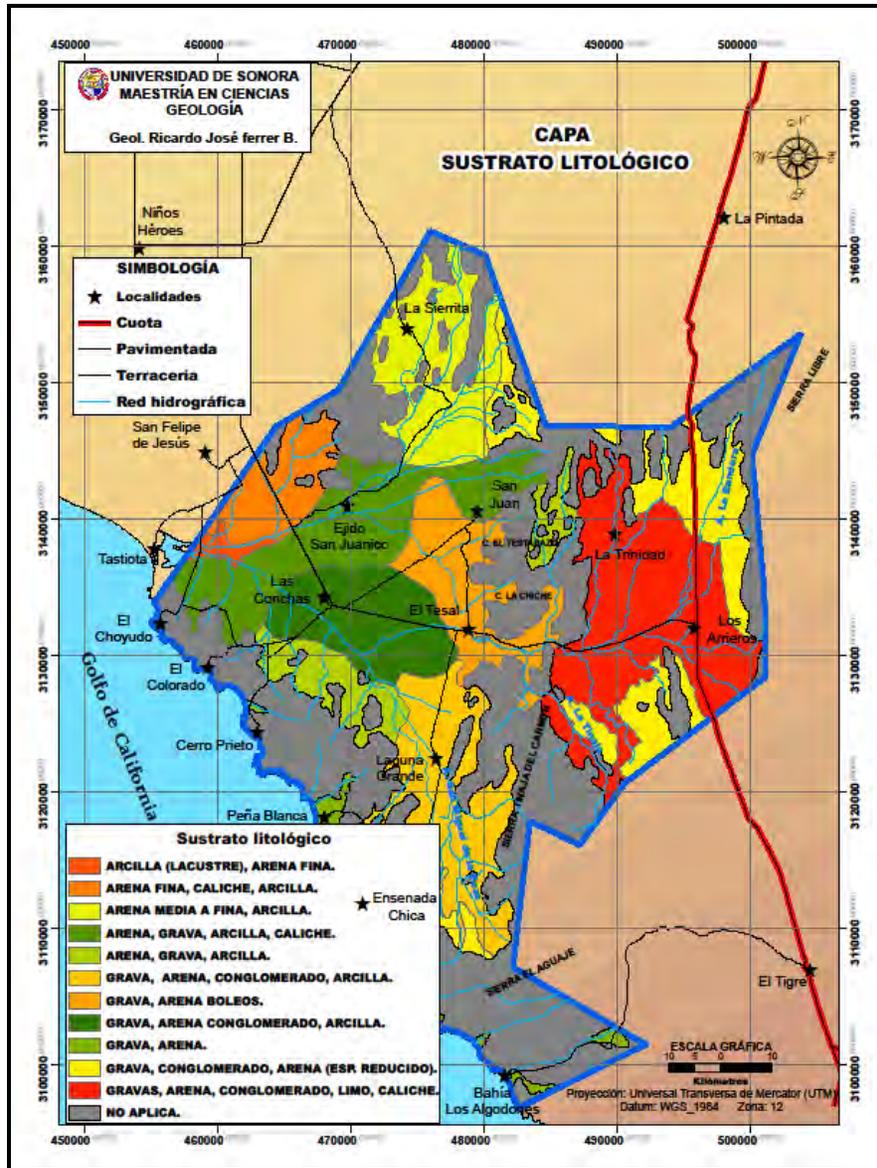


Figura VI.5.- Sustrato litológico.

VALORES	DESCRIPCIÓN
0.4	Arcilla lacustre, arcilla, caliche.
0.5	Areno-arcilloso, limo-arcilloso, limo-arenoso, caliche arenoso.
0.6	Limo, arena fina, arena fina con limo, arena semi-compacta.
0.7	Arena eólica, arena mediana.
0.8	Arena aluvial, conglomerado, basalto.
1.0	Arena gruesa, gravilla, grava coluvial, boleó.

Tabla VI.3.- Sustrato litológico.

VI.4.2.3.- Determinación de variable “D” profundidad de la zona no saturada

Para la determinación de la profundidad del agua subterránea se utilizó la información proveniente del levantamiento piezométrico llevado a cabo por Comisión Nacional del Agua en el año 2014 (Anexo D). Esta información contiene tanto la ubicación geográfica de cada uno de los pozos así como la profundidad del nivel de agua (Figura VI.6).

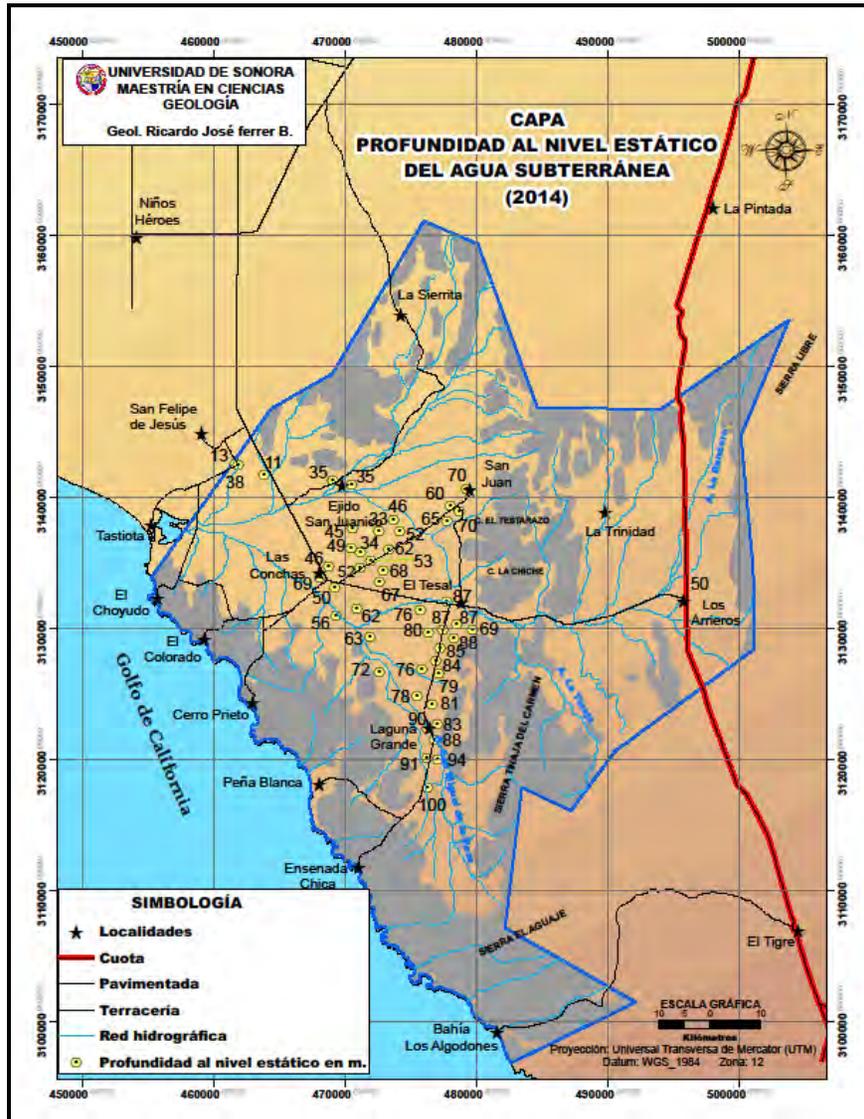


Figura VI.6.- Profundidad al nivel estático agua subterránea (2014).

Para la determinación de este parámetro se utilizó Tabla VI.4, que de acuerdo al rango (descripción) donde queda incluido los valores piezométricos de los aprovechamientos, la variable podrá asumir uno o varios valores que se encuentran entre 0.6 a 1.0. Los valores que se tomaron para esta cobertura son: 0.5 (50-100 m) la mayor parte del acuífero se encuentra bajo este valor, 0.6 (20-50 m) entre las localidades Las Conchas y el Ejido San Juanico, así como en la zona de Los Arrieros y el valor 0.7 (10-20 m) se restringe para la porción noroeste del área.

VALORES	DESCRIPCIÓN
0.4	> 100 m
0.5	50-100 m
0.6	20-50 m
0.7	10-20 m
0.8	5-10 m
0.9	2-5 m
1.0	< 2 m

Tabla VI.4.- Valores de profundidad.

VI.4.2.4.- Determinación de variable “S” suelo

El factor suelo es un parámetro esencial que considera la capacidad de atenuación y el grado de configuración del mismo. Para la evaluación de este parámetro se toma como base la textura de los suelos, los cuales se obtienen de la cartografía edafológica (INEGI, 2013) la cual está representada en la Figura VI.7. Para esta área de estudio la textura varía de fina a gruesa.

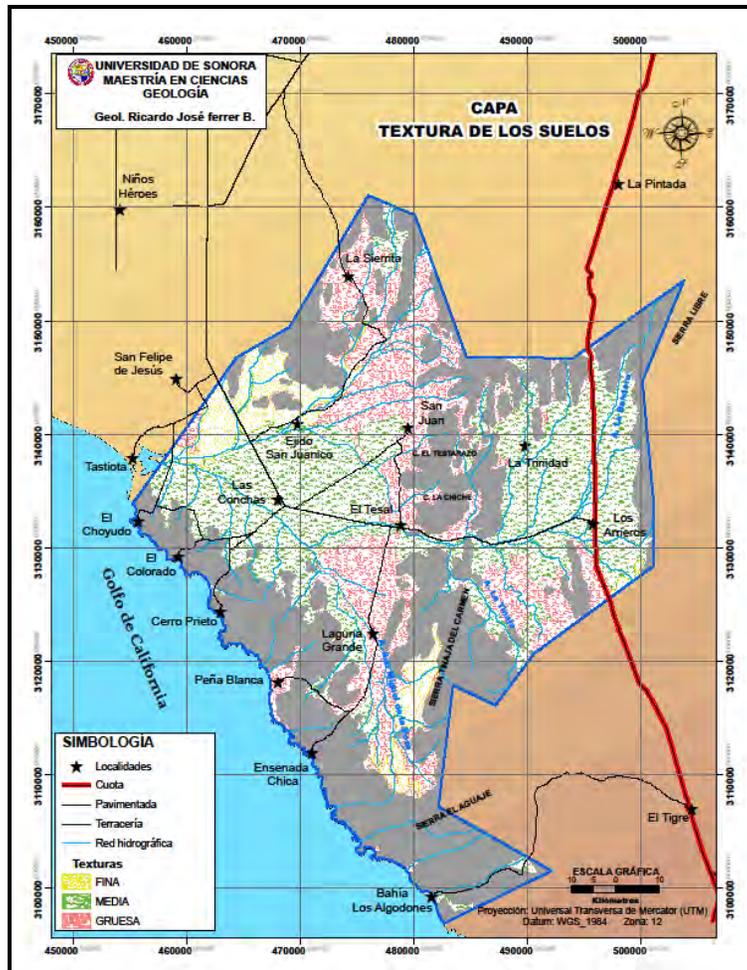


Figura VI.7.- Textura de los suelos.

Estas texturas se distribuyen como siguen: la textura fina se presenta en pequeñas porciones como es al norte del Ejido San Juanico y al sureste de Laguna Grande; abarca grandes porciones tanto al este como al poniente del área de estudio; y al textura gruesa se restringe a las zonas bajas de las sierras y cerros.

Para la determinación de este parámetro se utilizo Tabla VI.5, que de acuerdo al rango de textura de esta cobertura esta variable toma valores desde 0.5 a 1.0.

VALORES	TEXTURA	DESCRIPCIÓN
0.5	Fina	Arcilla no expansiva
0.6	Fina	Franco arcilloso
0.8	Media	Franco limoso
0.9	Gruesa	Franco arenoso
1.0	Gruesa	Arcilla expansiva, arena gruesa y grava
Delgado o ausente	Sin dato	Sin dato

Tabla VI.5.- Valores de textura de los suelos.

VI.4.2.5.- Determinación del Índice de Vulnerabilidad GODS

Una vez obtenido los valores del producto de la multiplicación de las cuatro variables, se procede a consultar la Tabla VI.6 que se muestra a continuación, con el propósito de determinar los índices de vulnerabilidad que se tienen en el acuífero.

VALORES	DESCRIPCIÓN
Nula	Menor de cero
0-0.1	Despreciable
0.1-0.3	Baja
0.3-0.5	Media
0.5-0.7	Alta
0.7-1.0	Extrema

Tabla VI.6.- Índice de vulnerabilidad GODS.

VI.5.- Índice de Vulnerabilidad GODS

VI.5.1- Definición de las clases de vulnerabilidad a la contaminación

En la Tabla VI.7 se observa la definición práctica de cada una de clases de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos.

CLASE DE VULNERABILIDAD	DEFINICIÓN CORRESPONDIENTE
Despreciable	Materiales rocosos impermeables con cubierta de suelo mínima, o materiales no consolidados de baja, que funcionan como capas confinantes en las que el flujo vertical es insignificante, aunado a esto niveles estáticos mayores a 100 m.
Baja	Materiales de baja permeabilidad, con niveles estáticos entre los 50 y 100 m, cubiertos de suelo arcilloso o mixto, vulnerable a contaminantes persistentes.
Media	Se presentan en acuíferos confinados, cubiertos por suelos permeables de tipo arenoso, limo-arcilloso o de agregados de tipo arcilloso, con un estrato litológico menos permeable y niveles estáticos entre 20 y 50 m.
Alta	Se encuentran materiales no consolidados de arenas, gravas, areniscas, calizas, con un espesor limitado, con niveles estáticos entre 5 y 20 m, cubiertos por suelos arenosos permeables vulnerables a contaminantes con excepción de los agentes altamente absorbibles o degradables por procesos químicos u orgánicos.
Extrema	Presente en materiales no consolidados permeables, constituidos de arenas, gravas areniscas, calizas con niveles estáticos entre 0 y 5 m de profundidad, también en zonas de inundación asociadas con los cauces de ríos o interconectadas a cuerpos de agua superficial, en materiales calcáreos masivos, cársticos, con fuerte fracturamiento y escasa pendiente; vulnerable a contaminantes de impacto alto.

Tabla VI.7.- Clases de vulnerabilidad GODS.

VI.5.2- Clases de vulnerabilidad a la contaminación

Como resultado de la multiplicación de las variables, se genero valores entre 0.07 y 0.5 (Tabla VI.6), por lo que en el área se distribuyen únicamente los índices de vulnerabilidad: despreciable, baja y media.

En la Figura VI.8 se tiene la representación o distribución de los índices de vulnerabilidad en el acuífero; en el cual se pone de manifiesto que la vulnerabilidad baja y media son las de mayor representatividad en el área de estudio.

VI.5.2.1.- Vulnerabilidad Media

La unidad se localiza en varias porciones del acuífero, pero posiblemente la más importante es la que se encuentra al oriente del área de estudio, ya que en esta porción se ubica gran parte del cauce del arroyo La Bandera, además de ser la zona de recarga del acuífero. El arroyo cruza toda el área de estudio por centro, de oriente a poniente. Esta unidad geológicamente se encuentra conformada por depósitos aluviales del Cuaternario.

