

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA Y
SITUACIÓN ACTUAL DE LA INTRUSIÓN
MARINA EN LA PORCIÓN COSTERA DEL
ACUÍFERO CABORCA, SONORA, MÉXICO.

TESIS

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



PRESENTA:

DAYNA ANGELICA CAÑEZ ARAIZA

Hermosillo, Sonora, Octubre de 2018

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

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada No. 786615 durante los estudios de maestría.

Quiero agradecer a mis padres Francisco de Paula Cañez Valdez y Martha Guadalupe Araiza Martínez, simplemente porque no existen palabras para describir el amor y agradecimiento que siento hacia ellos. En general a mi familia completa, sobre todo a mis hermanas Denya, Danya y Diana por siempre apoyarme en todo, y a mi sobrinito Kristian Francisco por siempre hacerme reír y distraerme cuando más lo necesitaba.

Agradezco al Dr. Miguel Rangel Medina por brindarme la oportunidad de trabajar con él y por el conocimiento que compartió conmigo a lo largo de estos dos años. Al Dr. Rogelio Monreal Saavedra por dirigir este trabajo de tesis y también al Dr. Francisco Javier Grijalva Noriega, a los M.C. Margarita de la O Villanueva y Adrián Grijalva Montoya por sus comentarios, observaciones y apoyo durante la realización de este trabajo de investigación y mostrar disponibilidad para mí.

Agradezco al Distrito de Riego 037 Altar-Pitiquito-Caborca por su apoyo brindado a la hora de planificar y recolectar las muestras para análisis, a la maestra Beatriz Elena Arias Tobín del laboratorio de Agua, Suelo y Planta de la Universidad de Sonora campus Caborca y al personal del laboratorio Isotech Laboratories ubicado en Champaign, Illinois por amablemente realizar el análisis fisicoquímico y el análisis de isotópico de las muestras de agua tomadas para poder realizar este trabajo.

Agradezco a mis amigas de Caborca porque a pesar de la distancia, siempre están presentes de alguna forma en mi vida y a mis compañeros de la Maestría en Ciencias-Geología por los pocos, pero buenos momentos compartidos.

Para no omitir de forma involuntaria a alguna persona que ha contribuido de manera significativa durante el lapso de mi vida que me llevó a concluir mi formación y la presente tesis, quiero agradecer a todos mis amigos que me han mostrado un apoyo constante.



CONTENIDO

	RESUMEN.....	1
	ABSTRACT.....	2
I.	INTRODUCCIÓN.....	4
1.1	Objetivos.....	7
1.1.1	Objetivo general.....	7
1.1.2	Objetivos específicos.....	7
1.2	Hipótesis.....	7
1.3	Metodología.....	9
1.4	Estudios previos.....	14
1.5	Localización del área de estudio.....	16
1.6	Situación administrativa del acuífero.....	18
1.7	Zona agrícola.....	19
II.	MARCO FÍSICO.....	24
2.1	Fisiografía.....	24
2.2	Geomorfología.....	25
2.3	Geología regional.....	25
2.4	Estratigrafía.....	27
2.5	Geología del subsuelo.....	28
2.5.1	Depósitos aluviales.....	29
2.5.2	Caliza, dolomía y conglomerados calcáreos.....	30
2.5.3	Sedimentos arcillosos.....	30
2.5.4	Funcionamiento hidráulico de las rocas.....	31
2.5.4.1	Depósitos aluviales cuaternarios.....	31
2.5.4.2	Depósitos fluviales cuaternarios.....	32
2.5.4.3	Sedimentos terciarios y cuaternarios.....	32
2.5.4.4	Rocas ígneas intrusivas, extrusivas y metamórficas.....	33
2.6	Tipo de clima.....	33
2.7	Análisis climatológico.....	35
2.7.1	Estación Pitiquito.....	36
2.7.2	Estación Puerto Libertad.....	37
2.7.3	Estación Puerto Peñasco.....	38
2.7.4	Polígonos de Thiessen.....	39
2.7.5	Evaporación potencial.....	41
2.7.6	Evapotranspiración real.....	41
2.8	Hidrología superficial.....	41
2.8.1	Corrientes principales.....	42
III.	HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA.....	43
3.1	Piezometría.....	43
3.2	Elevación del nivel estático.....	45
IV.	RESULTADOS.....	52
4.1	Hidrogeoquímica.....	52
4.1.1	Muestreo hidrogeoquímico.....	53
4.1.2	Parámetros fisicoquímicos de campo.....	56
4.1.3	Proceso de toma y transporte de muestras.....	59
4.1.4	Resultados de laboratorio.....	61
4.1.5	Balance iónico.....	63
4.2	Calidad del agua y características fisicoquímicas.....	68



4.2.1	Calcio.....	68
4.2.2	Magnesio.....	72
4.2.3	Sodio.....	76
4.2.4	Potasio.....	80
4.2.5	Sulfatos.....	84
4.2.6	Bicarbonatos.....	88
4.2.7	Cloruros.....	92
4.2.8	Nitratos.....	96
4.2.9	Bromuros.....	101
4.2.10	Conductividad eléctrica.....	102
4.2.11	Sólidos totales disueltos.....	107
4.3	Clasificación del agua (diagramas hidroquímicos)	112
4.3.1	Diagramas de Piper.....	113
4.3.2	Diagramas de Stiff.....	117
4.4	Isótopos estables.....	120
4.4.1	Aporte de deuterio y oxígeno a las aguas subterráneas.....	124
4.4.2	Isótopos estables (deuterio y oxígeno 18) en el acuífero costero de Caborca.....	125
4.5	Geofísica.....	127
4.5.1	Reinterpretación de Secciones Geofísicas.....	129
V.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	137
5.1	Calcio.....	137
5.2	Magnesio.....	137
5.3	Sodio.....	138
5.4	Potasio.....	139
5.5	Bicarbonatos.....	139
5.6	Cloruros.....	139
5.7	Bromuros.....	140
5.8	Nitratos.....	141
5.9	Conductividad Eléctrica.....	141
5.10	Sólidos totales disueltos.....	142
5.11	Diagramas hidroquímicos.....	143
5.12	Isótopos estables.....	144
5.13	Reinterpretación de secciones geofísicas.....	147
VI.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	148
6.1	Conclusiones.....	148
6.2	Recomendaciones.....	152
VII.	REFERENCIAS CITADAS.....	153

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Esquema de un acuífero costero con sobrebombeo y su consecuente cono de depresión.....	8
2	Diagrama de flujo de metodología	9



3	Localización del acuífero costero de Caborca	17
4	Localización del acuífero administrativo de Caborca y acuíferos colindantes, tomada de CONAGUA, (2010)	18
5	Volumen extraído y superficie sembrada por año agrícola, tomada de Banco Mundial, (2006).....	20
6	Variación del nivel estático promedio en el acuífero, tomada de Banco Mundial, (2006)	21
7	Fisiografía de la porción costera del acuífero administrativo de Caborca, Modificada de INEGI, (2009)	24
8	Tipo de clima en la región	34
9	Localización de las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio	35
10	Precipitación media acumulada y temperatura media mensual en la estación Pitiquito durante el periodo 1966-2015	37
11	Precipitación media acumulada y temperatura media mensual en la estación Puerto Libertad durante el periodo 1966-2008	38
12	Precipitación media acumulada y temperatura media mensual en la estación Puerto Peñasco durante el periodo 1966-2015	39
13	Polígonos de Thiessen entre las estaciones Puerto Peñasco, Pitiquito y Puerto Libertad	40
14	Corrientes superficiales localizadas en el área de estudio	43
15	Localización de aprovechamientos	44
16	Elevación del nivel estático y dirección de flujo 1966	45
17	Elevación del nivel estático y dirección de flujo 1976	46
18	Elevación del nivel estático y dirección de flujo 1986	46
19	Elevación del nivel estático y dirección de flujo 1996	47
20	Elevación del nivel estático y dirección de flujo 1997	47
21	Elevación del nivel estático y dirección de flujo 1998	48
22	Elevación del nivel estático y dirección de flujo 1999	48
23	Elevación del nivel estático y dirección de flujo 2000	49
24	Elevación del nivel estático y dirección de flujo 2001	49
25	Elevación del nivel estático y dirección de flujo 2002	50
26	Elevación del nivel estático y dirección de flujo 2003	50
27	Elevación del nivel estático y dirección de flujo 2014	51



28	Elevación del nivel estático y dirección de flujo 2015	51
29	Distribución del muestreo de aguas subterráneas para análisis fisicoquímico en el año 1981	54
30	Distribución del muestreo de aguas subterráneas para análisis fisicoquímico en el año 2010	54
31	Distribución del muestreo de aguas subterráneas para análisis fisicoquímico en el año 2017	55
32	Distribución del muestreo de aguas subterráneas para análisis de bromuros y nitratos en el año 2017	55
33	Medición de parámetros en campo	56
34	Sitios de medición de parámetros en campo	57
35	Toma de muestras de la descarga de flujo.....	59
36	Preservación de muestras en hielo	60
37	Distribución de isovalores de calcio para el año 1981	69
38	Concentraciones de calcio para el año 1981	70
39	Distribución de isovalores de calcio para el año 2010	70
40	Concentraciones de calcio para el año 2010	71
41	Distribución de isovalores de calcio para el año 2017	71
42	Concentraciones de calcio para el año 2017	72
43	Distribución de isovalores de magnesio para el año 1981	73
44	Concentraciones de magnesio para el año 1987	74
45	Distribución de isovalores de magnesio para el año 2010	74
46	Concentraciones de magnesio para el año 2010	75
47	Distribución de isovalores de magnesio para el año 2017	75
48	Concentraciones de magnesio para el año 2017	76
49	Distribución de isovalores de sodio para el año 1981	77
50	Concentraciones de sodio contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 1981	78
51	Distribución de isovalores de sodio para el año 2010	78
52	Concentraciones de sodio contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 2010	79
53	Distribución de isovalores de sodio para el año 2017	79



54	Concentraciones de sodio contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 2017	80
55	Distribución de isovalores de potasio para el año 1981	81
56	Concentraciones de potasio para el año 1981	82
57	Distribución de isovalores de potasio para el año 2010	82
58	Concentraciones de potasio para el año 2010	83
59	Distribución de isovalores de potasio para el año 2017	83
60	Concentraciones de potasio para el año 2017	84
61	Distribución de isovalores de sulfato para el año 1981	85
62	Concentraciones de sulfatos contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 1981	86
63	Distribución de isovalores de sulfato para el año 2010	86
64	Concentraciones de sulfatos contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 2010	87
65	Distribución de isovalores de sulfatos para el año 2017	87
66	Concentraciones de sulfatos contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 2017	88
67	Distribución de isovalores bicarbonatos para el año 1981	89
68	Concentraciones de bicarbonatos para el año 1981	90
69	Distribución de isovalores de bicarbonatos para el año 2010	90
70	Concentraciones de bicarbonatos para el año 2010	91
71	Distribución de isovalores de bicarbonatos para el año 2017	91
72	Concentraciones de bicarbonatos para el año 2017	92
73	Distribución de isovalores de cloruros para el año 1981	93
74	Concentraciones de cloruros contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 1981	94
75	Distribución de isovalores de cloruro para el año 2010	94
76	Concentraciones de cloruros contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 2010	95
77	Distribución de isovalores de cloruro para el año 2017	95
78	Concentraciones de cloruros contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 2017	96



79	Distribución de isovalores de nitratos para el año 1981	98
80	Valores de nitratos contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 1981	98
81	Distribución de isovalores de nitratos para el año 2010	99
82	Valores de nitratos contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 2010	99
83	Distribución de isovalores de nitratos para el año 2017	100
84	Valores nitratos contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 2017	100
85	Distribución de isovalores de bromuros para el año 2017	102
86	Distribución de isovalores de conductividad eléctrica para el año 1981	104
87	Valores de conductividad eléctrica para el año 1981	105
88	Distribución de isovalores de conductividad eléctrica para el año 2010	105
89	Valores de conductividad eléctrica para el año 2010	106
90	Distribución de isovalores de conductividad eléctrica para el año 2017	106
91	Valores de conductividad eléctrica para el año 2017	107
92	Distribución de isovalores de sólidos totales disueltos para el año 1981	109
93	Valores de sólidos totales disueltos contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 1981	110
94	Distribución de isovalores de sólidos totales disueltos para el año 2010	110
95	Valores de sólidos totales disueltos contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 2010	111
96	Distribución de isovalores de sólidos totales disueltos para el año 2017	111
97	Valores de sólidos disueltos totales contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 2017	112
98	Diagrama de Piper 1981	114
99	Diagrama de Piper 2010	115
100	Diagrama de Piper 2017	116
101	Distribución de Diagramas de Stiff 1981	119
102	Distribución de Diagramas de Stiff 2010	119
103	Distribución de Diagramas de Stiff 2017	120



104	Distribución del muestreo de aguas subterráneas para análisis isotópico en el año 2018	126
105	Rangos típicos de resistividades eléctricas de los materiales de la tierra. Modificado de Palacky, (1987); Perttu, (2008)	128
106	Levantamientos de TEMs realizado por la Universidad de Sonora en el área de la costa de Caborca. Fuente Comisión Nacional del Agua, (2007)	130
107	Perfil de Resistividad 15	133
108	Perfil de Resistividad 15 con valores en pozos del año 2010	134
109	Perfil de Resistividad 15 con valores en pozos del año 2017	134
110	Perfil de Resistividad 16	135
111	Perfil de Resistividad 16 con valores en pozos del año 2010.....	136
112	Perfil de Resistividad 16 con valores en pozos del año 2017	136
113	Zonificación de aguas a partir del contenido de ^2H y ^{18}o	146
114	Comparación de gasto, nivel estático y calidad del agua en los pozos para los años 2010 y 2017	147
115	Distribución de los tipos de agua encontrados en el acuífero de la Costa de Caborca en el año 1981	149
116	Distribución de los tipos de agua encontrados en el acuífero de la Costa de Caborca en el año 2010	149
117	Distribución de los tipos de agua encontrados en el acuífero de la Costa de Caborca en el año 2017	150
118	Perfil hidrogeoquímico 2010	151
119	Perfil hidrogeoquímico 2017	151

ÍNDICE DE TABLAS

1	Localización y periodo con datos de las estaciones meteorológicas	36
2	Cálculo de precipitación y temperatura del área de estudio mediante polígonos de Thiessen	40
3	Parámetros fisicoquímicos obtenidos en campo	58
4	Resultados de laboratorio 1981	62



**Caracterización Hidrogeoquímica y Situación Actual de la Intrusión Marina en
la Porción Costera del Acuífero Caborca, Sonora, México**



5	Resultados de laboratorio 2010	62
6	Resultados de laboratorio 2017	63
7	Tabla de aniones y cationes para la fórmula del balance iónico	64
8	Resultados del balance iónico para el año 1981	65
9	Resultados del balance iónico para el año 2010	66
10	Resultados del balance iónico para el año 2017	67
11	Clasificación del agua con base en la conductividad eléctrica. APHA, (1995).....	103
12	Clasificación del agua con base en sólidos disueltos totales. Fetter, (2001)	108
13	Resultados del Análisis Isotópico	126
14	Unidades resistivas interpretadas dentro del área estudiada	130



Resumen

Con el fin de identificar los procesos que controlan la evolución geoquímica del agua subterránea en la porción costera del acuífero administrativo de Caborca, se llevó a cabo una campaña de muestreo para determinar características fisicoquímicas del agua subterránea en pozos de abastecimiento con profundidades de perforación que van de 50 a 213 metros de profundidad. En campo se midieron parámetros fisicoquímicos de pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, temperatura, salinidad y ORP (potencial redox). Los constituyentes químicos analizados en el laboratorio fueron los cationes calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+) y potasio (K^+) y los aniones carbonato (CO_3^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}), cloruro (Cl^-), bromuro (Br^-) y nitrato (NO_3^-). Además, se realizó otra campaña de muestreo para obtener muestras de agua que fueron enviadas al laboratorio para analizar isótopos estables de oxígeno 18 (^{18}O) y deuterio (^2H).

De acuerdo con el análisis geoquímico realizado a través de los diagramas de Piper y de Stiff, se observan cuatro tipos de agua predominantes en el área de estudio: clorurada-sódica (Cl-Na), clorurada-cálcica (Cl-Ca), clorurada-bicarbonatada-sódica-cálcica (Cl- HCO_3^- -Na-Ca) y bicarbonatada-cálcica (HCO_3^- -Ca). Del análisis de isótopos estables, se pueden definir tres grupos de agua presentes en el área de estudio: agua de recarga, agua típica del valle y agua de zona de interfase.

Con el fin de comparar, de manera general, la evolución hidrogeoquímica de la porción costera del acuífero administrativo de Caborca, se tomaron en cuenta los resultados de dos muestreos fisicoquímicos llevados a cabo en 1981 y en 2010 y se compararon los resultados con los obtenidos para este trabajo. Además, se hizo una comparación de los gastos de los pozos y de los niveles piezométricos en los diferentes años.

Se identificó que la varianza en la hidrogeoquímica del área de estudio proviene principalmente de la mezcla del agua subterránea con el agua marina, además del aporte de nutrientes por actividades humanas al observarse elevadas concentraciones de nitratos en el año 2010 en comparación con los otros años, probablemente como consecuencia del uso de



fertilizantes. Se puede determinar que un factor que juega un papel importante es el gasto de los pozos, al observarse una aparente recuperación en la calidad del agua al haber disminuido los volúmenes de extracción de los pozos.

Abstract

In order to identify the processes that control the geochemical evolution of groundwater in the coastal portion of the administrative aquifer of Caborca, a sampling campaign was carried out to determine the physicochemical characteristics of groundwater in wells with drilling depths that go from 50 to 213 meters. In the field, physicochemical parameters of pH, electrical conductivity, total dissolved solids, temperature, salinity and ORP were measured. The chemical constituents analyzed in the laboratory were the following cations: calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), sodium (Na^+) and potassium (K^+) and the anions carbonate (CO_3^{2-}), bicarbonate (HCO_3^-), sulphate (SO_4^{2-}), chloride (Cl^-), bromide (Br^-) and nitrate (NO_3^-). Furthermore, another sampling campaign was conducted to obtain water samples that were sent to the laboratory to analyze stable isotopes of oxygen 18 (^{18}O) and deuterium (^2H).

According to the geochemical analysis made through Piper and Stiff diagrams, four predominant types of water were identified in the study area: sodium-chloride (Cl-Na), calcium-chloride (Cl-Ca), sodium-calcium-bicarbonate-chloride (Cl- HCO_3 -Na-Ca) and calcium-bicarbonate (HCO_3 -Ca). From the analysis of stable isotopes, three groups of water present in the study area can be defined: recharge water, typical valley water and transition zone water.

To compare the hydrogeochemical evolution of the coastal portion of the administrative aquifer of Caborca, physicochemical sample results carried out in 1981 and 2010 were considered and the results were compared with the ones of this study. Apart from that, a comparison of the piezometric levels and pumping volume in different years was made.



Caracterización Hidrogeoquímica y Situación Actual de la Intrusión Marina en la Porción Costera del Acuífero Caborca, Sonora, México



It was identified that the variance in the hydrogeochemistry of the study area comes mainly from the mixture of groundwater with seawater, in addition to the contribution of nutrients by human activities showing high concentrations of nitrates in 2010 compared to the other years, probably because of the use of fertilizers. It can be determined that a factor that plays an important role in water quality is the volume of water extracted from the wells, when an apparent recovery in water quality is observed as the extraction volumes of water in the wells have decreased.



I. INTRODUCCIÓN

En el año de 1940, el aprovechamiento de los recursos hídricos en la región de Caborca iniciaba de manera incipiente, sólo existían algunas captaciones que operaban con fines domésticos y para abastecimiento de agua potable de la ciudad, por lo que, en ese entonces, el recurso del agua que se disponía era abundante acorde a las demandas de una escasa población. Sin embargo, el gran desarrollo agrícola se incrementó en la región y tuvo que basarse en la única fuente permanente disponible de agua: el agua subterránea. La baja precipitación, principal fuente de recarga hacia el subsuelo para alimentar los acuíferos aluviales que almacenan agua, fue rebasada en su descarga y el descenso del nivel estático del acuífero fue calculado en 0.82 m por año (Fimbres et al., 2008).

La región de Caborca, actualmente, es una de las más importantes zonas de producción agrícola de México. Una gran parte de la actividad agrícola de la región se localiza en la planicie costera y sigue siendo soportada por aprovechamientos de agua subterránea para poder subsistir.

A nivel mundial, la agricultura de riego es el mayor extractor y el consumidor predominante de los recursos hídricos subterráneos, habiendo surgido ampliamente importantes agro-economías dependientes del agua subterránea (Global Water Partnership, 2013).

En las naciones en desarrollo y en transformación, el auge del riego con aguas subterráneas ocurrió en diversos niveles económicos (Garduno y Foster, 2010), desde aquellos de agricultura de subsistencia, producción de cultivos básicos a gran escala y los comerciales. Esto ha llevado a importantes beneficios socioeconómicos a las comunidades rurales y, en muchos países, ha ayudado a aliviar la pobreza agraria mediante el aumento de la seguridad alimentaria, al asegurar la disponibilidad de agua en los momentos críticos para el crecimiento de los cultivos y mitigando los devastadores efectos de las sequías en su rendimiento (Shah, 2009).



La falta de conocimiento en años previos acerca de la gestión del agua subterránea provocó un uso irracional de los recursos hídricos en la región de Caborca y, con ello, un deterioro del acuífero, creando fuertes problemas hidroambientales. La situación se agravó ya que hubo un reconocimiento tardío de que se había deteriorado el medio acuífero, en principio porque el agua subterránea no es un recurso visible, y al no existir un monitoreo adecuado el problema tardó en hacerse evidente.

La planificación de acuíferos costeros requiere un enfoque similar al tradicional realizado en acuíferos continentales. Ambos tienen elementos de planificación en común: problemas de rendimiento de acuíferos, interferencia entre pozos de bombeo, interacción acuífero-río, contaminación de aguas superficiales, etc. Sin embargo, los acuíferos situados a lo largo de la costa tienen una complicación adicional para el proceso de manejo: el potencial de intrusión salina que eventualmente puede presentarse en porciones de acuíferos costeros cuya consecuencia es la inutilidad del recurso para consumo humano (Bedoya Soto, 2009).

Si la extracción de agua dulce de los acuíferos costeros no viene compensada por un aumento de la recarga, se producirá un descenso en igual cantidad de la descarga de agua dulce subterránea al mar. Esta reducción progresiva de la descarga, a lo largo de meses o años, disminuye el almacenamiento de agua subterránea dulce en el sistema. Como consecuencia de la disminución de descarga dulce al mar, se inicia un proceso de penetración de la cuña de agua marina y una expansión de la zona de mezcla. Esto puede producir la salinización de las captaciones al cabo de un cierto tiempo, bien sea por acceso directo del agua salada a los filtros o porque se producen conos de ascensión salinos al situarse el agua salina bajo la captación. En cualquiera de los casos, la salinidad del agua extraída por los pozos es variable en función del régimen y tiempo de extracción del agua del propio pozo y de otros pozos que influyan hidráulicamente. Rara vez se produce agua de salinidad igual a la marina, ya que en el pozo convergen tubos de flujo de agua dulce, mezcla y marina (Bocanegra y Custodio, 1994).

La correcta explotación, protección y adecuada gestión de los acuíferos costeros es de suma importancia local, técnica, económica y socialmente. Su degradación especulativa,



por ignorancia o por desidia, es un grave problema que afecta al desarrollo y al bienestar (Llamas, 1988).

Debido a la problemática que surgió en el acuífero costero de Caborca, ocasionada por el sobrebombeo, se tomaron una serie de medidas para controlar la explotación de las aguas subterráneas. En la década de los años 60's se lanzó un decreto de veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la región, a finales de los 60's y principios de los 70's se recomendó la suspensión de la operación de los pozos próximos al litoral, a finales de los 70's se ratificó la veda ampliándose a todo el distrito de riego (Comisión Nacional del Agua, 1992) y en el 2003 se implementó un programa de recuperación ambiental, Programa de Adquisición de Derechos de Uso del Agua, (PADUA) cancelando extracciones de agua subterránea en busca de una recuperación del sistema.

Este proyecto busca dar a conocer el estado actual de la calidad del agua subterránea que se encuentra en la porción costera del acuífero administrativo de Caborca. El conocimiento científico juega un papel clave en la conservación de la cantidad y calidad del agua subterránea, sobre todo en este tipo de acuíferos que son muy sensibles a la explotación. Con un monitoreo adecuado, y frecuente, se beneficiará tanto la población de Caborca, como los productores agrícolas de la región y el ecosistema en general, ya que realizar monitoreos frecuentes al agua permite conocer factores de riesgo de contaminación en etapas tempranas y reduce los problemas que se puedan llegar a ocasionar una vez que el problema avanza. Es importante tener en cuenta que la recuperación de un acuífero, entre más deteriorado esté, suele ser lenta y con un costo elevado.



1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Evaluar el estado actual de la calidad del agua subterránea en la porción costera del acuífero administrativo de Caborca con especial énfasis en la salinización ocasionada por actividades humanas y/o el ambiente geológico.

1.1.2 Objetivos específicos

- Conocer las propiedades clave de un acuífero costero intensamente bombeado cuya gestión del agua subterránea careció de control científico al inicio de su explotación.
- Identificar la situación actual del frente de intrusión marina.
- Identificar los tipos de familias de agua que existen en el área de estudio.
- Identificar las regiones donde las concentraciones de los contaminantes en el agua subterránea rebasan los límites permisibles, en cuanto a las características físicas y químicas, establecidas en la NOM127-SSA1-1994.

1.2 Hipótesis

Un acuífero costero es una unidad hidrogeológica cuya principal característica es que uno de sus límites geográficos es el mar o la costa. En este caso, la unidad generalmente se entiende como una representación de la descarga de agua de una cuenca hidrológica continental.



Este tipo de acuífero es muy sensible a la extracción de agua subterránea por medio de pozos, ya que a diferencia de los acuíferos continentales donde el sobrebombeo es compensado tomando agua de almacenamiento, en los acuíferos costeros entra el agua de mar en su lugar; esto es debido al desequilibrio hidráulico que resulta del hecho de que la extracción es superior a la recarga y, como consecuencia, hay una pérdida de carga hidráulica. Bajo estas condiciones se forma un cono de depresión que persistirá hasta que la extracción excesiva del agua subterránea continúe. Por lo tanto, en un acuífero costero, si el bombeo excede la recarga, se produce una pérdida de carga hidráulica y el agua marina penetra, como se puede apreciar en la Figura 1.

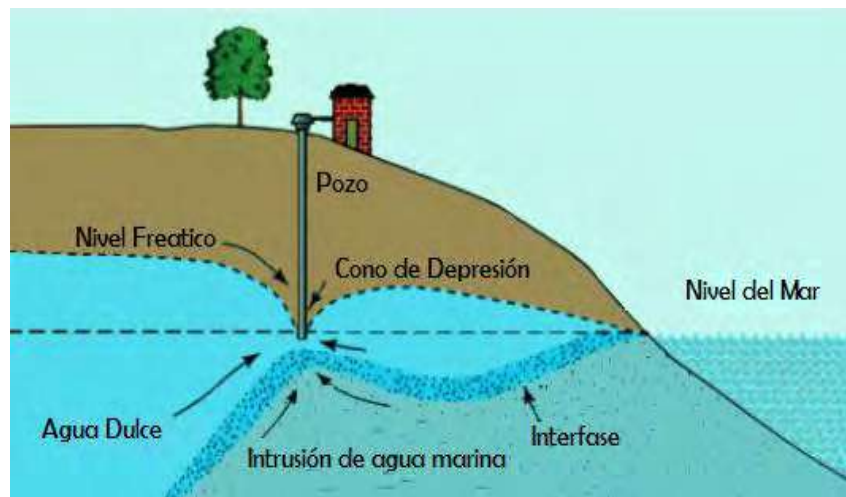


Figura 1. Esquema de un acuífero costero con sobrebombeo y su consecuente cono de depresión.

La hipótesis principal en que se basa este trabajo es que debido a la intensa actividad agrícola y al clima desértico de la región, la extracción del agua ha sido mayor que la recuperación provocando un descenso de la superficie piezométrica.

Al tratarse de un acuífero costero, esto ha alterado el equilibrio agua dulce- agua salada y se ha deteriorado la calidad del agua dulce, producto de un avance horizontal de la interfase hacia el interior y el ascenso vertical en forma de cono (“upconing”) de la interfase a favor de pozos en los que tiene lugar el bombeo intensivo y se ha propiciado la penetración de la cuña de agua marina tierra adentro.



1.3 Metodología

A continuación, se presenta el diagrama de flujo de la metodología seguida para realizar el presente estudio (Figura 2). Seguido del diagrama se encuentra la descripción detallada de cada una de las actividades realizadas.

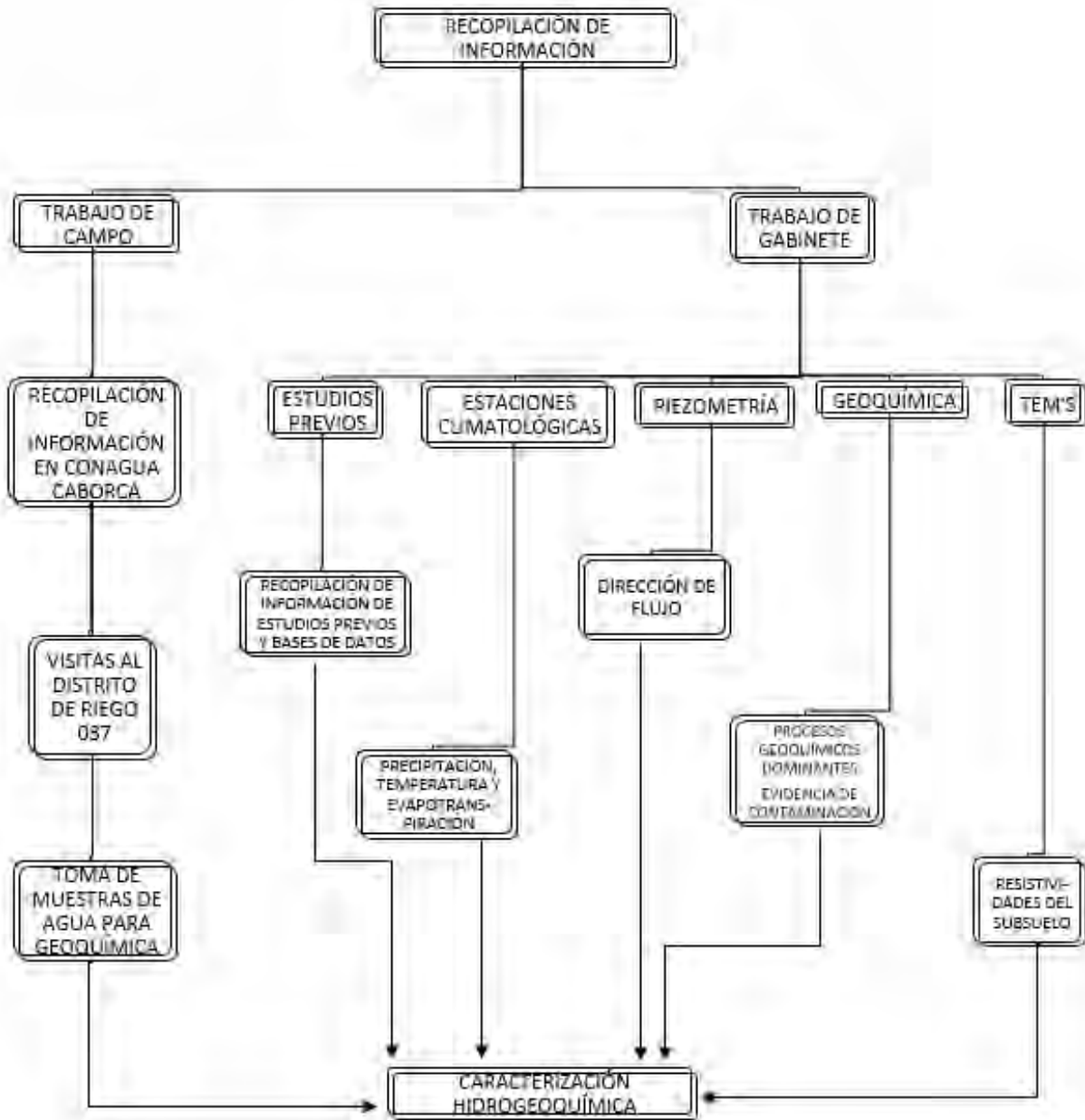


Figura 2. Diagrama de flujo de metodología.



La metodología seguida para realizar el presente estudio se basó en las siguientes actividades:

1) Trabajo de gabinete

- Recopilación de la información disponible dentro del área y en los alrededores, incluyendo estudios previos, bases de datos de estaciones climatológicas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), información digital y estadística del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), revisión de los conceptos básicos a utilizarse en el estudio, etc.

-Recopilación de información relevante acerca de los pozos ubicados en el área de estudio en la Comisión Nacional del Agua ubicada en Caborca. Esta actividad consistió en la búsqueda de información en archivos históricos en físico que se encuentran localizados en la ciudad de Caborca.

- Análisis de la climatología de la región, procesando los datos de las estaciones climatológicas proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en el cual se analizaron los parámetros de precipitación, temperatura y evapotranspiración.

- Identificación de las unidades estratigráficas presentes en el área de estudio con base en la información de la geología superficial obtenida a partir de las cartas geológico-mineras realizadas por el Servicio Geológico Mexicano (SGM), las cuales fueron digitalizadas para ser utilizadas con el software ArcMap 10.3.

-Para definir la geología del subsuelo se consideró la información obtenida de estudios previos, así como un análisis de cortes litológicos de pozos perforados en el área, los cuales fueron obtenidos a partir de un análisis de información realizado en la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ubicada en Caborca. También se utilizaron los datos obtenidos de una reinterpretación de sondeos electromagnéticos



transitorios en el dominio del tiempo (TEM's) realizados por la Universidad de Sonora para la Comisión Nacional del Agua.

- Análisis de los niveles piezométricos con base en las elevaciones de los brocales y las profundidades a los niveles estáticos obtenidos en los censos de aprovechamientos realizados por la Comisión Nacional del Agua, con las cuales se configuraron las curvas equipotenciales del flujo subterráneo, que sirvieron como base para trazar la dirección del flujo subterráneo.

Con respecto a la información de piezometría histórica, se seleccionaron intervalos de tiempo para elaborar planos con curvas de igual evolución del nivel estático.

- Selección de la red de monitoreo con base en los aprovechamientos de los cuales se tenía un comportamiento histórico al contar con información hidrogeoquímica proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) de los años 1981 y 2010.

Los criterios para la selección de los sitios de muestreo, una vez definidos los posibles pozos con base en la información obtenida previamente, fueron:

- Accesibilidad: el punto de muestreo debe estar en un lugar accesible en cuanto a las vías de acceso vehicular y peatonal que sean necesarias, de tal manera que faciliten obtener las muestras y transportar la carga que implican los equipos y materiales de muestreo.
- Representatividad: el punto de recolección de las muestras debe ser lo más representativo posible de las características totales del cuerpo de agua, esto significa que el cuerpo de agua debe estar mezclado totalmente en el lugar de muestreo, relacionado específicamente con la turbulencia, velocidad y



aparición física del mismo, buscando que la muestra sea lo más homogénea posible.

- Seguridad: el punto de muestreo, sus alrededores y las condiciones meteorológicas deben garantizar la seguridad de las personas responsables del muestreo, minimizando los riesgos de accidentes y de lesiones personales, es por esto que es recomendable tomar siempre todas las precauciones y utilizar los equipos de seguridad y de protección personal necesarios.

- Procesamiento de la información hidrogeoquímica obtenida de los resultados de las muestras de agua tomadas en campo para definir el origen del agua subterránea, identificar los procesos geoquímicos dominantes, interacción agua-roca y evidencias de contaminación.

- Elaboración de diagramas, figuras, planos de isovalores, etc. para la presentación de resultados de hidrogeoquímica. Para la obtención de las familias de agua dominantes se utilizaron los diagramas de Piper y Stiff, generados mediante el programa AquaChem v. 3.7.

- Reinterpretación de sondeos electromagnéticos transitorios en el dominio del tiempo (TEM's). Dentro de los perfiles generados se ubicaron los aprovechamientos de los cuales se tenía información litológica, así como geoquímica.

Los cortes litológicos obtenidos previamente sirvieron para calibrar los perfiles generados. Una vez definida la litología, los perfiles sirvieron para calibrar el modelo hidrogeoquímico con base en las resistividades obtenidas en los sondeos.



2) Trabajo de campo

- Visitas al Distrito de Riego 037 Altar-Pitiquito-Caborca para confirmar qué pozos se encuentran operando actualmente y ajustar la red de monitoreo propuesta con base en los datos obtenidos previamente.

- Toma de muestras de agua para determinar propiedades físicas y químicas del agua. En campo se determinaron los parámetros físicos de temperatura, pH, sólidos totales disueltos y conductividad eléctrica. Los parámetros químicos se mandaron a analizar al laboratorio.

El protocolo de muestreo consistió en lo siguiente:

- Identificar el pozo en operación del cual se obtendrá la muestra de agua.
- Si se trata de un pozo, la muestra se toma directamente del tubo de descarga, si el pozo está recién encendido se requiere dejar correr el agua por lo menos 10 min, para garantizar la homogeneidad de la muestra.
- Al momento de llenar los envases con el agua muestreada se utilizan guantes de látex estériles para evitar la contaminación con agentes externos, se debe enjuagar tres veces cada recipiente utilizado.
- El llenado de cada recipiente debe ser al total de la capacidad del envase, con la finalidad de evitar la presencia de burbujas de oxígeno (sobre todo en las muestras que se enviarán para análisis isotópico) y se añaden los preservadores adecuados si la muestra así lo requiere.
- Obtener los parámetros de campo (temperatura ambiente y del agua, sólidos totales disueltos, conductividad eléctrica y pH) con la sonda multiparamétrica HANNA, los cuales se escriben en la bitácora y en la cadena de custodia, así como la clave de rastreo asignada a la muestra, la hora, fecha de muestreo, número de submuestras, persona que realizó el muestreo y preservador añadido.



- Trasladar los envases con las muestras en hieleras, manteniéndolos a una temperatura de 4°C, añadiendo hielo constantemente hasta su llegada al laboratorio.
- Al entregar las muestras al laboratorio, se debe entregar la cadena de custodia con todos los datos requeridos, con la finalidad de evitar confusiones y errores al momento del análisis.