El cauce del arroyo La Bandera (en la zona de Los Arrieros) se encuentra formado por suelo de color claro en general y de textura media. El resto del área se caracteriza por presentar depósitos de piedemonte, conformado por conglomerado mal compactado; el suelo es de color rojizo y de textura gruesa. Es común observar en esta área sobre la superficie pedregosidad. En general es un área que presenta permeabilidad media a alta, lo que tiene por consecuencia una mayor infiltración y poca retención de agua. Los valores de profundidad al nivel estático están alrededor de los 20 y 50 m.

VI.5.2.2.- Vulnerabilidad Baja

La unidad al sur, se forma por pequeños depósitos de piedemonte, conformados por conglomerados terciarios mal compactados.

El índice de vulnerabilidad baja ocupa gran parte del flanco occidental del acuífero, la cual se ve interrumpida en la porción central por vulnerabilidad despreciable. Esta vulnerabilidad es conformada por depósitos aluviales del Cuaternario. Por la gran amplitud de esta vulnerabilidad la textura presenta zonificación, es decir, gruesa al pie de las sierras y cerros, y media en el valle. Los valores de profundidad al nivel estático son: al noroeste entre los 10 a 40 m y desde el centro al sur varía de 50 a 100 m.

VI.5.2.3.- Vulnerabilidad Despreciable

La unidad de vulnerabilidad despreciable se sitúa del centro al poniente del área de estudio, alrededor del Ejido San Juanico. EL suelo en esta zona es conformado por depósito aluvial, se caracterizan por ser de textura media y rico en sales. El suelo en algún horizonte de su estructura es formado por arcilla. Debido a las características del suelo da como resultado: tenga mal drenaje, escasa porosidad, duro al secarse y que se inunde fácilmente. La profundidad al nivel estático en esta vulnerabilidad va desde los 35 a 70 m.

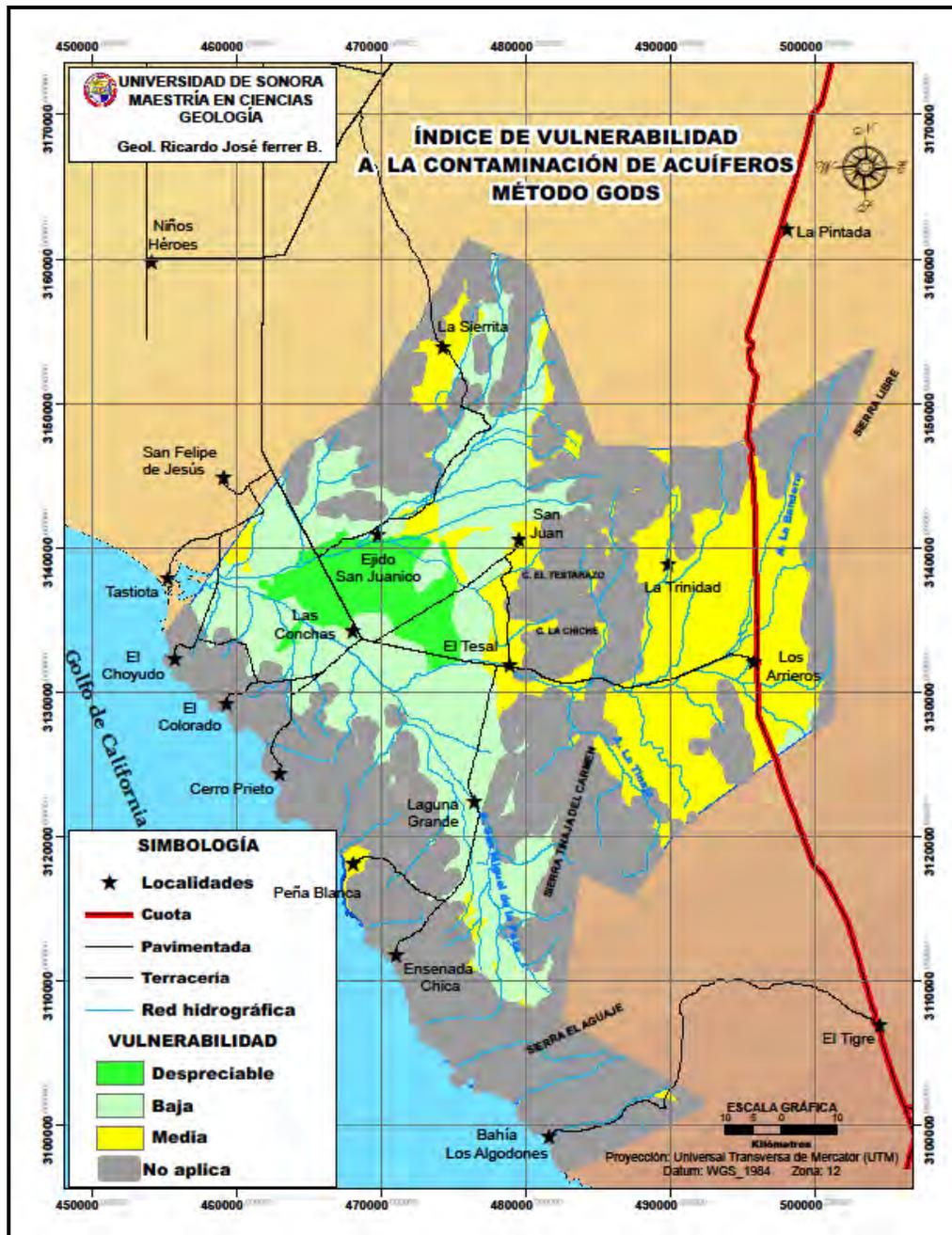


Figura VI.8.- Mapa Índice de Vulnerabilidad GODS.

VI.6.- Intrusión marina

El trazo del área de intrusión marina es tomado de INEGI (2013). Este polígono se localiza al noroeste del acuífero, hacia el zona del estero de Tastiota donde los pozos se encuentran fuera de uso, debido a que encuentran contaminado por este fenómeno (Figura VI.9). La franja de intrusión marina posee una superficie aproximada de 10.5 km de longitud y de 9.5 km de ancho.

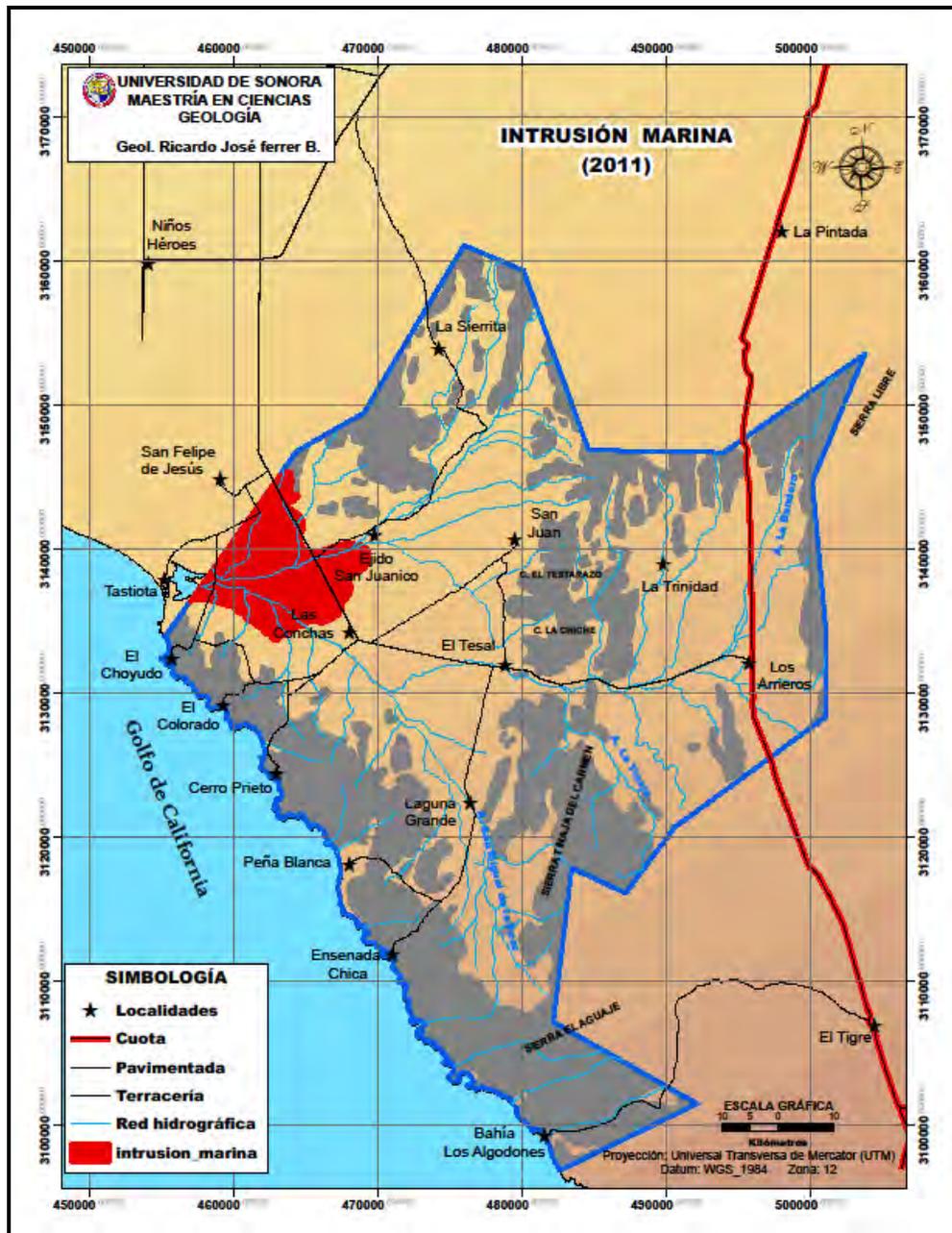


Figura VI.9.- Intrusión marina.

La intrusión marina aún no es tan fuerte, debido a que esta zona se encuentra bien resguardada, por los afloramientos rocosos que se ubican paralelamente a la línea de costa (rocas ígneas intrusivas) y que funcionan como una barrera natural; además de estratos de material fino que se encuentra como uno de los constituyentes del acuífero, estos reducen considerablemente el avance de la intrusión marina. Las únicas porciones por donde se podría darse este fenómeno, es por el acuífero contiguo que es el de la Costa de Hermosillo y por el estero de Tastiota, que es la única porción donde el acuífero se encuentra en contacto con el mar.

VI.6.1.- Vulnerabilidad a la intrusión marina

VI.6.1.1.- Metodología SEA-GIndex

Las condiciones geológicas y las actividades humanas cercanas a la línea de costa afectan la contaminación del agua subterránea por intrusión marina.

Por lo que en este apartado se propone utilizar del método SEA-GIndex (Figura VI.10) que fue elaborado por la Dra. Emilia María Bocanegra (2004), la cual se basó en el método GOD, para evaluar la vulnerabilidad de la intrusión marina (considerada como un fenómeno de contaminación lateral). Este método es de fácil aplicación ya que solamente se requiere de tres parámetros que son: **distancia a la costa** (en lugar de la distancia vertical al agua subterránea), la parte del acuífero más alejada de la costa es menos vulnerable a la contaminación por intrusión salina; **altura piezométrica** (en lugar del grado de confinamiento hidráulico), este factor es importante porque se convierte en una barrera natural contra el avance de la intrusión marina y el único factor que se conserva del método GOD es la **Litología** (ocurrencia del estrato suprayacente); dependiendo de ella, el agua salada o salobre va a tener menor o mayor resistencia a contaminar el acuífero de agua dulce.

$h > 10$	$10 > h > 5$	$5 > h > 2.5$	$2.5 > h > 1$	$h < 1$	Nivel piezométrico (m)
3	6	8	9	10	*
Loess		Arenas eólicas		Gravas y arenas	Litología
Rocas de baja permeabilidad		Areniscas		Calizas	
		Rocas Volcánicas		Karst	
3	6	8	9	10	
$d > 10$	$10 > d > 6$	$6 > d > 3$	$3 > d > 1.5$	$d < 1.5$	Distancia al mar (km)
2	4	7	9	10	=
$V < 300$	$300 < V < 500$	$500 < V < 700$	$700 < V < 900$	$900 < V < 1000$	Vulnerabilidad intrusión marina
insignificante	baja	moderada	alta	extrema	

Figura VI.10.- Método SEA-GIndex (2004).

El mapeo de la distribución espacial de intrusión marina se llevó a cabo con la aplicación de un SIG raster (ARGIS 10.3.1), proporcionando como resultado después de aplicar la herramienta de álgebra de mapas el siguiente resultado (Figura VI.11).

Como es de esperar la mayor parte del acuífero no presenta vulnerabilidad a la intrusión marina, a excepción de las áreas: entre Las Conchas y Tastiota, donde la vulnerabilidad es baja y moderada; así como en los pequeños valles que se localizan sobre la línea de costa, por lo que tienen una vulnerabilidad extrema.

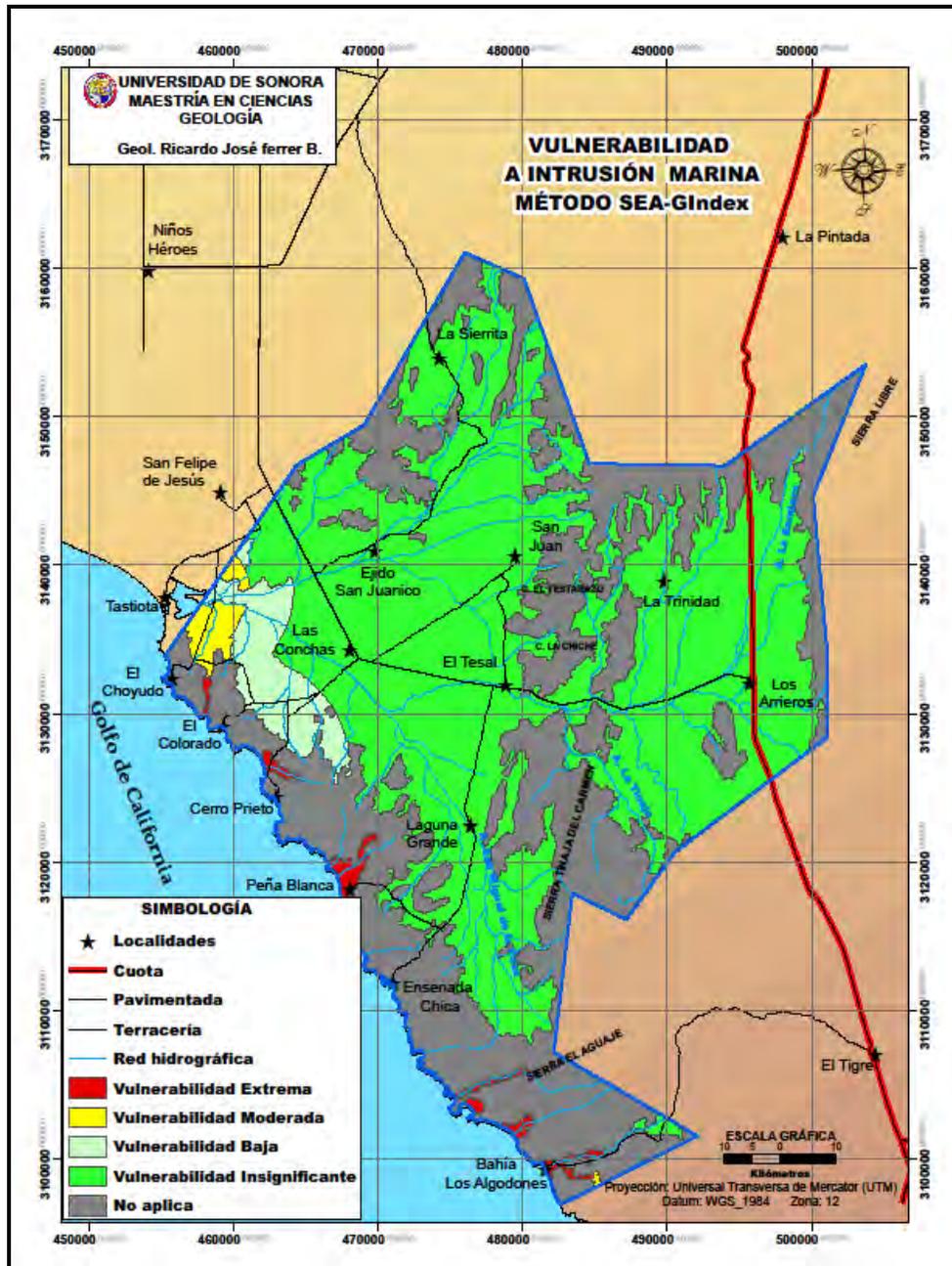


Figura VI.11.- Vulnerabilidad a la intrusión marina.

CAPÍTULO VII.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VII.1.- Conclusiones

1. El área de estudio del acuífero Sahuaral forma parte de la Provincia de Sierras y Valles (Basin and Range). La cual se forma por un complejo sistema de fosas y pilares en la costa sonorense.

2.- El acuífero Sahuaral debe su origen a fallamientos normales producto de la apertura del Golfo de California. Estos fallamientos normales se observan al oriente del picacho Colorado y al occidente del cerro La Gloria. El primero de estos se infiere por la terminación abrupta del granito; el segundo presenta un bloque de granito inclinado hacia el oriente, este fallamiento tiene una dirección NW-SE, y se infiere por las alturas topográficas de los derrames andesíticos y riolíticos que cubren a este granito con respecto al granito ubicado al sur del estero de Tastiota. Además dentro de la planicie se han cortado espesores de más de 400 m de relleno, los que se deben solamente por un hundimiento en la parte central de este valle, o bien ya hubieran cortado por los pozos perforados. Las paredes de este valle son impermeables hacia el occidente o hacia el litoral, ya que están formados por granitos que en el subsuelo constituyen una barrera actúan como barreras a la penetración de agua marina.

3.- La zona agrícola del acuífero Sahuaral, está situado en una región semidesértica, muy seca, con lluvia deficiente todo el año. La evaporación potencial media anual es mucho mayor que la precipitación pluvial.

4.- De los escurrimientos superficiales de cierta importancia, solo el arroyo La Bandera de régimen intermitente; al mismo tiempo recarga los acuíferos subálveos que se explotan al oriente del acuífero.

5.- El acuífero del Sahuaral forma parte de los acuíferos que actualmente se encuentran sobreexplotados y como consecuencia se presentan problemas de abatimiento y deterioro de la calidad del agua, por lo que afecta directamente a los procesos productivos en la zona y estos a su vez al sector social.

6.- El balance de aguas subterráneas publicado en el Diario Oficial de la Federación, dice que se tienen concesionados 63.65 millones de m³/año y que el acuífero recibe una recarga de 58.6 millones de m³/año, por lo que el cálculo de la disponibilidad es negativo, es decir la disponibilidad es de 5'057,635 de m³ anuales. Este recurso extra proviene del almacenamiento no renovable del acuífero.

7.- Durante recorrido de campo se observó: el abandono de tierras cercanas a la línea de costa debido a la salinización de los suelos y el deterioro del agua subterránea producto de la intrusión marina, aumento en la profundidad de los niveles estáticos y de reubicación de los pozos.

8.- La profundidad al nivel estático en el acuífero es la siguiente: en el año de 1967 se hizo el primer levantamiento en forma que se llevó a cabo para este acuífero, arrojando valores entre los 9 y 46 m, los cuales van creciendo desde la línea de costa hacia la porción central del área; en el año de 1978 en algunas partes del acuífero el nivel estático ya supera los 55 m de profundidad; y así siguen aumentando paulatinamente en los siguientes años, ahora para el año de 2014 la profundidad al nivel estático está entre los 20 y 100 m, los menores valores se localizan al noroeste

del acuífero, debido a algunos aprovechamientos han dejado de funcionar, en cambio del centro al sur del acuífero sigue en aumento la profundidad.

9.- La evolución del nivel estático para el primer periodo de 1967 a 1968, los abatimientos van desde los -0.5 m (noroeste del acuífero) a -6 m al centro y sur del área de estudio; y en el periodo de 2010 a 2014 se tiene un abatimiento máximo de -15 m en la porción central área, en el resto del área los abatimientos van desde unos centímetros hasta -5 m, en cuanto a las recuperaciones son más locales, en general están entre 0.50 a 1.5 m.

10.- La elevación del nivel estático en condiciones originales están entre 1 y 10 msnm (metros sobre el nivel medio del mar), lógicamente la de menor elevación esta cerca de la línea de costa y la mayor en la porción central del acuífero; pero para el año de 1967 ya se presentan elevaciones bajo el nivel medio del mar, donde los valores máximos superan los 7 mbnm (noroeste del acuífero) y la “curva cero” se localiza en la porción central del área y desde este lugar hacia al sur los valores son positivos; en 1978 desaparece la curva cero, es decir en gran parte del acuífero el agua subterránea se extraen por debajo del nivel medio del mar bien; así continua hasta hoy 2014, donde el valor máximo de elevación está por los 50 mbnm.

11.- Los flujos originales van desde el norte, oriente y sur al estero de Tastiota. En 1967 los flujos se distorsionan dirigiéndose al centro del área y al noroeste hacia la colindancia del acuífero Costa de Hermosillo. En cambio en 1978 el flujo subterráneo se vuelve completamente radial hacia el centro del área por lo que los pozos cercanos a la costa empiezan hacer afectados por intrusión marina. Hasta el día de hoy el flujo subterráneo principal continúa hacia la porción central del acuífero. En la parte oriente del área de estudio, donde la explotación del acuífero no ha sido tan intensiva, se puede decir que el flujo subterráneo permanece casi como desde sus inicios.

12.- Las temperaturas registradas en las muestras de agua varían de los 26.1 a 37.1 °C, la mayor parte de las muestras tienen una temperatura entre los 27 y 32 °C. Las máximas se localizan en la porción central de área de estudio, básicamente al noroeste de la localidad El Tesal.

13.- El pH de laboratorio da valores entre 7.33 y 8.56. El pH mayor a 8.0 se ubica al centro y al oriente del acuífero. Es posible que la alcalinidad en estas zonas sea debido a la circulación del agua por los conglomerados los cuales se encuentran cementados por caliche.

14.- El agua subterránea en el acuífero Sahuaral tiene una conductividad eléctrica entre 439 y 20380 $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$. Las concentraciones mayores a 5,000 $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ (microsiemens/centímetro) se localizan al noroeste, mientras en la porción oriental los valores no llegan a 1,000 $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ y en el resto del área los valores oscilan entre los 1,000 y 5,000 $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$.

15.- Los sólidos totales disueltos para el año de 1967 se presentan de la siguiente forma: los sólidos totales disueltos menores a 1,000 mg/l se limitan a la porción centro-norte del acuífero, al centro están alrededor de 1,500 mg/l, y en el sur y poniente estos valores aumentan hasta alcanzar los 2,000 mg/l. Después de 44 años (2011) los sólidos varían de 320 a 12,169 mg/l; los valores menores a 1,000 mg/l se ubican al centro, norte y oriente del acuífero; las concentraciones aumentan del centro al sur, alcanzando valores por arriba de los 2,500 mg/l; pero en la porción noroeste del acuífero los valores alcanzan los 10,000 mg/l.

16.- Entre los iones que tienen límites establecidos por la NOM-127-SSA1-1994, modificada en el año 2000, se encuentran los nitratos, cuyas concentraciones en el acuífero varían de 0 a 49.14 mg/l. La norma establece como límite máximo en agua para uso y consumo humano de 10 mg/l. Esta anomalía abarca toda la zona hidrogeológica, ya que 42 de las 55 muestras pasan el límite de la norma. Los valores máximos se localizan al centro del área de estudio, cuyos valores son 42.88 y 49.14 mg/l, valores mínimos se ubican en la zona de El Pedernal, esto en la parte occidental del acuífero, los valores van de 0 a 2.48 mg/l.

17.- La clasificación de la calidad del agua subterránea por su conductividad eléctrica, de acuerdo a lo establecido por la American Potability and Health Association (APHA, 1995). Como se mencionó en párrafos anteriores la conductividad eléctrica que tiene el área va de 439 a 20,380 $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ (microsiemens/centímetro). Queda comprendida en tres rangos: agua dulce, valores con concentraciones entre 439 a 1,723 μScm^{-1} , se ubican la parte centro, norte y oriente del acuífero; el segundo rango agua salobre, con valores entre 2019 a 4900 μScm^{-1} , dominan las porciones centro, sur y poniente; el último rango agua de mar, tiene valores entre 5,120 y 20,380 μScm^{-1} , se ubican en forma aislada en el acuífero, tiene presencia al noroeste, centro y centro sur del acuífero.

18.- Clasificación del agua subterránea por su dureza (CaCO_3), de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS) presenta cuatro tipos de agua blanda, moderadamente dura, dura y muy dura. En el acuífero existen toda esta gama de tipos de agua, pero sobresalen dos: el primero de ellos con el de mayor representatividad que son las aguas muy duras, ya que la mayoría de las muestras de agua tienen concentraciones mayores a 180 mg/l, estas se ubican principalmente al sur y centro-oeste del acuífero; el segundo tipo agua es la moderadamente dura (61-120 mg/l), encontrándose desde el centro hacia el oriente y del centro al norte del acuífero.

19.- Las familias de agua se clasificaron por medio del diagrama triangular de Piper, el cual da como resultado nueve familias para el acuífero Sahuaral. Las familias dominantes son cuatro: Sódica-Clorurada, Cálcica Sódica-Clorurada, Sódica-Bicarbonatada Clorurada y Sódica-Bicarbonatada. A la primera de ellas le corresponde el 56.36% del total de las muestras recolectadas, por lo que esta familia se distribuye ampliamente en el acuífero, prácticamente abarca toda el área central y poniente del acuífero. Esta familia por su ubicación es posible que este influencia por factores como: intrusión marina, por el medio geológico, es decir aquellos flujos subterráneos que atravesaron depósitos evaporíticos y el último posible factor por ser aguas fósiles. La segunda familia se localiza en la porción centro sur del acuífero. La tercera y cuarta familia se puede considerar que se encuentran cerca zonas de recarga, es decir al norte y oriente del acuífero.

20.- Calidad del agua para riego de acuerdo a la clasificación más usada en nuestro país, es la de Richard (1954), también conocida como Normas Riverside. Los resultados de laboratorio arrojaron ocho clases: C2-S1, C3-S1, C3-S2, C3-S3, C3-S4, C4-S2, C4-S3 y C4-S4. De estas las que tienen mayor representatividad en el área son: C4-S4 que se distribuye al poniente, noroeste y sur del acuífero; C4-S3 la cual se ubica básicamente hacia la porción centro sur; C2-S1 y C3-S3, la primera abarca la porción oriental del acuífero y la segunda al centro oriente del área; las dos últimas clases son la C4-S2 que también ocupa parte de la porción centro sur y la C3-S2, esta no guarda una posición dominante sino que se encuentra en forma aislada al norte, centro y oriente. Observando las clases dominantes así como su ubicación se concluye que la porción oriental es donde se encuentra la clase con mejor calidad.

21.- La aplicación del método GODS al acuífero Sahuaral proporcionó como resultado tres rangos de vulnerabilidad que son despreciable, baja y media. La que debe tener mayor atención es la de vulnerabilidad media que se localiza principalmente en la zonas de recarga, sin olvidar que en ella se encuentra el arroyo La Bandera.

22.- La aplicación del método SEA-GIndex para intrusión marina, da como resultado cuatro unidades; sobresaliendo la vulnerabilidad extrema que se ubica sobre las pequeñas playas y la de vulnerabilidad moderada en el estero de Tastiota, esta área es la posible ruta de entrada del agua marina al acuífero.

VII.2.- Recomendaciones

1.- Instalación de varias estaciones climatológicas, para así obtener un conocimiento más exacto de las condiciones climatológicas de la región y con ello poder realizar un buen balance, que permita equilibrar la explotación del acuífero.

2.- Iniciar un plan de aprovechamiento, para los pocos escurrimientos del arroyo La bandera en tiempos de lluvia; dadas las circunstancias actuales de la falta de este líquido.

3.- Llevar acabo pozos exploratorios, con el fin de conocer a través de los cortes de pozos los diferentes estratos que conforman al acuífero. De preferencia que la descripción de estos cortes sea hecha por un geólogo.

4.- Seguir verificando en campo los datos consignados en el catalogo de pozos de la zona, ya que es indispensable mejorarlo y tenerlo al día; con el propósito de tener un mejor control del uso y manejo del agua subterránea.

5.- Ampliar las observaciones piezométricas a un nuevo conjunto de pozos, localizados estratégicamente al norte, sur y oriente.

6.- Las mediciones en los pozos de observación debe ser mensual. Estas mediciones incluyen las lecturas de los niveles estáticos, niveles dinámicos y régimen de operación. Esto permitirá delinear mejor y ampliar las redes de flujo actuales.

7.- Llevar a cabo nuevas pruebas de bombeo, el cual mejorará el conocimiento de las propiedades físicas de los acuíferos, la cual permitirá ratificar o en su defecto afinar los cálculos actuales, respecto al caudal del flujo subterráneo, la relación entre los niveles piezométricos y la variación del volumen de agua almacenada en los acuíferos.

8.- Efectuar estudios de tipo geofísico y gravimétrico, en aquellas zonas del acuífero menos exploradas como son: al norte, oriente y al extremo sur del acuífero.

9.- Respecto a la calidad del agua. Primeramente tener un inventario actualizado del número de aprovechamientos con sus características constructivas, con el propósito tomar muestras de agua zonificadas y evitar tener mezclas de estas. Esto proporcionará información de la calidad del agua en diferentes estratos litológicos, esto con el fin de conocer la existencia de estratos evaporíticos o efectivamente el aumento de los iones de sodio y cloro es debido a intrusión marina. Y posiblemente determinar los diferentes flujos subterráneos y la alta temperatura que en algunos pozos se presenta.

10.- El muestreo del agua deberá ser siempre en los mismos pozos, las mismas fechas, con una frecuencia de cuando menos trimestral, ampliando las observaciones hacia el norte y al oriente, el motivo es de llevar un estricto control tanto de la calidad del agua).