1.4 Estudios previos

Se han llevado a cabo diversos estudios relacionados con las características hidrogeológicas de la región. A continuación, se enlistan algunos de los trabajos previos realizados:

- *“Estudios geohidrológicos en Caborca, Sonora.” Valverde Amarillas José, 1970.* Esta tesis de maestría se escribió 15 años después de que empezaran a operar los pozos localizados en el Distrito de Riego 037. El estudio habla acerca de la importancia de realizar estudios hidrogeológicos en la costa de Caborca. El propósito es encontrar alternativas para una explotación más eficiente del agua subterránea, ya que a escasos 15 años de haber iniciado con la extracción del agua, las hectáreas irrigadas en la región habían aumentado de una forma exagerada y los niveles piezométricos habían disminuido de una manera que preocupaba a la población. Se presentan datos comparativos entre Magdalena, Caborca y Santa Ana donde en 1926, cuando aún no se explotaba el agua subterránea, la superficie irrigada con agua superficial en los valles era de 800, 1000 y 800, hectáreas respectivamente; mientras que para el año 1968 las superficies irrigadas con agua superficial eran de 800,800 y 800 hectáreas, y con agua subterránea eran de 250, 2100 y 46000 hectáreas respectivamente.
- *“Explotación futura del acuífero del valle de Caborca, Sonora.” Ing. Arturo Ojeda de la Cruz, noviembre de 1994.* Esta tesis de maestría tiene como fin conocer el estado



que guardan los niveles de agua subterránea del acuífero y su evolución de acuerdo con las extracciones realizadas desde 1975 a 1989. Así mismo, también se realiza una asimilación del consumo de energía eléctrica, con lo cual se pretenden visualizar las áreas más conflictivas desde el punto de vista hidráulico de acuerdo con los abatimientos que se presentaron en dicho periodo.

- “*Tecnificación integral del Distrito de Riego 037 Altar-Pitiquito-Caborca, para la estabilización de su acuífero.*”, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2002. El objetivo de este estudio fue realizar un diagnóstico de la situación en que se encuentra la infraestructura hidráulica del Distrito de Riego, así como determinar la recarga del acuífero. El resultado de este estudio establece que se presenta una recarga sostenible de 111.7 mm³ anuales. Con dichos resultados se emitieron algunas recomendaciones como: reducir las extracciones de agua a 150 millones de m³ por ciclo agrícola, disminuir la superficie actual de cultivos perennes a 12,000 hectáreas, aplicar riego presurizado a las 12,000 hectáreas de riegos perennes, eliminar el total de la superficie sembrada con cultivos anuales para instalar 200 hectáreas de invernadero con este tipo de cultivo, adquirir por parte del gobierno 329 derechos de agua para ser cancelados; además reducir en 20% la extracción de agua de los 501 aprovechamientos que quedarán en operación y rehabilitar los equipos electromecánicos de los 501 pozos que queden operando. Este estudio fue importante ya que, con base en los resultados y las recomendaciones establecidas, se implementó el Programa de Adquisición de Derechos de Uso del Agua (PADUA).
- “*Estudio técnico para determinar la factibilidad de extracción de agua subterránea salobre para su desalación, en los acuíferos de Caborca, Puerto Libertad, Arivaipa y Fuerte-Mayo, Sonora.*”, Universidad de Sonora, 2007. El objetivo de este estudio es caracterizar de forma general el acuífero administrativo. En este estudio se incluyen análisis hidrogeoquímicos, geofísicos, así como también un balance hidrometeorológico y de aguas subterráneas. Este estudio fue importante para la elaboración de este trabajo de tesis ya que se realizó una reinterpretación de los datos



geofísicos obtenidos en este trabajo la cual sirvió para calibrar el modelo hidrogeoquímico y hacer una comparación del posible comportamiento en diferentes años.

- “*Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Caborca (2605), Estado de Sonora.*” *Comisión Nacional del Agua, mayo del 2010.* Este es el informe de disponibilidad publicado por la CONAGUA. Se consideró una recarga total media anual de 212.9 hm³ y la descarga natural comprometida nula, y el volumen concesionado fue de 307.574119 hm³/año. De esta manera, la disponibilidad de agua calculada fue de -94.674119 hm³/año, es decir, un déficit que se está extrayendo a costa del almacenamiento no renovable del acuífero.
- “*Hidrogeología de Sonora, México.*” *Instituto de Geología UNAM., 2011.* Este artículo describe los acuíferos más importantes del estado de Sonora en cuanto a extensión y disponibilidad. Aquí mencionan que los acuíferos más importantes se encuentran localizados en la planicie costera y que se encuentran sobreexplotados y con intrusión salina. Los acuíferos que describe son los de Caborca, Costa de Hermosillo, Valle de Guaymas y San José de Guaymas. De manera general, describe resumidamente aspectos como hidrología superficial, hidrogeología, parámetros hidrogeológicos, disponibilidad y calidad de agua.

1.5 Localización del área de estudio

El área de estudio se localiza en la planicie costera del municipio de Caborca en la porción noroeste del estado de Sonora y comprende una extensión territorial de aproximadamente 658 km² (Figura 3).

El municipio de Caborca colinda al norte con los Estados Unidos de Norteamérica, al este con el municipio de Altar, al sureste con el de Pitiquito, al noroeste con el de Puerto



Peñasco y al suroeste con el Golfo de California. El área de estudio, a su vez, comprende la porción costera del acuífero administrativo de Caborca.

El acuífero administrativo de Caborca es definido con la clave 2605 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Este se localiza entre las coordenadas geográficas 29°54' y 31°22' de latitud norte y 111°29' y 113°08' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 13,242 km².

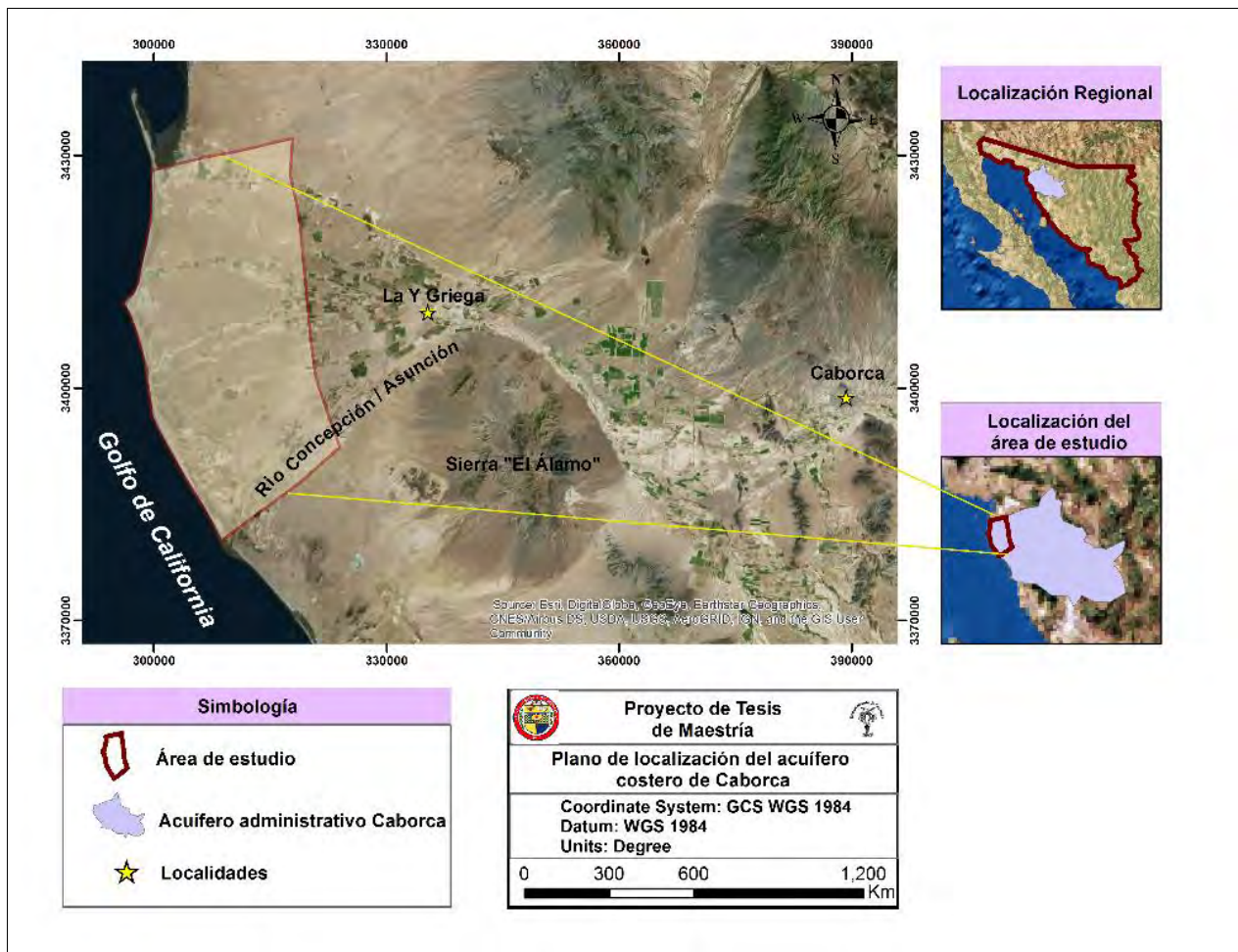


Figura 3. Localización del acuífero costero de Caborca.



El acuífero administrativo Caborca limita al norte con los acuíferos Arroyo Sahuaro y los Chirriones; al este y noreste con Arroyo Seco, Río Altar, Busani, Río Magdalena y La Tinaja; al sur con Puerto Libertad y Arivaipa; y al oeste con el Golfo de California, como se puede observar en la Figura 4.



Figura 4. Localización del acuífero administrativo de Caborca y acuíferos colindantes, tomada de CONAGUA, (2010).

1.6 Situación administrativa del acuífero

El acuífero administrativo Caborca pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste. El territorio completo que cubre el acuífero está cubierto por dos decretos de veda. El primero rige en la porción central y está sujeto a las disposiciones del “*Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona que comprende la región de Altar, Pitiquito y Caborca, estado de Sonora*”, publicado en el Diario



Oficial de la Federación (DOF) el 18 de octubre de 1962. Este decreto es tipo III, en el que la capacidad de los acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

El resto de su superficie está sujeto a las disposiciones del “*Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los acuíferos del Estado de Sonora, en la parte oeste del meridiano 110° de Greenwich para el mejor control de las extracciones, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo, en dicha zona*”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 19 de septiembre de 1978. Este decreto es tipo II, en el que la capacidad de los acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (2010), los municipios de Caborca, Altar y Pitiquito, se encuentran en zona de disponibilidad 4, en tanto que Trincheras y Oquitoa se ubican en zona de disponibilidad 6. El principal usuario es el agrícola. El Distrito de Riego 037 “Altar-Pitiquito-Caborca” se encuentra ubicado sobre el acuífero. A la fecha no se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) (Comisión Nacional del Agua, 2010).

El volumen de disponibilidad publicado en el año 2010 para el acuífero administrativo Caborca fue de $-94.674119 \text{ hm}^3/\text{año}$, lo cual indica que no hay volumen de agua subterránea disponible para otorgar nuevas concesiones.

1.7 Zona agrícola

La superficie estudiada queda comprendida dentro del Distrito de Riego 037, Altar-Pitiquito- Caborca, principal usuario de agua de la región. De acuerdo con Ariel Consultores (1997) el desarrollo agrícola data desde 1940, fecha en que se empezaron a perforar pozos.

En 1962 se publicó en el Diario Oficial de la Federación un Decreto de Veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo. Cinco años después, en 1967 se estableció el Distrito de Riego No. 037 Altar-Pitiquito-Caborca.



El título de concesión otorgado en 1994 por la Comisión Nacional del Agua a la Asociación de Usuarios, estipula que había que reducir la extracción de 798 Mm³/año a 301 Mm³/año en 2005. En la Figura 5 (Banco Mundial, 2006), se muestra con líneas y rombos la superficie sembrada y con barras el volumen extraído. Cabe aclarar que el volumen extraído se estimó por métodos indirectos (Instituto Mexicano de Tecnología de Agua, IMTA, 2002) ya que en ese año solamente el 20% de los pozos contaba con medidor de caudal, de los cuales muchos se encontraban en mal estado o no cumplían con las especificaciones de instalación.

Los valores de la gráfica mostrada en la Figura 5 indican que efectivamente las extracciones habían disminuido con una tendencia clara a llegar a la meta establecida. Sin embargo, el Banco Mundial declaró que es necesario que se instalen medidores en cada pozo, porque así lo establecen tanto la Ley de Aguas Nacionales como el título de concesión y para verificar los volúmenes ya que, a pesar de las reducciones aparentes en las extracciones, los niveles en el acuífero siguieron disminuyendo, como se puede apreciar en la Figura 6.

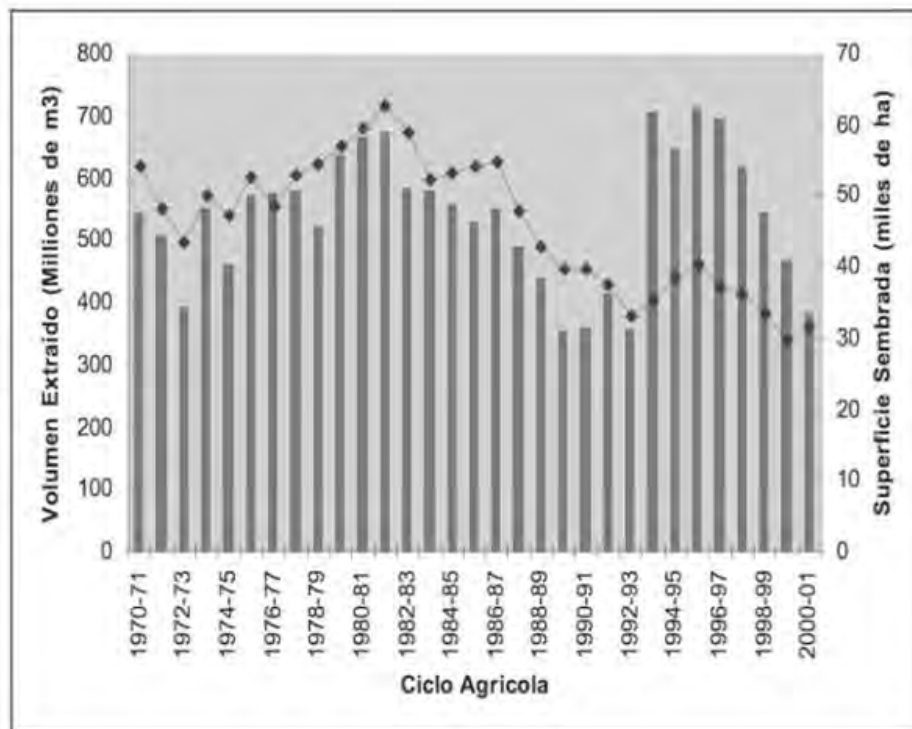


Figura 5. Volumen extraído y superficie sembrada por año agrícola, tomada de Banco Mundial, 2006.

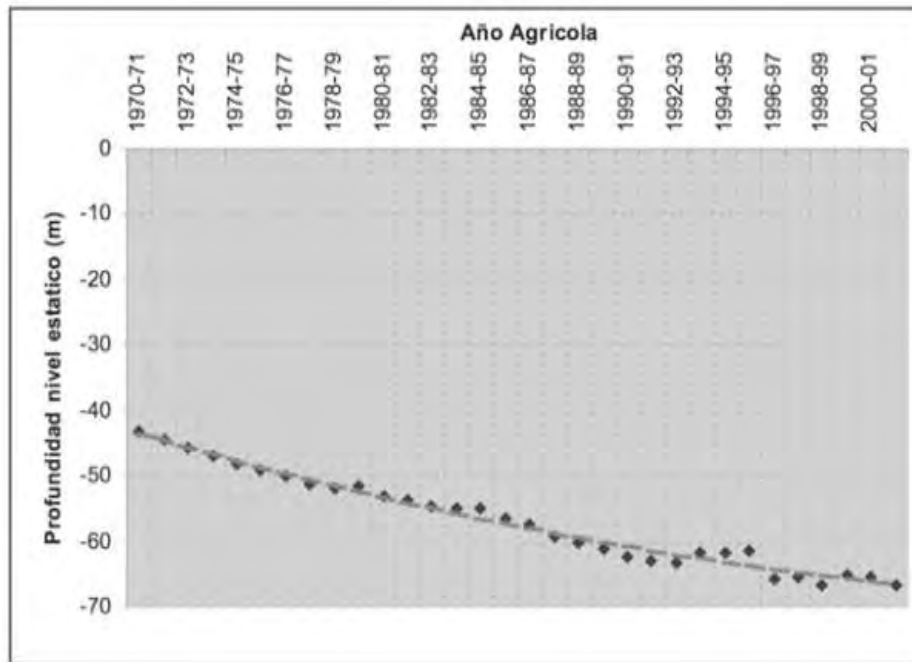


Figura 6. Variación del nivel estático promedio en el acuífero, tomada de Banco Mundial, 2006.

La sobreexplotación del acuífero hizo que en algunas zonas del Distrito de Riego se registraran incrementos de la profundidad estática de hasta cinco metros por año, lo cual provocó un aumento de los costos de operación por concepto de energía eléctrica, y en consecuencia la reducción de la utilidad neta de los productores y el abandono de la infraestructura de riego y de agroindustria en una superficie considerable, así como el aumento de la posibilidad de intrusión de agua de mar, sobre todo en los pozos más cercanos a la costa.

Debido a lo anterior se ha reducido el gasto de extracción de los pozos, la superficie de siembra y se han realizado trabajos de tecnificación de las zonas de riego para lograr un uso más eficiente del agua.

En 1970 la superficie sembrada dentro del distrito de riego fue de 50,900 hectáreas de cultivos anuales, mientras que en el ciclo agrícola 2002-2003 descendió a 6,400. En cuanto a los cultivos perennes, en 1970 se sembraron 3,200 hectáreas, ascendiendo a 26,000



hectáreas en 1980 y disminuyendo a 19,900 hectáreas en el ciclo 2002-2003. Según las cifras reportadas por la ASUDIR, publicadas en cada respectivo año, en los ciclos 2008-2009, 2009-2010, 2010-2011, 2011-2012, 2012-2013 y 2014-2015 las superficies sembradas de cultivos perennes han sido de 18 302, 18 273, 18 657, 18 671, 19 445, 18 844 y 19 595 hectáreas respectivamente.

En el 2003 se implementó un programa a través del cual el productor le vendía los derechos de agua al gobierno y éste le pagaba un precio justo procediendo a la cancelación del pozo. Este programa fue llamado Programa de Adquisición de Derechos de Uso del Agua (PADUA). El monto de apoyo máximo establecido era de hasta 2,500 pesos por mm^3 de agua concesionada y 174 usuarios se inscribieron. Sin embargo, al comparar los datos de las inscripciones con el padrón original se encontró que solamente en el 30% de los casos (de las inscripciones) correspondió el número del pozo y el nombre del concesionario (contraviniendo las condiciones del título en el sentido de mantener actualizado el padrón de usuarios en el Registro Público de Derechos de Agua). Se llegó a la conclusión de que otorgar un beneficio económico proveniente de recursos públicos a usuarios incumplidos sería contrario a Derecho, por lo cual se siguió buscando otras alternativas de solución al tiempo que revisaba las modificaciones la Ley de Aguas Nacionales. Tras revisar las reglas de operación del programa y después de lograr acuerdos con la Asociación, el número de interesados en el programa se había reducido a 50.

El banco mundial en su obra “*Water Resources Management in Mexico: the role of the Water Rights Adjustment Program (WRAP) in water sustainability and rural development*” (2004), analiza el papel del PADUA en el Distrito de Riego 037 y concluye que hay cambios importantes en la población de productores y en la estructura de las unidades productivas. En un análisis económico indicó que la región de Caborca tiene un reducido peso demográfico y un incipiente desarrollo industrial regional, el cual no está asociado a la producción agrícola, pero existe un potencial importante para la producción de cultivos de exportación de alto valor dada su cercanía con los Estados Unidos.

El Distrito de Riego 037 ha difundido entre los usuarios las convocatorias para inscribirse en los programas hidroagrícolas de la Comisión Nacional del Agua en los cuales



se puede solicitar apoyo para: rehabilitación de sistemas de riego presurizado, modernización y eficiencia electromecánica de los pozos, líneas de conducción, repesos, tecnificación del riego y apoyo para la rehabilitación y perforación de pozos. Según datos de la ASUDIR los beneficiarios de estos programas han recibido apoyo de hasta 20,000.00 por hectárea en lo que se refiere a rehabilitación, tecnificación, repeso y líneas de conducción. También se ha recibido apoyo de hasta un 50% en la modernización y eficiencia electromecánica de los pozos y en la perforación de pozos, donde además, con su implemento, los usuarios empezaban a ver un ahorro de energía en el recibo de la luz de un 20-55%.

Según cifras reportadas por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Recursos Hidráulicos, Pesca y Acuicultura (SAGARHPA, 2017), en el 2015 el distrito de Caborca era el segundo distrito más tecnificado del estado, con una superficie sembrada en el ciclo agrícola 2014-2015 de 34,640 hectáreas de las cuales 19,449 contaban con una superficie tecnificada, es decir el 56% de la superficie total estaba tecnificada. El distrito más tecnificado del estado es el de Guaymas en el cual se sembraron 11,760 hectáreas de las cuales 10,041 pertenecieron a una superficie tecnificada, es decir, el 85% de la superficie total estaba tecnificada. Para el año 2016 el distrito de Caborca ya contaba con el 60% de tecnificación, y continuaba siendo el segundo distrito más tecnificado del estado, el primero continuó siendo el distrito de Guaymas que para el año 2016 ya contaba con el 90% de la superficie tecnificada.

Cabe mencionar que Sonora es el principal productor de espárragos a nivel nacional, produciendo en el año 2017 el 64.18% de la producción total nacional, siendo Caborca el municipio donde se produce la mayor cantidad de espárragos (36% del total de la producción nacional) gracias a las condiciones climáticas que favorecen el cultivo de ese vegetal, debido al choque térmico provocado por el frío invierno y la quema que desencadena el proceso de formación de los turiones. A nivel mundial, México ocupa el tercer lugar en producción de espárragos (El Economista, 2018).



II. MARCO FÍSICO

2.1 Fisiografía

Según la Carta Fisiográfica escala 1:1,000,000 emitida por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2009), el territorio del Estado de Sonora es dividido en cuatro provincias o regiones fisiográficas: Desierto o Llanura Sonorense, hacia el noroeste y oeste; Sierra Madre Occidental, en la parte oriental; Sierras y Llanuras del Norte, en la porción boreal, y Llanura Costera del Pacífico, en el sur.

El acuífero Caborca se ubica en la provincia fisiográfica Llanura Sonorense, y además dentro de la subprovincia fisiográfica Sierras y Llanuras Sonorenses constituida por una amplia variedad de rocas, en cuanto a su edad y composición, que se caracteriza por la presencia de sierras aisladas de rumbo NW-SE y N-S, con alturas que varían de 200 a 1,400 msnm. Los valles se encuentran cubiertos por suelos de edad cuaternaria. En la porción costera del acuífero administrativo de Caborca dominan la llanura y la playa, pudiéndose encontrar también cerca del área de estudio bajadas de aluviones, sierras y lomeríos, como se puede apreciar en la Figura 7.

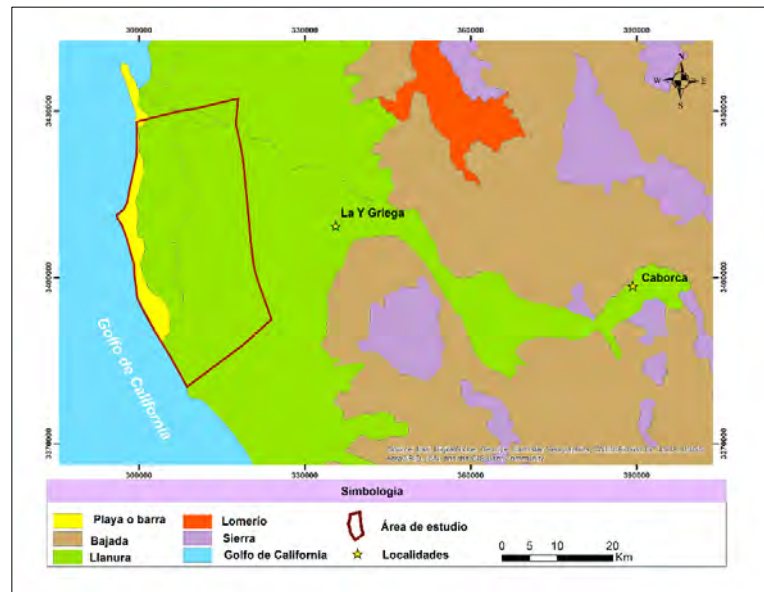


Figura 7. Fisiografía de la porción costera del acuífero administrativo de Caborca, Modificada de INEGI (2009).



2.2 Geomorfología

El rasgo geomorfológico más notable del área de estudio está constituido por amplias planicies aluviales, sobre las que destacan elevaciones montañosas de moderada altitud, alineándose con rumbo NW-SE. Destacan por su altitud las sierras: El Álamo, El Viejo, El Cuchillón y Cerro Carnero, con un poco más de 1000 m s.n.m. y una diferencia de elevación con respecto al piso del valle variable entre 600 y 800 m.

La forma de los valles generalmente es alargada y de rumbo NW-SE haciéndose más amplios al aproximarse a la planicie costera, estando esta última cubierta casi en su totalidad por depósitos de dunas. La planicie costera tiene una forma sensiblemente de abanico, estando el ápice en la región de El Coyote.

2.3 Geología regional

La geología regional, está constituida por un basamento ígneo-metamórfico del Proterozoico inferior-medio, denominado Complejo Metamórfico Bámori (Longoria et al., 1978) constituido por gneises y esquistos afectados por un granito micrográfico denominado Granito Aibó, fechado en 1,100 Ma por Anderson y Silver (1979); ambas unidades afloran en la porción sureste del área del acuífero administrativo de Caborca. Sobreyacen discordantemente sedimentos de edad proterozoica, representados por dolomías y areniscas, denominadas Capas Gamuza, que afloran en la porción oriental. Sobreponiéndose concordante y transicionalmente a dichas capas, se encuentran paquetes de calizas y areniscas; en la porción central norte y este, sobreyaciendo a estas rocas se encuentran discordantemente (hiato en el Cámbrico Superior) calizas y lutitas de facies de cuenca profunda de edad Ordovícico-Devónico (CONAGUA,2010).

Al norte de Sierra El Álamo en la porción central del acuífero administrativo de Caborca, afloran calizas y limolitas de la Formación Monos (Cooper, 1965) del Pérmico



Superior, sobreyacidas discordantemente por calizas y lutitas del Pérmico Superior-Triásico Superior, seguidas discordantemente por una unidad de metaareniscas y meta-lutitas de edad Triásico Superior, que a su vez es cubierta discordantemente por un paquete de areniscas y limolitas, calizas y areniscas, areniscas y conglomerados polimícticos del Jurásico, correlacionables con la Formación San Antonio (González, 1980). Estas unidades afloran principalmente en la Sierra El Antimonio (CONAGUA, 2010).

En forma aislada afloran en la parte norte del acuífero rocas graníticas y granodioríticas de edad Jurásico Superior (Stewart, 1986). Cabalgando a rocas jurásicas, afloran rocas metavolcánicas y metasedimentarias del Jurásico Medio, consistentes en riolitas, andesitas, areniscas y conglomerados deformados, que conforman casi la totalidad de Sierra La Gloria, en esta localidad cabalga a rocas sedimentarias del Jurásico Inferior y del Cretácico-Terciario. En contacto por falla normal con esta unidad, se encuentra la unidad metasedimentaria de la misma edad, constituida por conglomerados polimícticos y areniscas deformadas expuestas en el Cerro El Álamo. En esta misma porción cabalga a la Formación Morita, constituida por lutitas y areniscas, de edad Aptiano y a su vez está en contacto por falla normal con una secuencia de riolitas y andesitas del Complejo Volcánico El Charro (CONAGUA, 2010).

Cubriendo discordantemente a las rocas triásicas y jurásicas, aflora una secuencia volcanosedimentaria constituida por andesitas y areniscas del Cretácico Superior correspondientes a la Formación Tarahumara, que aflora en la Sierra El Álamo. Sobreyaciendo discordantemente y en contacto tectónico con las unidades del Jurásico Inferior, afloran en el flanco Sur occidental de la Sierra La Gloria y Cerro El Álamo, los conglomerados polimícticos rojos y areniscas de edad Cretácico Superior - Terciario Paleoceno (CONAGUA, 2010).

Afectando en parte a las unidades anteriores, se presentan rocas intrusivas representadas por gabros, granitos, granodioritas y dioritas que se encuentran distribuidas en la mayor parte del área de estudio; estas unidades han sido fechadas por el método K-Ar, obteniendo edades que van de 64.3 ± 2 Ma (Damon et al., 1983) a 80.9 ± 1.8 Ma (De Jong, 1988).



El Pleistoceno está representado por depósitos semiconsolidados y no consolidados de piedemonte, constituidos por conglomerados polimícticos, gravas y arenas y el Holoceno por materiales aluviales, depósitos eólicos, lacustres, palustres y aluvión (CONAGUA, 2010).

2.4 Estratigrafía

A continuación, se hace una breve descripción de las unidades geológicas que se encuentran en la región del acuífero administrativo de Caborca, de la más antigua a la más reciente (CONAGUA, 2010):

Precámbrico. Dentro del área del acuífero administrativo de Caborca afloran rocas precámbricas metamórficas constituidas principalmente por esquistos micáceos, cuarcitas, gneis y un complejo metamórfico. Estos afloramientos se encuentran concentrados en la porción sur del acuífero. Respecto a las rocas ígneas precámbricas se presentan en el área pequeños afloramientos de granito y granodiorita, localizados al suroeste y este de Bámori, respectivamente. El Precámbrico superior está representado por secuencias de areniscas y calizas correlacionables con las rocas del Precámbrico superior de la región de Caborca, que afloran al sur de la Ciudad del mismo nombre.

Paleozoico. Se encuentra representado por una secuencia detrítico-carbonatada que fue depositada en un ambiente de plataforma somera, cuyas edades varían del Cámbrico al Pérmico. Estas secuencias están constituidas de calizas y areniscas principalmente.

Mesozoico. Está representado por una secuencia marina, con depósitos calcáreos, arcillo-calcáreos y arcillo-arenosos. Afloran también rocas ígneas, intrusivas y extrusivas de composición ácida a intermedia, así como un complejo metamórfico. Una asociación de arenisca-toba intermedia de edad Triásico-Jurásico se encuentra aflorando al suroeste de Caborca. Respecto a rocas jurásicas, aflora una secuencia volcanoclástica al sureste de



Pitiquito. El Jurásico en el área está representado por dioritas, tonalitas y una asociación de riolita- toba ácida.

Cenozoico. Las rocas cenozoicas en el área del acuífero administrativo de Caborca están representadas por afloramientos de andesitas y de basaltos, así como extensos afloramientos de conglomerados, los cuales están diseminados sobre toda la superficie. Las rocas terciarias están representadas por rocas ígneas intrusivas y extrusivas. Al suroeste del área del acuífero administrativo existen afloramientos de riolita-toba ácida y riolita-toba ácida, así como afloramientos dispersos de riolita, riolita y toba ácida. En el extremo norte del acuífero administrativo se encuentra un afloramiento de granito. Respecto a rocas sedimentarias terciarias, afloran secuencias de areniscas-limolitas al sureste.

Del *Cuaternario* se localizan depósitos lacustres, litorales y palustres. El depósito aluvial es el que ocupa mayor extensión en el área del acuífero, seguido de depósitos eólicos, localizados en la zona costera.

2.5 Geología del subsuelo

Con base en los resultados de los SEV's realizados por las empresas TMI (1975) e ICG (1977), y los TEM's realizados por CONAGUA (2007), en cuanto al acuífero administrativo de Caborca, es posible definir la presencia de un acuífero constituido en su porción superior por depósitos aluviales y en su porción inferior por gravas y arenas empacadas en arcillas. Hacia la zona de El Desemboque se presentan cuatro horizontes de distinta composición y granulometría. La capa más somera corresponde con gravas, arenas y arcillas, en la cual el contenido de arcillas disminuye hacia la parte costera, esta capa tiene un espesor que varía, de sureste a noroeste, de 50 a 150 m aproximadamente; debajo de esta capa se encuentra una capa de arcilla azul con un espesor mayor a 150 m, el cual se incrementa hacia la parte noroeste de El Desemboque. Subyaciendo a la arcilla azul se encuentra una arcilla de color marrón con gravillas, con un espesor aproximado de 100 m; y finalmente, a una profundidad aproximada de 250 m se encuentra la capa de cuarcita alterada.



De acuerdo con los estudios geológicos que se han realizado en la zona de estudio (TMI, S.A., 1975), sobresalen las siguientes unidades:

- Depósitos aluviales
- Caliza, dolomia y conglomerados calcáreos
- Sedimentos arcillosos

2.5.1 Depósitos aluviales

Esta unidad corresponde a los depósitos aluviales del Cuaternario y constituyen los rellenos del valle. Consiste en gravas, arenas, lentes de arcilla y limos.

La distribución de estos sedimentos en el subsuelo, presentan variaciones laterales de facies, existiendo depósitos limo-arcillosos con poco contenido de gravas que lateralmente cambian a arenas, gravas y boleos exentos de estos materiales limosos.

Existe cierto predominio de los sedimentos limosos sobre los sedimentos de gravas y arenas, el cual se pronuncia en la región de El Coyote y El Desemboque.

En el área de Pitiquito, el espesor aluvial se sabe por inferencias de varios pozos que su espesor no excede los 200 metros. Por lo que respecta al área principal de la costa de Caborca, se ha definido que el espesor de estos materiales aluviales es de unos 250 metros aproximadamente.

En el Valle del Bisani, el espesor promedio es de 180 metros aproximadamente, el cual disminuye progresivamente hasta los 60 metros, en las proximidades del estrechamiento que separa a este valle de la región de El Coyote.

En la región de El Coyote, se ha inferido que los depósitos aluviales, están compuestos exclusivamente de materiales limosos, formando un espesor de aproximadamente 250 metros en promedio, estos materiales descansan sobre arcillas arenosas de naturaleza impermeable. En la porción occidental de la región de El Coyote, ya



sobre la margen derecha del mismo arroyo los depósitos limosos cambian a facies de gravas y arenas cubriendo un espesor de 150 m.

Dentro de la misma región de El Coyote y en su extremo occidental, los depósitos granulares vuelven a estar constituidos por un predominio de materiales limosos, estos materiales se extienden desde ese punto hasta toda la parte del área El Coyote- Desemboque, donde forman espesores que van de 140 a 200 metros para reducirse después considerablemente ya en la región del desemboque a un espesor promedio de 80 metros.

2.5.2 Caliza, dolomia y conglomerados calcáreos

Esta unidad corresponde a las rocas más antiguas de la región estudiada, pues su edad se le asigna al Paleozoico. Constituye en general una serie de rocas calizas con pedernal, calizas y areniscas, dolomitas, rocas intrusivas y metamorizadas con sedimentos de conglomerado calcáreo. Esta unidad forma probablemente el basamento regional de la costa de Caborca en general.

2.5.3 Sedimentos arcillosos

Estos sedimentos se encuentran constituidos por tres cuerpos de arcillas con diferentes características físicas que las difieren entre sí. Estas arcillas son: un cuerpo de arcilla amarilla compacta y plástica, que generalmente se encuentra exenta de materiales plásticos mayores, como arenas y gravas; una arcilla arenosa de color marrón con poca grava compacta y plástica y por último, una arcilla arenosa color gris azul con intercalaciones de gravilla y grava.

Estos sedimentos arcillosos, en conjunto, se encuentran por debajo de los materiales aluviales y se encuentran descansando sobre el lecho rocoso formado por rocas intrusivas o metamórficas.



2.5.4 Funcionamiento hidráulico de las rocas

Desde el punto de vista hidrogeológico, las descripciones de las rocas anotadas anteriormente se identifican como:

- Depósitos aluviales cuaternarios
- Depósitos fluviales cuaternarios
- Sedimentos terciarios y cuaternarios
- Rocas ígneas, intrusivas, extrusivas y metamórficas

2.5.4.1 Depósitos aluviales cuaternarios

Estos materiales, debido a su composición heterogénea de arenas, gravas, boleos y limos, constituyen un depósito de alta permeabilidad donde se aloja el acuífero en explotación de la costa de Caborca, comprendido dentro de la cuenca del río Asunción.

Este acuífero de medios granulares, es alimentado principalmente por medio de infiltración de los escurrimientos superficiales de los arroyos y ríos que corren sobre la superficie de los valles ahí existentes, así como la infiltración de agua que estas mismas corrientes superficiales producen en el contacto de la sierra circundante con la costa.

Dentro de estas corrientes superficiales, las correspondientes al río Asunción y arroyo El Coyote, son las que generan la mayor recarga a estos depósitos aluviales cuaternarios; esta recarga es inducida preferentemente, en aquellas áreas de los valles donde los suelos tienen mayor cobertura de depósitos arcillosos, como en el caso del valle del Bisaní donde los suelos están formados por arenas gruesas, así como en la confluencia del arroyo El Coyote con el río Asunción, área en la que los suelos están formados por arena gruesa y gravas.

Estas condiciones, favorecen notablemente la infiltración del agua desde la superficie hasta los niveles de saturación. Los espesores de los materiales granulares que constituyen el acuífero, varían en cada uno de los valles, así como su permeabilidad debido principalmente



a la intercalación de facies de grava y arenas con limos arenosos; sin embargo, puede considerarse que en conjunto estos materiales aluviales saturados, forman un acuífero de alta permeabilidad, según lo demuestran los altos volúmenes de explotación que se han extraído año con año del almacenamiento subterráneo.

2.5.4.2 Depósitos fluviales cuaternarios

Estos depósitos están formados por materiales de granulometría gruesa y forman estructuras de terrazas fluviales. Entre estos, destaca por su importancia los materiales fluviales que se encuentran descansando sobre laderas de las sierras El Viejo, del cerro Pozo Prieto, del cerro Colorado y del cerro El Álamo, en la margen izquierda del río Asunción. Sin embargo, la alta permeabilidad de estos materiales, no constituyen acuíferos, debido a que el agua infiltrada en ellos se drena rápidamente hacia la ribera del río Asunción y pasa a infiltrarse posteriormente en el valle de Bisani y en la región de El Coyote.

2.5.4.3 Sedimentos terciarios y cuaternarios

Esta unidad, está formada por gravas, arenas y arcillas y materiales tobáceos que forman una delgada cubierta sobre el lecho rocoso de las sierras circundantes. En el área de estudio, forman una parte las empinadas laderas que descienden desde las sierras hacia las partes planas; y, por otra parte, extensas planicies en la porción noroccidental de la cuenca formada esencialmente por depósitos arenosos que constituyen médanos y dunas.

En la primera expresión morfológica mencionada, las arcillas y depósitos tobáceos superficiales de naturaleza impermeable impiden la infiltración del agua de los escurrimientos superficiales, formándose una extensa red de drenaje por medio del cual el agua precipitada en esta zona es conducida hacia las partes planas donde tiene lugar la infiltración. Por lo que respecta a las planicies arenosas, son de poca importancia para la recarga del acuífero, debido a la escasez de escurrimientos superficiales por la misma aridez.



2.5.4.4 Rocas ígneas intrusivas, extrusivas y metamórficas

Estas rocas se han agrupado, dadas sus características físicas similares dentro de un solo grupo, cuyo rasgo común es la casi nula propiedad para transmitir o almacenar agua.

Son rocas ígneas intrusivas, tales como granito, granodiorita, diorita y tonalita; extrusivas ácidas y básicas (riolita, toba, dacita, andesita); rocas metamórficas, rocas plutónicas, conglomerados, areniscas y brechas, calizas con areniscas y dolomías.