11.- De seguir prevaleciendo las condiciones de bombeo sin modificación alguna, la superficie afectada por la intrusión salina seguirá creciendo hasta posesionarse de toda la zona de bombeo actual. Para amortiguar este efecto sería conveniente reducir el bombeo en la zona central del área de estudio; además ayudará amortiguar un poco a la sobreexplotación del acuífero.

12.- Efectuar estudios hidrogeológicos complementarios, para tener una mayor certeza del avance de la intrusión salina, en función de análisis hidrogeoquímico en el agua subterránea, como es utilizar un trazador o marcador como por ejemplo bromuros (Br^{-1}).

13.- Se recomienda cuidar de algún tipo de contaminación las porciones norte y oriente del acuífero, ya que son áreas de recarga.

14.- Otras recomendaciones serían: llevar a cabo programas de modernización donde se logre la estabilización del acuífero y seguir con el Programa de Adquisición de Derechos de Uso del Agua.

CAPÍTULO VIII.- BIBLIOGRAFÍA

VIII.1.- Bibliografía

AquaChem v. 3.7 for Windows 95/98 NT. 1999. Aqueous Geochemical data, Análisis, Plotting and Modeling. Waterloo Hydrogeologic, Software User's Manual and Program.

American Potability and Health Association (APHA). 1995. Standard Methods. 19th Edition. American Public Health Association, Washington, DC.

APHA (American Public Health Association). 1995. Standard Methods for the examination of water and wastewater, 19th ed., New York, 769 Págs.

Ariel Construcciones S.A. 1968. Estudio Geohidrológico Completo de los Acuíferos de la Costa de Hermosillo, Son. Secretaría de Recursos Hidráulicos, D.F., México.

Ariel Construcciones S.A. 1970. Estudio Hidrológico Completo de los Acuíferos de la Costa de Hermosillo, Son. Secretaría de Recursos Hidráulicos, D.F., México.

Castillo G. J., M.A. Ríos R.A. Gutiérrez. 1999. La sobreexplotación de los acuíferos en Sonora. Memorias del III Seminario sobre Acuíferos Costeros de Sonora. Hermosillo, México.

Castro G. J. A. 1998. Modelo numérico de intrusión salina en la Costa de Hermosillo, Sonora, con base en estudios geofísicos. Tesis de maestría. Instituto de Geofísica. UNAM. México. 95 Págs.

Llamas M., C. F. 1976. Hidrología subterránea. Tomo I y II. Ed. Omega, S. A. Barcelona, España. 1019-1063 Págs.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 1994. Manual para Evaluar Recursos Hidráulicos Subterráneos. Editado por la Comisión Nacional del Agua, a través de la Subdirección General de Administración del Agua, D.F. México.

Comisión Nacional del Agua. 1999. Guía de Muestreo de Aguas Subterráneas y el Manual de Equipamiento de Pozos de Monitoreo. D.F. México.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2010. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero 2620 Sahuaral, Estado de Sonora. D.F., México. 27 Págs.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2015. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Sahuaral (2620), Estado de Sonora. D.F., México. 2 Págs.

Coordinación General de Recaudación y Fiscalización, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua. 2014. Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales. D.F., México, 25-26 Págs.

Davies y R. De Wiest. 1971. Hidrogeología, Ediciones Ariel, Barcelona, España.

Diario Oficial de la Federación (DOF). 2001. Acuerdo por el que se establece y da a conocer al público en general la denominación única de los acuíferos reconocidos en el territorio de los Estados Unidos Mexicanos, por la Comisión Nacional del Agua, y la homologación de los nombres de los acuíferos que fueron utilizados para la emisión de los títulos de concesión, asignación o permisos otorgados por este órgano desconcentrado. D. F., México.

Diario Oficial de la Federación (DOF). 2015. Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 20 de abril de 2015, Segunda Sección, D.F., México, 10 pág.

Encinas Y., David H.; R. González E. y S. Díaz M. 1998. Evaluación de la Vulnerabilidad a la Contaminación del Agua Subterránea del Valle del Yaqui, Sonora. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 14(1):52. UNAM. México.

Fernández-Aguirre M.A., Monreal R., y Grijalva-Haro A.S. 1993. Carta Geologica Sonora, 1:500,000: Dirección General de Fomento Minero y Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora (Mapa). Hermosillo, México.

Fetter, C. 1999. Contaminant Hydrology. Prentice Hall, 500 Págs.

Foster, Stephen, Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M. y Paris, M. 2002. Protección de la calidad de agua subterránea, guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Banco Mundial. Washington, D.C. 127 Págs.

Freeze, R. A., Cherry, J. 1976. Groundwater, Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A.

GEOCALLI S. A. Consultores. 1978. Estudio Geohidrológico del Valle del Sahuaral, Sonora. Realizado para la Secretaría de Recursos Hidráulicos. D.F., México. 215 Págs.

González, R., Marín, L. y Córdova, G. 1997. Hydrogeology and groundwater pollution of Yaqui Valley, Sonora, México en 1994. Geofísica Internacional, Vol. 36, Núm. 1, 49-54 Págs.

Gómez, M. L. 2009. Definición de la aptitud de agua para riego en un agrosistema del Sur de la Provincia de Córdoba, Argentina. Investigación y Ciencia, de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, Número 45, 38-43 Págs.

Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, S.A de C.V (IDEAS). 2009. Actualización geohidrológica de los acuíferos Los Vidrios, Río Alisos, Arroyo Sahuaro, Sahuaral y Cuitaca. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Hermosillo, México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 1993. Estudio Hidrológico del Estado de Sonora. Aguascalientes, México. 185 Págs.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2000. Síntesis de Información Geográfica del Estado de Sonora. Aguascalientes, México. 87 Págs.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2002. Carta Hidrológica serie II Esc. 1:250, 000. Departamento de Hidrología. Aguascalientes, México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2010. Metodología Información Serie III, Aguas Subterráneas. Aguascalientes, México. 76 Págs.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2013. Carta Edafológica, Escala 1:250 000, Serie II, Sierra Libre H12-11. Aguascalientes, México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2013. Conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250 000, Serie V (Conjunto Nacional). Aguascalientes, México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2013. Zona Hidrogeológica Sahuaral. Esc. 1:150, 000. Vectoriales e impreso, Aguascalientes, México.

Mazor, E. 1997. Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology, The applied Approach, second edition, Revised and expanded Marcel Dekker, Inc, Halsted Press a Divison of John Wiley and Sons, U.S.A.

Secretaría de Gobernación. 2000. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental, Agua para Uso y Consumo Humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. D. F., México.

NOM-011-CNA-2000. 2002. Norma Oficial Mexicana. Conservación del recurso agua que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Diario Oficial, D.F., México.

Noriega Guadalupe, Herrera J. Enrique, Rangel Medina M. 2009. "Avances en la Evaluación Geohidrológica del Acuífero Sahuaral Municipios de Hermosillo y Guaymas, Sonora". VII Congreso Nacional de Aguas Subterráneas. Guaymas, Son.

Olivas, M. Cerón, J. C. y Fernández, I. 2005. Sobre la Utilización de las Aguas de Riego el U.S. Laboratory Salinity (USLS). Gaceta, No. 37, ISSN: 021 3683X, 111-113 Págs.

Organización Mundial de la Salud (OMS). 1987. Guías para la calidad del agua potable. Washington.

Piper, A.M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses; Am. Geophys. Union Trans., v. 25, 914-923 Págs.

Rangel-Medina, M. 2001. Análisis de Vulnerabilidad en Zonas Áridas y Semiáridas con Énfasis en las Condiciones de Mátape, Sonora, México. I Seminario-Taller. Protección de Acuíferos Frente a la Contaminación: Metodología. Toluca, México.

Rangel-Medina, M. 2002. Determinación de la Vulnerabilidad a la Intrusión Marina de Acuíferos Costeros en el Pacífico Norte Mexicano; un caso, El Acuífero Costa de Hermosillo, Sonora, México. II Seminario-Taller. Protección de Acuíferos Frente a la Contaminación: Caracterización y Evaluación. Ciudad de La Habana Cuba, Cuba, 17 Págs.

Rangel, M., Monreal, R., Morales, M. y Castillo, J. 2004. Vulnerabilidad a la Intrusión Salina de Acuíferos Costeros en el Pacífico Norte Mexicano; Un Caso, El Acuífero Costa de Hermosillo, Sonora, México. Geofísica Internacional, Vol.43, Núm. 3, 621-631 Págs.

Rangel, M. 2006. Propuesta de un modelo integral para la recuperación de un acuífero intrusionado, sometido a uso intensivo de agua subterránea: El acuífero Costa de Hermosillo, Sonora, México. Tesis para obtener el grado de: Doctorado en Ciencias de la Tierra (Aguas Subterráneas). Universidad Autónoma de México, México, 201 Págs.

Secretaría de Salud (SSA). NOM-127-SSA1-1994. 1995. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Diario Oficial de la Federación, D.F., México, 6 Págs.

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Instituto de Geología. 1997. Estudio de la Intrusión Salina en la Franja Costera en el Valle de Hermosillo y El Sahuaral, Sonora. D.F., México, 253 Págs.

Universidad de Sonora (UNISON). 2005. Atlas de aguas subterráneas para el Estado de Sonora y diseño de una red de monitoreo piezométrico. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Hermosillo, México.

Waterloo Hydrogeologic. 1999. Aquifer Test-User manual. Waterloo Ontario. Canada.

Wilcox, L.V., G.Y. Blair and C.A. Bower. 1954. Effect of bicarbonate on suitability of water for irrigation. Soil Science 77(4), 259-266 Pags.

https://www.google.com.mx/search?q=La+hidrogeoqu%C3%ADmica+estudia+las+propiedades+qu%C3%ADmicas+del+agua+superficial+y+subterr%C3%A1nea&ie=utf-8&oe=utf-8&rls=org.mozilla:es-ES:official&client=firefox-a&channel=np&source=hp&gws_rd=cr&ei=UHshUtDyDJeisATjI4CABA

<http://tierra.rediris.es/hidrored/ponencias/medina.html>

<http://www.smart-fertilizer.com/articulos/calidad-del-agua-de-riego>

Anexos

Anexo A.- Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero Sahuaral (CONAGUA, 2010)

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MIN	SEG	GRADOS	MIN	SEG	
1	111	27	19.6	28	19	50.0	
2	111	21	47.4	28	26	47.6	
3	111	18	56.2	28	28	15.4	
4	111	14	41.8	28	34	33.5	
5	111	12	10.4	28	33	37.0	
6	111	9	23.2	28	26	52.1	
7	111	3	38.8	28	26	47.6	
8	110	57	39.5	28	30	29.8	
9	110	59	54.0	28	25	42.6	
10	110	59	19.5	28	20	12.5	
11	110	59	17.5	28	16	53.3	
12	111	5	43.1	28	12	42.7	
13	111	7	48.2	28	10	13.9	
14	111	10	4.9	28	11	11.0	
15	111	10	51.1	28	5	23.5	
16	111	4	46.7	28	2	19.6	
17	111	10	34.5	27	59	48.7	del 17 al 1 por la línea de bajamar a lo largo de la línea de costa
1	111	27	19.6	28	19	50.0	

Anexo B.- Características de los aprovechamientos muestreados en el año 2011 (INEGI, 2013)

Clave de Campo	Obra	Coordenadas WGS_84		DTD pulg	Q lps	PTO m	PNE m	Tipo de Bomba	Fuente de Energía	USO
		UTM_X	UTM_Y							
1	Pozo	483914	3145959	1	1	50	---	Sumergible	Eléctrica	Pecuario
2	Pozo	464470	3142989	3	6	---	---	Sumergible	Eléctrica	Público urbano
3	Pozo	461665	3142810	---	---	76.2	14.17	Ninguna	Ninguna	Ninguno
4	Pozo	462170	3141923	---	---	61	12.10	Ninguna	Ninguna	Ninguno
5	Pozo	469796	3141186	4	10	60	---	Sumergible	Eléctrica	Público urbano
6	Pozo	470457	3141178	10	90	---	36.30	Vertical	Eléctrica	Agrícola
7	Pozo	479211	3140941	10	60	198	69.98	Vertical	Eléctrica	Agrícola
8	Pozo	495371	3139991	3	---	80	---	Sumergible	Eléctrica	Pecuario
9	Pozo	477740	3139218	10	45	213.4	59.80	Vertical	Eléctrica	Agrícola
10	Pozo	478718	3139147	10	65	134.1	65.37	Vertical	Eléctrica	Agrícola
11	Pozo	489465	3138980	1	2	---	---	Sumergible	Eléctrica	Agrícola
12	Pozo	473653	3138420	12	124	259	47.87	Vertical	Eléctrica	Agrícola
13	Pozo	478788	3138411	10	124	---	---	Vertical	Eléctrica	Agrícola
14	Pozo	474841	3137582	10	48	270.1	---	Vertical	Eléctrica	Agrícola
15	Pozo	474724	3136194	10	48	259.1	57.50	Vertical	Eléctrica	Agrícola
16	Pozo	468016	3136009	2	3	91.5	34.50	Sumergible	Eléctrica	Pecuario
17	Pozo	475500	3135237	10	---	250	---	Vertical	Eléctrica	Agrícola
18	Pozo	471173	3134825	---	---	213	52.30	Ninguna	Ninguna	Ninguno
19	Pozo	476017	3133780	10	48	251	---	Vertical	Eléctrica	Agrícola
20	Pozo	472572	3133663	10	48	76.2	62.62	Vertical	Eléctrica	Pecuario
21	Pozo	469161	3133188	10	100	88.4	50.20	Vertical	Eléctrica	Agrícola
22	Pozo	495728	3132686	1.5	---	80	---	Vertical	Eléctrica	Doméstico
23	Pozo	473981	3132643	10	90	121.9	---	Vertical	Eléctrica	Agrícola
24	Pozo	496165	3132626	1.5	---	120	45.40	Vertical	Eléctrica	Doméstico
25	Pozo	478109	3132619	2	3	120	---	Vertical	Eléctrica	Público urbano
26	Pozo	476913	3132292	10	---	91.4	81.70	Vertical	Eléctrica	Agrícola
27	Pozo	477846	3132273	10	48	121.4	87.15	Vertical	Eléctrica	Agrícola