Su extensa área de afloramiento funciona como zona de captación del agua de precipitación pluvial, la cual es colectada por el extenso sistema de drenaje natural que en ella se desarrolla, para escurrir hacia las áreas de contacto con el material aluvial de los valles existentes, donde se presentan los escurrimientos. Localmente, estas rocas pueden presentar permeabilidad por fracturamiento, la cual puede considerarse despreciable dado el régimen de recarga en la zona.

2.6 Tipo de clima

El área de estudio se caracteriza por ser una zona árida, de precipitaciones pluviales poco frecuentes, altas temperaturas en verano, escasa humedad y elevada evaporación.

Las variaciones regionales de los climas están determinadas por la influencia de los vientos alisios provenientes del noreste, mismos que hacen un recorrido continental, razón por la cual van perdiendo humedad al ir chocando contra los elementos orográficos existentes en su trayecto, siendo el último de ellos la Sierra Madre Occidental, provocando que su arribo a las llanuras sonorenses sea carente de humedad; por otro lado, el mar no proporciona humedad suficiente debida a las bajas temperaturas del agua durante buena parte el año, por lo que no es posible una evaporación considerable.

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García (1981) el tipo de clima es BWhw(x'). Este corresponde a un tipo de clima muy seco o árido semicálido, con lluvias escasas todo el año. Alrededor del área se puede encontrar también



el tipo de clima BW(h')hw(x') que corresponde a un tipo de clima muy seco, cálido con régimen de lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal (Figura 8).

El clima desértico que prevalece en la zona, se cree que se deba a las siguientes razones climatológicas:

a) Caborca está en el límite sureste del Desierto del Altar, se encuentra ubicado en el punto medio de la línea imaginaria que divide las trayectorias típicas por donde transitan los sistemas ciclónicos asociados al frente polar a los sistemas de la zona de convergencia intertropical.

b) Por tal motivo, las lluvias que generan importantes escurrimientos superficiales y recargas subterráneas en cuestión están asociadas a tormentas producidas por ciertas conformaciones climatológicas muy particulares y que se presentan en ciertas épocas del año.

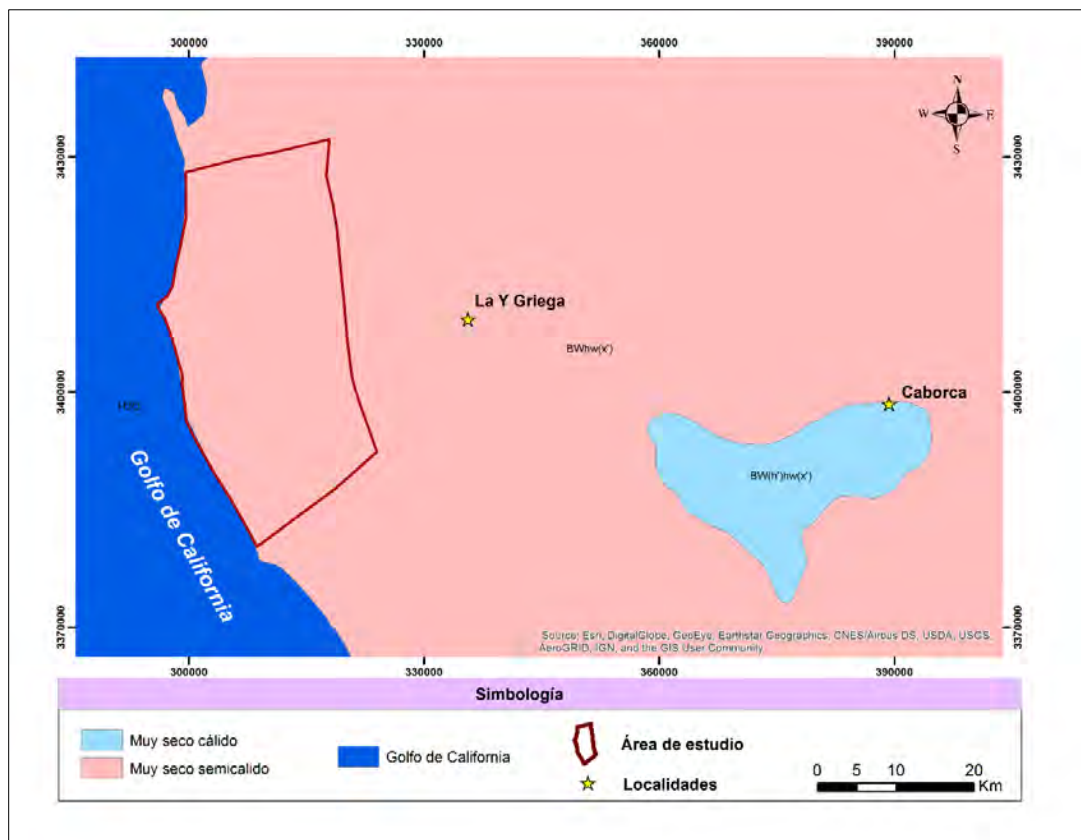


Figura 8. Tipo de clima en la región, modificado de INEGI (2009).



2.7 Análisis climatológico

Los datos de temperatura y precipitación se obtuvieron de los registros de tres estaciones meteorológicas operadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Estas estaciones son: Puerto Peñasco, Pitiquito y Puerto Libertad. En la Figura 9 se muestra la localización de cada una de las estaciones y en la Tabla 1 se presentan las coordenadas de localización de éstas, así como el periodo con datos.

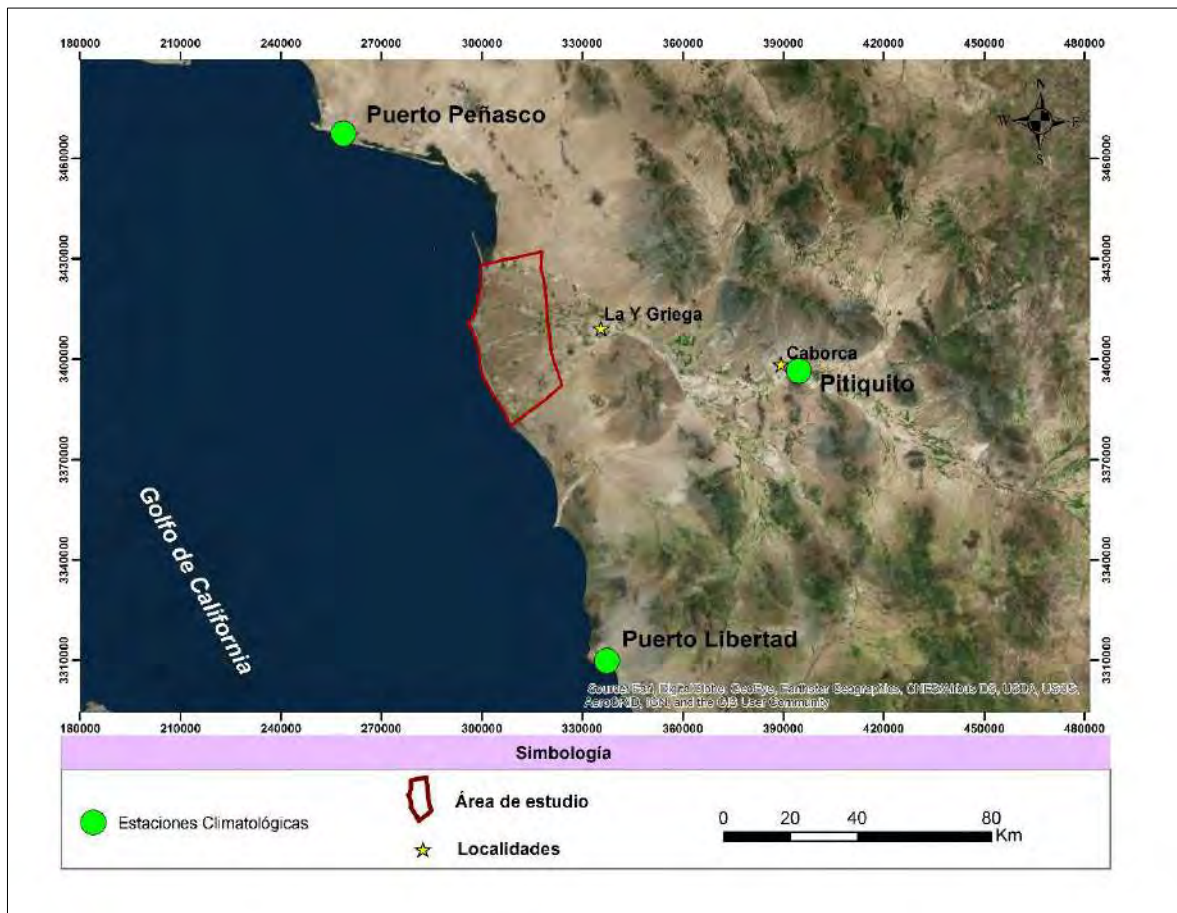


Figura 9. Localización de las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio.



Tabla 1. Localización y periodo con datos de las estaciones meteorológicas.

ESTACIÓN	COORDENADAS		PERIODO
	X	Y	
PITIQUITO	30°41'52.08"	112° 5'60.00"	1966-2015
PUERTO LIBERTAD	29°54'32.04"	112°41'6.00"	1966-2008
PUERTO PEÑASCO	31°19'0.12"	113°32'12.84"	1966-2015

Aunque la información se encuentra actualizada hasta el año 2015, con el fin de ser consistente con el análisis de los parámetros climatológicos se tomaron en cuenta los datos hasta el 2008 ya que la estación de Puerto Libertad solo cuenta con datos hasta ese año; sin embargo, las estaciones se analizaron individualmente con el periodo completo que presenta cada una.

Para la caracterización climática del área de estudio en específico, se trazaron polígonos de Thiessen y se realizó una interpolación de los datos de precipitación y temperatura, ya que no se cuenta con una estación meteorológica en área.

2.7.1 Estación Pitiquito

Con base en los datos proporcionados de la estación meteorológica Pitiquito, la precipitación media anual (PMA) es de 245.78 mm en el periodo de 1966-2015. Como se puede observar en la Figura 10, las precipitaciones más importantes se presentan en verano durante los meses de julio, agosto y septiembre cuando se registra el 60.6% de la precipitación total anual. En tanto a que el periodo de estiaje se presenta en los meses de mayo y junio principalmente. Las precipitaciones invernales representan un segundo periodo de lluvias y en los meses de diciembre, enero y febrero se registra el 21.2% de la lluvia media anual.



En cuanto a la temperatura media anual para el periodo 1966-2015 en la estación Pitiquito es de 21.8°C. Las temperaturas medias máximas se registran los meses de julio con 32°C y agosto con 31.3°C, mientras que las temperaturas medias mínimas se registran en los meses de diciembre con 12.5°C y enero con 12.8°C.

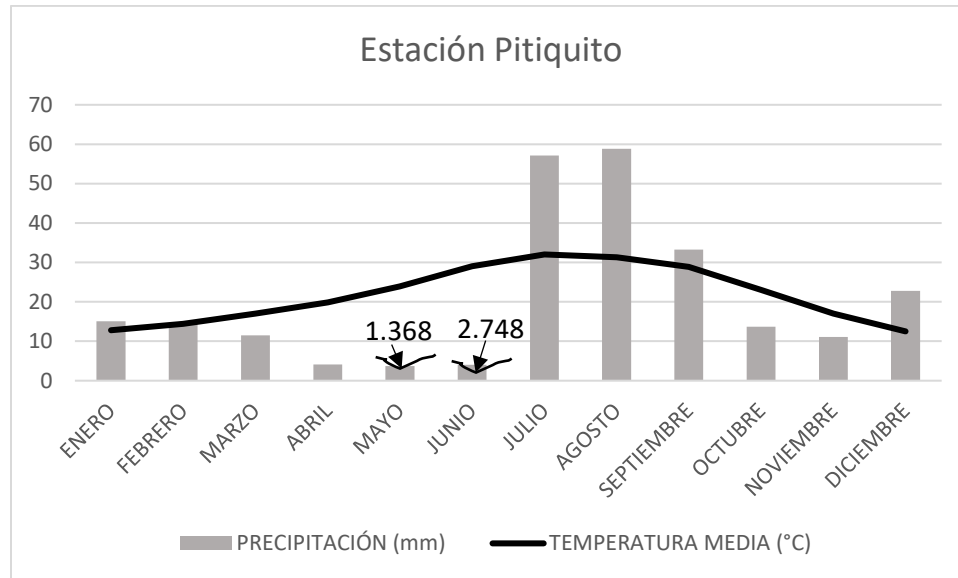


Figura 10. Precipitación media acumulada y temperatura media mensual en la estación Pitiquito durante el periodo 1966-2015.

2.7.2 Estación Puerto Libertad

Con base en los datos de la estación climatológica Puerto Libertad, la precipitación media anual (PMA) es de 97.3 mm para el periodo 1966-2008. Como se puede apreciar en la Figura 11, las precipitaciones más importantes se presentan durante los meses de agosto, septiembre y octubre cuando se registra el 39.8% de la precipitación total anual. En cuanto al periodo de estiaje, este se presenta principalmente en los meses de mayo y junio. Las precipitaciones invernales representan un segundo periodo de lluvias y en los meses de diciembre, enero y febrero se registra el 26.1% de la lluvia media anual.



Por otra parte, temperatura media anual en la estación Puerto Libertad para el periodo 1966-2008 es de 21.2°C. Las temperaturas medias máximas se registran los meses de julio con 29.8°C y agosto con 30.3°C, mientras que las temperaturas medias mínimas se registran en los meses de diciembre con 13.3°C y enero con 13.1°C.

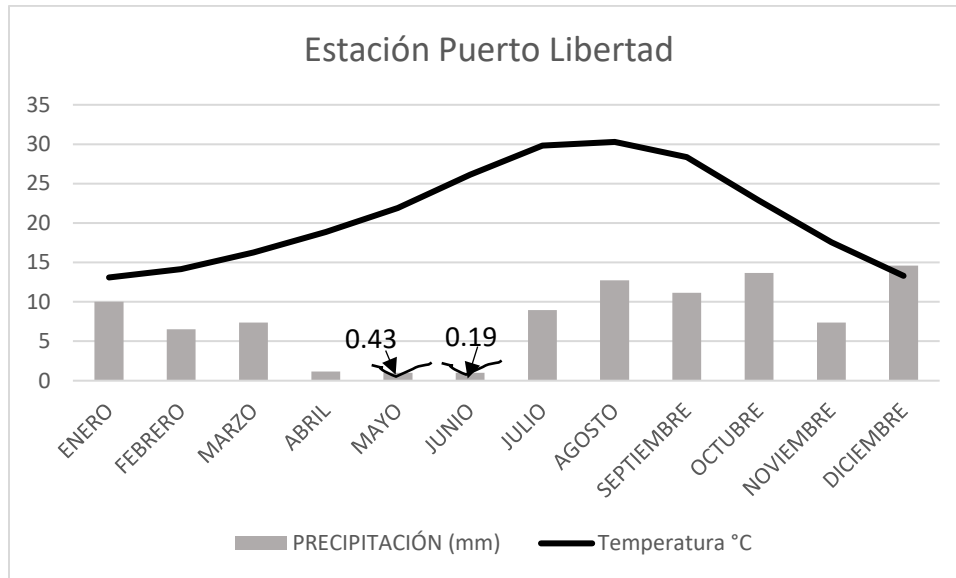


Figura 11. Precipitación media acumulada y temperatura media mensual en la estación Puerto Libertad durante el periodo 1966-2008.

2.7.3 Estación Puerto Peñasco

Con base en los datos de la estación meteorológica Puerto Peñasco, la precipitación media anual (PMA) para el periodo 1966-2015 es de 79.9 mm. Como se puede apreciar en la Figura 12, las precipitaciones más importantes se presentan durante los meses de agosto, septiembre y octubre cuando se registra el 45.81% de la precipitación total anual. Mientras que el periodo de estiaje se presenta en los meses de mayo y junio principalmente. Las precipitaciones invernales representan un segundo periodo de lluvias y en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo se registra el 29.4% de la lluvia media anual.



En cuanto a la temperatura media anual para el periodo 1966-2015 en la estación Puerto Peñasco es de 22.2°C. Las temperaturas medias máximas se registran los meses de julio con 30.4 °C y agosto con 31.2°C, mientras que las temperaturas medias mínimas se registran en los meses de diciembre con 14.4 °C y enero con 13.7°C.

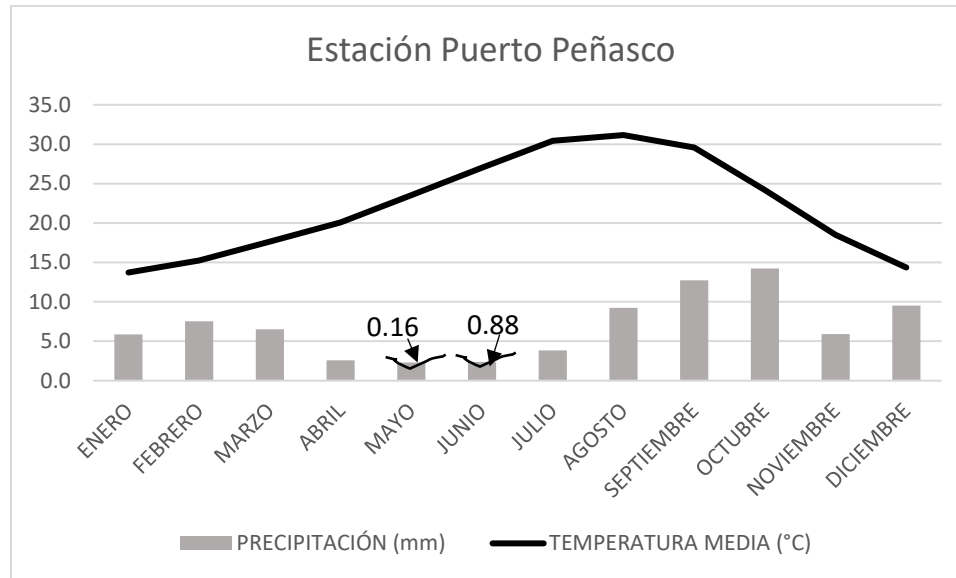


Figura 12. Precipitación media acumulada y temperatura media mensual en la estación Puerto Peñasco durante el periodo 1966-2015.

2.7.4 Polígonos de Thiessen

El método de polígonos de Thiessen permite determinar la lluvia media de una zona; se aplica cuando se sabe que las medidas de precipitación en los diferentes pluviómetros sufren variaciones, teniendo además el condicionante de que la cuenca es de topografía suave o en lo posible plana.

Para determinar los valores de precipitación y temperatura del área, primero se unieron las estaciones con líneas rectas y se trazaron mediatrices a las líneas que unen las estaciones. Después, se seleccionó solamente el área de estudio, como se puede ver en la Figura 13. Esto fue realizado con ayuda del software ArcGis 10.3.



Finalmente, se realizaron los cálculos correspondientes para determinar la precipitación y la temperatura del área. Estos cálculos se presentan en la Tabla 2.

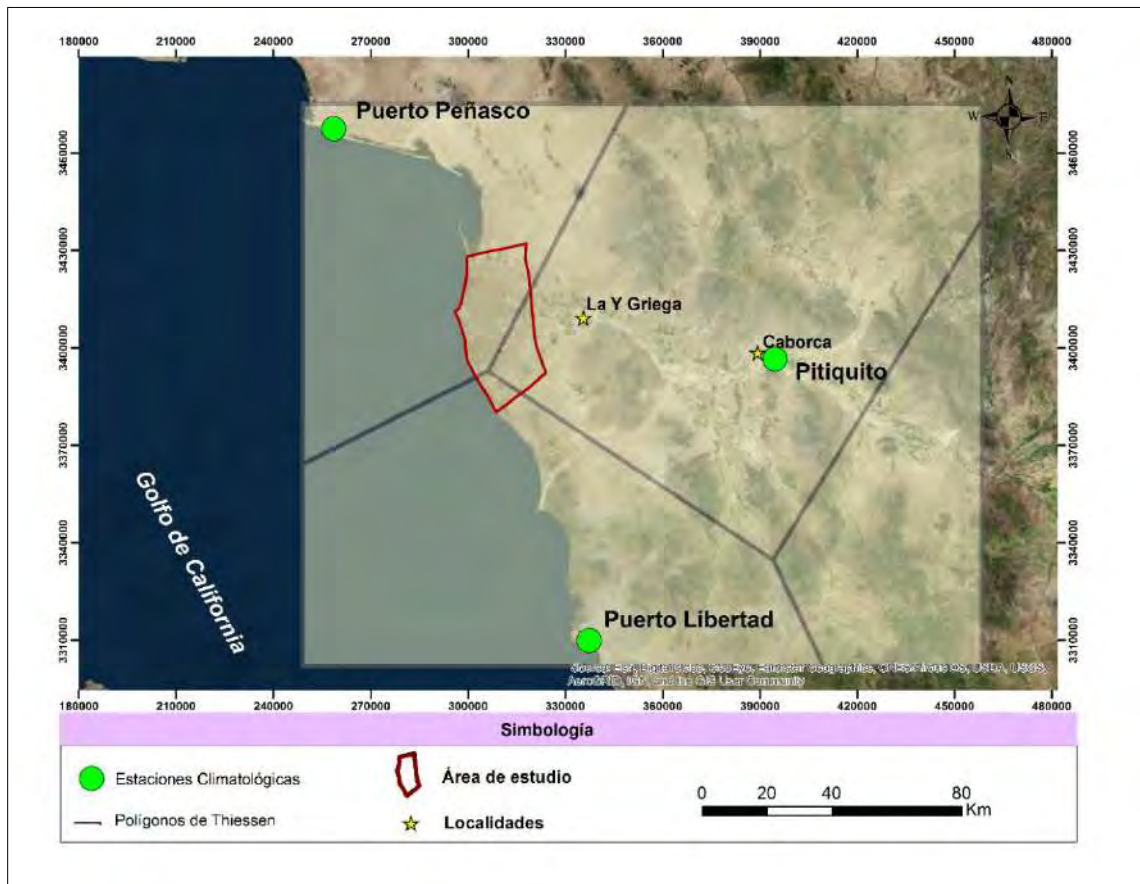


Figura 13. Polígonos de Thiessen entre las estaciones Puerto Peñasco, Pitiquito y Puerto Libertad.

Tabla 2. Cálculo de precipitación y temperatura del área de estudio mediante polígonos de Thiessen.

Estación	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Área (m ²)	Precipitación ponderada (mm)	Temperatura ponderada (°C)
Puerto Peñasco	84.69	21.78	386075255.3420	0.090802	7.90
Pitiquito	250.41	21.17	79406589.8758	0.007257	1.57
Puerto Libertad	97.17	22.06	599230914.1920	0.047665	12.41
Suma	432.27	65.21	1064712759.4089	0.145724*1000= 145.7241	21.88



2.7.5 Evaporación potencial

No se cuenta con datos de evaporación potencial para ninguna de las estaciones.

2.7.6 Evapotranspiración real

La evapotranspiración real (ETR) se determina aplicando métodos indirectos. La evapotranspiración se obtuvo a partir del método de *Coutagne* (Campos, 1996), mediante la ecuación:

$$ETR = P - XP^2$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real anual, en m

P = Precipitación total anual, en m

X = Parámetro de cálculo, función de la Temperatura Media Anual, en $^{\circ}\text{C} = 1/(0.8+0.14t)$

t = Temperatura Media Anual, en $^{\circ}\text{C}$

Tomando en cuenta la ecuación anterior, la lámina de evapotranspiración obtenida en el análisis es de 140.22 mm anuales.

2.8 Hidrología superficial

La cuenca de estudio pertenece a la región hidrológica (de la Comisión Nacional del Agua) No.8 Sonora Norte, que abarca gran parte del desierto de altar y sus principales corrientes son los ríos Asunción- Magdalena.



2.8.1 Corrientes principales

Las corrientes principales que drenan el área son el río Asunción o Magdalena. El río Asunción es el nombre que toma el Río Magdalena al entrar al área de estudio que es la costa de Caborca. Este río es la corriente más importante de la Región Hidrológica No. 8 por su área drenada, de la cual 310 km² corresponden a territorio de Estados Unidos de Norteamérica. Sus límites son por el oriente la cuenca del río Sonora, al sur la cuenca del río Bacoachi, al norte la del río Sonoyta y la de los ríos San Pedro y Santa Cruz que escurren hacia el territorio de Estados Unidos de Norteamérica.

El río Magdalena, nace con el nombre de arroyo la piedra en la sierra el Chivato a pocos kilómetros al sureste del poblado Santa Cruz, Sonora. El cauce sigue un rumbo suroeste, recibe por su margen derecha al arroyo San Antonio y cambia su nombre al de arroyo Cocospera. Inmediatamente aguas debajo de Ímuris, Sonora el arroyo Cocospera, recibe por su margen derecha las aportaciones del afluente el arroyo Los Alisos y poco después por la misma margen el arroyo Punta de Agua, y toma el nombre de río Los Alisos hasta las inmediaciones de Magdalena, Sonora, de donde parte con el nombre de esta población. De aquí, continúa su curso hacia el suroeste pasando por Santa Ana, Sonora. A la altura del ejido Bellavista recibe por la margen izquierda el arroyo El Carriso, poco después a la altura del ejido La Tinaja, recibe por su margen derecha el arroyo El Coyotillo, a partir de esta confluencia hasta Caborca, sigue un curso noroeste y toma el nombre del río Asunción.

El río Asunción, recibe por su margen derecha a la altura de Altar, Sonora, los ríos Altar y el Sásabe pasando por Pitiquito, Sonora y posteriormente Caborca. Luego de pasar Caborca, un afluente importante del río Asunción que se conecta a la altura del ejido El Norteño, es el arroyo El Coyote, de aquí que toma la dirección oeste atravesando la planicie costera hasta su desembocadura en el golfo de California, como se puede apreciar en la Figura 14.

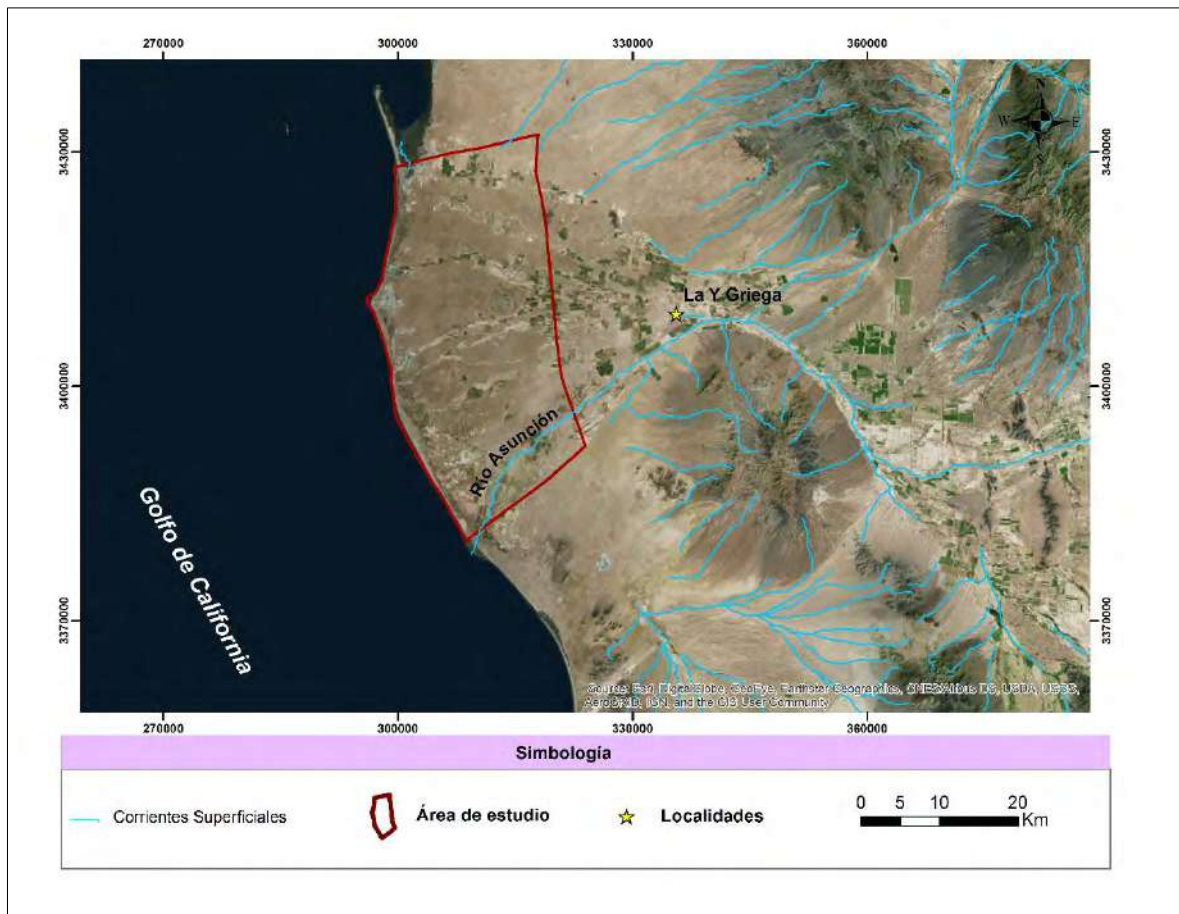


Figura 14. Corrientes superficiales localizadas en el área de estudio.

III. HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

3.1 Piezometría

La definición de áreas de recarga y descarga, y consecuentemente trayectorias de flujo de agua subterránea, puede ser lograda mediante diversos indicadores, uno de ellos es la medición de los niveles piezométricos por medio de los cuales no solo es posible identificar estas zonas sino también componentes verticales de flujo subterráneo, ascendentes y descendentes.



Se cuenta con información piezométrica tomada por parte de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) desde el año 1966 hasta el 2015. Sin embargo, solo se tomaron en cuenta los años 1966,1976,1986 y1996 con la finalidad de observar la evolución histórica de los niveles del acuífero por décadas en diferentes pozos y los años 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2014 y 2015 para ver el comportamiento hidráulico del acuífero utilizando los mismos pozos en todos los años (Figura 15).

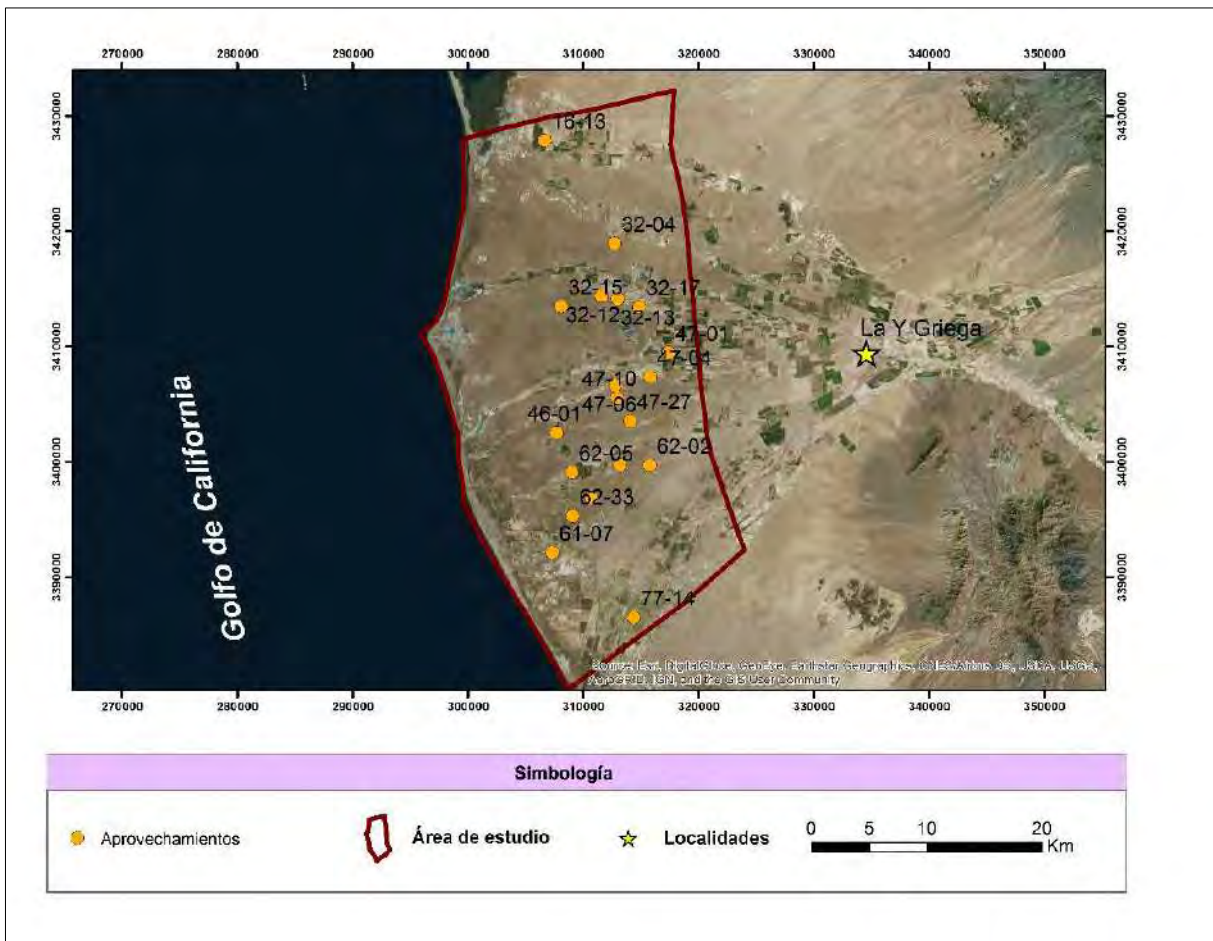


Figura 15. Localización de aprovechamientos en el área de estudio.



3.2 Elevación del nivel estático

Para determinar la elevación de los niveles estáticos se utilizaron las alturas obtenidas con las curvas topográficas proporcionadas por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2013).

Para el periodo de 1997-2003 el promedio de la elevación del nivel estático en el área de estudio fue de -7.44 metros y después de 11 años para el periodo 2014-2015 el promedio de la elevación se encontraba a -9.37 metros.

Se trazaron curvas de isovalores de elevación del nivel estático con base en las elevaciones calculadas previamente para diferentes años. Se llevó a cabo una interpolación de las elevaciones de los niveles estáticos del periodo de tiempo que va desde 1966 hasta el 2015 mediante el software ArcMap 10.3. Se obtuvieron planos de isolíneas, los cuales se pueden apreciar en las Figuras 16 a la 28.

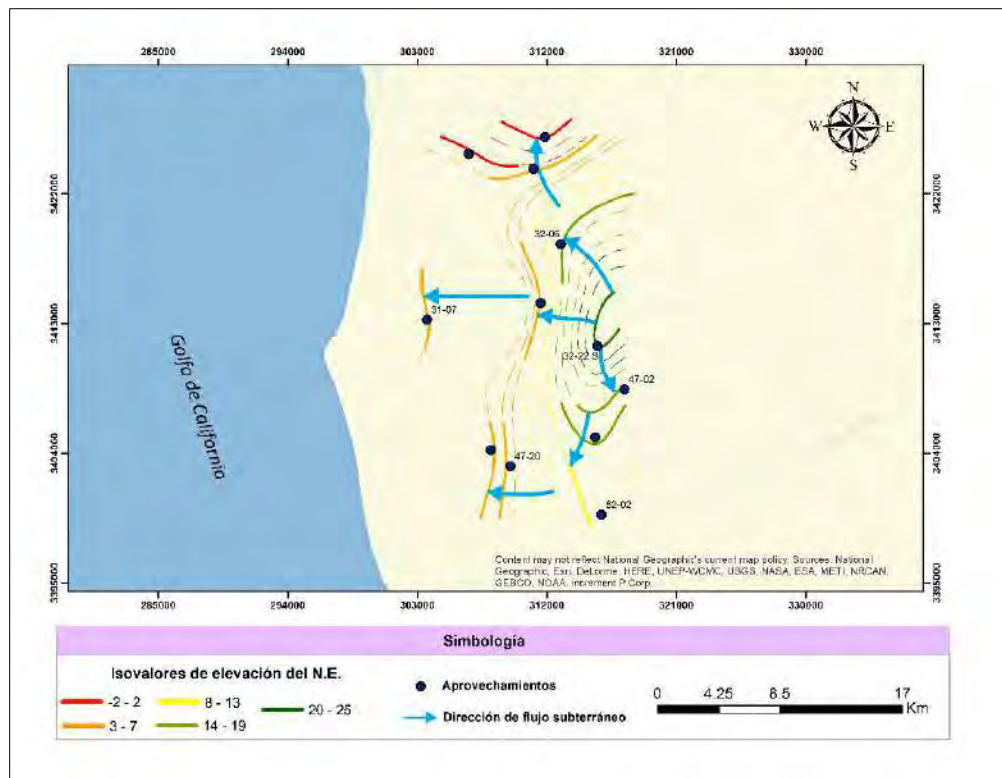


Figura 16. Elevación del nivel estático y dirección de flujo 1966.



Caracterización Hidrogeoquímica y Situación Actual de la Intrusión Marina en la Porción Costera del Acuífero Caborca, Sonora, México

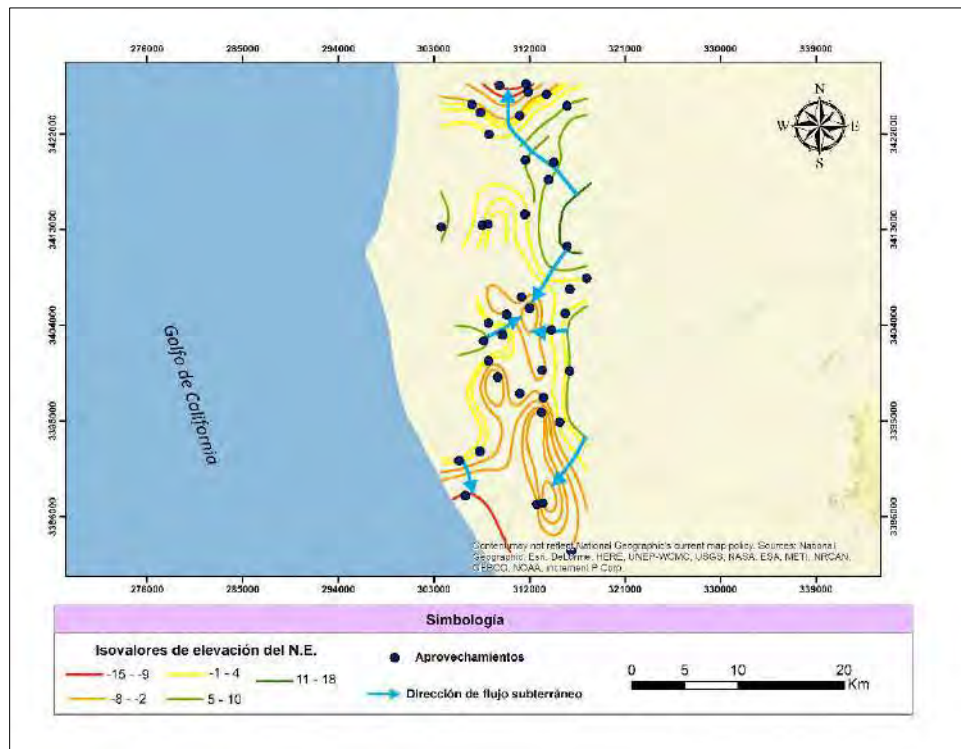


Figura 17. Elevación del nivel estático y dirección de flujo 1976.

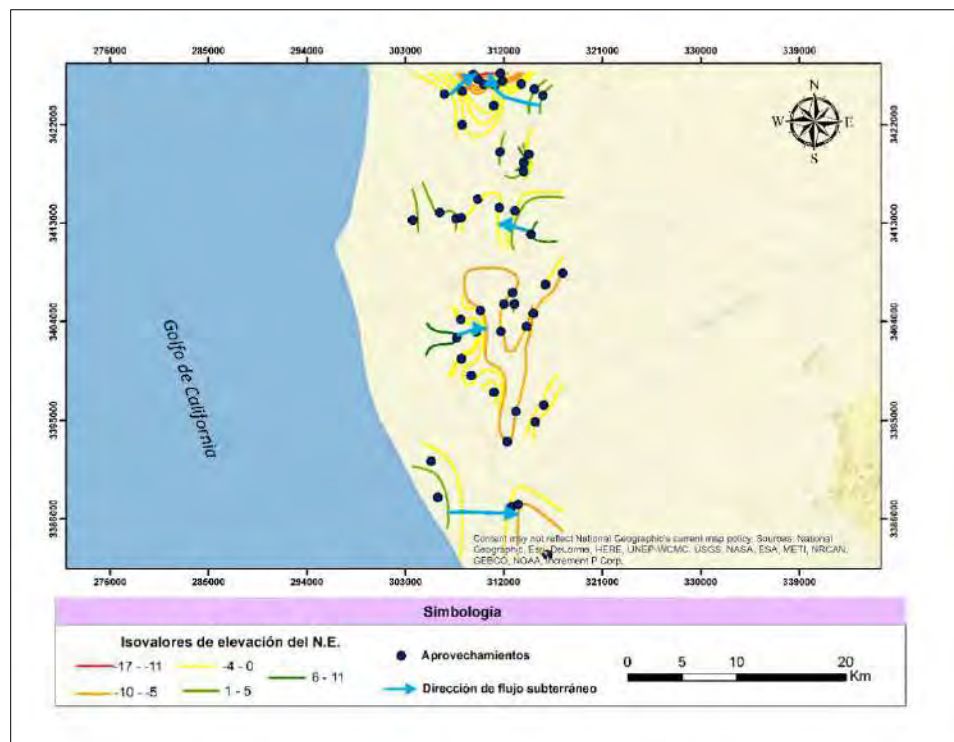


Figura 18. Elevación del nivel estático y dirección de flujo 1986.



Caracterización Hidrogeoquímica y Situación Actual de la Intrusión Marina en la Porción Costera del Acuífero Caborca, Sonora, México

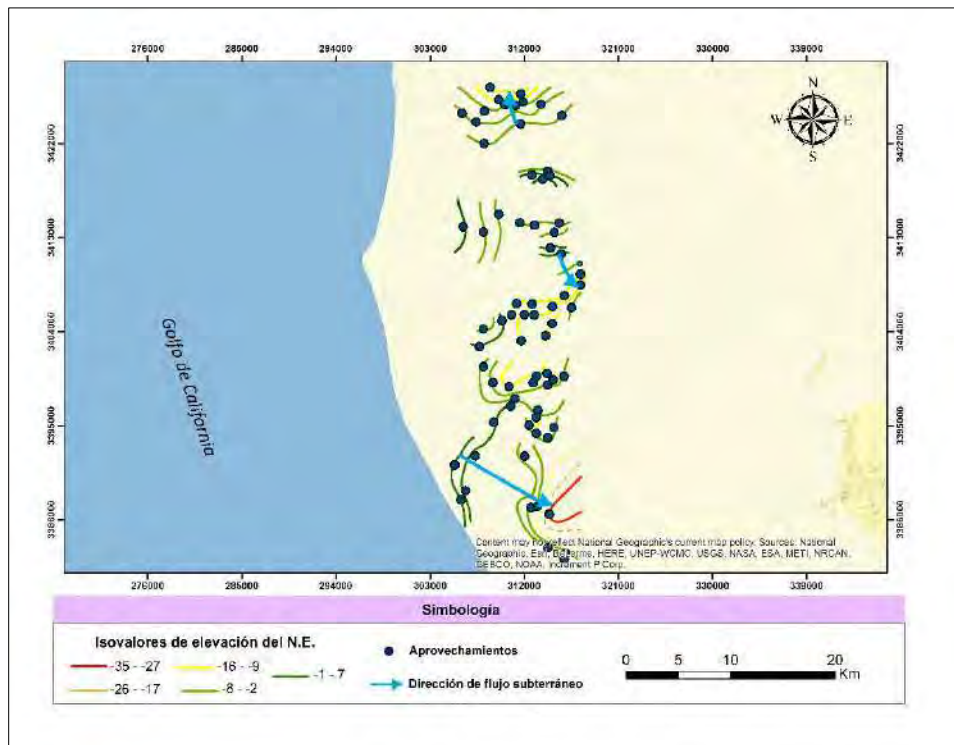


Figura 19. Elevación del nivel estático y dirección de flujo 1996.

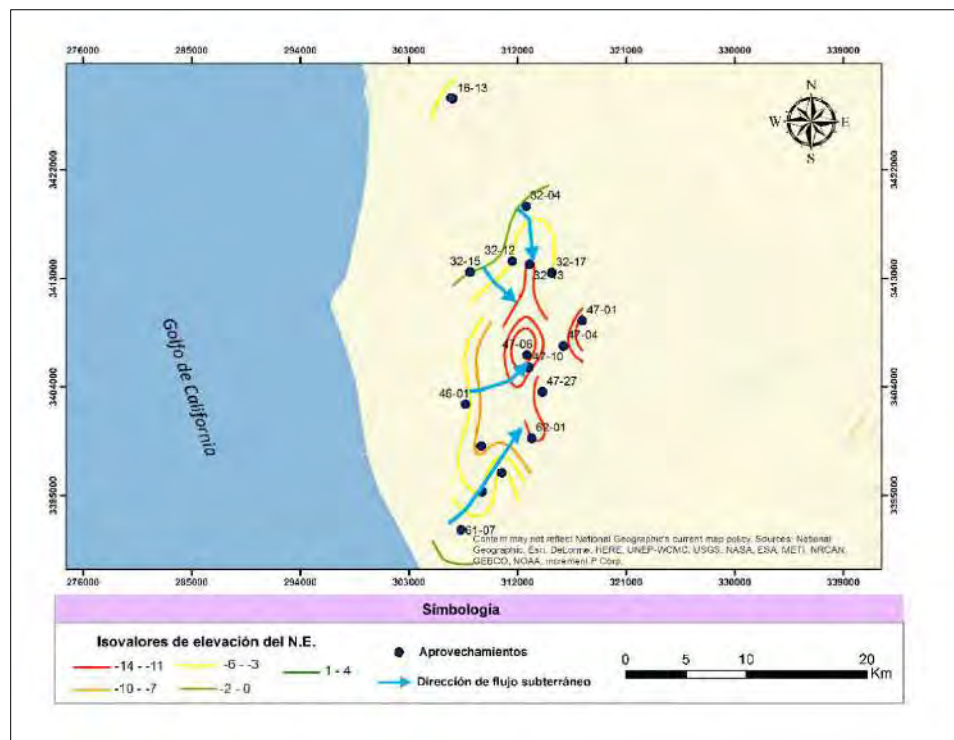


Figura 20. Elevación del nivel estático y dirección de flujo 1997.



Caracterización Hidrogeoquímica y Situación Actual de la Intrusión Marina en la Porción Costera del Acuífero Caborca, Sonora, México

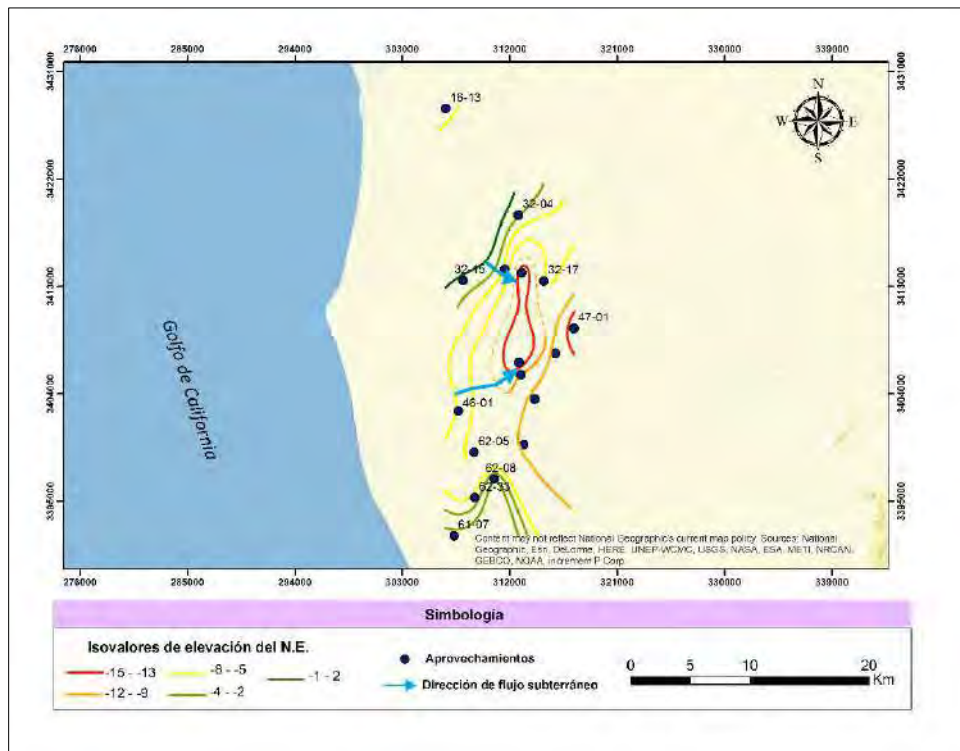


Figura 21. Elevación del nivel estático y dirección de flujo 1998.



Figura 22. Elevación del nivel estático y dirección de flujo 1999.



Caracterización Hidrogeoquímica y Situación Actual de la Intrusión Marina en la Porción Costera del Acuífero Caborca, Sonora, México

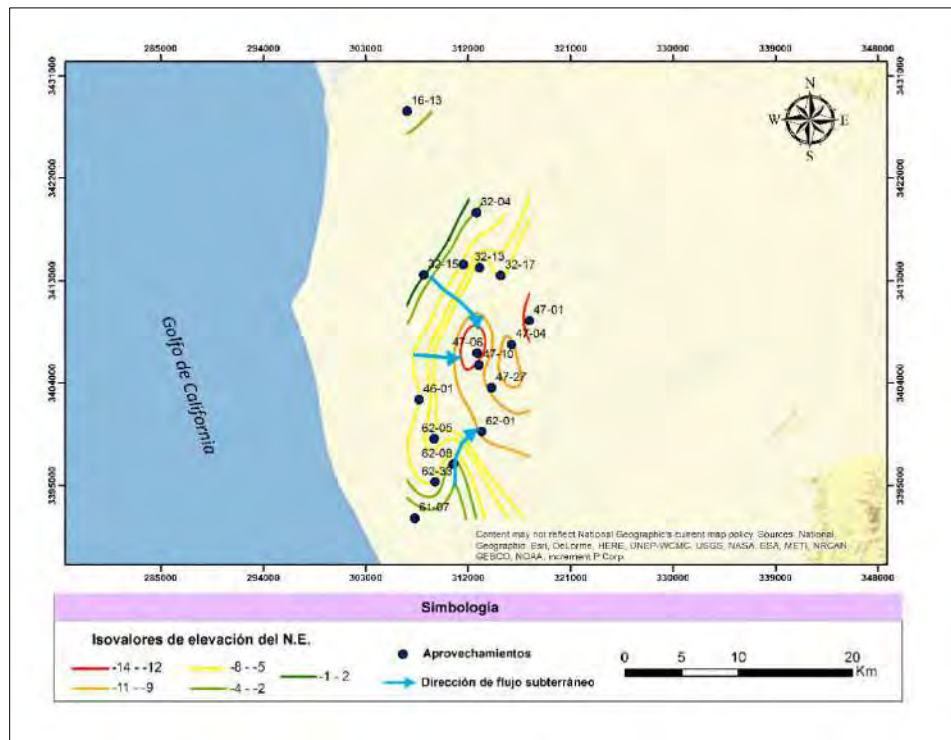


Figura 23. Elevación del nivel estático y dirección de flujo 2000.

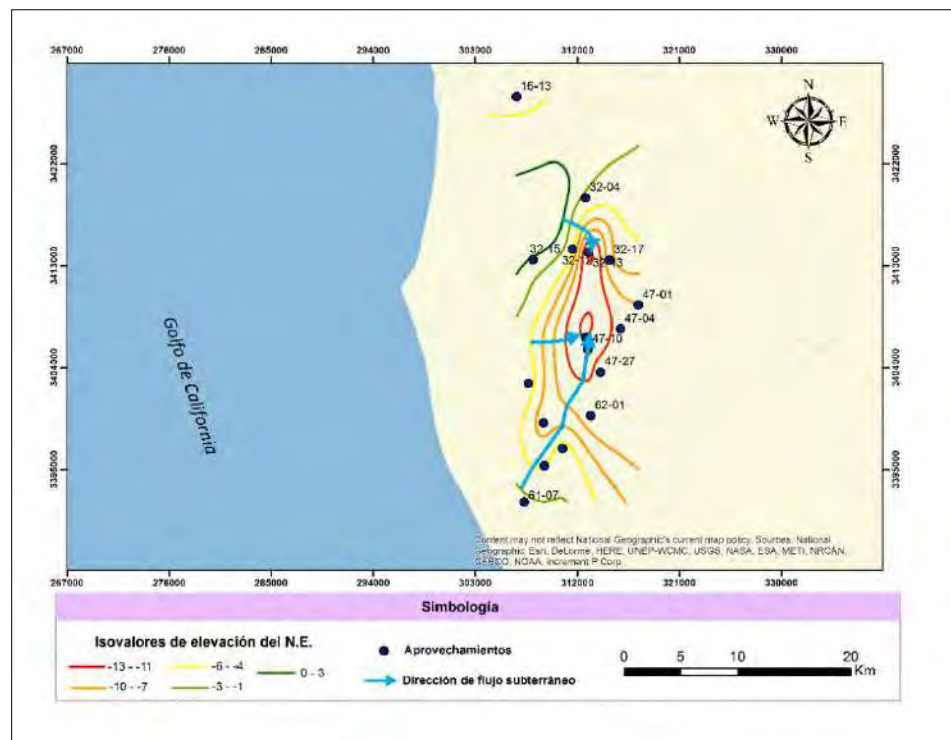


Figura 24. Elevación del nivel estático y dirección de flujo 2001.



Caracterización Hidrogeoquímica y Situación Actual de la Intrusión Marina en la Porción Costera del Acuífero Caborca, Sonora, México



Figura 25. Elevación del nivel estático y dirección de flujo 2002.



Figura 26. Elevación del nivel estático y dirección de flujo 2003.



Caracterización Hidrogeoquímica y Situación Actual de la Intrusión Marina en la Porción Costera del Acuífero Caborca, Sonora, México



Figura 27. Elevación del nivel estático y dirección de flujo 2014.

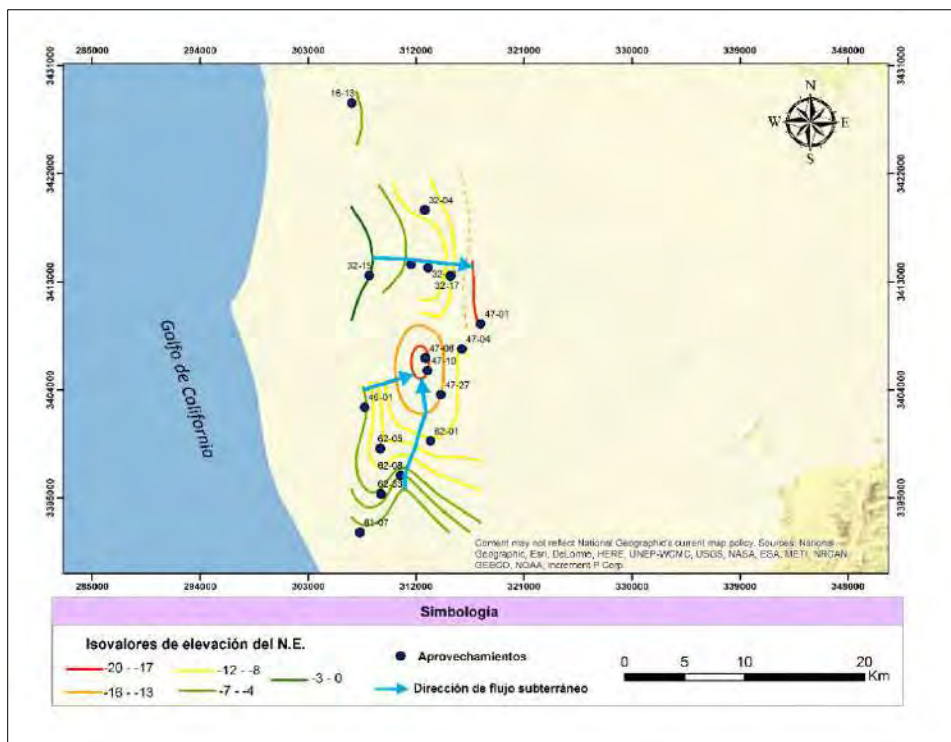


Figura 28. Elevación del nivel estático y dirección de flujo 2015.



La dirección de flujo del agua subterránea se observa con tendencia hacia la costa en toda el área de estudio en el año 1966. En el año 1976 se puede observar ésta varía en dirección hacia el mar y en ciertos lugares puntuales, donde hay pozos, la dirección va hacia el continente. A partir del año 1986 hasta el 2015 se puede observar que el flujo se dirige hacia el continente, sobre todo en dirección a ciertos pozos.

En la zona de mayor extracción se presentan varios conos de abatimiento de hasta 20 metros bajo el nivel del mar probablemente debido al sobrebombeo de los pozos localizados en esa zona del acuífero.

IV. RESULTADOS

4.1 Hidrogeoquímica

La hidrogeoquímica estudia las propiedades físico-químicas del agua superficial y subterránea, y su relación con la geología, analizando los iones disueltos en agua y los procesos de interacción agua-sólido. El agua en su movimiento a través del subsuelo entra en un contacto prolongado con los minerales que conforman los estratos, y estos minerales en mayor o menor medida presentan cierto grado de solubilidad, de modo que el agua incrementa su contenido mineral hasta que logra alcanzar el equilibrio de las sustancias en solución.

Según Castillo Pérez y Morell Evangelista (1988), cualquier estudio de intrusión marina debe basarse en el conocimiento previo de las características físicoquímicas del agua presente en el acuífero. El agua dulce y el agua salada presentan características ciertamente constantes en un área dada, salvo en casos de diferentes mecanismos contaminantes.

El agua de interfase, resultado de la mezcla de las fases dulce y salada, se muestra como un agua químicamente muy activa, siempre en busca del equilibrio iónico entre ella y el propio acuífero. Esto se traduce en la existencia de ciertos fenómenos físicoquímicos que



modifican, a veces sustancialmente, la composición química del agua de mezcla. La intensidad y el sentido de estas reacciones son distintos según las características litológicas de cada acuífero.

4.1.1 Muestreo hidrogeoquímico

Dado que el objetivo de este estudio es la identificación de la diversidad de salinidad en el agua del acuífero e identificar como se muestra la migración de la intrusión salina, el muestreo se planeó siguiendo la metodología descrita por Rangel-Medina (2003) acorde al espacio del área de estudio. Por tanto, se tuvo un cubrimiento espacial (lateral y vertical) limitado pero suficiente para interpretar el avance de la salinidad. Dada la antigüedad de la mayoría de los pozos, pocos rebasan doscientos metros en sus profundidades; descontándoles la profundidad al nivel estático, los metros de registro se reducen considerablemente.

Se realizó un muestreo de aguas subterráneas en el acuífero de la costa de Caborca y se complementó la información con datos obtenidos por el INEGI para los años 1981 y 2010 para poder hacer un seguimiento del comportamiento hidrogeoquímico del acuífero.

La distribución del muestreo de aguas subterráneas para análisis fisicoquímico se determinó con base en las zonas de mayor interés para este trabajo a partir de las anteriores campañas de muestreo de las cuales se obtuvo información del INEGI. Se consideraron los pozos que cubrieran de manera representativa el área de estudio y que la mayoría se encontraran activos durante los 3 años de seguimiento (1981, 2010 y 2017), como se puede observar en las Figuras 29, 30 y 31.

A partir de los resultados del análisis fisicoquímico, se seleccionaron sitios de interés debido a su elevada salinidad para tomar una muestra de agua y analizar bromuros y nitratos. Estos sitios se pueden observar en la Figura 32.



Caracterización Hidrogeoquímica y Situación Actual de la Intrusión Marina en la Porción Costera del Acuífero Caborca, Sonora, México

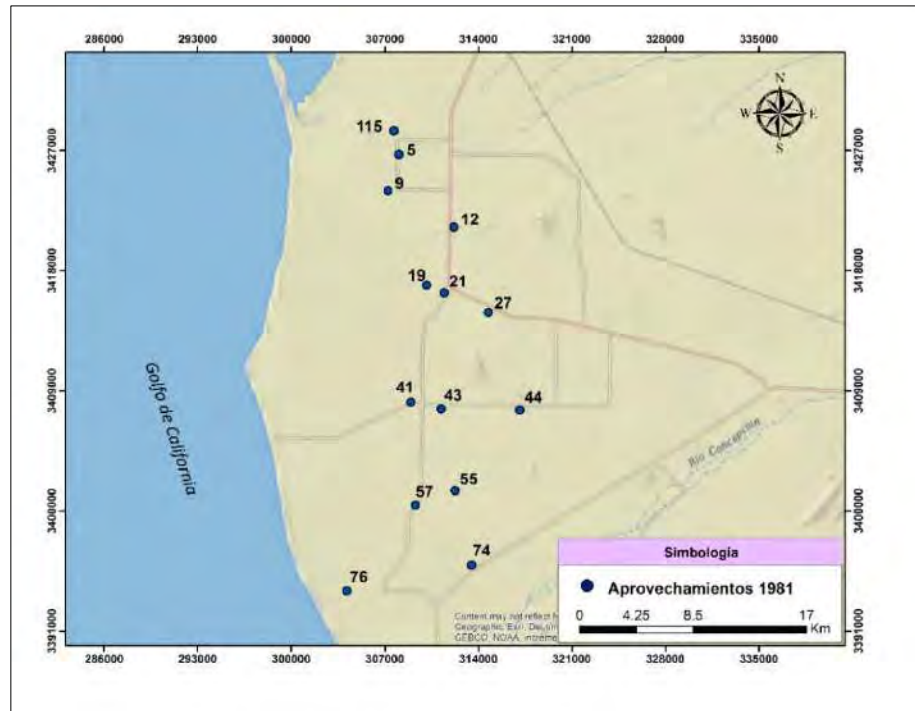


Figura 29. Distribución del muestreo de aguas subterráneas para análisis fisicoquímico en el año 1981.

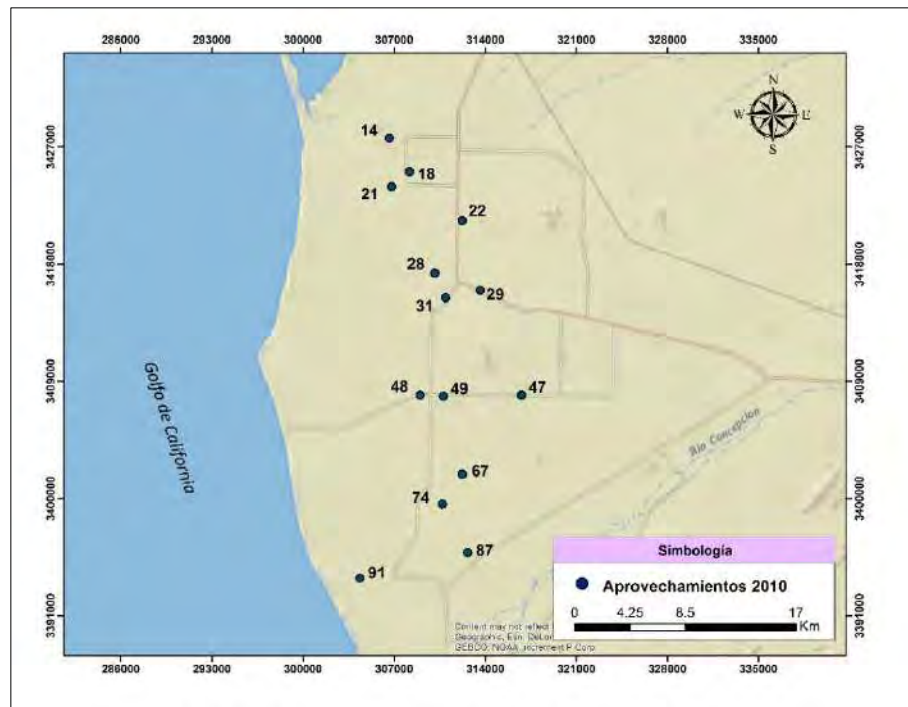


Figura 30. Distribución del muestreo de aguas subterráneas para análisis fisicoquímico en el año 2010.



Caracterización Hidrogeoquímica y Situación Actual de la Intrusión Marina en la Porción Costera del Acuífero Caborca, Sonora, México

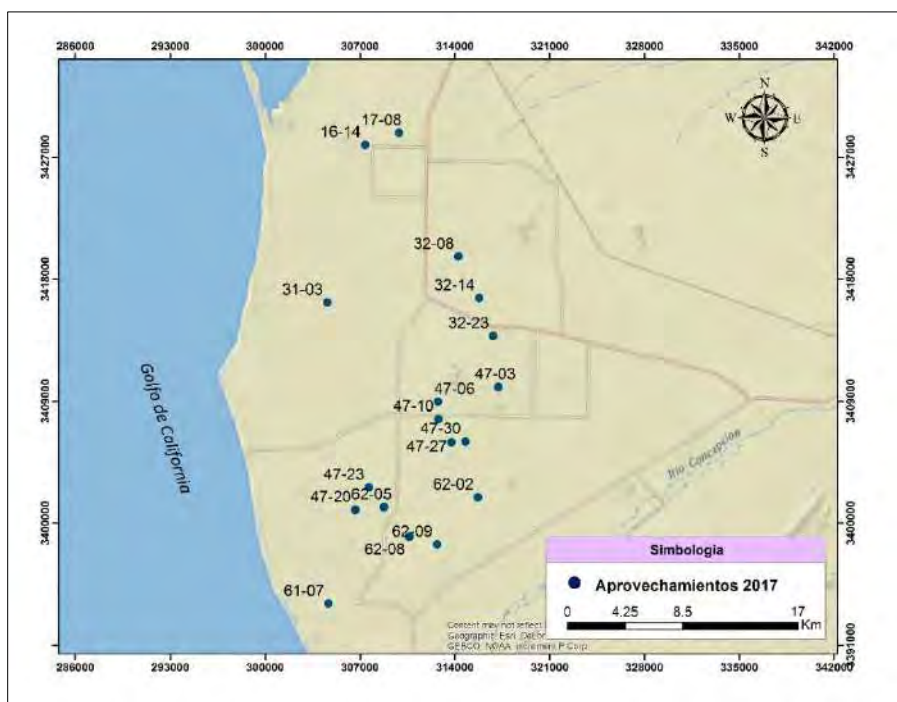


Figura 31. Distribución del muestreo de aguas subterráneas para análisis fisicoquímico en el año 2017.

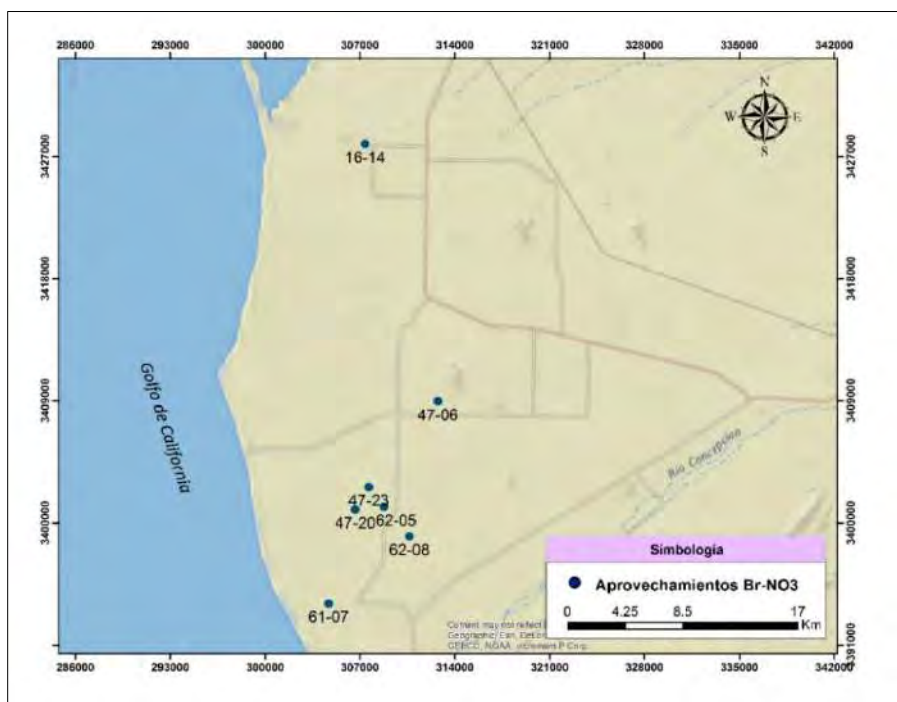


Figura 32. Distribución del muestreo de aguas subterráneas para análisis de bromuros y nitratos en el año 2017.



4.1.2 Parámetros fisicoquímicos de campo

Los parámetros fisicoquímicos permiten conocer de una manera general las características del agua asociadas a la cantidad de sólidos totales disueltos, interacción con las condiciones atmosféricas, profundidades diferentes de circulación y la actividad del ion hidrógeno. Estos parámetros deben ser medidos en el campo y, aunque sean menos precisos que las medidas hechas en el laboratorio, son más exactos porque reflejan las condiciones originales del agua dentro del acuífero.

La medición de los parámetros fisicoquímicos de campo se llevó a cabo *in situ* en 26 sitios, entre los cuales se encuentran el mar y los sitios a los cuales se les tomó muestra para enviar al laboratorio. En el caso de los pozos, la medición de los parámetros de campo se realizó directamente de la descarga del flujo y en el mar se realizó directamente, tratando de no tomar la medición muy superficialmente.

Las mediciones se llevaron a cabo con una sonda multiparamétrica Hanna HI9828, como se puede observar en la Figura 33, la cual permitió obtener los valores de conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, temperatura, salinidad, pH y ORP.



Figura 33. Medición de parámetros en campo.



Los sitios en los cuales se midieron parámetros fisicoquímicos se muestran en la Figura 34 y las coordenadas y resultados de las mediciones hechas en campo se encuentran en la Tabla 3.

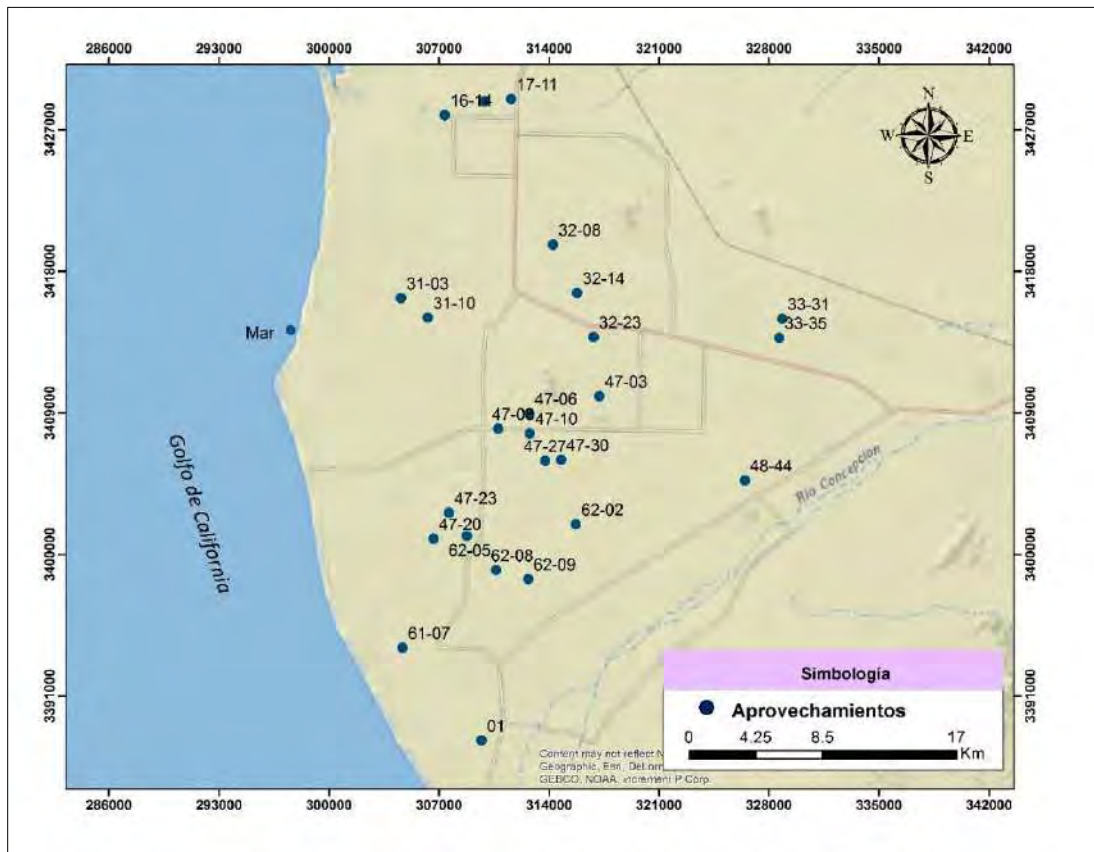


Figura 34. Sitios de medición de parámetros en campo.



Caracterización Hidrogeoquímica y Situación Actual de la Intrusión Marina en la Porción Costera del Acuífero Caborca, Sonora, México



Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos obtenidos en campo.

Pozo	X	Y	pH	T (°C)	CE (µS/cm)	STD (ppm)	SAL	ORP
16-14	307390	3427940	7.14	24.26	5880	2941	3.18	134
17-08	309906	3428814	7.18	27.82	6440	2880	3.48	191
17-11	311612	3428962	7.1	28.8	3164	1429	1.64	85
31-03	304599	3416300	5.70	27.50	2620	1178	1.34	180
31-10	306305	3415074	7.66	26.4	2500	1118	1.29	102.4
32-08	314268	3419700	7.32	28.4	990	435	0.51	93
32-14	315808	3416639	7.75	29.50	659	297	0.32	179
32-23	316845	3413829	7.77	29.71	1495	673	0.74	170
33-31	328852	3414995	7.25	29.5	1271	573	0.64	95.2
33-35	328657	3413778	7.1	29.6	1266	568	0.62	75
47-03	317222	3410068	7.66	31.39	1358	611	0.67	123
47-06	312762	3408971	7.43	27.96	2138	1022	1.09	169
47-08	310774	3408008	7.36	27	4200	1884	2.23	107
47-10	312794	3407709	7.64	28.30	1354	609	0.67	155
47-20	306667	3401000	7.35	25.42	5619	2810	3.03	122
47-23	307658	3402652	7.46	26.00	2713	1330	1.37	115
47-27	313769	3405979	7.65	25.00	1676	755	0.84	182
47-30	314790	3406036	7.66	29.00	857	386	0.42	192
48-44	326472	3404716	7.64	29	892	402	0.43	81.8
61-07	304696	3394083	7.44	25.02	4521	2154	2.41	196
62-02	315722	3401921	7.91	29.26	982	442	0.48	60.3
62-05	308783	3401196	7.20	28.00	2704	1219	1.39	146
62-08	310657	3399019	7.32	25.96	4280	2144	2.27	212
62-09	312691	3398446	7.67	27.40	1113	502	0.55	197
Mar	297856	3412882	7.85	27.9	53760	24230	35.6	80
01	309716	3388192	7.26	28.3	10680	4780	6.07	52



4.1.3 Proceso de toma y transporte de muestras

Las muestras fueron tomadas directamente de la descarga del flujo de los pozos, como se observa en la Figura 35. La mayoría de los pozos se encontraron trabajando, pero donde estaban fuera de operación se bombearon un mínimo de 15 minutos antes de tomar la muestra, según la técnica establecida en el plan y protocolo de muestreo. En caso de que el aprovechamiento no contara con equipo de bombeo, se utilizó un bailer atado a una soga para tomar la muestra. Se tomó especial cuidado, sobre todo para las muestras que serían enviadas a análisis isotópico, en que el envase quedara lo más lleno posible evitando dejar burbujas con aire al cerrarlo.



Figura 35. Toma de muestras de la descarga de flujo.

El muestreo siguió un riguroso protocolo con el objetivo de no contaminar las muestras y de no alterar con reacciones posteriores a su toma el medio fisicoquímico dentro de los envases.



Los envases utilizados fueron previamente lavados con agua acidulada, y etiquetados con clave de rastreabilidad, fecha, hora de toma de muestra y condiciones ambientales. La preservación de las muestras fue con hielo (como se puede apreciar en la Figura 36), con el fin de mantenerlas a una temperatura de 4°C durante su transportación al laboratorio.



Figura 36. Preservación de muestras en hielo.

Según la técnica establecida en el plan y protocolo de muestreo, las características que se deben de incluir en cada sitio son: nomenclatura (clave de rastreabilidad), cobertura, recorrido, número de toma de muestras y características de la toma de la muestra para análisis de elementos a determinar. Todos ellos con base en el protocolo del laboratorio (Na, K, Cl, NO₃, con y sin preservativo: H₂SO₄, HCO₃, CO₃, durezas, sulfatos, sin preservativo para fisicoquímicos).

La clave de rastreabilidad se asignó respetando la clave establecida a cada aprovechamiento por la Comisión Nacional del Agua, con el fin de facilitar y evitar confusiones en estudios futuros.

El cierre de las botellas se hizo aplicando papel “Parafilm” alrededor de la tapa, a fin de asegurarse de que no hubiera pérdidas y se colocó una etiqueta sello sobre la tapa, con la identificación de la muestra, muestreador, hora de sellado y espacio para que en el laboratorio se identificara, quien y a qué hora se abre la muestra.



Para su traslado al laboratorio, en la bitácora de registro se incluyeron en campo datos de condiciones climatológicas, hora de toma de la muestra, hora de sellado y hora de preservación en hielo para mantenimiento de temperatura a 4°C durante su transportación al laboratorio, así como levantamiento de las Coordenadas UTM con un equipo de posicionamiento Garmin GPS 100 SRVY II. Igualmente se realizó llenado de registros de muestreo de campo y cadenas de custodia en dos formatos de cada uno y se entregaron al Laboratorio de Análisis de Agua, Suelo y Planta de la Universidad de Sonora, Unidad Caborca que amablemente se hizo cargo de los análisis químicos de este estudio, así como también al laboratorio Analítica del Noroeste ubicado en Hermosillo quienes analizaron los iones de bromuros y nitratos y al laboratorio Isotech ubicado en Champaign, Illinois quienes analizaron los isótopos estables.