28	Pozo	470889	3131708	10	130	79.3	61.91	Vertical	Eléctrica	Agrícola
29	Pozo	475683	3131418	10	---	75	75.85	Vertical	Eléctrica	Agrícola
30	Pozo	489945	3131378	2	---	91.4	---	Aeromotor	Eólica	Pecuario
31	Pozo	484624	3131375	2	---	61	---	Sumergible	Eléctrica	Pecuario
32	Pozo	477630	3131193	10	48	244	---	Vertical	Eléctrica	Agrícola
33	Pozo	469358	3131166	10	120	91.4	63.76	Vertical	Eléctrica	Agrícola
34	Pozo	463813	3131088	1.5	2	---	---	Vertical	Eléctrica	Público urbano
35	Pozo	485350	3130915	1	1	---	---	Aeromotor	Eólica	Pecuario
36	Pozo	478442	3130524	10	---	219	72.51	Vertical	Eléctrica	Agrícola
37	Noria	486229	3130268	1	---	---	---	Sumergible	Eléctrica	Pecuario
38	Pozo	477468	3130080	10	100	---	---	Vertical	Eléctrica	Agrícola
39	Pozo	476297	3129986	10	---	198.1	80.00	Vertical	Eléctrica	Agrícola
40	Pozo	478246	3129425	10	140	121	88.37	Vertical	Eléctrica	Agrícola
41	Pozo	476315	3129355	10	125	---	80.30	Vertical	Eléctrica	Agrícola
42	Noria	496325	3129029	1	---	---	60.00	Aeromotor	Eléctrica	Pecuario
43	Pozo	476154	3128989	10	125	---	80.32	Vertical	Eléctrica	Agrícola
44	Pozo	477216	3128695	10	48	164.6	84.29	Vertical	Eléctrica	Agrícola
45	Pozo	474048	3128231	10	95	152.4	---	Vertical	Eléctrica	Agrícola
46	Pozo	475764	3128226	10	126	---	---	Vertical	Eléctrica	Agrícola
47	Pozo	476885	3127723	10	163	366	83.10	Vertical	Eléctrica	Agrícola
48	Pozo	477166	3126721	10	15	---	78.12	Vertical	Eléctrica	Agrícola
49	Pozo	475449	3125000	10	135	123	7.96	Vertical	Eléctrica	Agrícola
50	Pozo	476517	3124351	10	140	95	80.39	Vertical	Eléctrica	Agrícola
51	Pozo	475742	3122909	10	123	228.6	---	Vertical	Eléctrica	Agrícola
52	Pozo	476221	3122531	10	110	243.8	84.04	Vertical	Eléctrica	Agrícola
53	Pozo	477011	3122356	10	110	115	---	Vertical	Eléctrica	Agrícola
54	Pozo	476977	3120239	12	---	198.1	92.27	Vertical	Eléctrica	Agrícola
55	Pozo	477161	3115425	2	---	123.5	---	Sumergible	Eléctrica	Pecuario

DTD= Diámetro total de descarga Q= Gasto PTO= Profundidad Total de la Obra PNE= Profundidad al Nivel Estático

Anexo C.- Resultados de la interpretación de las pruebas de bombeo (GEOCALLI S.A. Consultores, 1978; IDEAS, 2009)

POZO No.	FECHA	PROFUNDIDAD (m)	DURACIÓN (hrs)	PNE (m)	PND (m)	CAUDAL (lps)	Q/S (lps/m)	T X 10 ⁻³ (m ² /s)	ETAPA	INTERPRETACIÓN	S
S6-B	20/X/78	---	5.5	13.81	35.05	151.6	7.1	30.8	ABATIMIENTO	JACOB	---
S6-B	20/X/78	---	4.0	13.81	35.05	151.6	7.1	10.0	RECUPERACIÓN	JACOB	---
S6-OBS	20/X/78	---	5.5	12.62	13.24	---	---	61.6	ABATIMIENTO	JACOB	0.053
S6-OBS	20/X/78	---	4.0	12.62	13.24	---	---	55.4	RECUPERACIÓN	JACOB	---
S9-B	25/X/78	---	4.0	35.31	37.98	126.3	47.3	---	RECUPERACIÓN	---	---
S9-B	25/X/78	---	2.5	35.31	37.98	126.3	47.3	---	ABATIMIENTO	---	---
S12-B	15/IX/78	---	4.0	39.36	49.03	67.3	7.0	21.6	RECUPERACIÓN	JACOB	---
S12-B	15/IX/78	---	4.5	39.36	49.03	67.3	7.0	20.5	ABATIMIENTO	JACOB	---
S13-B	13/IX/78	---	3.0	42.22	46.43	174.0	41.3	0.303	RECUPERACIÓN	JACOB	---
S13-B	13/IX/78	---	2.0	42.22	46.01	174.0	41.3	0.265	ABATIMIENTO	JACOB	---
S15-B	13/IX/78	---	4.0	53.60	66.10	70.0	5.6	4.0	RECUPERACIÓN	HANTUSH	---
S15-B	13/IX/78	---	4.0	53.60	64.44	70.0	6.5	38.8	ABATIMIENTO	JACOB	---
S17-B	15/VIII/78	198.25	4.5	53.07	68.72	34.0	2.2	16.3	RECUPERACIÓN	JACOB	---
S18-B	11/IX/78	---	2.5	50.74	57.58	72.7	10.3	26.9	RECUPERACIÓN	HANTUSH	---
S18-B	11/IX/78	---	5.0	50.74	58.83	72.7	9.1	---	ABATIMIENTO	---	---
S19-B	12/IX/78	---	4.5	57.76	72.20	84.2	5.8	4.8	RECUPERACIÓN	HANTUSH	---
S19-B	12/IX/78	---	1.5	57.76	70.23	84.2	6.8	---	ABATIMIENTO	---	---
S21-B	08/IX/78	---	4.5	53.67	62.70	73.0	8.1	95.4	RECUPERACIÓN	JACOB	---
S21-B	08/IX/78	---	4.0	53.67	60.46	73.0	10.8	121.4	ABATIMIENTO	JACOB	---
S24-B	09/IX/78	244.00	5.0	76.20	92.30	87.0	5.4	54.9	RECUPERACIÓN	JACOB	---
S26-B	28/VIII/78	---	4.0	72.43	85.05	126.3	10.0	---	RECUPERACIÓN	---	---
S27-B	06/IX/78	---	3.0	68.93	70.12	95.4	80.2	124.7	RECUPERACIÓN	JACOB	---
S27-B	06/IX/78	---	2.0	68.93	69.98	95.4	90.8	---	ABATIMIENTO	---	---
S27-OBS	20/IX/78	---	6.0	67.84	67.90	---	---	---	RECUPERACIÓN	---	---
S29-B	26/VIII/78	366.00	2.0	67.84	72.83	106.7	21.4	---	RECUPERACIÓN	---	---

S29-B	26/VIII/78	366.00	6.5	66.93	72.83	106.7	18.1	129.3	ABATIMIENTO	JACOB	---
S31-B	02/IX/78	---	3.5	66.93	68.58	81.4	49.3	74.4	RECUPERACIÓN	JACOB	---
S34-B	01/IX/78	---	5.0	63.45	67.63	95.4	22.8	96.9	RECUPERACIÓN	JACOB	---
S34-B	01/IX/78	---	4.0	63.45	66.84	95.4	28.1	---	ABATIMIENTO	---	---
S35-B	04/IX/78	---	4.5	59.95	70.02	84.2	8.4	66.9	RECUPERACIÓN	JACOB	---
S35-B	04/IX/78	---	3.5	59.95	69.95	84.2	8.4	70.0	ABATIMIENTO	JACOB	---
S37-B	30/VIII/78	---	3.5	39.97	40.33	60.0	166.6	---	RECUPERACIÓN	---	---
S37-B	30/VIII/78	---	5.3	39.97	40.13	60.0	375.0	---	ABATIMIENTO	---	---
S38-B	29/VIII/78	---	4.0	73.40	80.72	41.3	5.6	20.4	RECUPERACIÓN	JACOB	---
S50-B	26/X/78	---	4.0	34.22	53.76	137.5	7.0	24.4	RECUPERACIÓN	JACOB	---
S50-B	26/X/78	---	5.0	34.22	52.92	137.0	7.4	12.2	ABATIMIENTO	JACOB	---
S55-B	17/VIII/78	259.25	4.5	45.63	81.00	101.0	2.9	3.6	RECUPERACIÓN	JACOB	---
S55-B	17/VIII/78	259.25	3.5	45.63	72.56	101.0	3.7	---	ABATIMIENTO	---	---
S57-B	19/X/78	213.36	5.5	43.64	59.53	134.7	8.5	22.2	ABATIMIENTO	JACOB	---
S57-B	19/X/78	213.36	4.0	43.64	59.53	134.7	8.5	30.8	RECUPERACIÓN	JACOB	---
S63-B	22/IX/78	---	5.5	55.26	58.42	89.8	28.4	29.9	RECUPERACIÓN	JACOB	---
S63-B	22/IX/78	---	3.5	55.26	61.68	89.8	14.0	---	ABATIMIENTO	---	---
S63-OBS	22/IX/78	---	5.5	53.73	56.30	---	---	19.3	RECUPERACIÓN	JACOB	---
S63-OBS	22/IX/78	---	4.0	53.73	56.03	---	---	19.3	ABATIMIENTO	JACOB	0.00015
S64-B	16/VIII/78	250.00	5.0	58.62	63.69	73.0	14.4	7.6	RECUPERACIÓN	JACOB	---
S66-B	16/VIII/78	---	5.5	48.71	63.76	148.8	10.0	4.5	ABATIMIENTO	HANTUSH	---
S70-B	05/IX/78	---	5.0	60.24	76.31	120.7	7.5	96.0	RECUPERACIÓN	JACOB	---
S72-B	22/VIII/78	228.75	4.3	72.97	103.35	93.0	3.1	11.7	RECUPERACIÓN	JACOB	---

T= Transmisividad S = Coeficiente de almacenamiento PNE= Profundidad al Nivel Estático PND= Profundidad al Nivel Dinámico
 NOTA: Algunos valores se corrigieron.

Anexo D.- Profundidad al nivel estático (CONAGUA, 2014)

POZO No.	PREDIO	COORDENADAS WGS_84		PROFUNDIDAD AL NIVEL ESTÁTICO METROS
		UTM_X	UTM_Y	
S-1	El Pedernal 1	461637	3142633	13.49
S-2	El Pedernal 2	463838	3141765	11.39
S-3		461871	3142439	38.49
S-7		476239	3117893	100.00
S-11	Las Conchas	468089	3133875	69.20
S-12		469192	3133171	50.00
S-13	San Carlos	469306	3130979	56.31
S-14	San Isaac	470860	3131498	61.90
S-17		479221	3140658	70.10
S-18	Sta. Bernardina	471890	3129342	62.69
S-20	Agua Dulce	475707	3131364	75.99
S-21	Santa Leticia	472592	3126663	71.72
S-23		476313	3129673	79.50
S-24		478458	3130396	86.89
S-26	San Gonzalito	477420	3129945	86.80
S-27	María Dolores	477200	3128530	84.66
S-28		479691	3129962	68.75
S-29	San Pedro	476898	3127546	83.56
S-30	Santa Carmen	478263	3129236	88.45
S-31	La Hermosura	475476	3124810	77.59
S-32	El Refugio	477087	3126530	79.40
S-34	San José	476592	3124193	80.59
S-35	Alcalá	476998	3122715	83.40

POZO No.	PREDIO	COORDENADAS WGS_84		PROFUNDIDAD AL NIVEL ESTÁTICO METROS
		UTM_X	UTM_Y	
S-36	San Miguel	476234	3122378	90.40
S-38	La Lagunita	476202	3120101	91.48
S-39	El Retiro	477020	3120038	93.78
S-45		469044	3141333	35.32
S-46	San Juanico	470502	3141007	35.04
S-47	Xochitl	471170	3135867	34.32
S-48		478012	3139375	59.76
S-49		470546	3137622	45.02
S-50	San Alfredo	468744	3134735	45.56
S-51	Los Huicos	470436	3136176	48.54
S-54	El Pierro	472562	3137464	46.54
S-55	Las Vírgenes 5	473680	3138323	45.90
S-56	Las Vírgenes 1	473294	3135985	61.87
S-57	El Tetabiate	471140	3134667	52.15
S-58	El Tetabiate	471931	3135219	53.45
S-59	Las Vírgenes 4	474114	3137399	52.00
S-60	El Diamante 2	472882	3134386	67.84
S-61	El Mechudo	472580	3133525	67.39
S-65	Bacerac	477736	3138222	65.20
S-66		478673	3138906	70.20
S-70	La Humareda	475807	3126871	75.77
S-72	El Apache	477697	3132099	87.47
S-73	San Isidro	476778	3121546	87.83

Anexo E.- Elevación del nivel estático (CONAGUA, 2014)

POZO No.	PREDIO	COORDENADAS WGS_84		ELEVACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO METROS
		UTM_X	UTM_Y	
S-1	El Pedernal 1	461637	3142633	-6.49
S-2	El Pedernal 2	463838	3141765	-5.17
S-3		461871	3142439	-28.49
S-7		476239	3117893	-42.00
S-11	Las Conchas	468089	3133875	-57.61
S-12		469192	3133171	-35.00
S-13	San Carlos	469306	3130979	-37.18
S-14	San Isaac	470860	3131498	-42.28
S-17		479221	3140658	-25.10
S-18	Sta. Bernardina	471890	3129342	-42.18
S-20	Agua Dulce	475707	3131364	-41.95
S-21	Santa Leticia	472592	3126663	-45.07
S-23		476313	3129673	-41.50
S-24		478458	3130396	-42.89
S-26	San Gonzalito	477420	3129945	-50.51
S-27	María Dolores	477200	3128530	-48.41
S-28		479691	3129962	-22.75
S-29	San Pedro	476898	3127546	-50.84
S-30	Santa Carmén	478263	3129236	-50.91
S-31	La Hermosura	475476	3124810	-44.14
S-32	El Refugio	477087	3126530	-48.04
S-34	San José	476592	3124193	-42.77
S-35	Alcalá	476998	3122715	-12.52

POZO No.	PREDIO	COORDENADAS WGS_84		ELEVACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO METROS
		UTM_X	UTM_Y	
S-36	San Miguel	476234	3122378	-40.58
S-38	La Lagunita	476202	3120101	-42.51
S-39	El Retiro	477020	3120038	-41.19
S-45		469044	3141333	-28.32
S-46	San Juanico	470502	3141007	-25.10
S-47	Xochitl	471170	3135867	-16.21
S-48		478012	3139375	-25.76
S-49		470546	3137622	-31.02
S-50	San Alfredo	468744	3134735	-33.28
S-51	Los Huicos	470436	3136176	-32.78
S-54	El Pierso	472562	3137464	-26.18
S-55	Las Vírgenes 5	473680	3138323	-23.42
S-56	Las Vírgenes 1	473294	3135985	-37.44
S-57	El Tetabiate	471140	3134667	-33.04
S-58	El Tetabiate	471931	3135219	-32.20
S-59	Las Vírgenes 4	474114	3137399	-28.14
S-60	El Diamante 2	472882	3134386	-43.70
S-61	El Mechudo	472580	3133525	-43.91
S-65	Bacerac	477736	3138222	-30.89
S-66		478673	3138906	-30.20
S-70	La Humareda	475807	3126871	-46.12
S-72	El Apache	477697	3132099	-48.31
S-73	San Isidro	476778	3121546	-17.13

Anexo F.- Evolución del nivel estático (CONAGUA, 2010-2014)