4.1.4 Resultados de laboratorio

En las Tablas 4 y 5, se muestran los resultados de laboratorio proporcionados por el INEGI para los años 1981 y 2010 y en la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos del análisis efectuado por el laboratorio de Agua, Suelo y Planta de la Universidad de Sonora, Campus Caborca y del laboratorio Analítica del Noroeste para el año 2017. Los números en rojo indican que el resultado sobrepasa los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-1994.



Tabla 4. Resultados de laboratorio 1981.

Pozo	PARÁMETROS (mg/L)								
	Calcio	Magnesio	Sodio	Potasio	Sulfatos	Bicarbonatos	Carbonatos	Cloruros	Nitratos
5	92	86.50	437.9	9	521.30	268.40	18	585.7	8.7
9	51	22.90	236.4	5.5	145.90	262.30	12	223.6	3.7
12	55	109.70	528.5	9	354.70	213.50	12	781.0	11.8
19	27	29.20	153.6	6.2	62.40	231.80	6	202.3	2.5
21	32	19.70	125.1	4.3	62.40	244.00	6	102.9	3.7
27	172	132.10	230	9	354.70	152.50	0	674.5	8.7
41	66	28.30	142.8	5.5	83.00	158.60	12	248.5	1.2
43	80	26.50	265	6.6	187.70	189.10	6	373.3	3.7
44	43	16.40	113.7	6.6	52.30	195.20	6	131.3	5
55	42	14.90	84.4	6.6	21.10	231.80	0	102.9	5
57	25	14.90	109	3.9	41.30	213.50	0	102.9	3.7
74	50	13.00	82.1	4.7	73.00	225.70	0	85.2	3.7
76	50	17.50	93.8	3.5	62.40	274.50	12	67.4	5
115	36	12.70	53.8	3.9	20.60	237.90	12	14.2	2.5

Tabla 5. Resultados de laboratorio 2010.

Pozo	PARÁMETROS (mg/L)								
	Calcio	Magnesio	Sodio	Potasio	Sulfatos	Bicarbonatos	Carbonatos	Cloruros	Nitratos
14	190	102.06	1206.98	8.05	806.90	423.20	17.46	1702.3	118.73
18	36	23.94	186.56	4.93	65.18	281.15	17.46	187.6	7.93
21	77	42.53	353.82	4.11	236.84	319.62	23.28	392.6	37.06
22	150	29.16	167.83	5.55	151.53	171.65	8.73	337.0	43.26
28	99	37.91	260.25	4.61	145.48	183.49	2.91	507.2	6.07
29	138	21.02	152.42	4.14	168.68	248.60	17.46	225.8	17.29
31	81	22.48	89.43	3.71	22.53	248.60	8.73	163.3	36.93
47	108	10.21	103.46	2.93	138.47	162.77	8.73	152.9	31.79
48	163	27.22	169.44	2.27	74.93	189.41	14.55	416.9	9.36
49	418	59.29	382.44	4.89	456.48	219.00	11.64	986.6	81.8
67	133	15.07	86.21	4.77	26.42	210.12	8.73	225.8	26.21
74	254	34.99	248.52	5.67	128.67	216.04	5.82	639.2	63.95
87	177	26.00	119.66	5.12	57.59	82.87	0	444.7	42.26
91	388	49.21	611.53	5.08	166.62	227.88	11.64	1473.0	11.59



Tabla 6. Resultados de laboratorio 2017.

Pozo	PARÁMETROS (mg/L)									
	Calcio	Magnesio	Sodio	Potasio	Sulfatos	Bicarbonatos	Carbonatos	Cloruros	Bromuros	Nitratos
17-08	365.93	143.86	545.4	11.73	645.52	252.01	52.2	1242.1	NE	NE
31-03	257.91	63.91	114.3	5.083	3.36	313.64	52.2	543.9	NE	NE
32-23	142.08	29.04	123.3	5.083	56.20	176.96	32.4	286.1	NE	NE
32-08	72.144	13.97	82.92	4.301	3.36	185.50	26.1	131.4	NE	NE
32-14	91.182	8.14	52.6	3.91	0.00	158.04	26.1	85.6	NE	NE
62-02	120.44	12.15	56.17	2.737	0.00	231.88	12.9	97.6	NE	NE
62-05	210.42	25.03	303.1	4.301	219.02	225.77	26.1	492.4	3.7	1.6
62-08	428.25	51.03	276	8.211	268.49	139.13	19.5	979.1	8.1	8.4
47-03	167.53	17.13	80.47	8.993	42.75	198.93	12.9	251.7	NE	NE
47-06	122.24	17.74	261.5	4.301	235.35	239.20	12.9	331.9	1.8	9.1
47-10	140.28	19.32	71.77	4.301	2.88	237.98	26.1	246.0	NE	NE
47-27	214.43	21.99	86.49	3.128	154.18	152.55	19.5	286.1	NE	NE
47-30	102.6	8.14	39.01	2.346	0.00	212.35	39	91.6	NE	NE
61-07	255.11	52.25	511.8	6.256	0.00	192.21	54	1224.0	5.8	1.6
62-09	99.398	14.94	56.62	2.346	37.46	172.69	8.1	165.8	NE	NE
16-14	192.99	78.98	833.4	10.948	675.30	394.80	0	1152.7	6.8	1.5
47-20	277.95	56.98	717.1	6.256	626.31	241.64	0	1172.2	8.2	9.7
47-23	207.01	32.93	261.7	12.903	229.58	225.77	0	515.5	4	7.8

*NE= No Efectuado

4.1.5 Balance iónico

Cuando una especie iónica se encuentra en concentraciones superiores a 1 mg/L se le denomina especie iónica mayor. En un análisis químico completo debe verificarse que la



suma de miliequivalentes de cationes mayores sea aproximadamente igual a la suma de miliequivalentes de aniones mayores. Esto se debe a que normalmente el agua es eléctricamente neutra a menos que existan ciertos fenómenos que distorsionen esta propiedad.

Para poder utilizar con confianza los resultados, se debe realizar el balance iónico y efectuar por lo menos la obtención de los siguientes parámetros de cationes y aniones (iones mayores) que se muestran en la Tabla 7. Su alta presencia en el agua se debe a una alta movilidad química, es decir, alta solubilidad, alta tendencia a la adsorción, alta capacidad de intercambio y abundancia relativa.

Tabla 7. Tabla de aniones y cationes para la fórmula del balance iónico.

ANIONES	CATIONES
Bicarbonatos (HCO ₃)	Sodio (Na)
Cloruros (Cl)	Calcio (Ca)
Sulfatos (SO ₄)	Magnesio (Mg)
Carbonatos (CO ₃)	Potasio (K)

El porcentaje de balance iónico se define de la siguiente manera:

$$\%Balance\ Iónico = \frac{\sum(Cationes) - \sum(Aniones)}{\sum(Cationes) + \sum(Aniones)} \times 100\%$$

Estos porcentajes de balance iónico no deben exceder de 10%. Se pueden aceptar valores mayores en caso de que exista sospecha de factores que interfieren en la neutralidad eléctrica del agua que está siendo examinada.



En la Tabla 8 se muestran los resultados del balance iónico para las muestras del año 1981 (datos obtenidos del INEGI), en ella se puede apreciar que el total de las muestras se encuentran dentro del porcentaje de error admitido en un rango que va de -2.46% a 2.79% de error.

Tabla 8. Resultados del balance iónico para el año 1981.

Pozo	Balance iónico		
	Suma de aniones	Suma de cationes	Error %
115	5.128615	5.281545	1.469046
5	32.37508	30.98776	-2.18949
9	14.04445	14.85343	2.799444
12	33.31609	34.99168	2.453006
19	11.00523	10.59036	-1.92108
21	8.401117	8.769757	2.146891
27	28.91197	29.68853	1.325168
44	8.192167	8.610034	2.486978
43	17.73804	17.86901	0.36784
41	11.73766	11.9747	0.999639
55	7.141313	7.162149	0.145671
57	7.26194	7.314883	0.3632
76	8.099537	8.104905	0.033127
74	7.622575	7.256346	-2.46139



En la Tabla 9 se muestran los resultados del balance iónico realizado para las muestras del año 2010 (datos obtenidos del INEGI), en ella se puede apreciar que el total de las muestras se encuentran dentro del porcentaje de error admitido en un rango que va de -1.22% a 4.93% de error.

Tabla 9. Resultados del balance iónico para el año 2010.

Pozo	Balance iónico		
	Suma de aniones	Suma de cationes	Error %
14	72.34001	70.58807	-1.22575
18	11.83923	12.03135	0.804803
21	22.0199	22.81594	1.775454
22	15.76566	17.34212	4.761611
28	20.44196	19.48853	-2.38772
31	9.440728	9.85493	2.146606
29	14.5388	15.36608	2.766383
47	10.1539	10.80584	3.110445
49	41.3144	42.4999	1.414434
48	16.90989	17.81881	2.617191
67	10.65528	11.76243	4.93873
74	24.44646	26.49511	4.021569
91	49.14584	50.12074	0.982101
87	15.10169	16.30552	3.833001



En la Tabla 10 se muestran los resultados del balance iónico realizado en el año 2017, donde se puede observar que las muestras 32-14 y 62-02 sobrepasan el límite del 10% de error por 2.89% y 5.40% respectivamente, mientras que las restantes se encuentran dentro del porcentaje de error admitido en un rango que va de -0.16% a 7.26% de error.

Tabla 10. Resultados del balance iónico para el año 2017.

Pozo	Balance iónico		
	Suma de aniones	Suma de cationes	Error %
17-08	54.30166	54.12437	-0.16352
31-03	22.27111	23.23317	2.11421
32-23	13.21057	14.97154	6.248535
32-08	7.680435	8.46677	4.869792
32-14	5.870325	7.608173	12.89348
62-02	6.980527	9.523242	15.40687
62-05	23.0009	25.85638	5.844538
62-08	36.10134	37.78304	2.276123
47-03	11.67064	13.50007	7.268074
47-06	18.60076	19.04332	1.175648
47-10	11.76068	11.82187	0.259477
47-27	14.42054	16.35176	6.275838
47-30	7.360395	7.546698	1.249764
61-07	39.43173	39.45158	0.025168
62-09	8.550502	8.712596	0.93896



4.2 Calidad del agua y características fisicoquímicas

Según Fetter (2001), la calidad del agua es una consecuencia del estado físico y químico del agua, así como de cualquier alteración que pudiera haber ocurrido como consecuencia de la actividad humana. La utilidad del agua para un propósito en particular es determinada por la calidad del agua. Si la actividad humana altera la calidad natural del agua, hasta que ya no es apta para el uso que había sido previamente adecuado, se dice que el agua está contaminada. Cabe mencionar que en muchos lugares la calidad del agua ha sido impactada por la actividad humana, pero el agua aún puede utilizarse.

La calidad del agua en el área del acuífero costero de Caborca fue definida mediante los parámetros fisicoquímicos analizados en función de los límites máximos permisibles (LMP) establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para uso y consumo humano y en función de los valores que indican Custodio y Llamas (1996) como valores típicos de agua dulce y agua de mar.

A continuación, se describen los resultados de las muestras obtenidas de los análisis de laboratorio, así como también de los parámetros de campo.

4.2.1 Calcio

El calcio suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas naturales debido a su amplia difusión en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. En rocas ígneas aparece como constituyente esencial de los silicatos, especialmente en el grupo de las plagioclasas. En rocas sedimentarias aparece fundamentalmente en forma de carbonatos (Porrás Martín, Nieto López-Guerrero, Alvarez-Fernández, Fernández, Gimeno, 1985).

La Norma Oficial Mexicana no establece un límite máximo permisible para el calcio. Pero según Custodio y Llamas (1996), la concentración de calcio en aguas dulces varía entre 10 y 250 mg/l y el agua de mar tiene alrededor de 400 mg/l.



En el año 1981 las concentraciones de calcio en la costa de Caborca se encontraban en un rango que va de 25 a 172 mg/l, siendo el valor máximo el registrado en el aprovechamiento 27 y el mínimo en el aprovechamiento 57 (Figura 37 y 38).

En el año 2010, las concentraciones de calcio oscilaban entre 36 y 418 mg/l, encontrándose el valor mínimo en el pozo 18 y el máximo en el pozo 49 (Figura 39 y 40).

Para el año 2017, los valores de las concentraciones de calcio se encuentran en un rango que va de 72 a 428 mg/l. El valor máximo se encuentra en el pozo 62-08 y el mínimo en el pozo 32-08 (Figura 41 y 42).

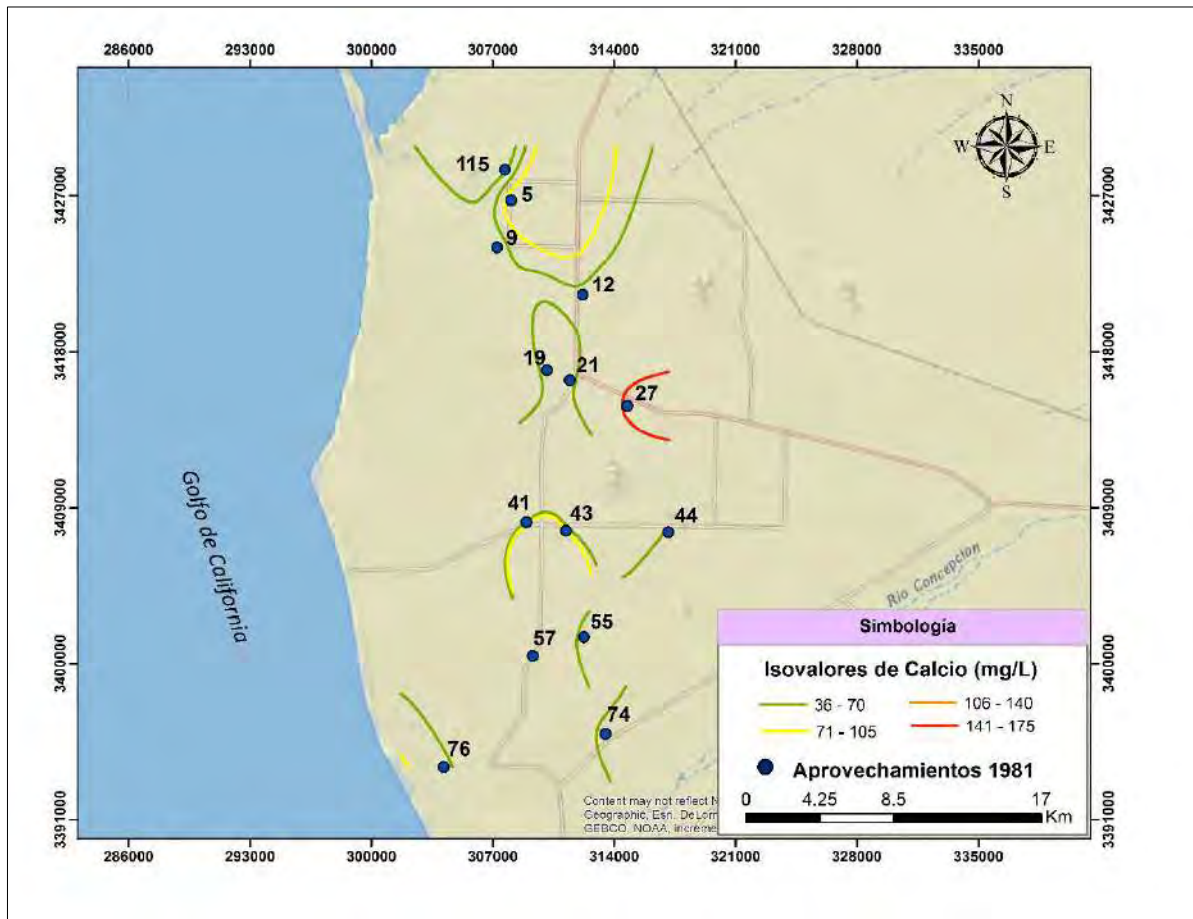


Figura 37. Distribución de isovalores de calcio para el año 1981.

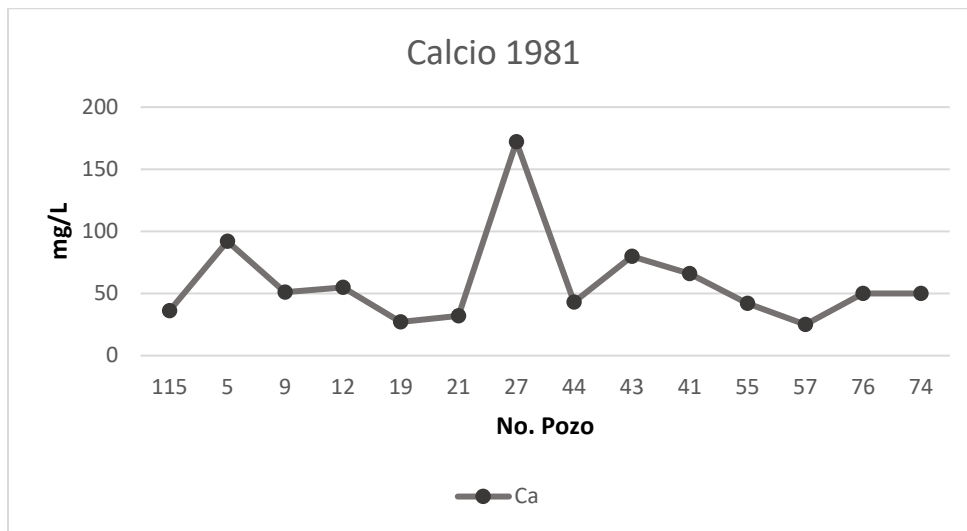


Figura 38. Concentraciones de calcio para el año 1981.

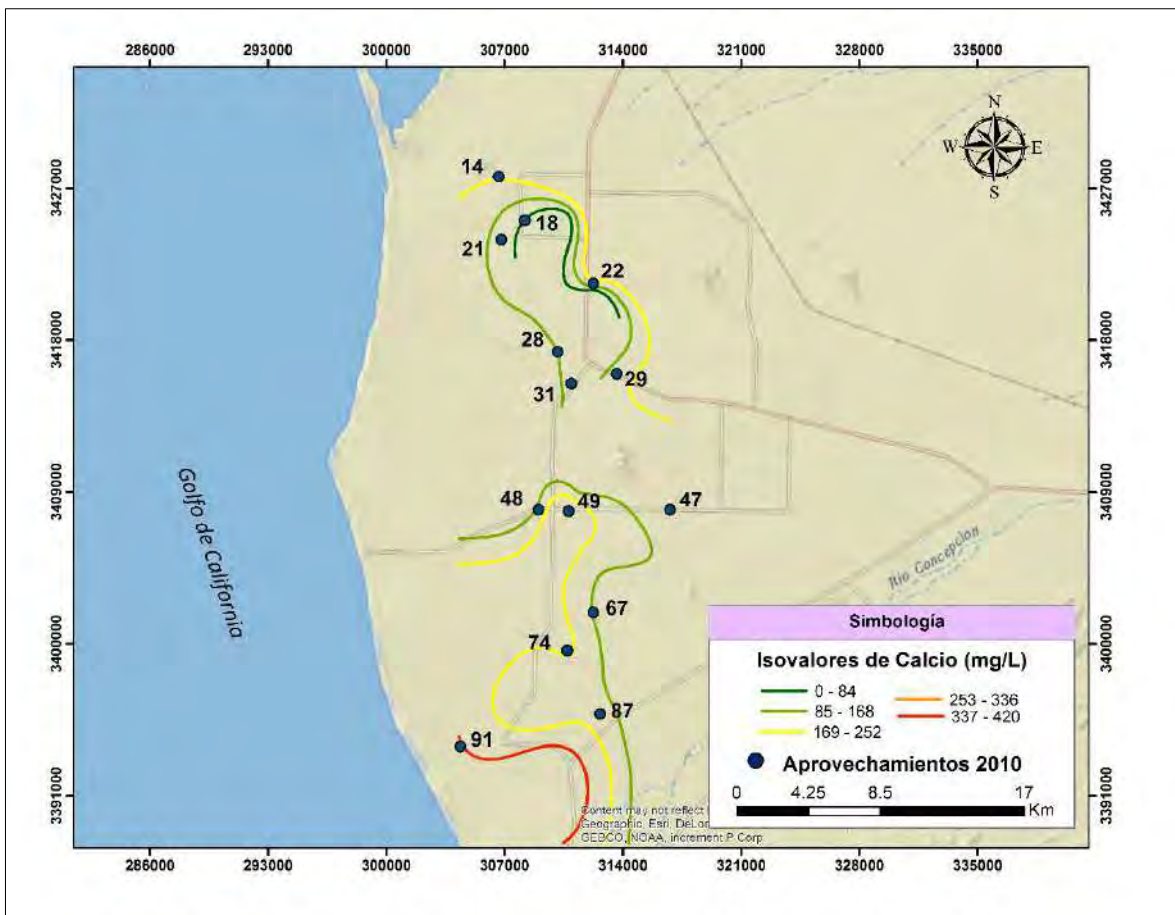


Figura 39. Distribución de isovalores de calcio para el año 2010.

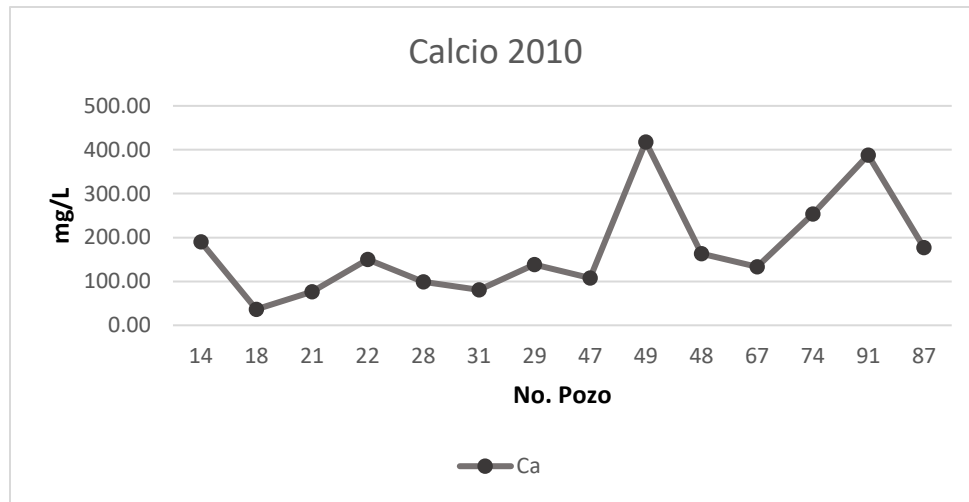


Figura 40. Concentraciones de calcio para el año 2010.

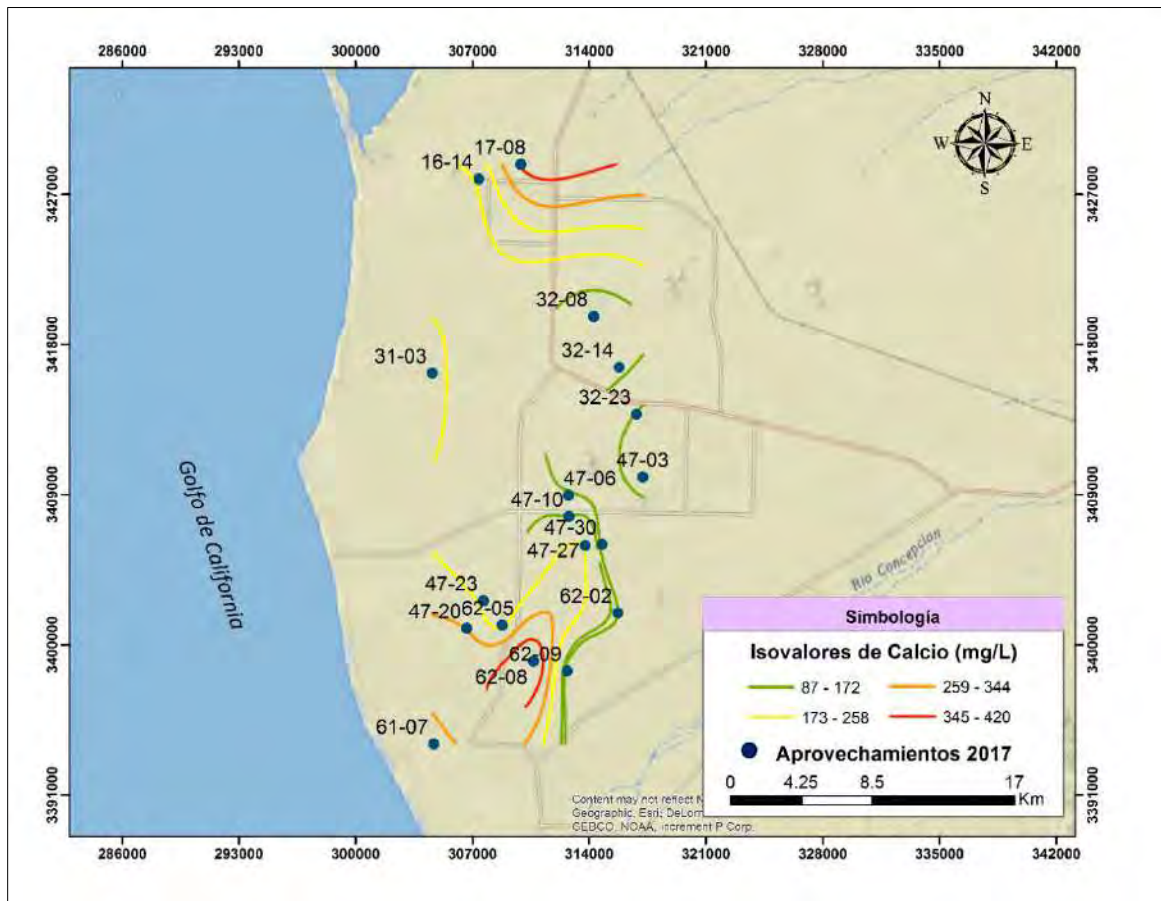


Figura 41. Distribución de isovalores de calcio para el año 2017.

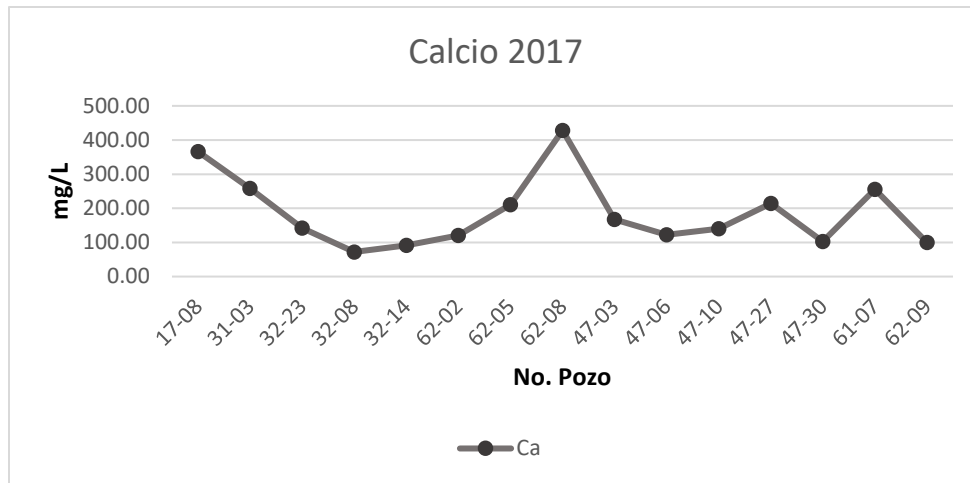


Figura 42. Concentraciones de calcio para el año 2017.

4.2.2 Magnesio

El magnesio, menos abundante que el calcio en aguas naturales, procede de la disolución de rocas carbonatadas (dolomías y calizas magnesianas), evaporitas y de la alteración de silicatos ferromagnesianos, así como de agua marina. Los procesos de intercambio iónico influyen también en las concentraciones de magnesio en aguas subterráneas. En ellas, el magnesio es retenido con preferencia al calcio en suelos y rocas (Porras et al., 1985).

La Norma Oficial Mexicana no establece un límite máximo permisible de magnesio para uso y consumo humano, debido a que no se considera peligroso para la salud humana, pero puede presentar un efecto laxante cuando se encuentra mezclado con sulfatos. Otro inconveniente que presenta este ion es que cuando se encuentra en altas concentraciones forma depósitos en tuberías y calderas. Según Custodio y Llamas (1996), la concentración de magnesio en aguas dulces varía entre 1 y 100 mg/l y el agua de mar tiene alrededor de 1200 mg/l.



En el año 1981 las concentraciones de magnesio en la costa de Caborca variaban de 12 a 132 mg/l, siendo el valor máximo el registrado en el aprovechamiento 27 y el mínimo en el aprovechamiento 115. Como se puede ver en las curvas de isovalores, las mayores concentraciones se encuentran hacia el norte del área de estudio (Figura 43 y 44).

En el año 2010, las concentraciones de magnesio oscilaban entre 10 y 102 mg/l, encontrándose el valor mínimo en el pozo 47 y el máximo en el pozo 14. Las curvas de isovalores muestran que las mayores concentraciones se encuentran en la parte norte y sur del área de estudio (Figura 45 y 46).

Para el año 2017, los valores de las concentraciones de magnesio van de 8 a 143 mg/l. El valor máximo se encuentra en el pozo 17-08 y el mínimo en el pozo 32-14, encontrándose los mayores valores en la parte norte y sur del área principalmente (Figura 47 y 48).

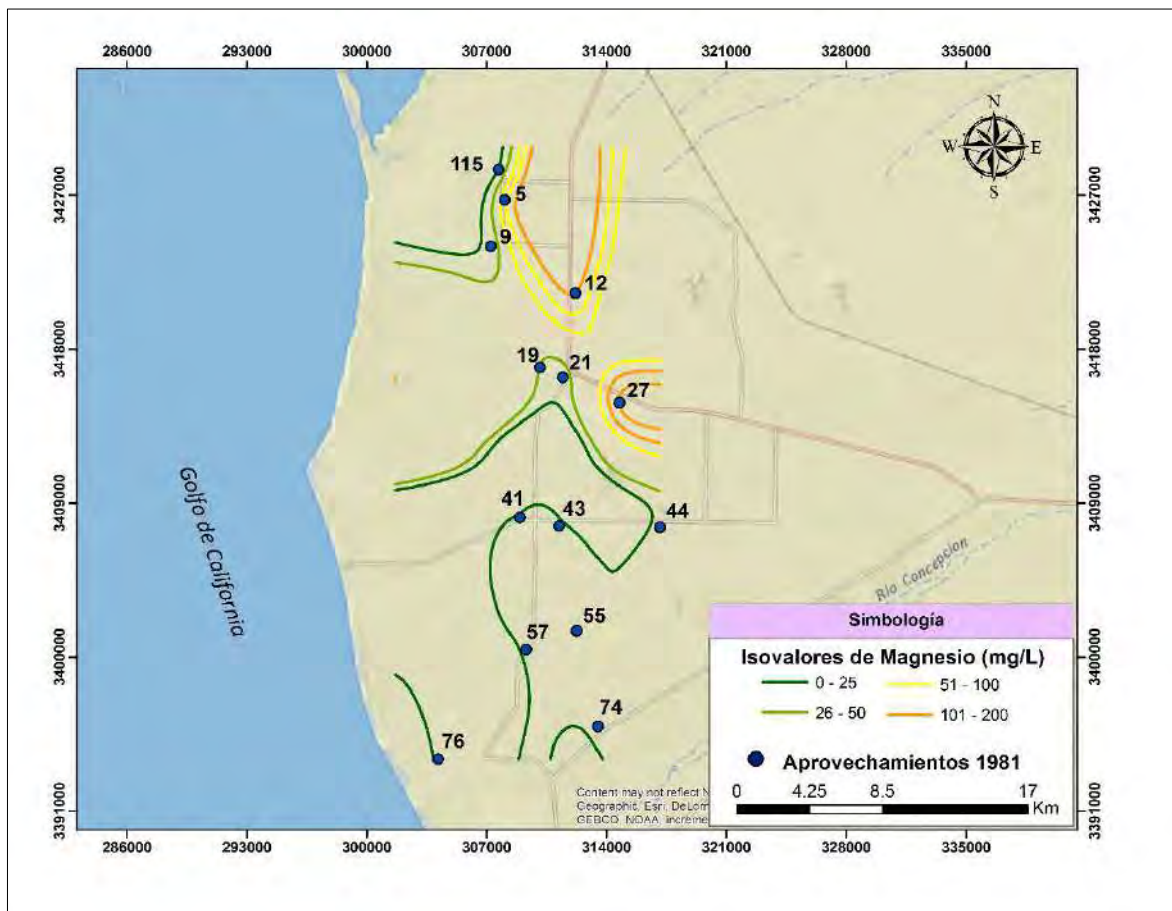


Figura 43. Distribución de isovalores de magnesio para el año 1981.

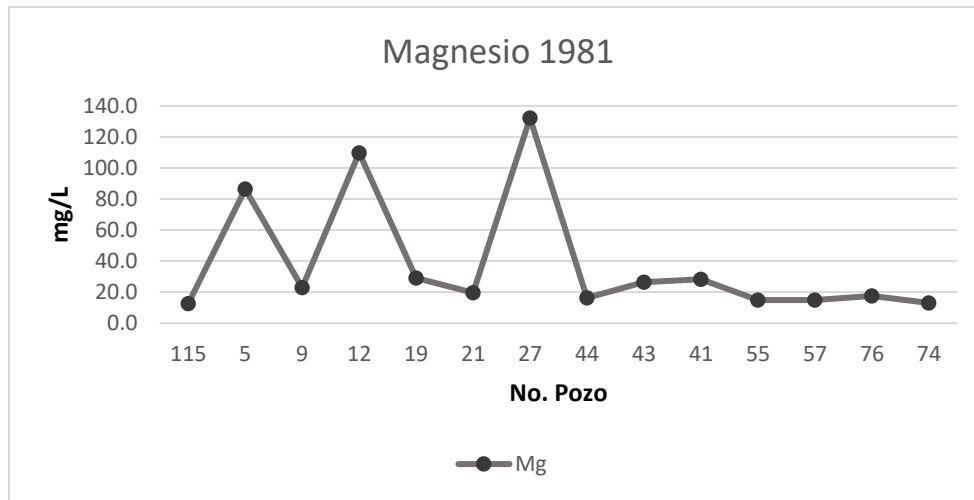


Figura 44. Concentraciones de magnesio para el año 1987.

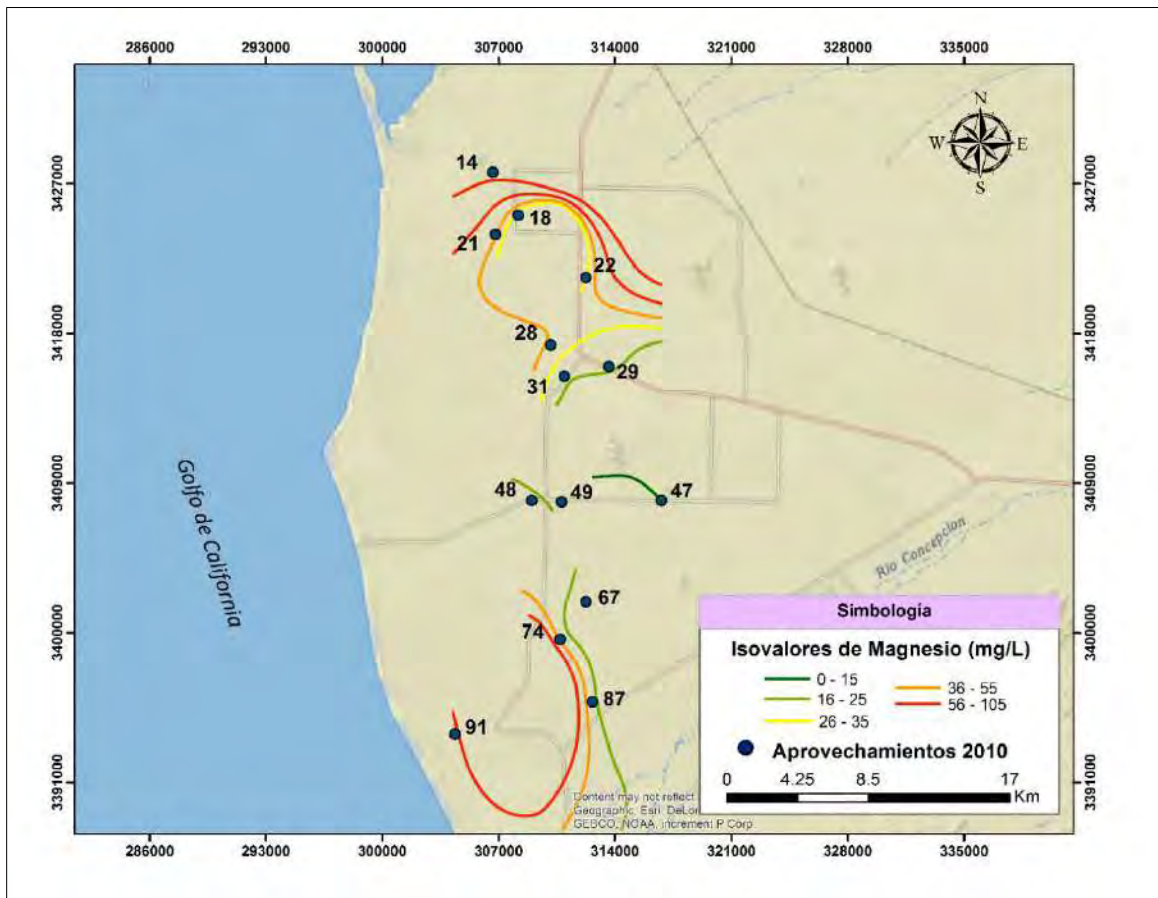


Figura 45. Distribución de isovalores de magnesio para el año 2010.

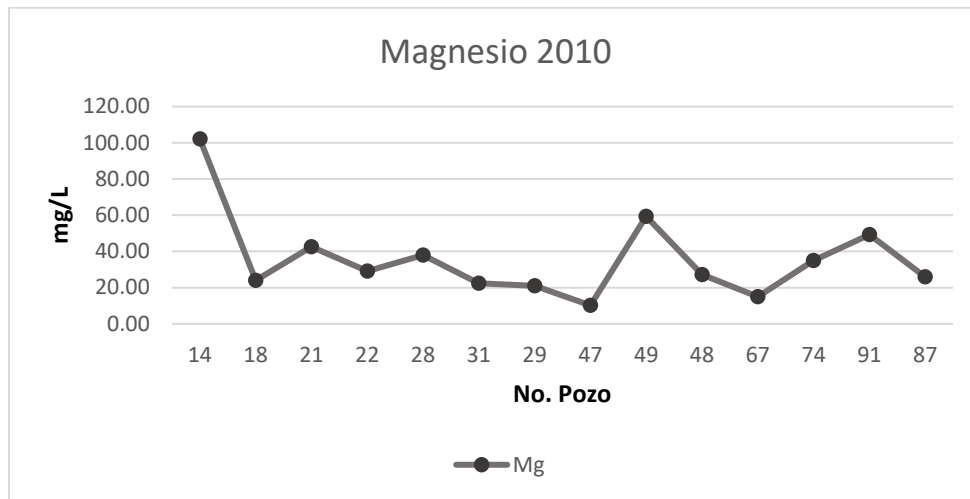


Figura 46. Concentraciones de magnesio para el año 2010.

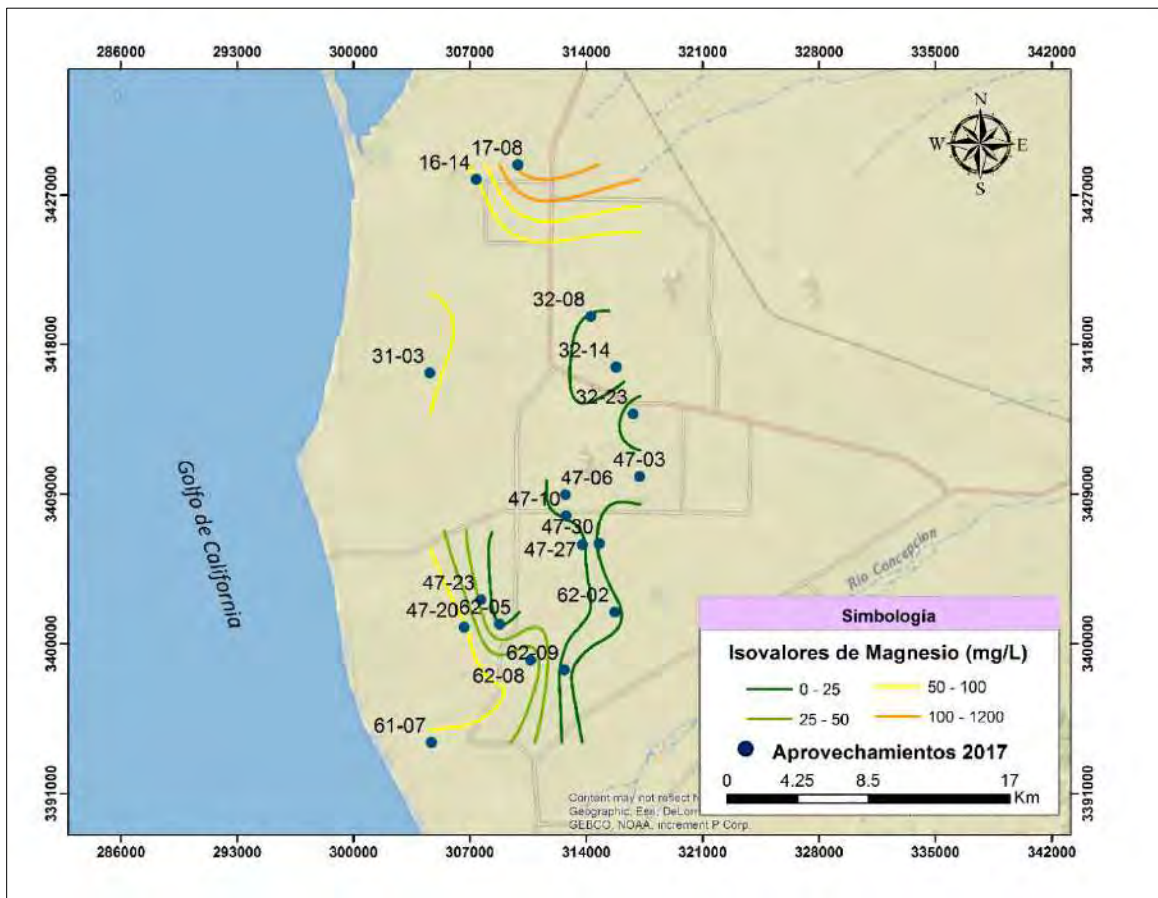


Figura 47. Distribución de isovalores de magnesio para el año 2017.

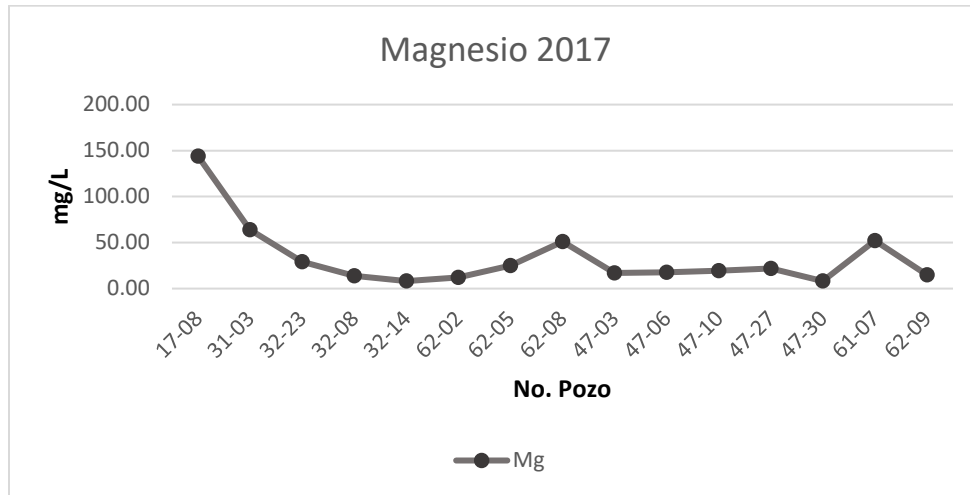


Figura 48. Concentraciones de magnesio para el año 2017.

4.2.3 Sodio

Una fuente importante de sodio la constituyen los aportes de agua marina en regiones costeras, tanto por fenómenos de intrusión en acuíferos costeros como por infiltración del agua a la que se incorpora desde el mar. La presencia de sodio en cantidades elevadas es muy perjudicial para la agricultura ya que tiende a impermeabilizar los suelos, especialmente en zonas de drenaje deficiente; aunque la presencia de calcio y magnesio atenúa este efecto (Porrás et al., 1985).

La NOM-127-SSA1-1994 establece un límite máximo permisible de 200 mg/L de sodio en agua para uso y consumo humano. Según Custodio y Llamas (1996), la concentración de sodio en aguas dulces varía entre 1 y 150 mg/l y el agua de mar tiene alrededor de 10,000 mg/l.

En el año 1981 las concentraciones de sodio en la costa de Caborca variaban de 53 a 528 mg/l, siendo el valor máximo el registrado en el aprovechamiento 12 y el mínimo en el aprovechamiento 115 (Figura 49). De las 14 captaciones muestreadas, los aprovechamientos



5, 9, 12, 27 y 43 se encuentran arriba del límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 y poseen baja calidad de agua para uso y consumo humano (Figura 50).

Para el caso del año 2010, la distribución de las isóneas muestra que las concentraciones de sodio van de 86 a 1206 mg/l, encontrándose el valor mínimo en el pozo 67 y el máximo en el pozo 14 (Figura 51). Seis de los 14 aprovechamientos rebasan el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994, siendo éstos los pozos 14,21,28, 49, 74 y 91 (Figura 52).

En el año 2017, los valores de las concentraciones de sodio van de 39 mg/l a 545 mg/l. El valor máximo se encuentra en el pozo 17-08 y el mínimo en el pozo 47-30 (Figura 53). En este año los aprovechamientos que rebasaron el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 fueron el 17-08, 62-05, 62-08, 47-06 y 61-07 (Figura 54).

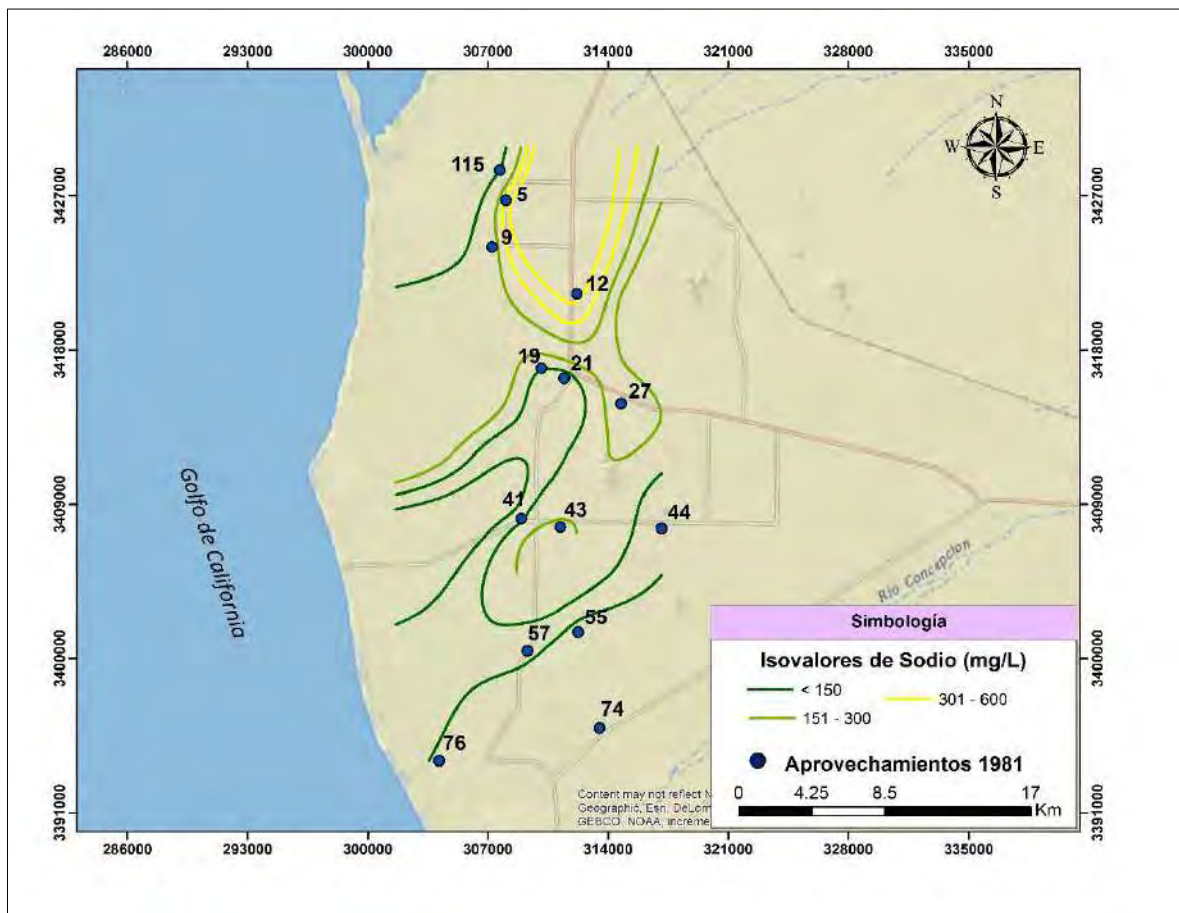


Figura 49. Distribución de isovalores de sodio para el año 1981.

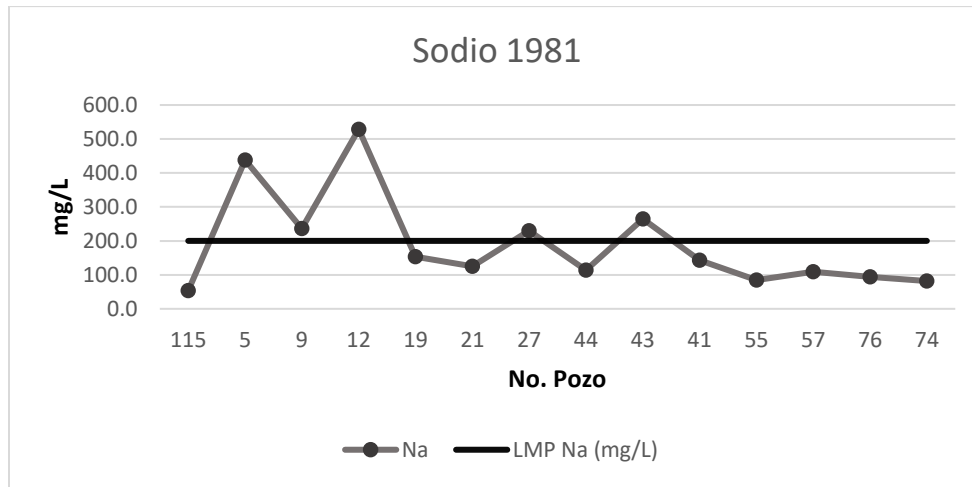


Figura 50. Concentraciones de sodio contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 1981.

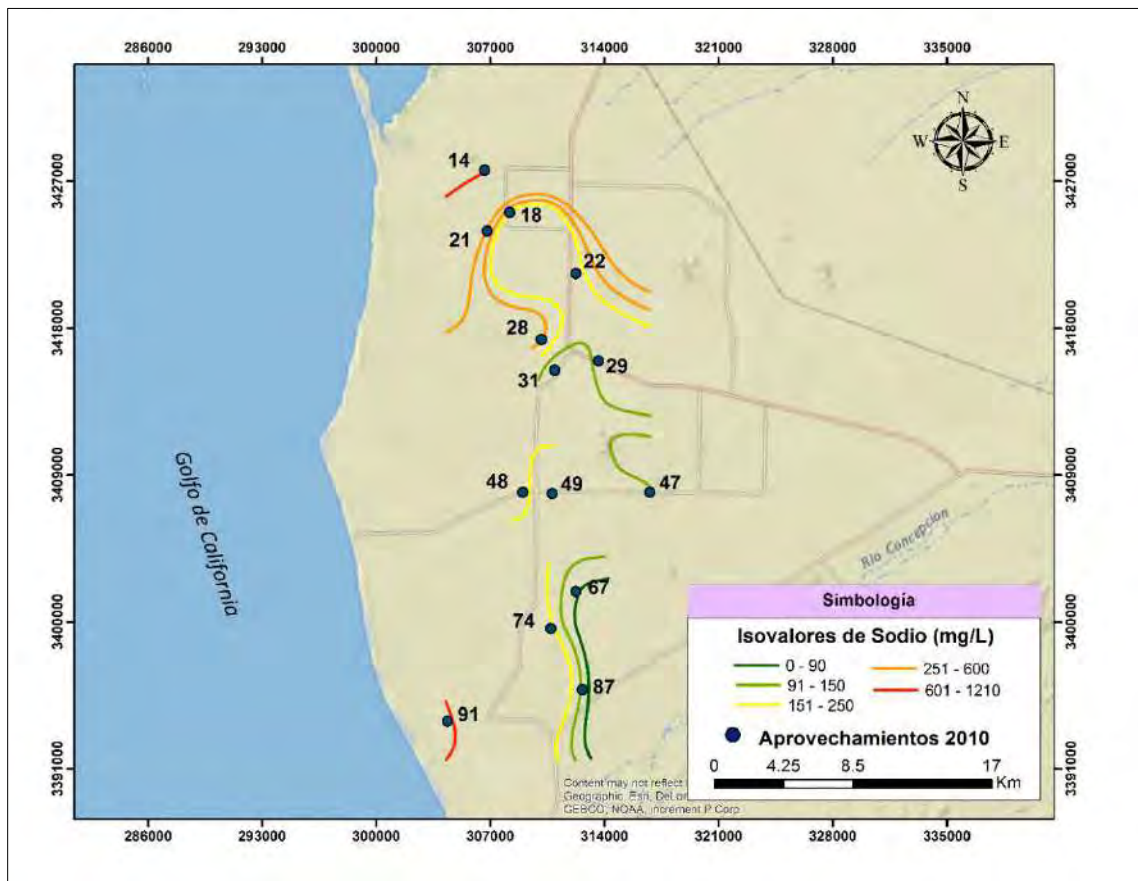


Figura 51. Distribución de isovalores de sodio para el año 2010.

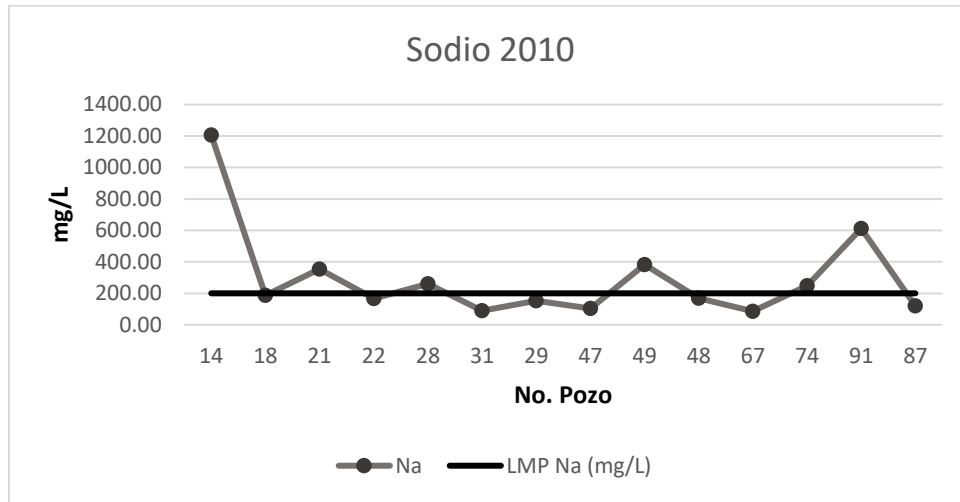


Figura 52. Concentraciones de sodio contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 2010.

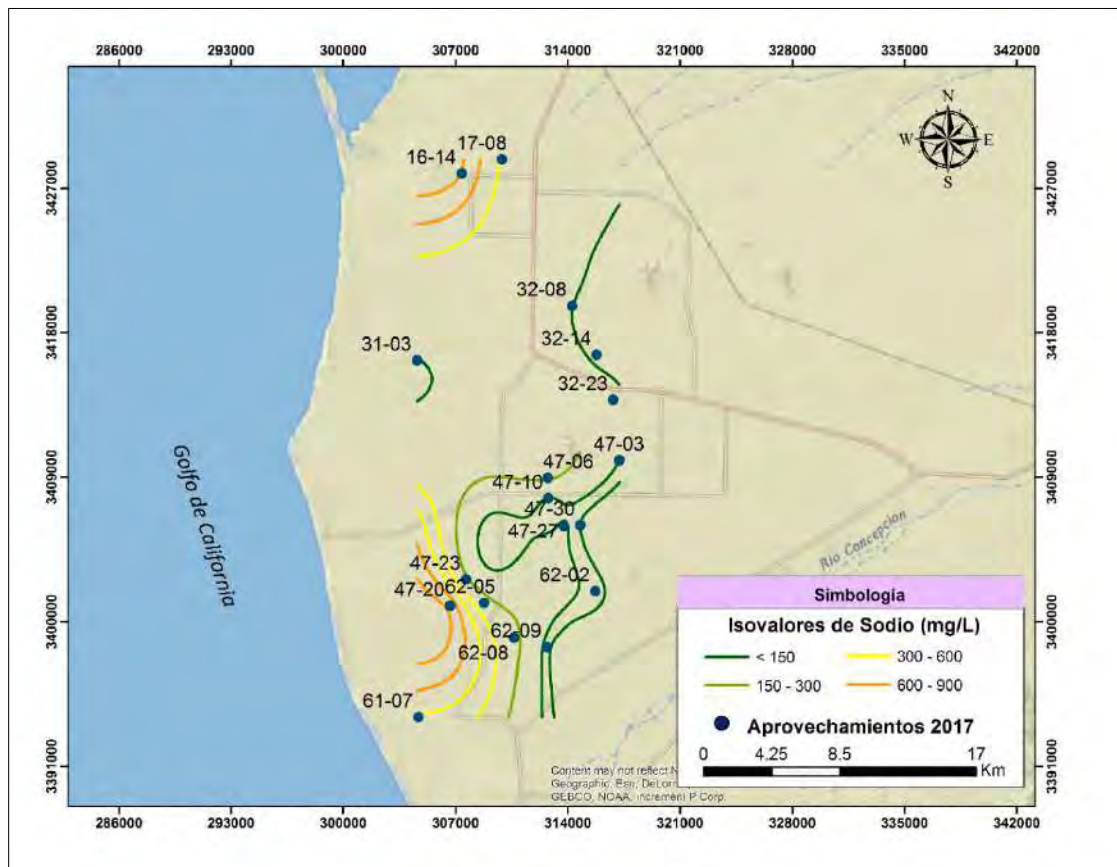


Figura 53. Distribución de isovalores de sodio para el año 2017.

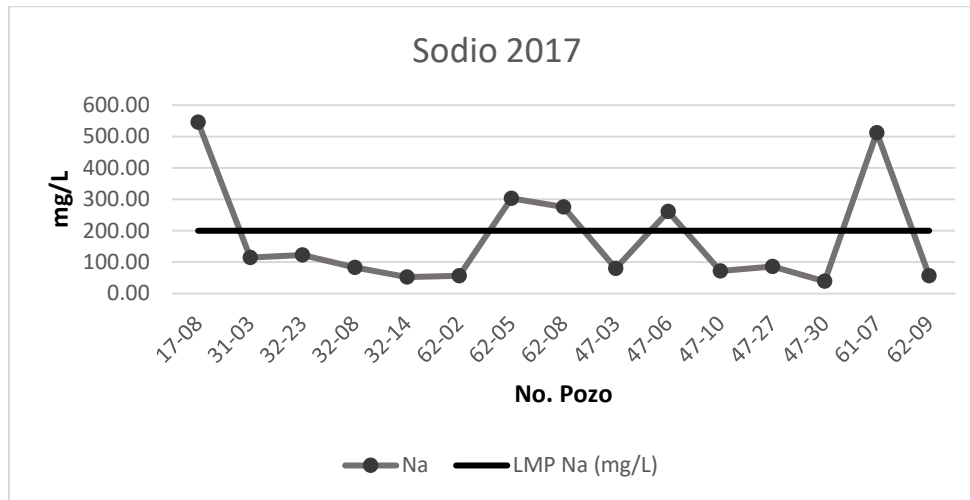


Figura 54. Concentraciones de sodio contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 2017.

4.2.4 Potasio

El potasio procede de la meteorización de feldspatos y ocasionalmente de la solubilización de depósitos de evaporitas, en particular de sales tipo silvina o carnalita. El potasio tiende a ser fijado irreversiblemente en procesos de formación de arcillas y de adsorción en las superficies de minerales con alta capacidad de intercambio iónico; por ello su concentración en aguas subterráneas naturales es de manera general mucho menor que la del sodio a pesar de que su contenido en las rocas es por lo común ligeramente inferior al del sodio (Porrás et al., 1985).

La Norma Oficial Mexicana no establece un límite máximo permisible de potasio en agua para uso y consumo humano. Según Custodio y Llamas (1996), la concentración de potasio en aguas dulces varía entre 0.1 y 10 mg/l y el agua de mar tiene alrededor de 400 mg/l.

En el año 1981 las concentraciones de potasio en la costa de Caborca variaban de 3.5 a 9 mg/l, siendo los valores máximos los registrados en los aprovechamientos 5, 12 y 27 y el mínimo en el aprovechamiento 76 (Figura 55 y 56).



En el año 2010, las concentraciones de potasio oscilaban entre 2 y 8 mg/l, encontrándose el valor mínimo en el pozo 48 y el máximo en el pozo 14 (Figura 57 y 58).

Para el año 2017, las concentraciones de potasio se encuentran en un rango que va de 2 a 11.7 mg/l. El valor máximo se encuentra en el pozo 17-08 y el mínimo en el pozo 47-30 (Figura 59 y 60).

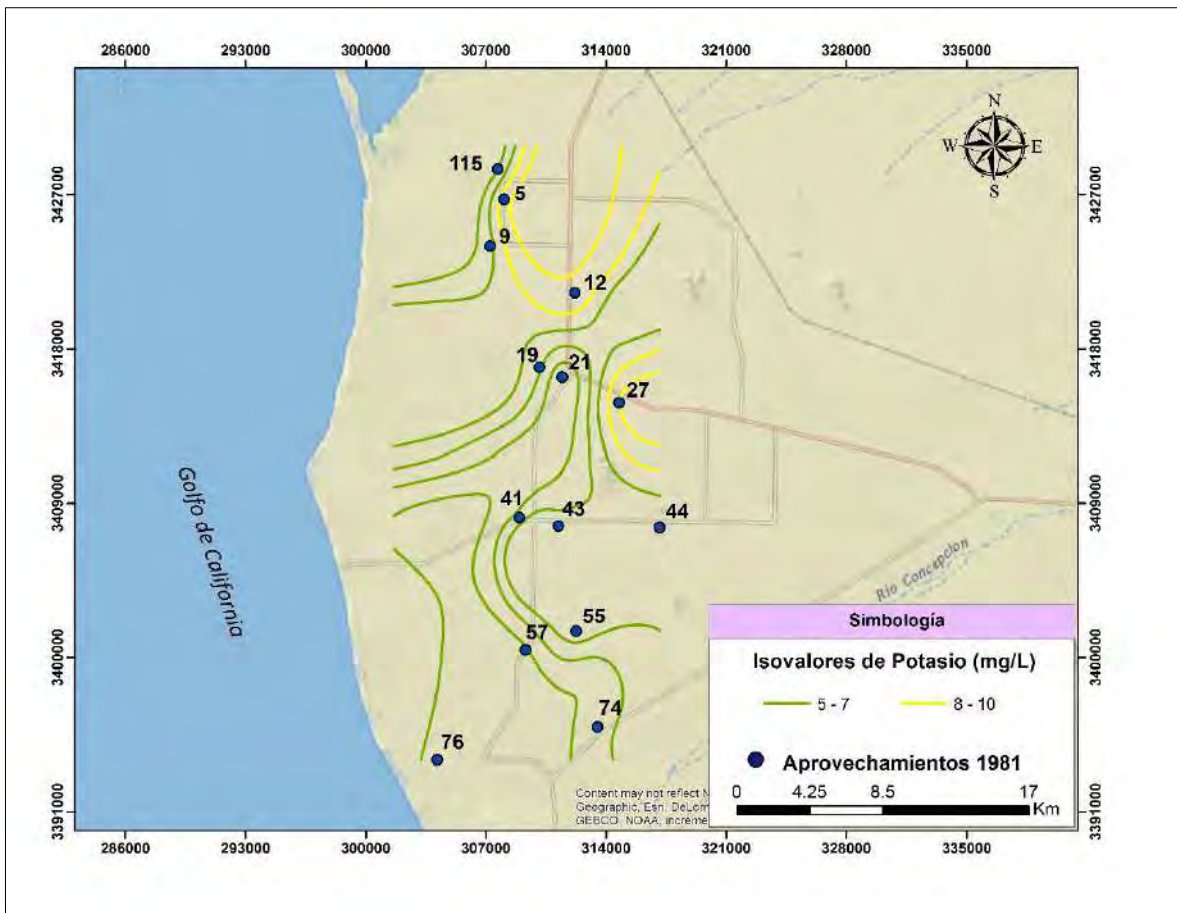


Figura 55. Distribución de isovalores de potasio para el año 1981.

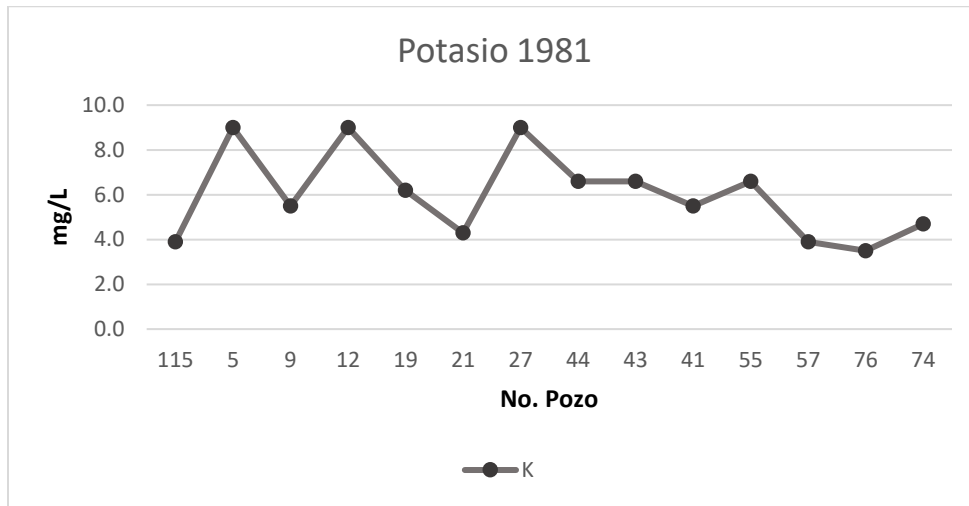


Figura 56. Concentraciones de potasio para el año 1981.

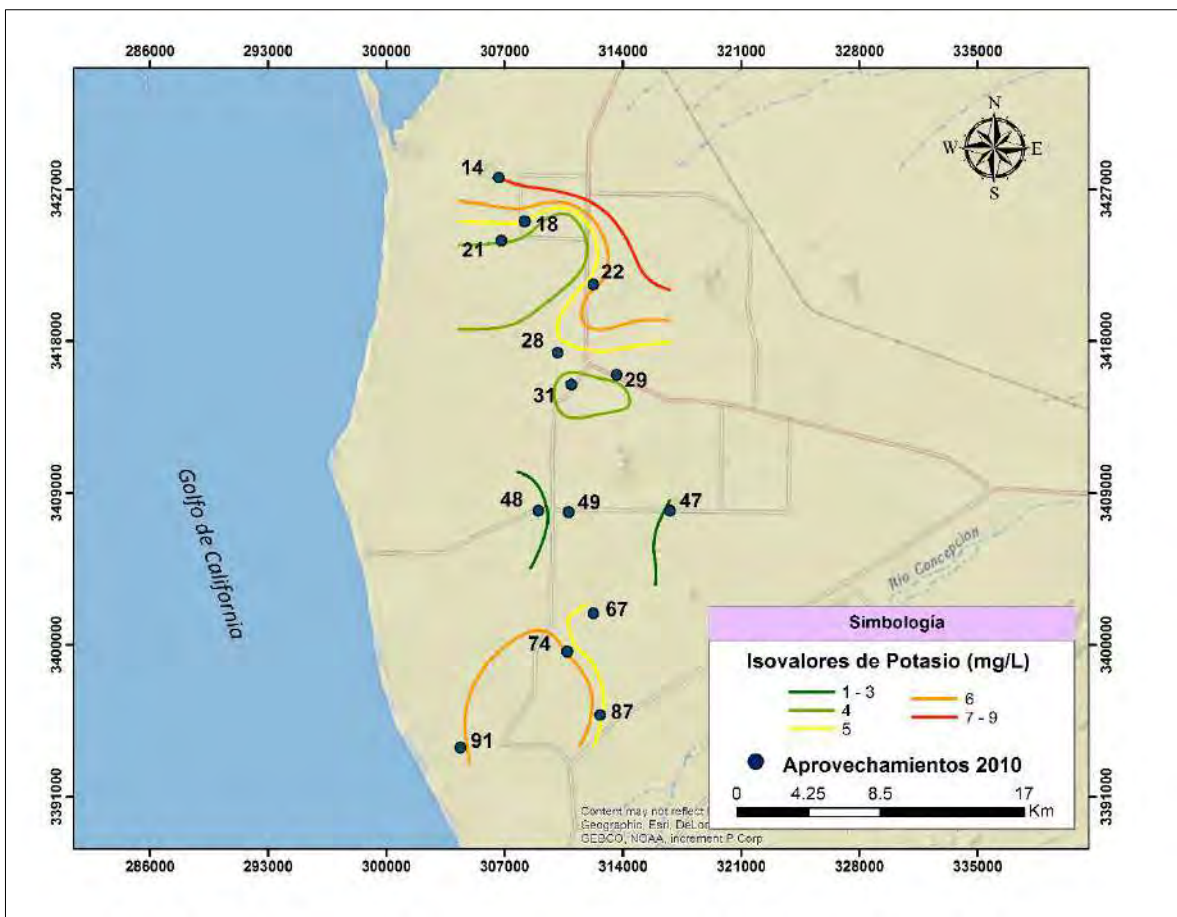


Figura 57. Distribución de isovalores de potasio para el año 2010.

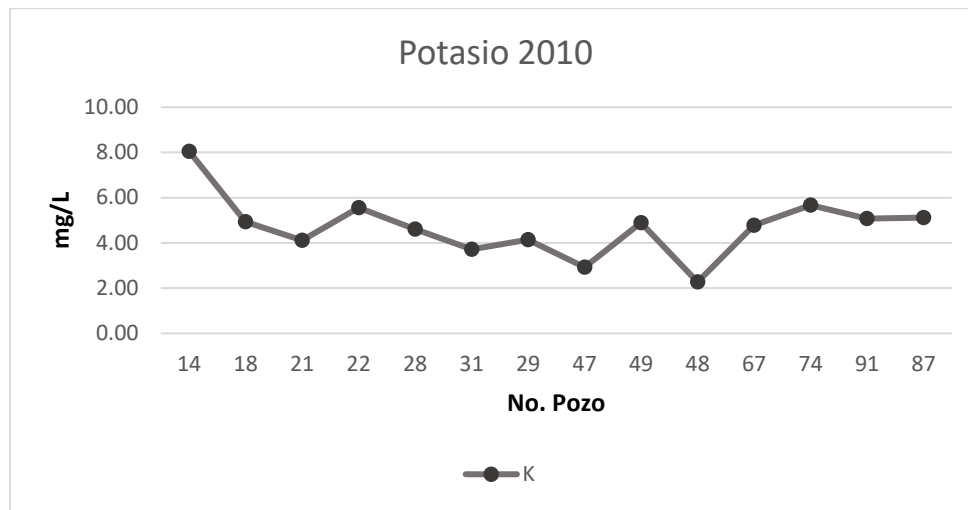


Figura 58. Concentraciones de potasio para el año 2010.

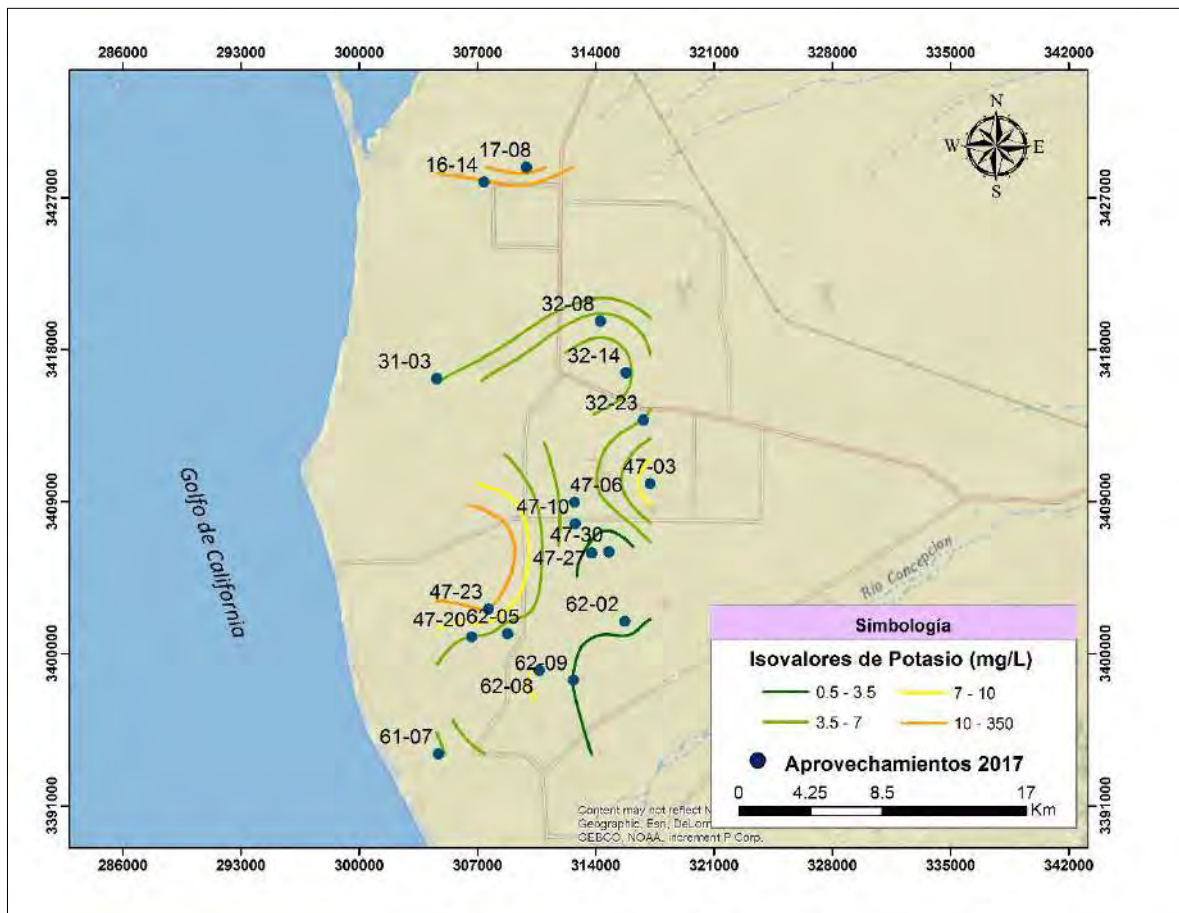


Figura 59. Distribución de isovalores de potasio para el año 2017.

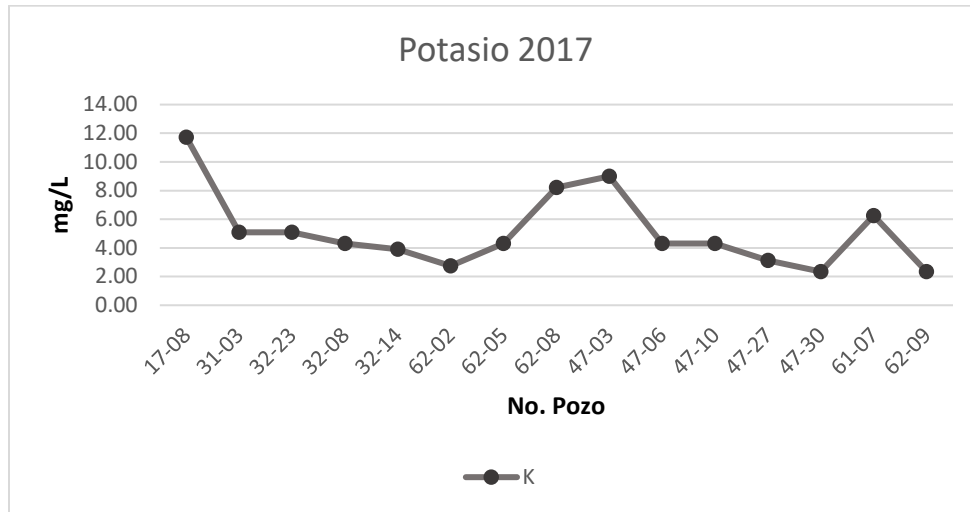


Figura 60. Concentraciones de potasio para el año 2017.

4.2.5 Sulfatos

El ion sulfato procede del lavado de terrenos formados en ambiente marino, de la oxidación de sulfuros que se encuentran ampliamente distribuidos en rocas ígneas y sedimentarias, de la descomposición de sustancias orgánicas, etc. Sin embargo, la disolución de yeso, anhidrita y otros tipos de sulfatos dispersos en el terreno representa frecuentemente el aporte cuantitativamente más significativo de este ion a las aguas subterráneas (Porrás et al., 1985).

El comportamiento del ion sulfato puede desviarse significativamente del teórico predecible con base a los principios de su disolución, por su tendencia a formar iones complejos con Na y Ca y a incorporarse a procesos biológicos (Porrás et al., 1985).

Según Custodio y Llamas (1996), la concentración de sulfatos en aguas dulces varía entre 2 y 150 mg/l y el agua de mar tiene alrededor de 3,000 mg/l. La NOM-127-SSA1-1994 establece un límite máximo permisible de 400 mg/l para uso y consumo humano de sulfatos.