POZO No.	PREDIO	COORDENADAS WGS_84		EVOLUCIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO METROS
		UTM_X	UTM_Y	
S-1	El Pedernal 1	461637	3142633	0.54
S-2	El Pedernal 2	463838	3141765	0.58
S-7		476239	3117893	-0.23
S-11	Las Conchas	468089	3133875	-5.07
S-12		469192	3133171	0.32
S-13	San Carlos	469306	3130979	7.45
S-14	San Isaac	470860	3131498	-0.06
S-17		479221	3140658	-0.80
S-20	Agua Dulce	475707	3131364	-0.83
S-23		476313	3129673	-0.40
S-24		478458	3130396	-15.63
S-27	María Dolores	477200	3128530	1.18
S-29	San Pedro	476898	3127546	-0.87
S-30	Santa Carmen	478263	3129236	-0.82
S-31	La Hermosura	475476	3124810	-1.33
S-32	El Refugio	477087	3126530	-1.77

POZO No.	PREDIO	COORDENADAS WGS_84		EVOLUCIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO METROS
		UTM_X	UTM_Y	
S-34	San José	476592	3124193	-0.75
S-36	San Miguel	476234	3122378	-5.63
S-38	La Lagunita	476202	3120101	-1.65
S-39	El Retiro	477020	3120038	-2.09
S-46	San Juanico	470502	3141007	1.22
S-47	Xochitl	471170	3135867	-0.13
S-48		478012	3139375	-0.29
S-50	San Alfredo	468744	3134735	0.81
S-55	Las Vírgenes 5	473680	3138323	2.24
S-57	El Tetabiate	471140	3134667	1.05
S-60	El Diamante 2	472882	3134386	-4.90
S-61	El Mechudo	472580	3133525	-5.95
S-65	Bacerac	477736	3138222	-3.90
S-66		478673	3138906	-5.38
S-70	La Humareda	475807	3126871	-0.18
S-73	San Isidro	476778	3121546	-1.52

Anexo G.- Parámetros fisicoquímicos de medidas en campo en el año 2011 (INEGI, 2013)

Clave de Campo	Obra	Coordenadas WGS 84		STD (mg/l)	CE (μScm^{-1})	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	pH
		UTM_X	UTM_Y				
1	Pozo	483914	3145959	596.30	776	29.4	9.10
2	Pozo	464470	3142989	630.00	830	28.3	9.40
3	Pozo	461665	3142810	6769.00	8920	29.2	7.30
4	Pozo	462170	3141923	11208.50	15210	26.3	8.20
5	Pozo	469796	3141186	591.30	780	28.1	8.70
6	Pozo	470457	3141178	969.40	1324	28.5	8.50
7	Pozo	479211	3140941	812.00	1021	31.3	8.40
8	Pozo	495371	3139991	316.70	425	27.5	9.30
9	Pozo	477740	3139218	1379.00	1750	31.2	9.10
10	Pozo	478718	3139147	1031.80	1295	31.2	8.50
11	Pozo	489465	3138980	351.70	447	30.8	9.10
12	Pozo	473653	3138420	1105.40	1400	30.6	9.20
13	Pozo	478788	3138411	2440.90	3110	31.2	8.40
14	Pozo	474841	3137582	1914.90	520	28.0	8.50
15	Pozo	474724	3136194	3133.20	4190	27.9	7.70
16	Pozo	468016	3136009	1731.60	2330	27.5	8.40
17	Pozo	475500	3135237	930.60	1024	37.1	9.40
18	Pozo	471173	3134825	3101.70	4090	28.7	8.30
19	Pozo	476017	3133780	957.60	1065	36.0	9.20
20	Pozo	472572	3133663	3833.40	4930	30.0	8.00
21	Pozo	469161	3133188	3252.80	4290	28.4	7.90
22	Pozo	495728	3132686	343.60	455	28.4	9.00

Clave de Campo	Obra	Coordenadas WGS 84		STD (mg/l)	CE (μScm^{-1})	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	pH
		UTM_X	UTM_Y				
28	Pozo	470889	3131708	2717.60	3470	31.0	7.9
29	Pozo	475683	3131418	1233.50	1571	32.6	8.6
30	Pozo	489945	3131378	610.40	806	28.6	8.9
31	Pozo	484624	3131375	340.70	436	29.2	9.0
32	Pozo	477630	3131193	1157.40	1423	29.4	9.0
33	Pozo	469358	3131166	2410.70	3000	31.3	8.0
34	Pozo	463813	3131088	2067.50	2810	26.7	8.5
35	Pozo	485350	3130915	429.10	598	26.1	9.1
36	Pozo	478442	3130524	1722.20	2190	31.0	8.0
37	Noria	486229	3130268	537.20	722	27.5	9.1
38	Pozo	477468	3130080	2789.30	3560	30.5	7.8
39	Pozo	476297	3129986	2150.40	2580	34.1	8.1
40	Pozo	478246	3129425	2806.70	3590	30.6	7.8
41	Pozo	476315	3129355	2298.00	2800	32.8	7.7
42	Noria	496325	3129029	502.40	623	31.5	8.7
43	Pozo	476154	3128989	2252.60	2830	32.0	8.0
44	Pozo	477216	3128695	3206.50	4040	31.2	7.8
45	Pozo	474048	3128231	1731.60	2560	30.0	8.8
46	Pozo	475764	3128226	2592.00	2860	31.8	8.1
47	Pozo	476885	3127723	3071.30	3950	30.5	7.9
48	Pozo	477166	3126721	3478.00	4860	27.5	8.0
49	Pozo	475449	3125000	2685.00	3450	30.0	8.3

23	Pozo	473981	3132643	2085.40	2660	30.6	8.00
24	Pozo	496165	3132626	415.90	555	27.5	7.80
25	Pozo	478109	3132619	1087.50	1468	28.3	9.00
26	Pozo	476913	3132292	991.50	1176	34.9	8.60
27	Pozo	477846	3132273	1061.60	1265	34.7	8.70

50	Pozo	476517	3124351	3556.80	4480	31.5	7.8
51	Pozo	475742	3122909	2432.00	3210	28.8	8.2
52	Pozo	476221	3122531	2780.20	3690	28.6	8.0
53	Pozo	477011	3122356	3217.70	4117	30.3	8.1
54	Pozo	476977	3120239	3216.40	4280	28.0	8.4
55	Pozo	477161	3115425	2749.20	3470	31.0	8.4

STD= Sólidos Totales Disueltos CE= Conductividad Eléctrica pH= potencial de Hidrógeno

ANEXO H.- Análisis físico-químicos del laboratorio del año 2011 (INEGI, 2013)

Clave de campo	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	CO ₃ ²⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	Dureza CaCO ₃ mg/l	RAS -----	pH -----	CE μScm ⁻¹	STD mg/l	Calidad de Riego	Agresividad -----	Familias de aguas
1	20.84	6.32	163.23	0.78	5.28	340.49	21.60	33.46	49.63	78.06	8.04	8.56	797	641.64	C3-S2	Incrustante	Sódica-Bicarbonatada
2	6.21	2.07	212.89	3.87	44.96	348.73	21.60	2.48	79.09	24.02	18.9	8.55	971	721.89	C3-S4	Agresiva	Sódica-Bicarbonatada
3	180.36	267.30	2289.80	40.12	119.50	52.17	0.00	0.00	4466.70	1551.24	25.30	7.35	12440	7415.95	C4-S4	Agresiva	Sódica-Clorurada
4	152.70	302.54	3784.15	104.4	2.31	1405.9	72.00	0.00	6345.55	1627.30	40.82	8.29	20380	12169.55	C4-S4	Incrustante	Sódica-Clorurada
5	36.87	8.26	139.73	6.06	31.89	232.30	0.00	0.50	138.26	126.10	5.41	7.95	832	593.88	C3-S1	Agresiva	Sódica-Bicarbonatada Clorurada
6	24.65	4.98	109.32	7.00	12.92	190.38	8.64	6.01	98.00	82.07	5.25	8.13	722	461.90	C2-S1	Agresiva	Sódica-Bicarbonatada Clorurada
7	32.46	2.67	211.74	3.56	55.95	207.96	8.64	9.85	202.07	92.07	9.60	7.91	1102	734.90	C3-S2	Agresiva	Sódica-Bicarbonatada Clorurada
8	45.89	13.61	29.89	5.00	5.76	180.68	5.64	6.44	46.09	170.64	1.00	8.54	473	339.01	C2-S1	Incrustante	Mixta-Bicarbonatada
9	70.94	11.18	349.45	6.06	131.65	169.21	0.00	15.24	482.12	223.18	10.18	8.29	2019	1235.85	C3-S3	Incrustante	Sódica-Clorurada
10	29.86	6.80	226.45	4.77	59.99	172.81	2.88	11.09	281.97	102.58	9.73	7.85	1398	796.63	C3-S2	Agresiva	Sódica-Clorurada
11	27.66	1.82	62.42	2.93	6.82	142.79	0.00	23.18	53.18	76.56	3.10	8.33	439	320.79	C2-S1	Agresiva	Sódica-Bicarbonatada Clorurada
12	38.48	4.86	236.34	8.29	58.60	148.28	2.70	14.38	329.69	116.09	9.54	8.42	1410	841.60	C3-S2	Incrustante	Sódica-Clorurada
13	169.94	45.68	571.30	9.93	426.36	149.13	0.00	31.11	893.34	612.49	10.05	7.97	3576	2296.80	C4-S3	Incrustante	Sódica-Clorurada
14	119.24	12.64	560.96	10.32	170.94	166.95	0.00	23.92	824.21	349.78	13.05	8.03	3003	1889.17	C4-S4	Incrustante	Sódica-Clorurada
15	231.46	36.45	666.71	13.22	158.45	115.33	0.00	36.93	1392.65	728.08	10.75	7.33	4900	2651.20	C4-S3	Agresiva	Sódica-Clorurada
16	21.04	1.82	573.60	15.21	299.47	292.53	0.00	25.10	524.66	60.05	32.21	7.94	2789	1753.43	C4-S4	Agresiva	Sódica-Sulfatada Clorurada
17	11.62	1.58	186.22	3.64	22.72	174.94	0.00	7.13	202.07	35.53	13.59	8.43	1057	609.91	C3-S3	Agresiva	Sódica-Clorurada
18	130.06	32.81	781.66	18.18	114.46	378.93	13.50	6.82	1233.66	459.87	15.86	7.80	4320	2710.07	C4-S4	Incrustante	Sódica-Clorurada
19	13.83	1.94	229.90	3.52	40.15	186.42	0.00	8.86	223.34	42.53	15.34	8.41	1082	707.96	C3-S3	Agresiva	Sódica-Clorurada
20	240.48	52.73	965.58	23.30	284.43	143.52	2.88	49.14	1684.94	817.65	14.69	7.58	6060	3447.01	C4-S4	Incrustante	Sódica-Clorurada
21	183.37	47.39	722.81	24.87	85.54	118.07	5.40	33.71	1461.43	653.02	12.31	7.84	4900	2682.58	C4-S4	Incrustante	Sódica-Clorurada
22	27.66	4.13	62.62	3.99	5.57	167.50	0.00	18.41	56.72	86.07	2.94	8.29	481	346.60	C2-S1	Agresiva	Sódica-Bicarbonatada Clorurada

23	80.16	18.23	597.74	15.25	74.45	210.89	0.00	29.00	903.98	275.22	15.68	7.81	3025	1929.68	C4-S4	Incrustante	Sódica-Clorurada
24	29.06	4.25	80.37	4.85	5.91	180.53	5.82	29.00	63.17	90.07	3.69	8.19	561	402.96	C2-S1	Agresiva	Sódica-Bicarbonatada Clorurada
25	17.23	6.44	275.88	5.04	46.73	109.84	0.00	10.29	404.13	69.56	14.39	8.36	1536	875.58	C3-S3	Agresiva	Sódica-Clorurada
26	33.27	2.79	245.30	3.32	49.86	187.45	0.00	12.21	271.19	94.58	10.98	8.22	1285	805.40	C3-S3	Incrustante	Sódica-Clorurada
27	24.05	4.62	298.87	4.61	29.63	216.74	0.00	15.12	343.87	79.06	14.63	8.16	1458	937.51	C3-S3	Agresiva	Sódica-Clorurada
28	196.99	67.80	423.02	37.07	94.72	112.58	5.40	23.61	1134.75	771.12	6.63	7.76	3870	2095.94	C4-S2	Incrustante	Cálcica Sódica-Clorurada
29	37.68	3.04	336.11	4.14	58.36	155.23	0.00	13.08	428.95	106.59	14.17	8.14	1723	1036.58	C3-S3	Agresiva	Sódica-Clorurada
30	18.84	7.41	158.63	2.31	13.88	351.48	21.60	0.00	63.81	77.56	7.84	8.51	813	637.95	C3-S2	Incrustante	Sódica-Bicarbonatada
31	26.05	9.23	63.22	2.89	0.00	266.35	16.20	2.11	3.55	103.08	2.71	8.32	463	389.61	C2-S1	Incrustante	Cálcica Sódica-Bicarbonatada
32	43.69	14.82	313.81	6.30	43.03	163.47	0.00	13.26	460.85	170.14	10.47	8.35	1716	1059.24	C3-S3	Incrustante	Sódica-Clorurada
33	156.11	48.84	478.19	23.81	57.83	142.79	5.40	26.28	1031.60	590.97	8.56	7.83	3607	1970.84	C4-S3	Incrustante	Sódica-Clorurada
34	55.11	15.80	528.77	6.65	193.08	205.94	10.80	18.16	709.00	202.66	16.16	8.27	2738	1743.30	C4-S4	Incrustante	Sódica-Clorurada
35	26.65	9.11	109.11	5.12	7.83	321.27	16.20	16.55	24.82	104.08	4.65	8.43	639	536.66	C2-S1	Incrustante	Sódica-Bicarbonatada
36	108.42	27.46	314.50	9.23	26.37	151.02	5.40	23.49	632.71	383.81	6.99	7.90	2277	1298.60	C4-S2	Incrustante	Sódica-Clorurada
37	48.90	14.09	95.87	10.48	13.26	266.72	19.92	17.72	81.54	180.14	3.11	8.46	794	565.49	C3-S1	Incrustante	Cálcica Sódica-Bicarbonatada
38	349.10	82.62	291.95	19.51	83.96	131.80	5.40	42.88	1220.72	1211.97	3.65	7.74	4170	2227.94	C4-S2	Incrustante	Cálcica Sódica-Clorurada
39	118.64	40.10	432.67	14.58	102.78	146.45	0.00	15.55	815.35	461.37	8.77	7.94	2929	1686.12	C4-S3	Incrustante	Sódica-Clorurada
40	210.82	83.11	511.07	17.28	74.78	137.66	2.88	25.66	1220.72	868.69	7.55	7.82	4040	2283.98	C4-S3	Incrustante	Cálcica Sódica-Clorurada
41	149.70	63.18	418.88	16.42	94.09	152.31	0.00	14.81	895.11	634.01	7.24	7.87	3240	1804.50	C4-S2	Incrustante	Cálcica Sódica-Clorurada
42	56.11	23.66	36.78	7.27	11.62	171.34	0.00	37.93	114.65	237.54	1.04	8.12	744	459.56	C2-S1	Incrustante	Mixta-Bicarbonatada Clorurada
43	180.36	64.4	329.91	15.99	92.27	146.45	0.00	14.38	912.84	715.57	5.37	7.86	3172	1756.58	C4-S2	Incrustante	Cálcica Sódica-Clorurada
44	233.27	109.96	502.91	22.29	64.84	109.84	0.00	20.20	1409.85	1035.33	6.80	7.57	4610	2473.14	C4-S2	Incrustante	Mixta-Clorurada
45	95.39	45.56	469.00	13.88	94.57	155.23	0.00	6.57	829.53	425.84	9.89	8.32	3035	1709.73	C4-S3	Incrustante	Sódica-Clorurada
46	136.67	52.25	574.75	16.15	122.09	146.45	0.00	15.68	1054.64	556.44	10.60	7.90	3656	2118.67	C4-S3	Incrustante	Sódica-Clorurada