En el año 1981 las distribuciones de las isolíneas en la costa de Caborca iban de 20.6 a 521 mg/l, siendo el valor máximo el registrado en el aprovechamiento 5 y el mínimo en el



115 (Figura 61). De las 14 captaciones muestreadas, sólo el identificado como el número 5 se encuentra arriba del límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 y posee baja calidad de agua para uso y consumo humano (Figura 62).

Para el año 2010, las concentraciones de sulfato van de 22.53 a 806.9 mg/l, encontrándose el valor mínimo en el pozo 31 y el máximo en el pozo 14 (Figura 63). Solo dos de los 14 aprovechamientos rebasan el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994, siendo éstos los pozos 14 y 49 (Figura 64).

En el año 2017, los valores de las concentraciones de sulfato van de 0 a 645.52 mg/l. El valor máximo se encuentra en el pozo 17-08 y el mínimo en los pozos 32-14, 62-02, 47-30 y 61-07 (Figura 65). En este año el único aprovechamiento que rebasó el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 fue el 17-08 (Figura 66).

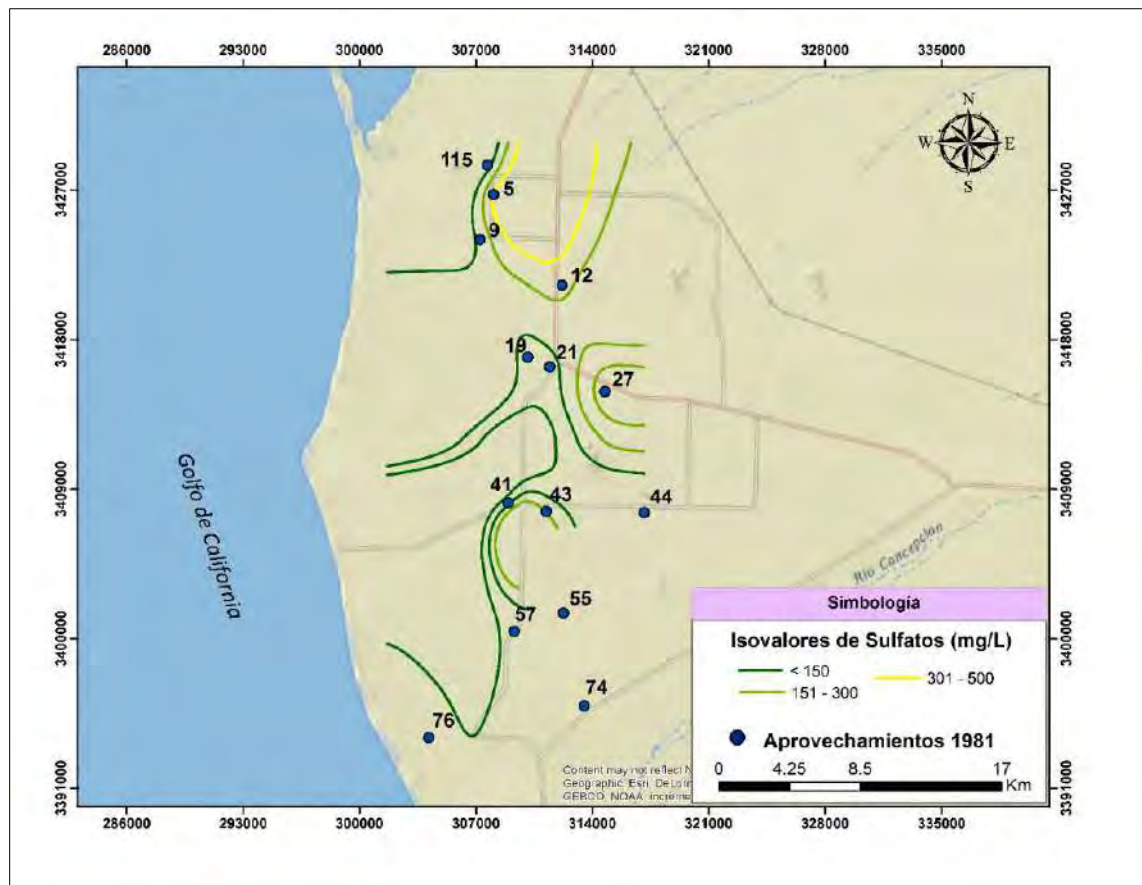


Figura 61. Distribución de isovalores de sulfato para el año 1981.

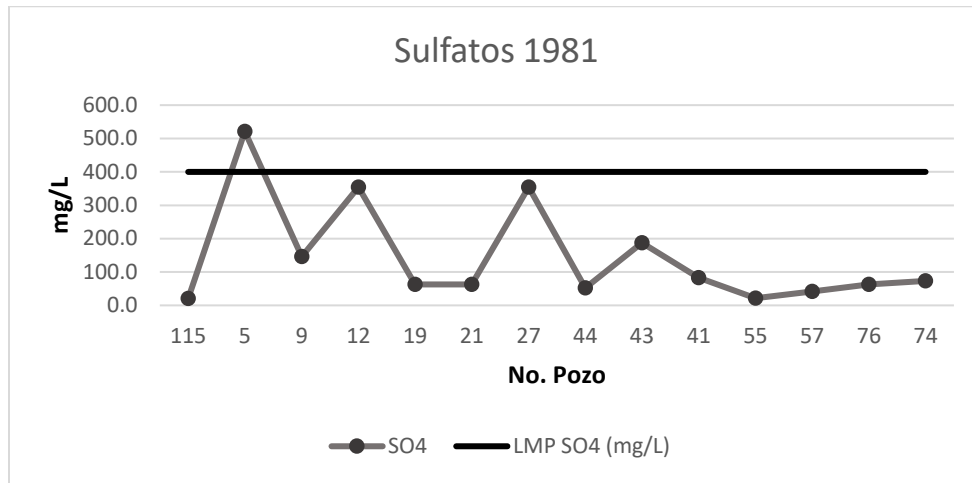


Figura 62. Concentraciones de sulfatos contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 1981.

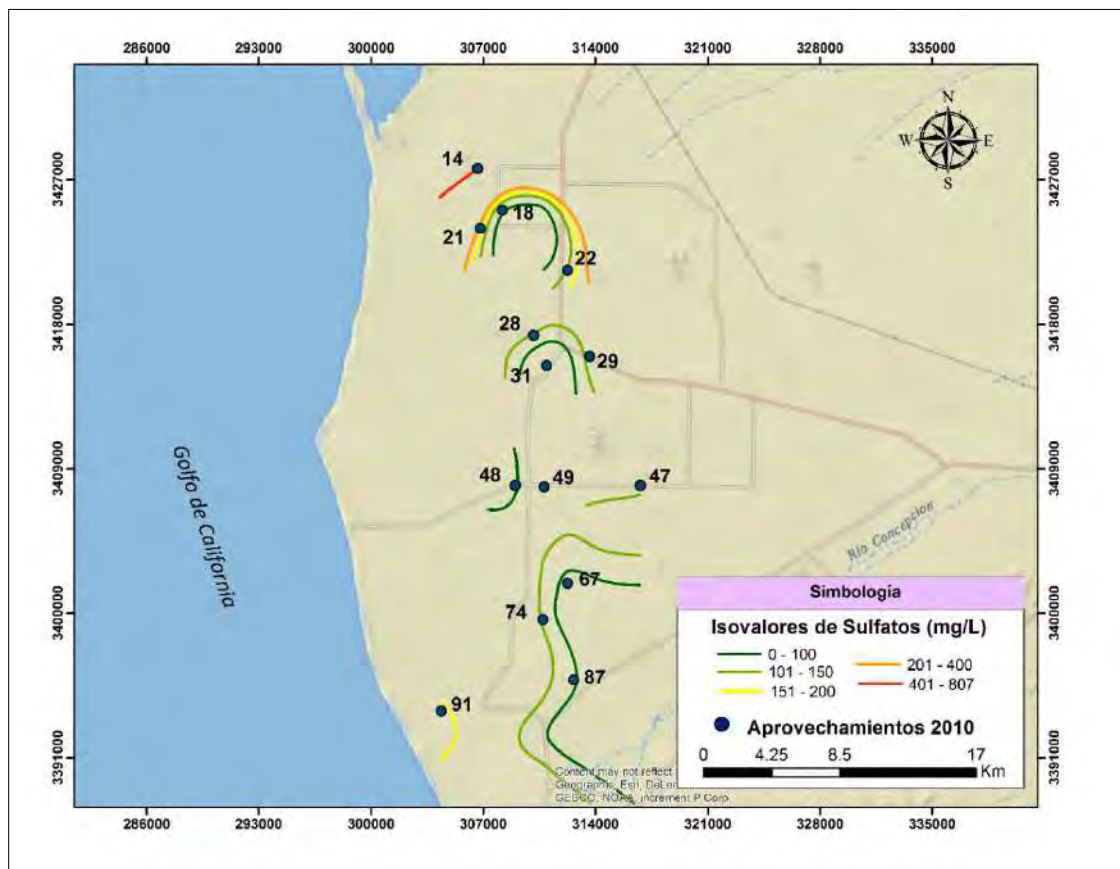


Figura 63. Distribución de isovalores de sulfato para el año 2010.



Caracterización Hidrogeoquímica y Situación Actual de la Intrusión Marina en la Porción Costera del Acuífero Caborca, Sonora, México

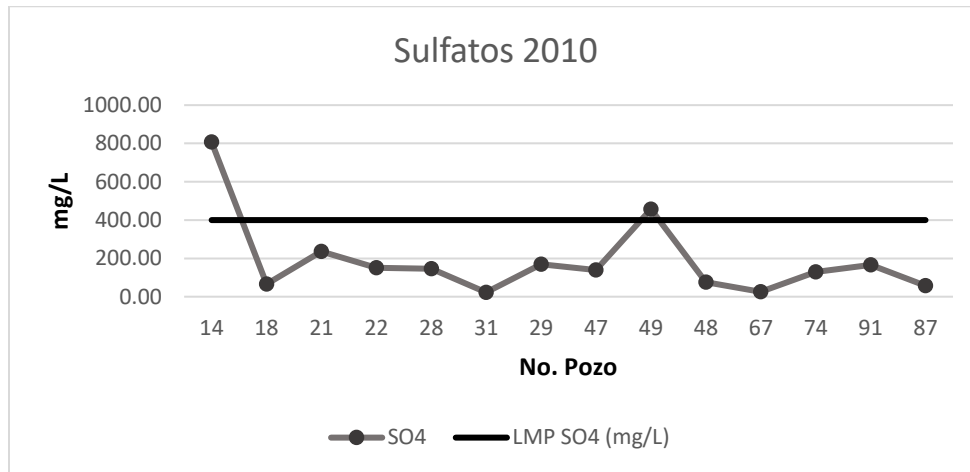


Figura 64. Concentraciones de sulfatos contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 2010.

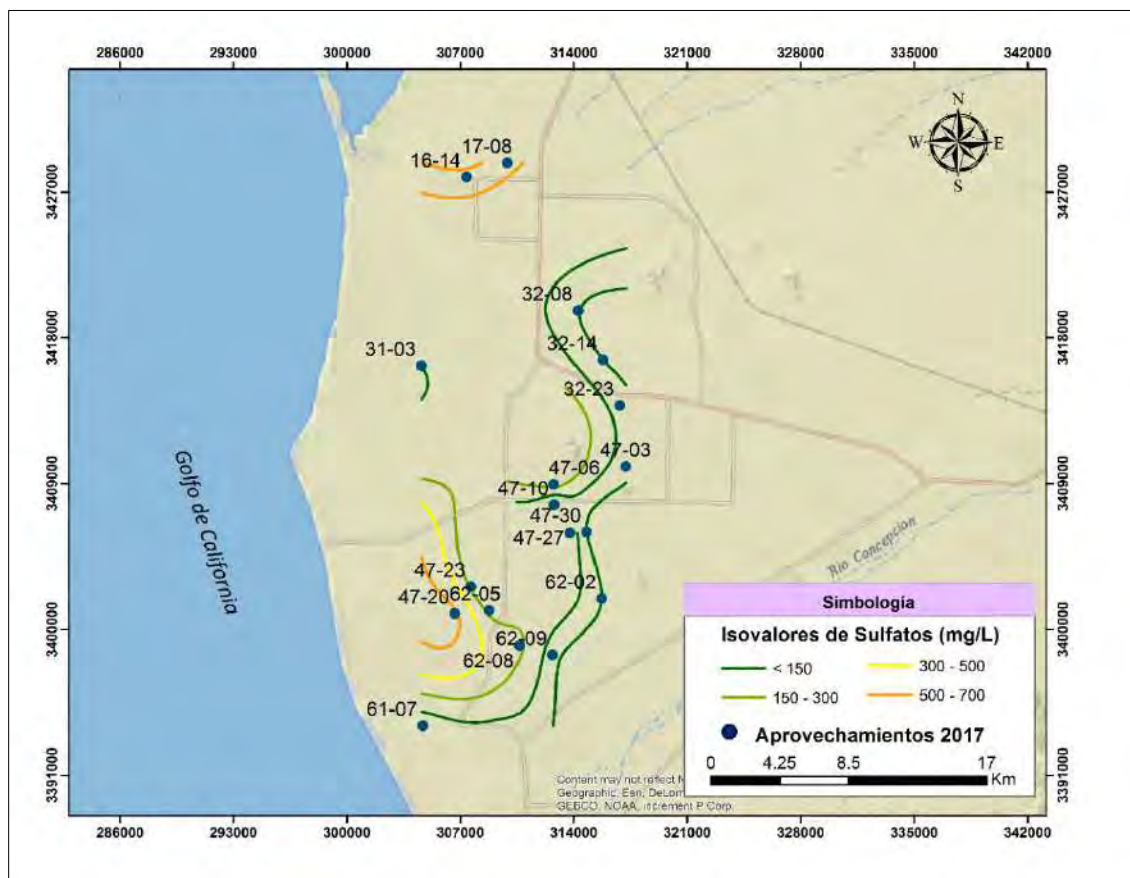


Figura 65. Distribución de isovalores de sulfatos para el año 2017.

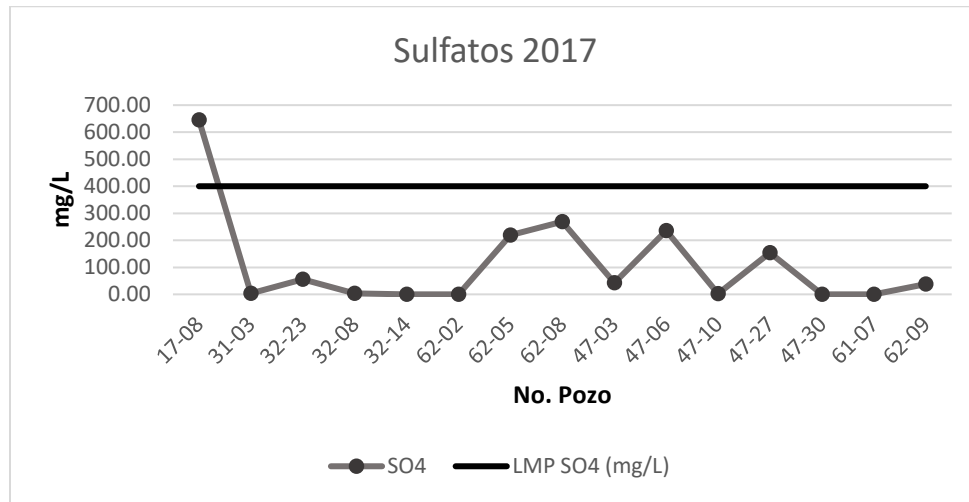


Figura 66. Concentraciones de sulfatos contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 2017.

4.2.6 Bicarbonatos

La disolución de calizas y dolomías es una de las fuentes principales de carbonatos y bicarbonatos. En la mayoría de las aguas subterráneas naturales con un pH inferior a 8.3, la especie carbonatada dominante es el anión bicarbonato.

No se conocen efectos negativos en cuanto al contenido de bicarbonatos en agua para consumo humano, por lo tanto, la Norma Oficial Mexicana no establece un límite máximo permisible en este sentido. El único inconveniente que puede surgir con las altas concentraciones de bicarbonatos es que al combinarse con Ca y Mg definen la dureza del agua, formando incrustaciones en las tuberías.

En el año 1981 las concentraciones de bicarbonato en la costa de Caborca oscilaban entre 152 a 274 mg/l, siendo el valor máximo el registrado en el aprovechamiento 76 y el mínimo en el aprovechamiento 27, localizándose las mayores concentraciones en la parte norte y sur del área (Figura 67 y 68).



Para el año 2010, las concentraciones de bicarbonato se encontraban de 82 a 423 mg/l, encontrándose el valor mínimo en el pozo 87 y el máximo en el pozo 14, localizándose las mayores concentraciones principalmente en la parte norte del área (Figura 69 y 70).

En el año 2017, los valores de las concentraciones de bicarbonato van de 139 a 313 mg/l. El valor máximo se encuentra en el pozo 31-03 y el mínimo en el pozo 62-08, encontrándose los mayores valores del centro hacia el norte del área (Figura 71 y 72).

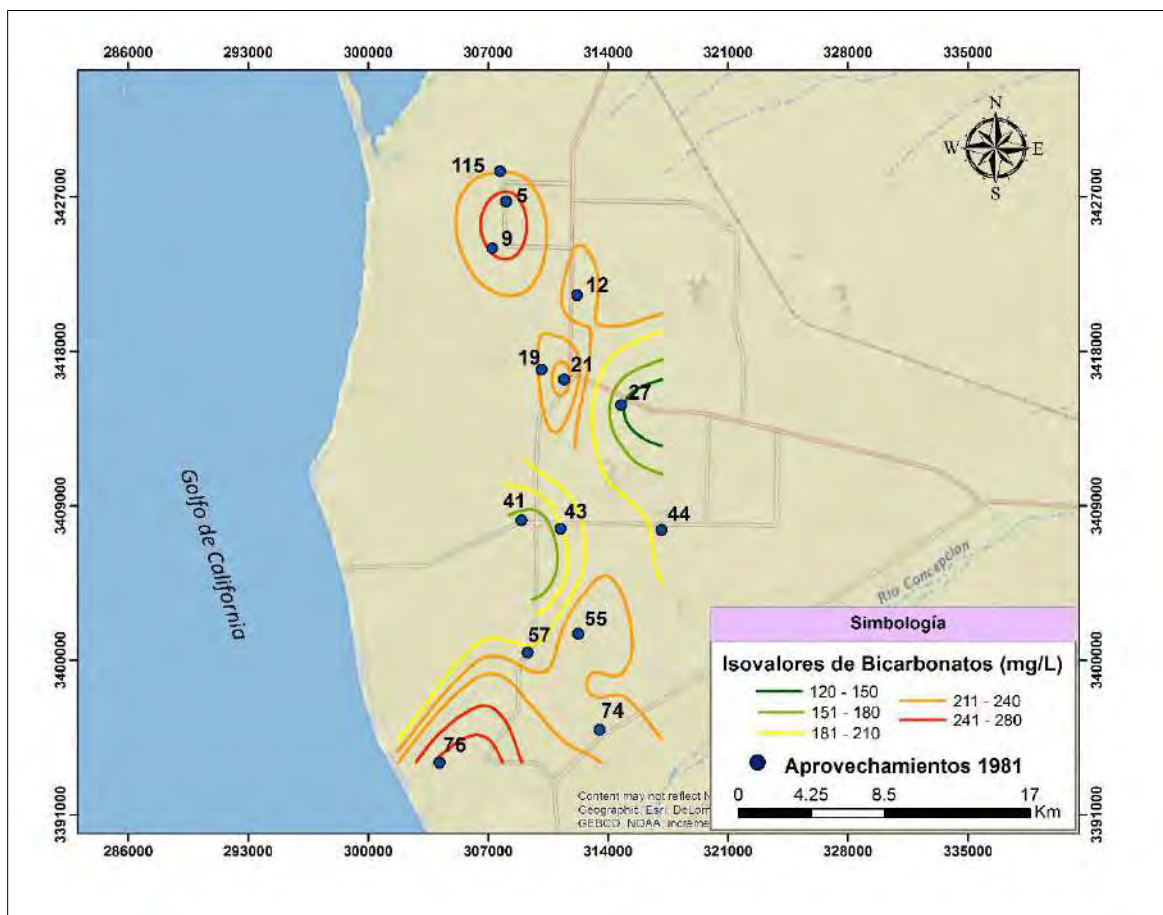


Figura 67. Distribución de isovalores bicarbonatos para el año 1981.



Caracterización Hidrogeoquímica y Situación Actual de la Intrusión Marina en la Porción Costera del Acuífero Caborca, Sonora, México

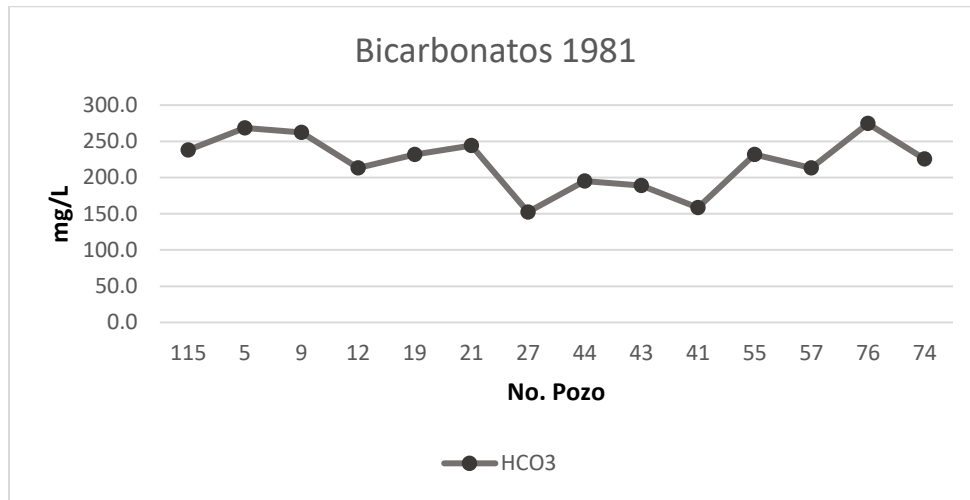


Figura 68. Concentraciones de bicarbonatos para el año 1981.

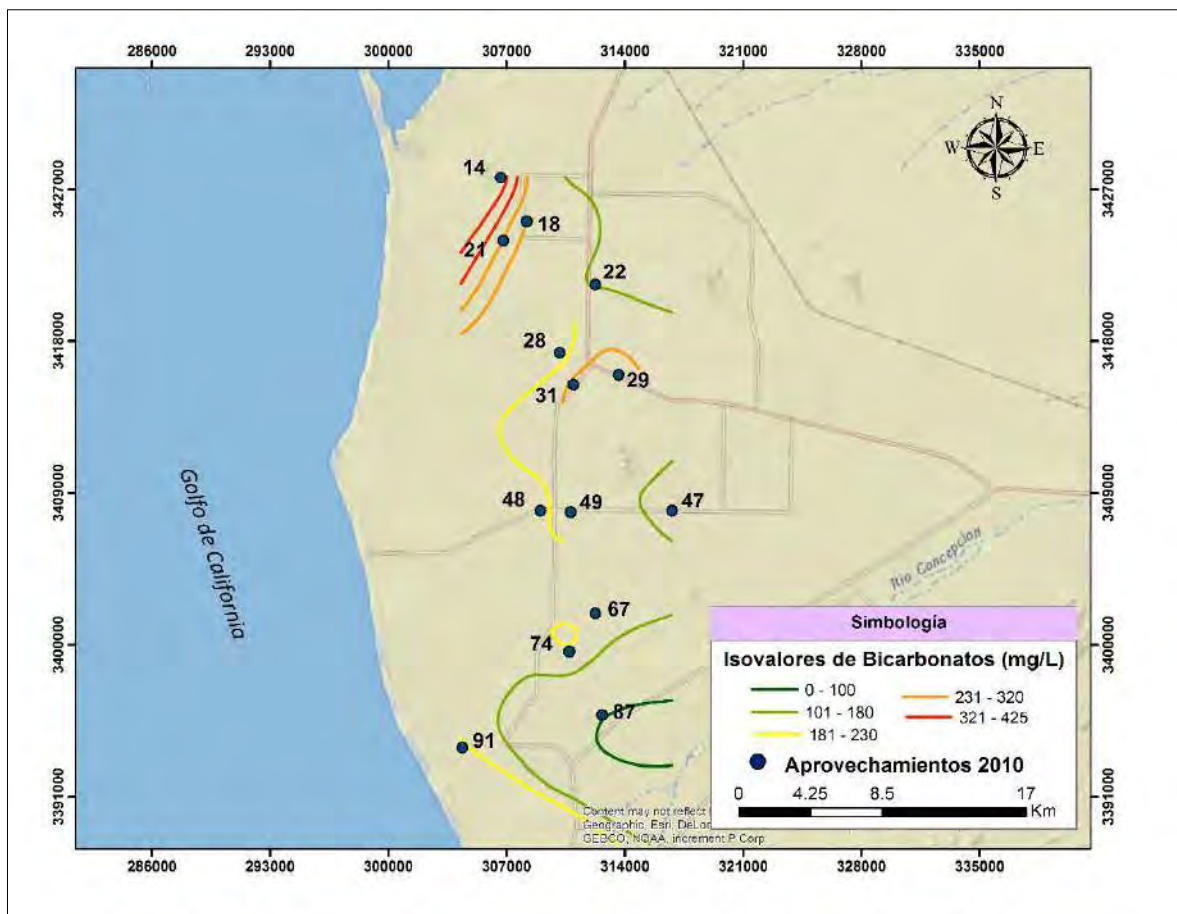


Figura 69. Distribución de isovalores de bicarbonatos para el año 2010.

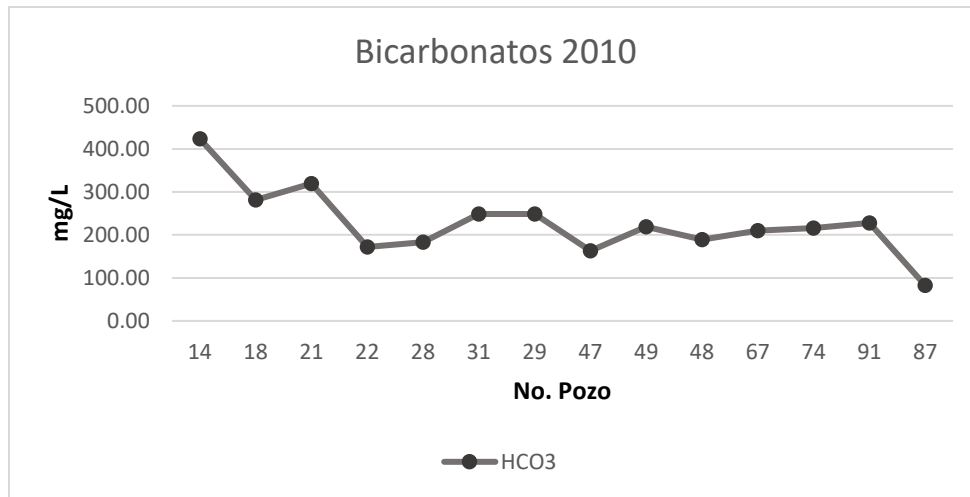


Figura 70. Concentraciones de bicarbonatos para el año 2010.

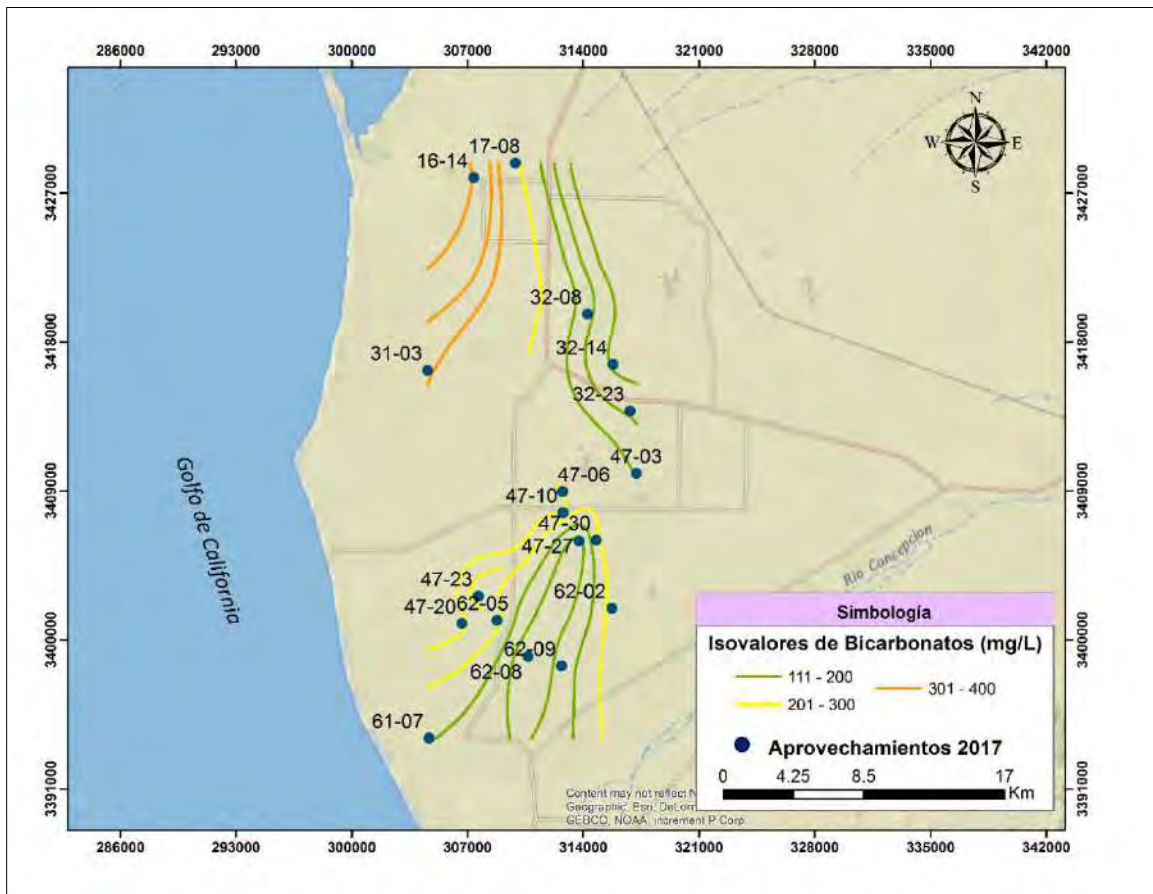


Figura 71. Distribución de isovalores de bicarbonatos para el año 2017.



Figura 72. Concentraciones de bicarbonatos para el año 2017.

4.2.7 Cloruros

El agua de lluvia puede ser una fuente importante del ion cloruro, especialmente en zonas próximas a la costa. La concentración de cloruro en el agua de lluvia disminuye rápidamente tierra adentro. El ion cloruro no forma sales de baja solubilidad, no se oxida ni se reduce en aguas naturales, no es adsorbido significativamente ni entra a formar parte de procesos bioquímicos, lo que le da un carácter de trazador casi ideal. Dada la elevada solubilidad de sus sales, éstos pasan rápidamente a la fase acuosa pudiendo alcanzar concentraciones muy altas (Porras et al., 1985)

La NOM-127-SSA1-1994 establece un límite máximo permisible de 250 mg/l para uso y consumo humano de cloruros. Según Custodio y Llamas (1996), la concentración de cloruro en aguas dulces varía entre 10 y 250 mg/l y el agua de mar tiene entre 18,000 y 21,000 mg/l. Las salmueras naturales pueden llegar a tener 220,000 mg/l.

En el año 1981 las concentraciones de cloruro en la costa de Caborca iban de 14.2 a 781 mg/l, siendo el valor máximo el registrado en el aprovechamiento 12 y el mínimo en el aprovechamiento 115 (Figura 73). De las 14 captaciones muestreadas, los aprovechamientos 5, 12, 27 y 43 se encuentran arriba del límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 y poseen baja calidad de agua para uso y consumo humano (Figura 74).



Para el caso del año 2010, la distribución de las isóneas muestra que las concentraciones de cloruro van de 152.8 a 1702.3 mg/l, encontrándose el valor mínimo en el pozo 47 y el máximo en el pozo 14 (Figura 75). Nueve de los 14 aprovechamientos rebasan el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994, siendo éstos los pozos 14,21,22,28,49,48,74,91 y 87 (Figura 76).

En el año 2017, los valores de las concentraciones de cloruro van de 85.56 mg/l a 1242.15 mg/l. El valor máximo se encuentra en el pozo 17-08 y el mínimo en el pozo 32-14 (Figura 77). En este año los aprovechamientos que rebasaron el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 fueron el 17-08, 31-03, 32-23, 62-05, 62-08, 47-06, 47-27 y 61-07 (Figura 78).

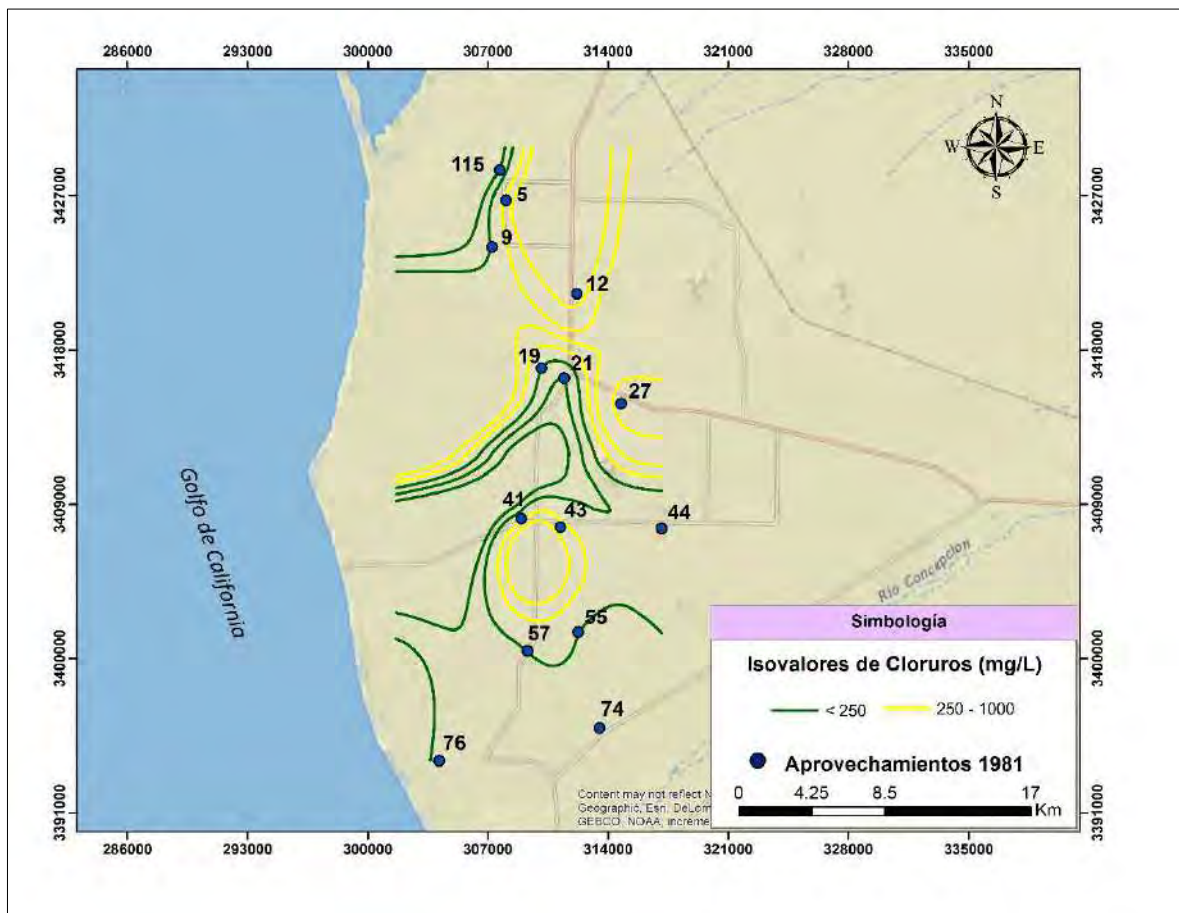


Figura 73. Distribución de isovalores de cloruros para el año 1981.

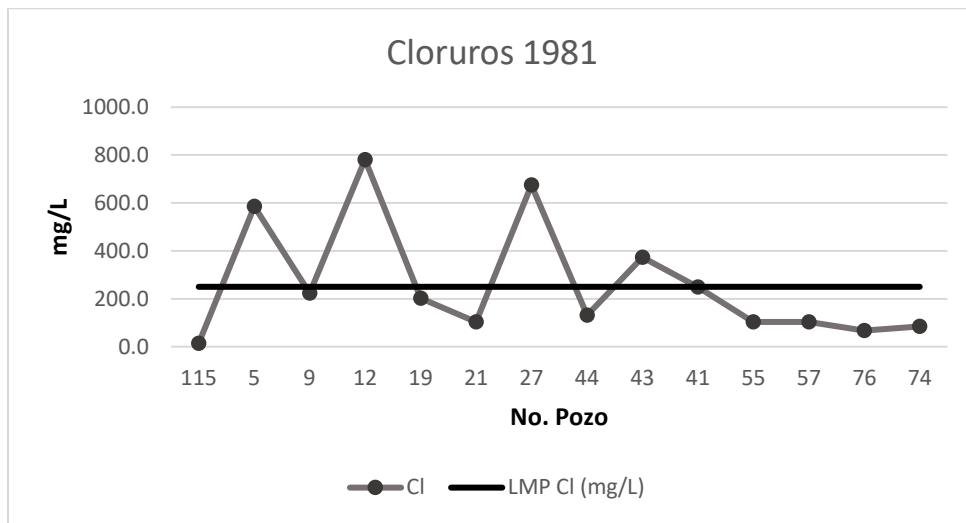


Figura 74. Concentraciones de cloruros contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 1981.