47	199.20	89.91	509.80	19.98	66.71	104.34	0.00	18.90	1375.46	867.69	7.53	7.52	4350	2384.31	C4-S3	Agresiva	Cálcica Sódica-Clorurada
48	249.30	104.49	650.39	21.31	149.85	104.34	2.70	25.22	1650.55	1052.84	8.72	7.75	5460	2958.16	C4-S3	Incrustante	Cálcica Sódica-Clorurada
49	138.48	60.75	687.40	16.46	161.91	152.31	0.00	24.23	1302.79	595.98	12.25	7.99	4470	2544.32	C4-S4	Incrustante	Sódica-Clorurada
50	203.21	82.62	669.70	26.74	142.31	129.06	0.00	32.35	1478.62	847.68	10.01	7.55	5120	2764.61	C4-S3	Agresiva	Sódica-Clorurada
51	98.20	4.37	734.53	12.75	160.42	193.31	0.00	19.02	1019.19	263.21	19.70	7.98	3809	2241.79	C4-S4	Incrustante	Sódica-Clorurada
52	127.86	47.39	804.65	12.16	129.78	178.67	0.00	31.73	1311.65	514.41	15.44	7.88	4250	2643.87	C4-S4	Incrustante	Sódica-Clorurada
53	152.30	69.86	827.64	11.46	154.51	164.02	0.00	33.46	1435.73	668.03	13.93	7.93	4830	2848.99	C4-S4	Incrustante	Sódica-Clorurada
54	180.36	67.80	804.65	17.24	116.71	153.77	0.00	16.73	1559.80	729.58	12.96	7.90	4880	2917.07	C4-S4	Incrustante	Sódica-Clorurada
55	323.04	91.13	560.96	13.06	98.03	134.55	0.00	12.95	1471.18	1181.94	7.10	8.06	4610	2704.89	C4-S3	Incrustante	Cálcica Sódica-Clorurada

STD= Sólidos Totales Disueltos CE= Conductividad Eléctrica pH= potencial de Hidrógeno Ca²⁺= Calcio Mg²⁺= Magnesio
Na⁺=Sodio K⁺= Potasio SO₄²⁻= Sulfatos HCO₃⁻= Bicarbonatos CO₃²⁻= Carbonatos NO₃⁻= Nitratos Cl⁻= Cloruros

ANEXO I.- Clasificación del diagrama de Kelly

Número de Muestra	Agua Dulce	Evolución Natural Ligera	Evolución Natural	Mezcla Conservativa Ligera	Mezcla Conservativa (Agua de Mar)	Intrusión Marina Ligera	Intrusión Marina
1			X				
2			X				
3					X		
4					X		
5			X				
6			X				
7			X				
8	X						
9					X		
10			X				
11		X					
12			X				
13					X		
14					X		
15					X		
16			X				
17			X				
18					X		
19			X				
20					X		
21					X		
22		X					
23			X				
24		X					
25			X				
26			X				
27			X				

28					X		
29			X				
30			X				
31			X				
32					X		
33							X
34			X				
35			X				
36					X		
37		X					
38							X
39					X		
40							X
41							X
42						X	
43							X
44							X
45					X		
46					X		
47							X
48							X
49					X		
50							X
51					X		
52					X		
53					X		
54					X		
55							X

ANEXO J.- Perfiles de pozos

POZO S-1	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
461637	3142633
PROFUNDIDAD TOTAL: 76,20 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: 1969	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	SUELO
18,29	AREANA FINA
33,53	ARENA
45,72	CALICHE ARENOSO
48,77	GRAVA CON ARCILLA
51,82	ARCILLA
60,96	BARRO CALICHOSO
74,01	CALICHE
76,20	BARRO CALICHOSO

POZO S-2	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
463838	3141765
PROFUNDIDAD TOTAL: 91,44 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: 1966	
CORTE GEOLÓGICO:	
1,83	SUELO
6,71	ARCILLA Y ARENA FINA
17,31	CALICHE ARENOSO
24,38	ARENA FINA Y CALICHE
27,43	ARENA FINA
39,62	ARENA GRUESA
42,67	ARENA FINA
45,72	ARENA Y CALICHE
51,82	ARENA GRUESA Y CALICHE
57,30	ARENA Y GRAVA
88,39	ARCILLA
91,44	FÓSILES MARINOS

POZO S-4	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
461637	3142633
PROFUNDIDAD TOTAL: 54,86 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: 1966	
CORTE GEOLÓGICO:	
1,52	SUELO
6,10	ARENA FINA
12,19	CALICHE
15,24	ARENA FINA CON CALICHE
21,34	ARCILLA
30,48	ARCILLA PEGAJOSA
36,58	ARENA CON ARCILLA
45,72	GRAVA CON CALICHE
48,77	ARENA GRUESA
54,86	ARENA CON CALICHE

POZO S-5	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
461637	3142633
PROFUNDIDAD TOTAL: 73,15 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: 1966	
CORTE GEOLÓGICO:	
1,52	SUELO
9,14	ARENA CALICHOSA
12,19	AREANA GRUESA
18,29	GRAVA Y CALICHE
24,38	GRAVA GRUESA Y ARCILLA
30,48	ARENA GRUESA
36,58	GRAVA Y ARCILLA
42,67	GRAVA Y ARENA
48,77	ARENA GRUESA
51,82	GRAVA Y ARENA
60,96	GRAVA Y CALICHE
67,06	CALICHE ARENOSO
73,15	ARCILLA

POZO S-7	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
476239	3117893
PROFUNDIDAD TOTAL: 137,16 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
2,13	LIMO
86,87	GRAVA MIXTA CON POCA ARENA
128,00	GRAVA COMPACTA MUY DURA
137,16	GRAVA CON ARENA

POZO S-15	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
461637	3142633
PROFUNDIDAD TOTAL: 121,92 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,48	SUELO
9,14	CALICHE ARENOSO
12,19	GRAVA CON ARCILLA
15,24	CONGLOMERADO
36,57	BOLEO
42,67	CONGLOMERADO
51,81	GRAVAS
60,96	ARENA
70,10	GRAVAS
85,34	ARENA
121,92	ARENA FINA

POZO S-16	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
472166	3131003
PROFUNDIDAD TOTAL: 91.45 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO	
3,05	SUELO ARCILLOSO Y ARENA
15,25	GRAVA
30,50	COMGLOMERADO EN CAPAS DE GRAVA
39,65	ARENA CON CAPAS DE CONGLOMERADO
45,70	GRAVA Y ARENA
67,05	ARENA Y GRAVA
76,20	GRAVA
82,80	CONGLOMERADO CON CAPAS DE ARENA
91,45	ARENA

POZO S-19 (REPOSICIÓN)	
COORDENADAS:	
UTM_X	UTM_Y
474645	3131243
PROFUNDIDAD TOTAL: 173.21 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: 1971	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	SUELO
24,38	BOLEO
30,48	CONGLOMERADO
33,53	ARCILLA Y GRAVA
38,10	ARENA FINA
45,72	COMGLOMERADO
70,10	ARENAS Y GRAVAS
73,15	ARENA FINA
82,30	GRAVA Y ARCILLA
91,44	GRAVA Y ARENA
112,78	ARENA FINA Y GRUESA
118,87	ARENA FINA Y ARCILLA
124,97	ARENA FINA Y GRUESA
131,06	ARENA FINA
146,30	CANTO RODADO
158,50	PIEDRA BASÁLTICA
167,64	BASALTO
173,21	ROCA CON PEQUEÑAS FRACTURAS

POZO S-21	
COORDENADAS:	
UTM_X	UTM_Y
472592	3126663
PROFUNDIDAD TOTAL: 88,39 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	BARRO
6,10	BARRO ARENOSO
15,40	ARENA
18,28	ARENA CON GRAVA
24,38	GRAVA
27,43	GRAVA CON ARCILLA
33,52	GRAVA
36,57	GRAVA CON ARCILLA
39,62	ARCILLA
42,67	BOLEO CON GRAVA
83,52	ROCA
88,39	ARCILLA CON BOLEO

POZO S-17 (REPOSICIÓN)	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
479221	3140658
PROFUNDIDAD TOTAL: 240 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: 1978	
CORTE GEOLÓGICO:	
2.00	GRAVILLA CUARZOSA CON ARENA MEDIA A FINA
14.00	ARENA CUARZOSA DE MEDIA A FINA
34.00	GRAVA CON MUY POCA FINA. PROVIENEN EXCLUSIVAMENTE DE ROCAS VOLCÁNICAS
46.00	GRAVAS EMPACADAS EN ARENA MEDIA A GRUESA. PROVIENEN ÚNICAMENTE DE ROCAS VOLCÁNICAS
58.00	GRAVAS PROVENIENTES DE ROCAS VOLCÁNICAS
68.00	GRAVAS EMPACADAS EN ARENA MEDIA. PROVIENEN DE ROCAS VOLCÁMICAS
70.00	ARCILLA CAFÉ CON POCA ARENA FINA Y ESCASAS GRAVAS PROVENIENTES DE ROCAS VOLCÁNICAS
86.00	GRAVILLA EMPACADA CON ARENA GRUESA. PROVIENEN DE ROCAS VOLCÁNICAS
90.00	GRAVILLA EMPACADA CON ARENA MEDIA. PROVIENEN DE ROCAS VOLCÁNICAS
98.00	GRAVA FINA EMPACADA CON ARENA Y ARCILLA. LAS GRAVAS PROVIENEN DE ROCAS VOLCÁNICAS
110.00	ARCILLA CAFÉ QUE EMPACA A ESCASAS GRAVAS. PROVIENEN DE ROCAS VOLCÁNICAS
124.00	GRAVA Y GRAVILLAS EMPACADAS EN ARENA MEDIA. SE OBSERVAN FRAGMENTOS PROVENIENTES DE ROCAS VOLCÁNICAS Y BRECHAS DEL MISMO ORIGEN
136.00	ARCILLA CAFÉ EMPACADO A POCA ARENA GRUESA Y ESCASAS GRAVAS
146.00	GRAVILLA EMPACADA CON ARENA FINA Y ARCILLA. PROVIENEN DE ROCAS VOLCÁNICAS
170.00	GRAVILLA EMPACADA CON ARENA FINA Y ARCILLA. PROVIENEN DE ROCAS VOLCÁNICAS
180.00	GRAVILLA EMPACADA EN ARCILLA Y ARENA FINA. PROVIENEN DE ROCAS VOLCÁNICAS. SE OBSERVAN FRAGMENTOS MUY ANGULOSOS DE ROCAS VOLCÁNICAS
198.00	ROCA VOLCÁNICAS DE COMPOSICIÓN ÁCIDA (RIOLITAS)
204.00	GRAVILLA EMPACADA EN ARCILLA Y ARENA FINA. PROVIENEN DE ROCAS VOLCÁNICAS
226.00	GRAVILLA EMPACADA EN ARCILLA Y ARENA FINA. PROVIENEN DE ROCAS VOLCÁNICAS
236.00	ROCA VOLCÁNICAS DE COMPOSICIÓN BÁSICA (ANDESITAS Y/O BASALTOS), OBSERVANDOSE ADEMÁS ALGUNOS FRAGMENTOS PROVENIENTES DE ROCAS VOLCÁNICAS ÁCIDAS
240.00	ARENA GRUESA Y ARCILLA CAFÉ

POZO S-22	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
474012	3128044
PROFUNDIDAD TOTAL: 152,40 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	SUELO
12,19	ARENOSO
24,38	RODADO
36,58	ARENA
54,86	GRAVA CON CALICHE
70,10	ARENA CON CALICHE
79,25	ARENA
88,39	ARENA
97,59	BOLEO
115,52	GRAVA
146,30	CANTO RODADO
152,40	GRAVA CON ARCILLA
109,73	GRAVA Y ARENA
115,82	GRAVA GRUESA
121,92	CONGLOMERADO

POZO S-23	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
476313	3129673
PROFUNDIDAD TOTAL: 121.92 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	CALICHE ARENOSO
10,67	BOLEO
18,29	BOLEO Y GRAVA
21,34	CONGLOMERADO
27,43	BOLEO Y ARENA
30,48	COMGLOMERADO
42,67	BOLEO Y ARENA
54,86	CONGLOMERADO
64,00	BOLEO Y ARENA
67,06	CONGLOMERADO
82,29	GRAVA Y ARENA
94,49	BOLEO Y ARENA
109,73	GRAVA Y ARENA
115,82	GRAVA GRUESA
121,92	CONGLOMERADO

POZO S-25	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
476138	3128840
PROFUNDIDAD TOTAL: 128,32 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
4,27	SUELO VEGETAL Y ARENOSO
60,96	GRAVA GRUESA Y MEDIA
124,36	ARENA CON GRAVA MEDIA Y VELOS DE CALICHE
128,32	GRAVAS GRUESAS CON BOLEOS SUELTOS, GRANÍTICOS

POZO S-27 (REPOSICIÓN)	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
477200	3128530
PROFUNDIDAD TOTAL: 164,59 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	SUELO
6,10	BOLEO CHICO
18,29	BOLEO
24,38	GRAVA SUELTA
30,48	BOLEO DURO
57,91	BOLEO
67,06	ARENA GRUESA
73,15	ARENA CON POCO BOLEO
79,25	ARENA GRUESA
97,54	ARENA CON BOLEO
100,58	ARENA
104,55	CERRO
107,29	CERRO NEGRO
124,97	BOLEO CON CERRO
128,07	CERRO
134,11	BOLEO CON CERRO
137,16	CERRO
143,26	BOLEO CON CERRO
152,10	BOLEO CON POCA ARENA
164,59	BOLEO CONGLOMERADO

POZO S-28 (RELOCALIZACIÓN)	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
479691	3129962
PROFUNDIDAD TOTAL: 242,78 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	SUELO
6,10	BOLEO
10,67	BOLEO
21,34	BOLEO
143,25	BOLEO
242,78	BOLEO Y BASALTO

POZO S-52	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
472783	3138879
PROFUNDIDAD TOTAL: 90,83 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
5,18	SUELO ARENOSO
12,19	SUELO CALICHOSO ARENOSO
47,24	GRAVA Y ARENA
82,90	CALICHE AMARILLO ARENOSO
90,83	CALICHE ARCILLOSO OSCURO

POZO S-29	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
476898	3127546
PROFUNDIDAD TOTAL: 123,44 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	SUELO
6,50	CALICHE ARENOSO
9,14	CONGLOMERADO
30,48	BOLEO
33,53	ARENA CON CALICHE
36,58	GRAVAS GRUESAS
54,86	CONGLOMERADO
70,10	ARENA FINA
76,20	ARENA GRANO GRUESO
79,25	ARENA FINA
82,30	ARENAS
85,34	ARENA FINA
97,54	ARENA
121,92	CONGLOMERADO
123,44	BASALTO

POZO S-30	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
478263	3129236
PROFUNDIDAD TOTAL: 121,00 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,04	ARCILLA Y ARENA MEDIA
8,00	CONGLOMERADO
21,00	GRAVA
25,00	CONGLOMERADO
33,75	GRAVA
40,00	CONGLOMERADO
49,00	GRAVAS
58,00	GRAVAS Y ARENAS
60,50	ARENA Y GRAVAS
70,00	GRAVAS
74,00	GRAVAS Y ARENAS
79,00	GRAVA
86,00	GRAVA Y ARENA
94,00	GRAVAS
109,00	GRAVA Y ARENA
116,00	GRAVAS
121,00	GRAVAS Y ARENA

POZO S-31	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
475476	3124810
PROFUNDIDAD TOTAL: 121,92 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,04	BARRO
6,10	BARRO ARENOSO
15,24	ARENA
18,28	ARENA CON GRAVA
21,33	GRAVA
36,57	GRAVA CON ARCILLA
39,62	ARCILLA
42,67	BOLEO CON GRAVAS
73,15	ROCA
88,39	ARCILLA CON BOLEO
91,44	GRAVA CON BOLEO
112,77	BOLEO CON ARCILLA
121,92	ROCA

POZO S-33	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
473967	3132506
PROFUNDIDAD TOTAL: 121,92 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	SUELO
6,10	ARENA GRUESA
9,14	GRAVA
30,48	ARENA GRUESA
42,67	GRAVA CON ARCILLA
48,77	ARENA CONGLOMERADA
54,86	GRAVA
59,13	ARENA GRUESA
76,20	ARENA
82,30	ARENA GRUESA
108,20	ARENA
121,92	ARENA CON ARCILLA

POZO S-34	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
476592	3124193
PROFUNDIDAD TOTAL: 95 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
10,00	SUELO
20,00	BOLEO CHICO
30,00	ARENA FINA
40,00	BOLEO
60,00	ARENA CON CAPA DE ARCILLA
95,00	ARENA Y GRAVA

POZO S-35	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
476998	3122715
PROFUNDIDAD TOTAL: 131,64 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	SUELO
24,38	GRAVA
36,57	GRAVA GRUESA Y BOLEO
69,60	GRAVA
70,10	CONGLOMERADO ROJO
121,92	GRAVA GRUESA Y BOLEO
131,64	CONGLOMERADO

POZO S-36	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
476234	3122378
PROFUNDIDAD TOTAL: 91,44 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	BARRO
6,10	BARRO ARENOSO
15,24	ARENA
18,28	ARENA CON GRAVA
21,33	GRAVA
27,43	GRAVA Y ARCILLA
30,48	GRAVA LIMPIA
36,57	GRAVA CON ARCILLA
39,62	ARCILLA
42,67	BOLEO
73,15	ROCA
88,39	ARCILLA CON BOLEO
91,44	GRAVA

POZO S-45	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
469044	3141333
PROFUNDIDAD TOTAL: 85,34 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
1,52	SUELO
9,14	GRAVA
12,19	CALICHE ARENOSO
15,24	ARENA MEDIA
24,14	GRAVA
33,53	GRAVA Y ARCILLA
45,72	ARENA MEDIA
64,01	ARENA FINA
70,10	GRAVA
76,20	GRAVA CON FÓSILES
82,30	ARCILLA
85,34	GRAVA

POZO S-47	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
471170	3135867
PROFUNDIDAD TOTAL: 91,44 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
1,52	SUELO
9,14	GRAVA
12,19	CALICHE ARENOSO
15,24	ARENA MEDIANA
24,14	GRAVAS
33,53	GRAVAS Y ARCILLAS
45,72	ARENA MEDIANA
64,01	ARENA FINA
70,10	GRAVAS
76,20	GRAVAS CON FÓSILES MARINOS
82,30	ARCILLA
85,34	GRAVAS
91,44	FONDO MARINO

POZO S-42	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
462343	3147651
PROFUNDIDAD TOTAL: 201,17 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	SUELO
6,10	CALICHE ARENOSO
9,14	ARENA
18,29	ARENA
24,38	CALICHE ARENOSO
30,48	ARENA
36,58	CALICHE ARENOSO
39,62	CALICHE
51,82	BOLEO
60,96	GRAVA GRUESA Y CALICHE
64,01	ARENA Y CALICHE
88,39	ARCILLA
100,58	CALICHE BLANCO
115,82	ARCILLA AZÚL
140,21	ARCILLA BLANCA CON FÓSILES MARINOS
152,40	GRAVA BLANCA CON FÓSILES MARINOS
155,45	ARENA BLANCA CON FÓSILES MARINOS
161,54	GRAVA BLANCA CON FÓSILES MARINOS

167,64	ARENA BLANCA CON FÓSILES MARINOS
170,69	ARCILLA AZÚL
176,78	ARENA BLANCA
179,83	GRAVA Y CALICHE ROJO
201,17	GRAVA ROJA CON CAPAS DE ARCILLA

POZO S-48	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
478012	3139375
PROFUNDIDAD TOTAL: 91,00 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,00	BARRO
6,00	BARRO ARENOSO
15,00	ARENA
21,00	ARENA CON ARCILLA
24,00	ARENA GRUESA
30,00	ARENA
33,00	ARCILLA
36,00	ARENA CON BOLEO
39,00	BOLEO
42,00	BOLEO CON ARCILLA
45,00	BOLEO
52,00	BOLEO CON ARCILLA
54,00	ARCILLA
58,00	BOLEO CON GRAVA
61,00	GRAVA
64,00	BOLEO CON GRAVA
70,00	BOLEO
73,00	ARCILLA AZÚL
79,00	ARCILLA
82,00	BOLEO CON ARCILLA
91,00	ARCILLA

POZO S-49	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
470546	3137622
PROFUNDIDAD TOTAL: 91,44 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
2,44	LIMO-ARENOSA
22,56	GRAVA Y ARENA
32,00	CALICHE BLANCO
60,96	GRAVA Y ARENA CON VETAS DE CALICHE
70,10	CALICHE AMARILLO MUY ARENOSO
76,80	CALICHE GRIS
87,78	GRAVA Y ARENA
91,44	CALICHE GRIS

POZO S-50	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
468744	3134735
PROFUNDIDAD TOTAL: 91,44 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	ARENAS
6,10	ARENAS Y GRAVAS
9,14	CALICHE
12,19	CALICHE ARENAS FINAS CUARZOSAS
15,24	ARENAS FINAS Y MEDIAS Y CALICHE
21,34	ARENAS Y CALICHE
24,38	ARENAS FINAS Y GRAVAS GRUESAS
27,43	ARENAS MEDIAS Y GRAVAS GRUESAS
33,53	BOLEOS
36,58	ARENAS MEDIAS Y GRAVAS
39,62	GRAVAS Y ARENAS
42,67	ARENAS GRAVAS Y CALICHE
45,72	GRAVAS Y ARENAS
48,77	MATERIAL CALICHOSO Y ARENAS
51,82	ARENAS Y GRAVAS
60,96	GRAVAS Y ARENAS
64,01	GRAVAS FINAS Y ARENAS GRUESAS
76,20	GRAVAS Y ARENAS GRUESAS Y MEDIAS
79,25	BOLEOS Y GRAVAS
88,39	BOLEOS, GRAVAS Y ARENAS
91,44	BOLEOS Y GRAVAS

POZO S-51 (REPOSICIÓN)	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
470436	3136176
PROFUNDIDAD TOTAL: 243,84 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	SUELO
27,43	CALICHE ARENOSO
30,48	ARENA
54,86	GRAVA
60,98	ARCILLA Y GRAVA
67,06	ARENA Y ARCILLA
73,10	CALICHE
79,25	CALICHE ARENOSO
115,82	CALICHE BLANCO
118,87	ARCILLA
195,07	GRAVA CON ARCILLA
243,84	GRAVA

POZO S-54	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
472562	3137464
PROFUNDIDAD TOTAL: 89,00 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
7,62	SUELO ARENOSO
12,19	ARENA CON GRAVA
16,15	GRAVA Y BOLEOS
25,90	ARENA Y GRAVA
39,62	CALICHE ARENOSO (AMARILLO)
77,72	ARENA Y GRAVA
79,25	CALICHE AMARILLO
85,34	CALICHE ARCILLOSO
89,00	CALICHE AMARILLO

POZO S-55 (REPOSICIÓN)	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
473680	3138323
PROFUNDIDAD TOTAL: 201,17 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	SUELO
12,19	CALICHE
33,53	GRAVA
45,72	ARENA
51,82	GRAVA Y ARENA
54,86	ARENA
57,06	GRAVA Y CALICHE
73,15	ARCILLA
76,20	ARENA CON ARCILLA
82,30	GRARVA
91,44	GRAVA CON ARCILLA
109,73	ARENA GRUESA
121,92	GRAVA
131,06	ARENA
170,69	GRAVA
188,98	GRAVA CON ARCILLA
201,17	GRAVA

POZO S-56	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
473294	3135985
PROFUNDIDAD TOTAL: 91,44 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
15,24	SUELO ARENOSO CON CALICHE
24,38	SUELO ARENOSO CON PIEDRA SUELTA
36,58	ARENA GRUESA
85,34	GRAVA Y ARENA
91,44	CALICHE Y MARGA BLANDA AZÚL VERDE

POZO S-57	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
471140	3134667
PROFUNDIDAD TOTAL: 91,44 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
6,70	LIMO ARENOSO
60,96	GRAVA Y ARENA CON VETAS DE BARRO
89,61	GRAVA CON VETAS DE CALICHE AMARILLO
91,44	BARRO

POZO S-58 (REPOSICIÓN)	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
471931	3135219
PROFUNDIDAD TOTAL: 152,40 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	SUELO
12,19	ARENA FINA
18,28	ARENA
27,43	GRAVA
33,52	GRAVA Y BASALTO
36,57	GRAVAS
54,86	ARENA Y ARCILLA
57,91	ARENA
60,96	ARENA GRUESA
64,00	ARENA Y ARCILLA
67,05	CALICHE Y ARENA
73,15	GRAVAS
79,24	CALICHE Y ARENA
82,29	ARENA
91,44	GRAVA
94,48	ARENA Y ARCILLA
152,40	ARCILLA PURA

POZO S-61	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
472580	3133525
PROFUNDIDAD TOTAL: 210,31 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	SUELO
9,14	GRAVA
15,24	ARENA
21,33	BOLEO
30,48	CONGLOMERADO
33,53	BOLEO CHICO
76,20	CONGLOMERADO
82,30	ARCILLA Y ARENA
88,39	ARENA CON ARCILLA
106,68	ARCILLA ARENOSA
143,26	ARENA GRUESA Y CAPAS DE CALICHE ROJO
210,31	CANTO RODADO

POZO S-66	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
478673	3138906
PROFUNDIDAD TOTAL: 134,11 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	SUELO
9,14	ARENA Y CALICHE
12,19	GRAVA
21,34	CANTO RODADO
48,77	BOLEO
51,82	CANTO RODADO
70,10	BOLEO
79,25	CANTO RODADO
97,54	BOLEO
134,11	BOLEO Y ARCILLA

POZO S-69	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
476880	3132100
PROFUNDIDAD TOTAL: 90,00 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
10,00	SUELO, ARENAS, GRAVAS, CALICHE
50,00	GRAVA (TOBA)
85,00	GRAVA Y ARENA
90,00	GRAVA ARENA (TOBA)

POZO S-67	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
461637	3142633
PROFUNDIDAD TOTAL: 95,00 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	SUELO ARENOSO
9,15	GRAVAS GRUESAS
18,30	GRAVA
21,35	GRAVAS GRUESAS
27,49	GRAVAS
33,54	GRAVAS Y ARCILLAS
36,59	ARENAS Y ARCILLAS
39,64	ARENAS
51,83	ARENAS Y GRAVAS
64,03	GRAVAS
76,23	GRAVAS Y ARENAS CON ARCILLA
85,37	ARENAS GRUESAS Y GRAVAS
91,44	GARAVAS Y ARCILLAS
95,00	GRAVAS

POZO S-67 (REPOSICIÓN)	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
475600	3132257
PROFUNDIDAD TOTAL: 188,97 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	SUELO
30,48	BOLEO
42,67	CONGLOMERADO
45,72	CALICHE ARENOSO
57,91	GRAVA
67,06	ARENA
70,10	CALICHE ARENOSO
91,44	ARENA
94,49	GRAVAS
109,73	ARENA
118,87	GRAVA
123,74	ARENA
131,06	GARAVA
137,16	GRAVA CON ARCILLA
164,59	CONGLOMERADO
170,69	ARENA GRUESA
179,83	GRAVA
188,97	CONGLOMERADO

POZO S-68 (REPOSICIÓN)	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
476257	3133979
PROFUNDIDAD TOTAL: 222,50 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	SUELO
4,10	CALICHE ARENOSO
30,48	BOLEO
48,76	CALICHE ARENOSO
70,10	GRAVAS Y ARENAS
76,20	CALICHE ARENOSO
152,40	GRAVAS Y ARENAS
164,59	CONGLOMERADO
170,69	GRAVA FINA
182,88	GRAVAS
188,97	CONGLOMERADO
213,36	GARAVA CON ARCILLA
222,50	ARCILLA

POZO S-70	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
475807	3126871
PROFUNDIDAD TOTAL: 128,02 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
4,27	SUELO VEGETAL ARENOSO
57,91	GRAVA GRUESA Y MEDIA
94,49	ARENA CON GRAVA MEDIA Y VETAS DE BARRO CALICHOSO
96,31	CALICHE PEGAJOSO
123,44	GRAVA Y ARENA CON PEQUEÑAS VETAS DE BARRO
128,02	GARAVA GRUESA CON BOLEOS SUELTOS GRANÍTICOS

POZO S-72	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
477697	3132099
PROFUNDIDAD TOTAL: 121,40 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	SUELO ARCILLA, ARENAS
21,75	GRAVAS Y ARENAS
42,70	GRAVAS
48,80	GRAVAS CON ARCILLAS
82,33	GRAVAS
85,38	GRAVAS ARENAS Y ARCILLA
121,40	GRAVAS

POZO S-73	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
476778	3121546
PROFUNDIDAD TOTAL: 128,01 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
0,60	LIMO ARENOSO
27,43	GRAVA CON ARENA
121,92	GRAVA MEDIANA Y GRUESA
128,01	GRAVA CON ARENA COMPACTADA DURA

POZO S-79	
COORDENADAS WGS_84	
UTM_X	UTM_Y
461637	3142633
PROFUNDIDAD TOTAL: 91,44 m	
AÑO DE PERFORACIÓN: SIN DATO	
CORTE GEOLÓGICO:	
3,05	LIMO ARENOSO
57,91	GRAVA Y ARENA
66,44	ARENA GRUESA
73,15	CALICHE DURO
78,02	CALICHE GRIS
82,30	CALICHE MUY ARENOSO (ARENILLA)
91,44	CALICHE GRIS