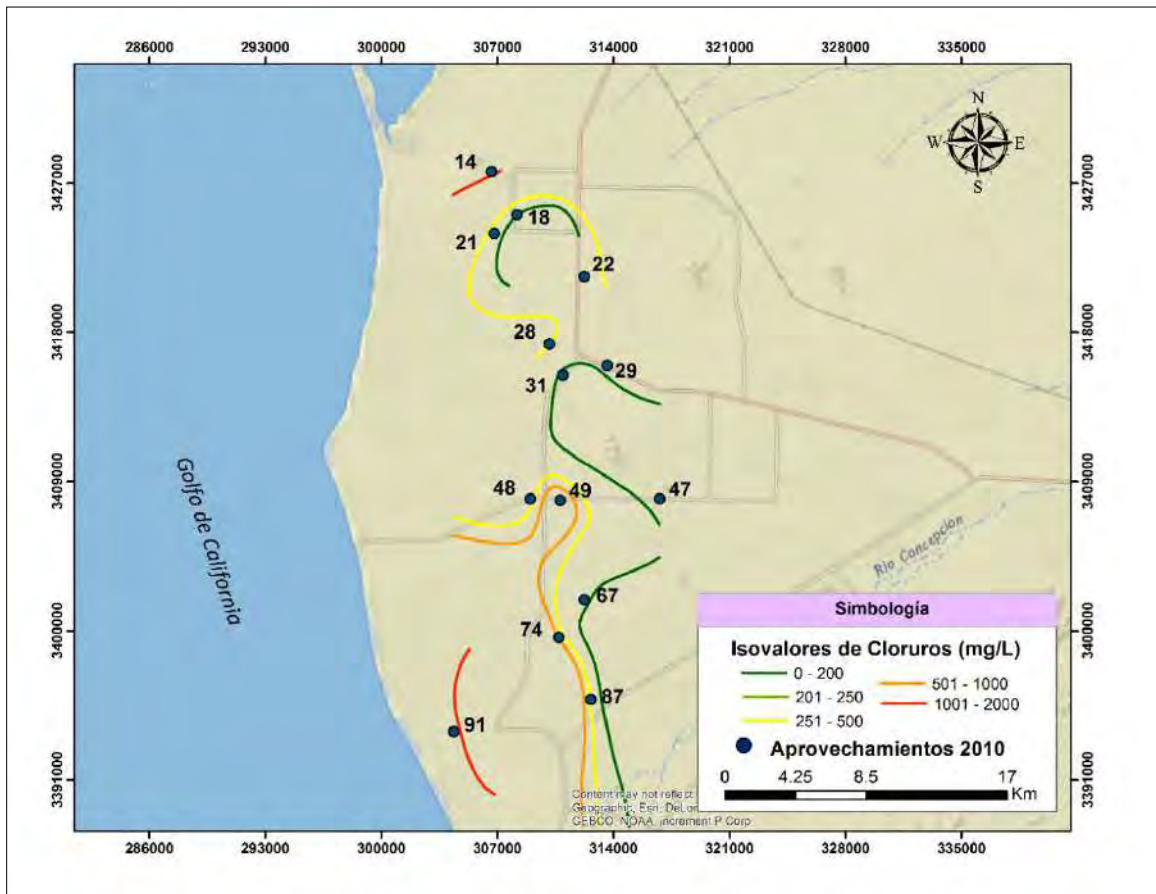


Figura 75. Distribución de isovalores de cloruro para el año 2010.

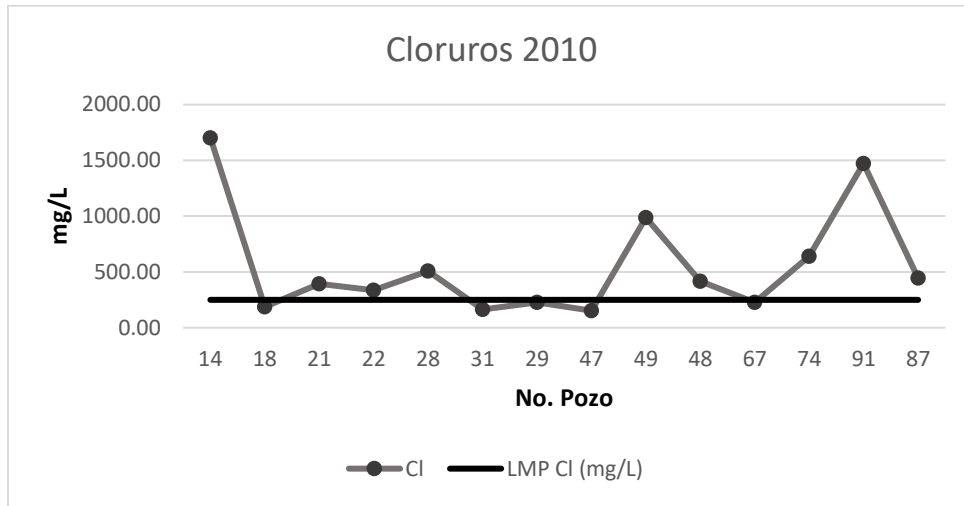


Figura 76. Concentraciones de cloruros contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 2010.

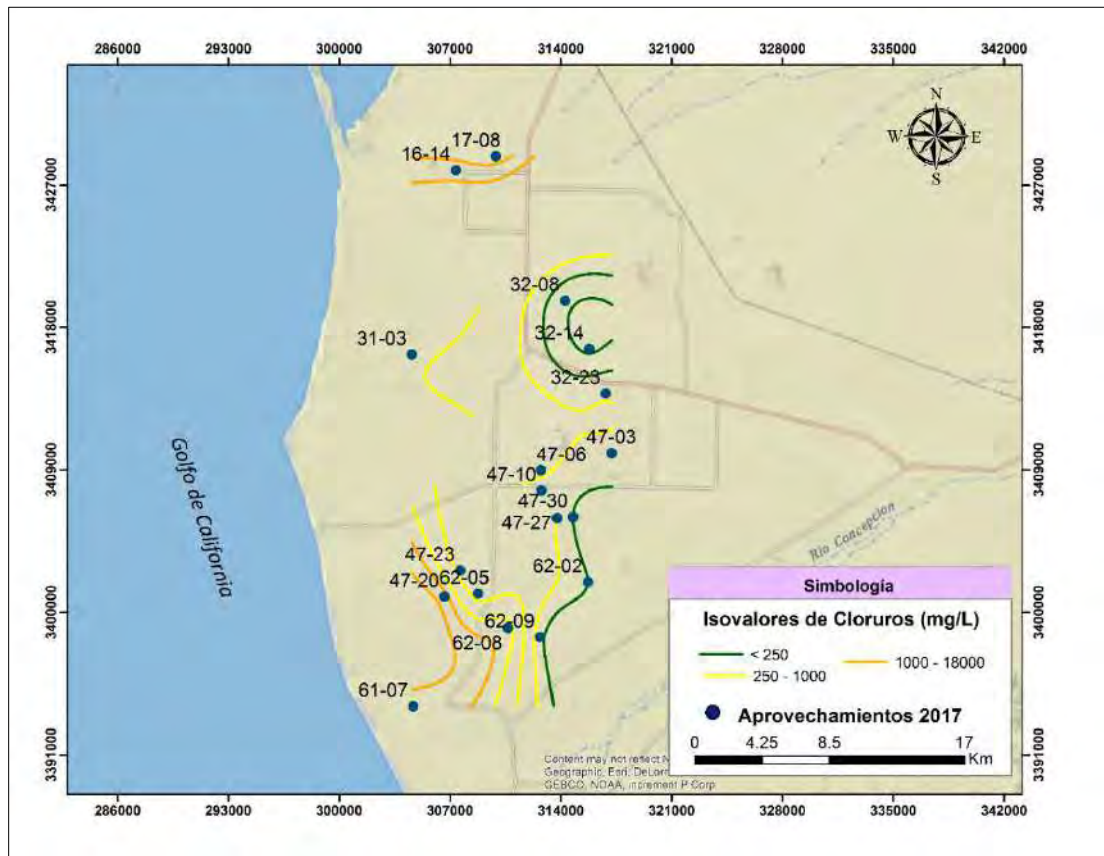


Figura 77. Distribución de isovalores de cloruro para el año 2017.

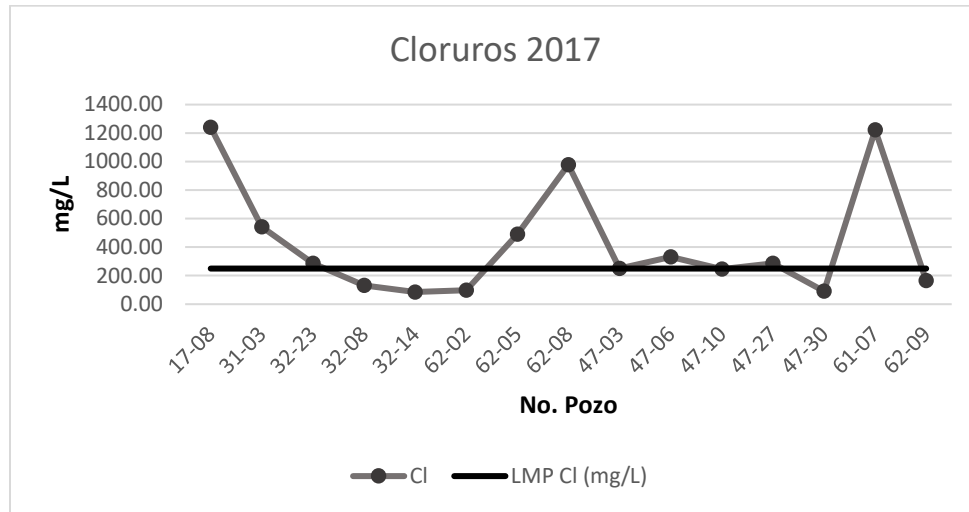


Figura 78. Concentraciones de cloruros contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 2017.

4.2.8 Nitratos

De entre todas las actividades o instalaciones potencialmente contaminantes por compuestos de nitrógeno, son las prácticas agrarias (abonado, riego y residuos ganaderos), por su amplitud y volúmenes de aplicación, el factor principal de alteración de la calidad de las aguas subterráneas, aunque sin olvidar que las fuentes puntuales de contaminación pueden repercutir, de forma intensa y localizada, sobre áreas concretas (López-Geta J.A., Loredó Pérez J., Fernández Ruiz L., Pernía Llera J.M., 2008).

La consideración, muy generalizada en la literatura científica, de que las prácticas agrarias son las principales responsables de la contaminación por nitratos en las aguas subterráneas, se sustenta, entre otros argumentos, en la relación existente entre el incremento del contenido en nitratos, con el uso del suelo para el desarrollo agrícola, la evolución en los últimos años del consumo de fertilizantes y los cambios en el sistema de producción ganadera (López-Geta et al., 2008).



La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece un límite máximo permisible de 10 mg/L de nitratos en agua subterránea para uso y consumo humano. Custodio y Llamas (1996), señalan un valor típico de entre 0.1 y 10 mg/l de nitratos en aguas continentales y de 200-1000 mg/l en aguas polucionadas. En el agua de mar señalan un valor típico de 1 mg/l o menos.

En 1981, de manera general, las concentraciones más bajas se encuentran en los aprovechamientos más cercanos al mar, sobre todo en la porción central del área de estudio. De las 14 muestras analizadas, solo la muestra 12 presenta una concentración de nitratos que supera el límite máximo permisible con un valor de 11.8 mg/L. El resto de las muestras presenta concentraciones que se encuentran dentro del límite máximo permisible establecido por la NOM. (Figura 79 y 80).

En el año 2010, el patrón que se observaba en 1981 en cuanto a la distribución de las concentraciones de nitratos es similar, pudiendo encontrar las concentraciones más bajas en los aprovechamientos más cercanos a la costa, sobre todo en la porción central del área de estudio. En este año, de las 14 muestras analizadas, sólo las muestras de los aprovechamientos 18, 28 y 48 se encuentran dentro del límite máximo permisible establecido por la NOM presentando concentraciones de 7.93, 6.07 y 9.36 mg/L respectivamente. El resto de las muestras supera el límite máximo permisible presentando concentraciones que oscilan entre 11.59 y 118.73 mg/L de nitratos (Figura 81 y 82).

En el año 2017, los aprovechamientos a los cuales se les analizaron concentraciones de nitratos fueron limitados y no se puede apreciar un patrón preferencial en cuanto a la distribución en el área de estudio. Sin embargo, se observa que, a diferencia del 2010, en este año las 7 muestras analizadas presentan concentraciones que se encuentran dentro del umbral permitido según la Norma Oficial Mexicana oscilando entre 1.5 y 9.1 mg/L (Figura 83 y 84).



Caracterización Hidrogeoquímica y Situación Actual de la Intrusión Marina en la Porción Costera del Acuífero Caborca, Sonora, México

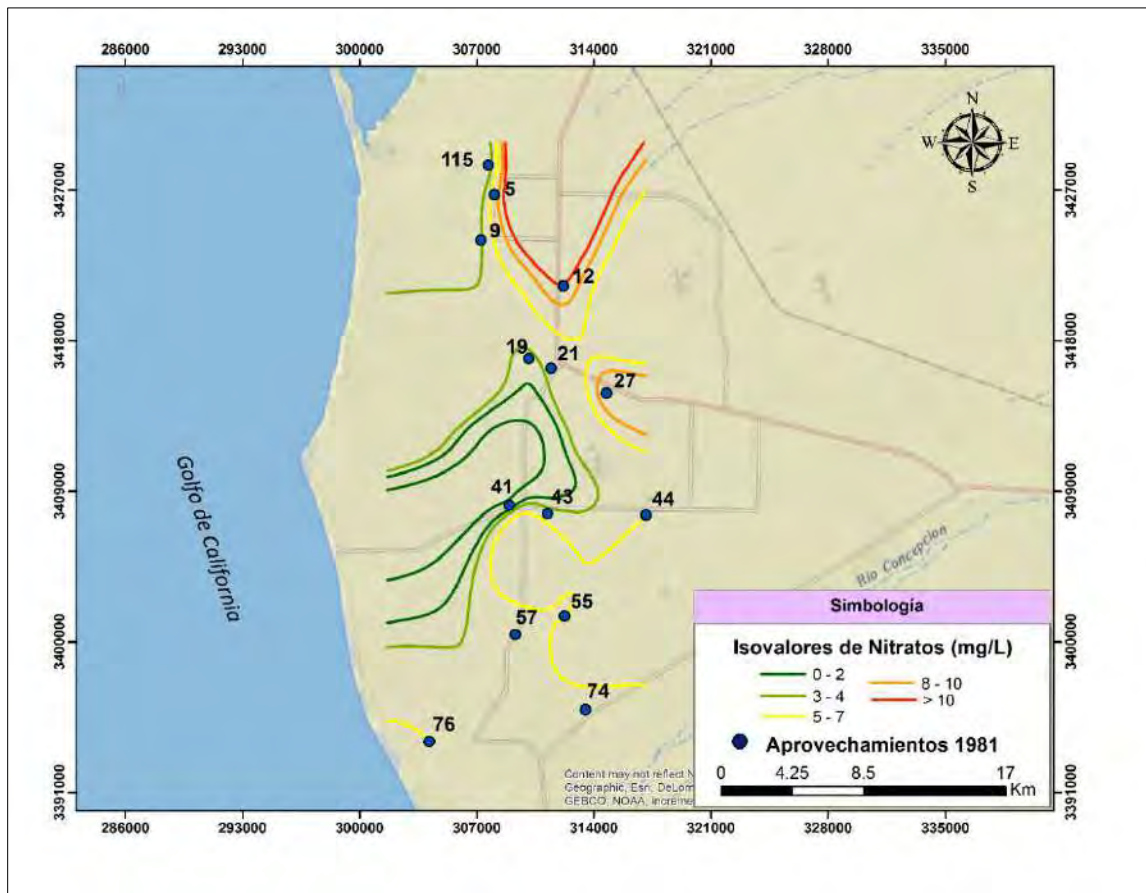


Figura 79. Distribución de isovalores de nitratos para el año 1981.

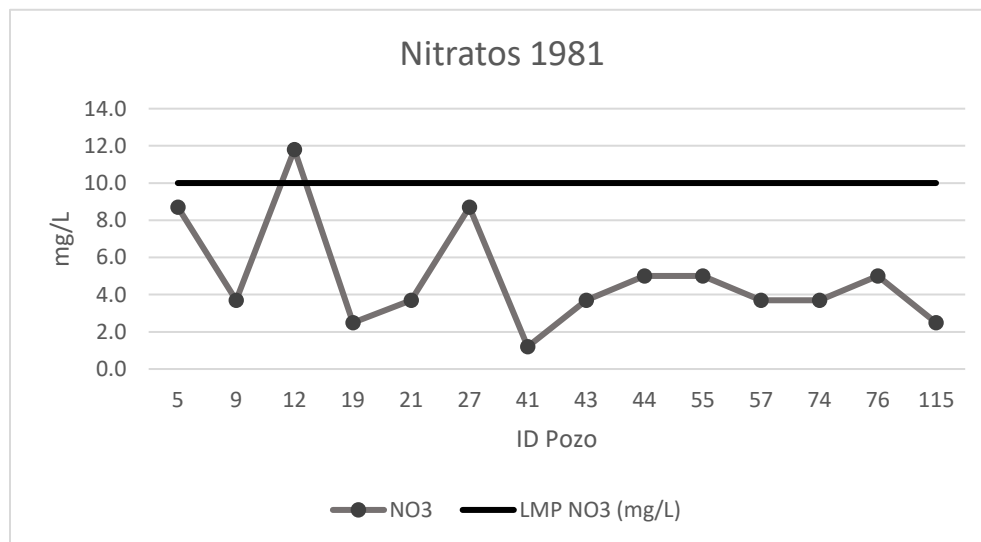


Figura 80. Valores de nitratos contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 1981.



Caracterización Hidrogeoquímica y Situación Actual de la Intrusión Marina en la Porción Costera del Acuífero Caborca, Sonora, México

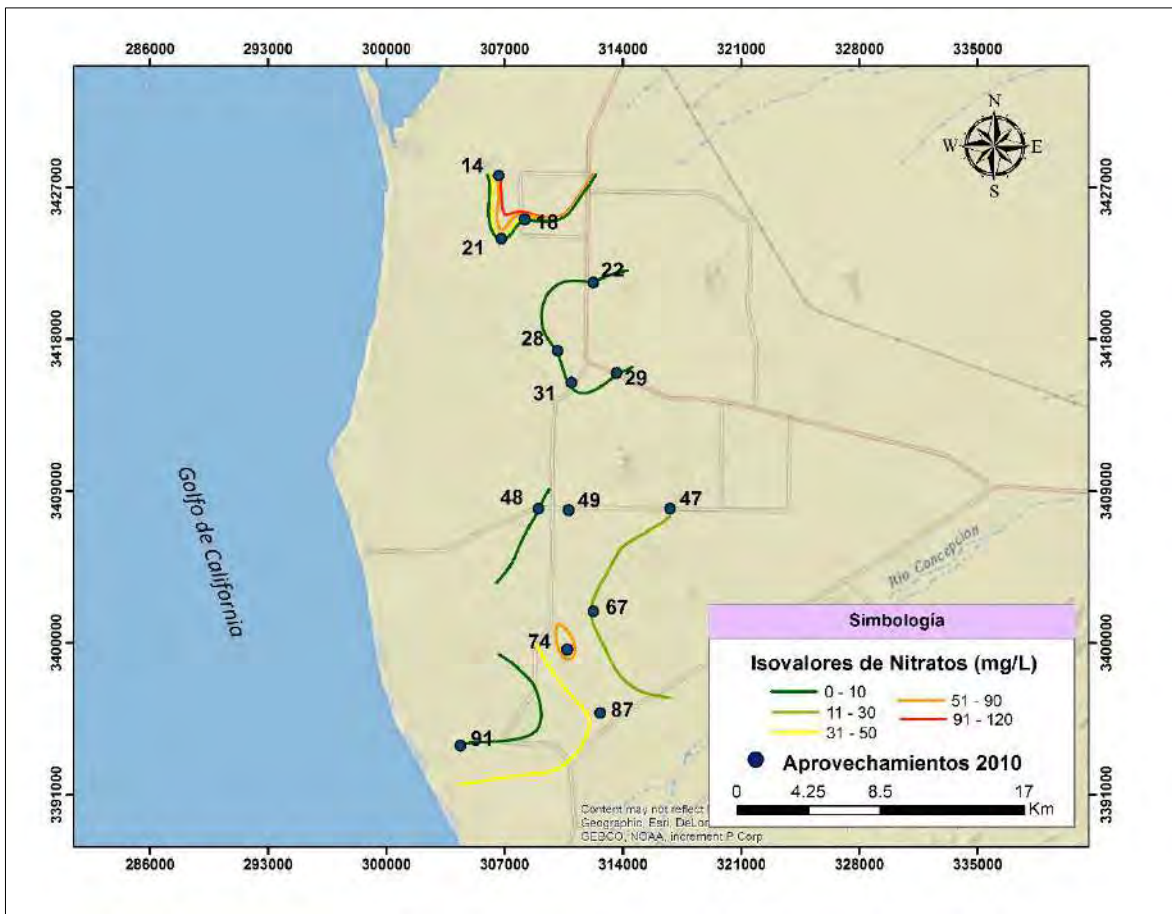


Figura 81. Distribución de isovalores de nitratos para el año 2010.

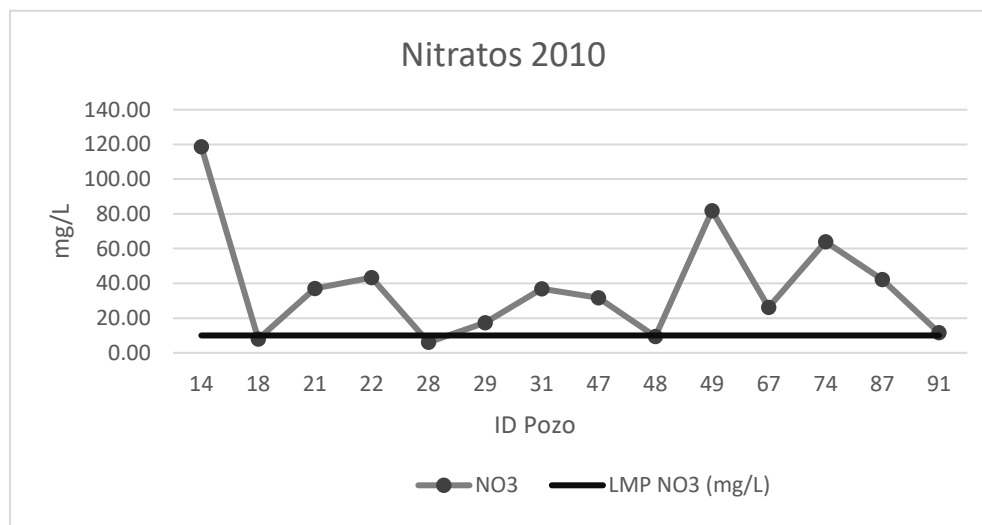


Figura 82. Valores de nitratos contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 2010.



Caracterización Hidrogeoquímica y Situación Actual de la Intrusión Marina en la Porción Costera del Acuífero Caborca, Sonora, México

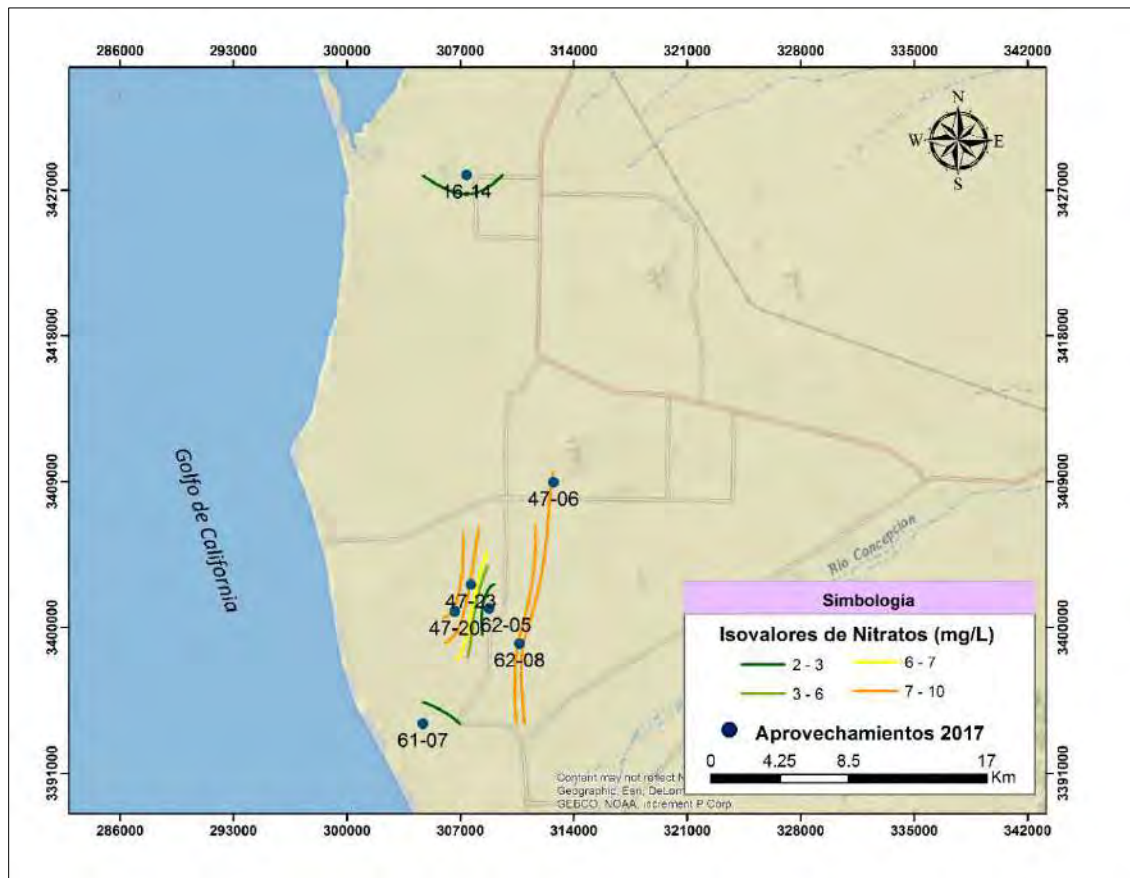


Figura 83. Distribución de isovalores de nitratos para el año 2017.

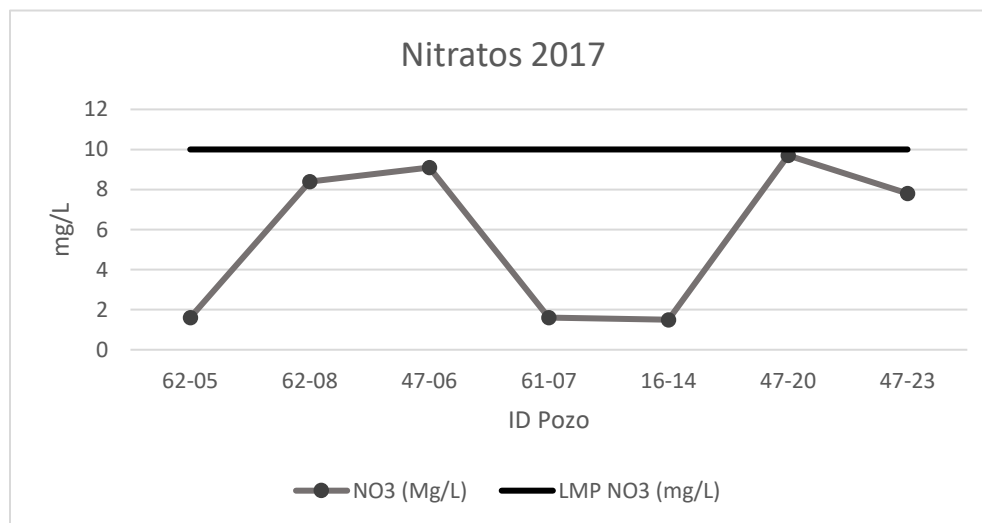


Figura 84. Valores nitratos contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 2017.



4.2.9 Bromuros

El comportamiento del ion bromuro es similar al del cloruro. Tiene interés en el estudio del origen de aguas saladas. En concentraciones usuales no ocasiona ningún problema para las plantas y animales y rara vez se analiza (Custodio y Llamas, 1996; Davis y De Wiest, 1971). No se conoce que la presencia de pequeñas cantidades de bromuro en agua subterránea tenga algún significado ecológico.

La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 no establece un límite máximo permisible de bromuro en agua para uso y consumo humano. Según Custodio y Llamas (1996), la concentración usual de bromuro es de menos de 0.01 ppm en aguas dulces y de 65 ppm en agua de mar. De acuerdo con Snoeyink y Jenkins (1987) la concentración de bromuro de la mayoría de las aguas naturales dulces es de menos de 1 ppm y en agua de mar de alrededor de 70 ppm.

En áreas costeras, las altas concentraciones de bromuro en el agua subterránea pueden atribuirse a la infiltración de agua de mar. La introducción de bromuro en el medio ambiente por actividades humanas, tales como la aplicación de pesticidas en áreas urbanas, son probablemente significativas.

No se cuenta con información histórica acerca de las concentraciones de bromuros que se han encontrado en el área de estudio. Por lo tanto, no se puede hacer una comparación acerca de la evolución de las concentraciones de bromuros.

Para el año 2017, se seleccionaron los sitios donde se observaba mayor salinidad para realizar un análisis de bromuros como complemento para comprobar el origen de la salinidad del agua. En la Figura 85 se puede observar que todos los pozos analizados exceden el límite máximo para aguas dulces y el contenido disminuye desde la costa hacia el continente, lo cual puede ser un indicador de que el aporte de bromuros al agua subterránea proviene directamente del agua de mar.

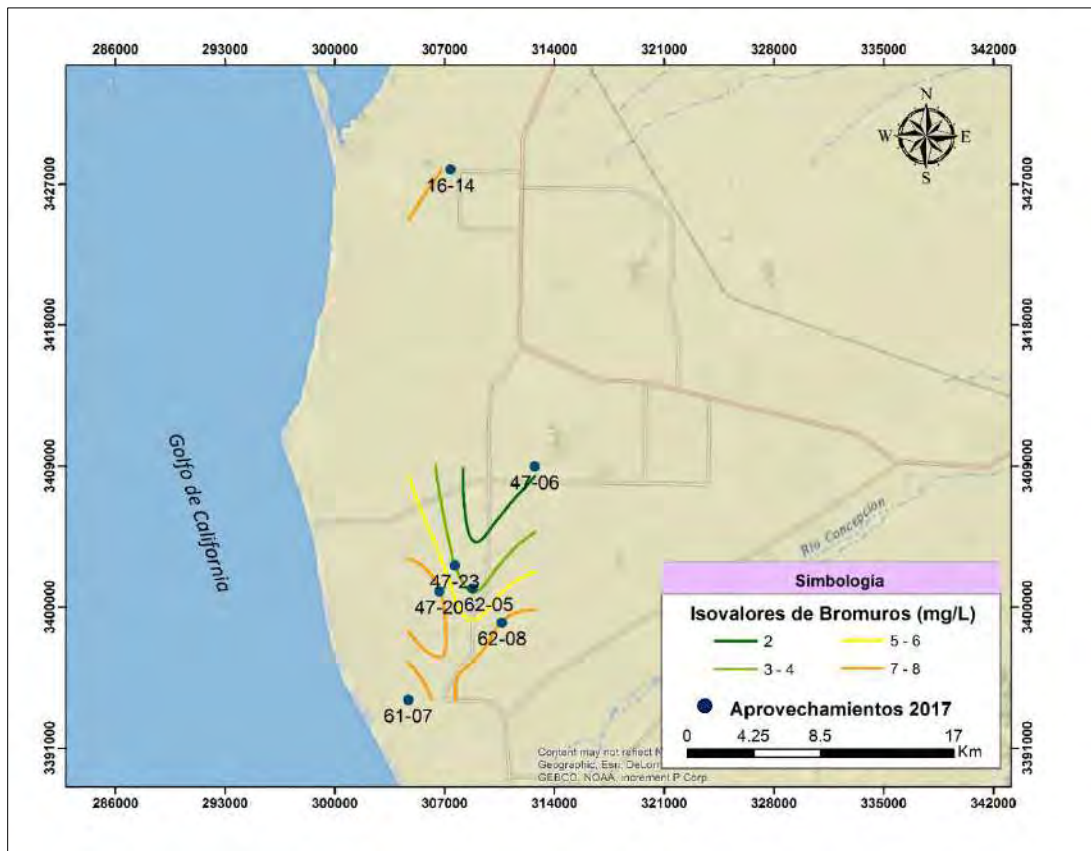


Figura 85. Distribución de isovalores de bromuros para el año 2017.

4.2.10 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) de una solución representa su capacidad para transportar la corriente eléctrica. Debido a que los iones son los responsables de la conducción de la electricidad, la conductividad eléctrica se relaciona con la concentración iónica total, de manera que es proporcional a la cantidad total de iones disueltos presentes en el agua, por lo que puede ser usada para dar una idea de los sólidos totales disueltos (Recuperado en 2017, de www.infoagro.com).

La determinación de este parámetro se efectúa mediante un electrodo conectado a un conductivímetro. La unidad de medición es el recíproco de la resistencia, y se expresa para aguas subterráneas como microsiemen por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$).



Un criterio representativo para la interpretación de la calidad del agua en función de la medición de la CE, es el establecido por la American Public Health Association (APHA 1995), que clasifica la calidad del agua de acuerdo con los criterios presentados en la Tabla 11.

Tabla 11. Clasificación del agua con base en la Conductividad Eléctrica (APHA, 1995).

Clasificación	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$ 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

En el año 1981 los valores de conductividad eléctrica en la costa de Caborca variaban de 540 a 3520 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo los valores máximos los registrados en los aprovechamientos 5, 12 y 27 y el mínimo en el aprovechamiento 15, localizándose las mayores concentraciones en el norte del área (Figura 86).

Tres de los 14 aprovechamientos muestreados en 1981 presentan conductividades altas. Según la clasificación de la APHA los pozos 5, 12 y 27 entran dentro de la categoría de agua salobre. El resto de los pozos presentan conductividades típicas de agua dulce (Figura 87).

En el año 2010, los valores de conductividad eléctrica oscilaban entre 986 y 6370 $\mu\text{S}/\text{cm}$, encontrándose el valor mínimo en el pozo 31 y el máximo en el pozo 14. En este año los valores más altos de conductividad eléctrica se encontraban al norte y al sur del área, siguiendo un patrón que va desde el Golfo de California (costa) hacia dentro del continente (Figura 88).

Cinco de los 14 aprovechamientos muestreados en el 2010 presentan conductividades altas. Según la clasificación de la APHA (1995) los pozos 21, 49, 74, y 91 entran dentro de



la categoría de agua salobre y el pozo 14 dentro de la de agua de mar presentando un valor de 6370 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El resto de los pozos presentan conductividades típicas de agua dulce (Figura 89).

Para el año 2017, los valores de la conductividad eléctrica van de 659 a 6440 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El valor máximo se encuentra en el pozo 17-08 y el mínimo en el pozo 32-14, pudiendo observar los pozos más cercanos al Golfo de California con mayor conductividad eléctrica (Figura 90).

En el año 2017 12 de los 24 aprovechamientos a los cuales se les tomaron parámetros de campo presentan conductividades altas. Los pozos 47-08, 17-11, 31-10, 31-03, 62-05, 47-06, 61-07 y 47-23 presentan valores típicos de agua salobre según la clasificación de la APHA (1965) y los pozos 01, 17-08, 16-14, y 47-20 valores típicos de agua de mar superando los 5,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 91).

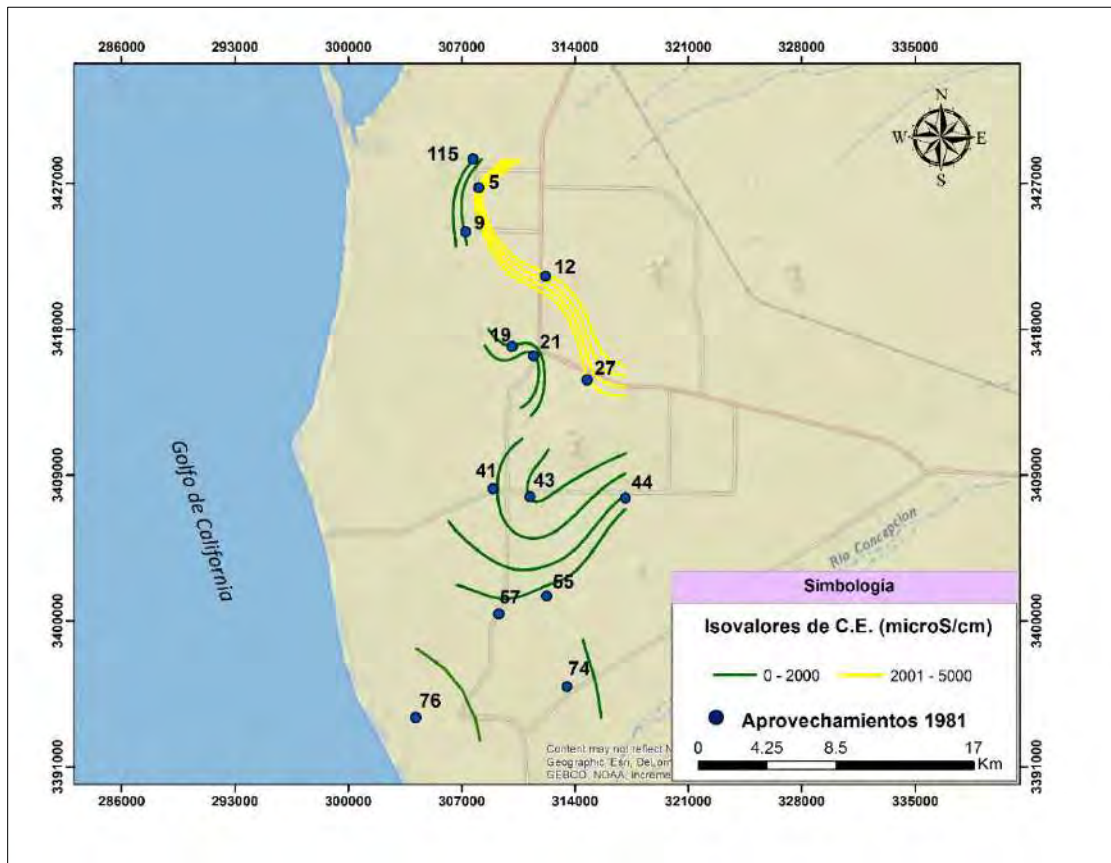


Figura 86. Distribución de isovalores de conductividad eléctrica para el año 1981.

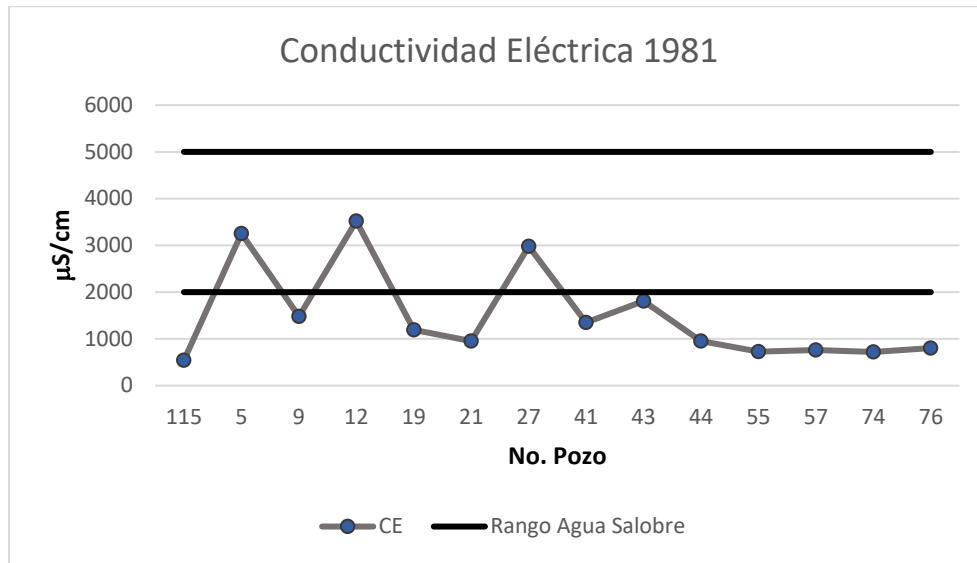


Figura 87. Valores de conductividad eléctrica para el año 1981.

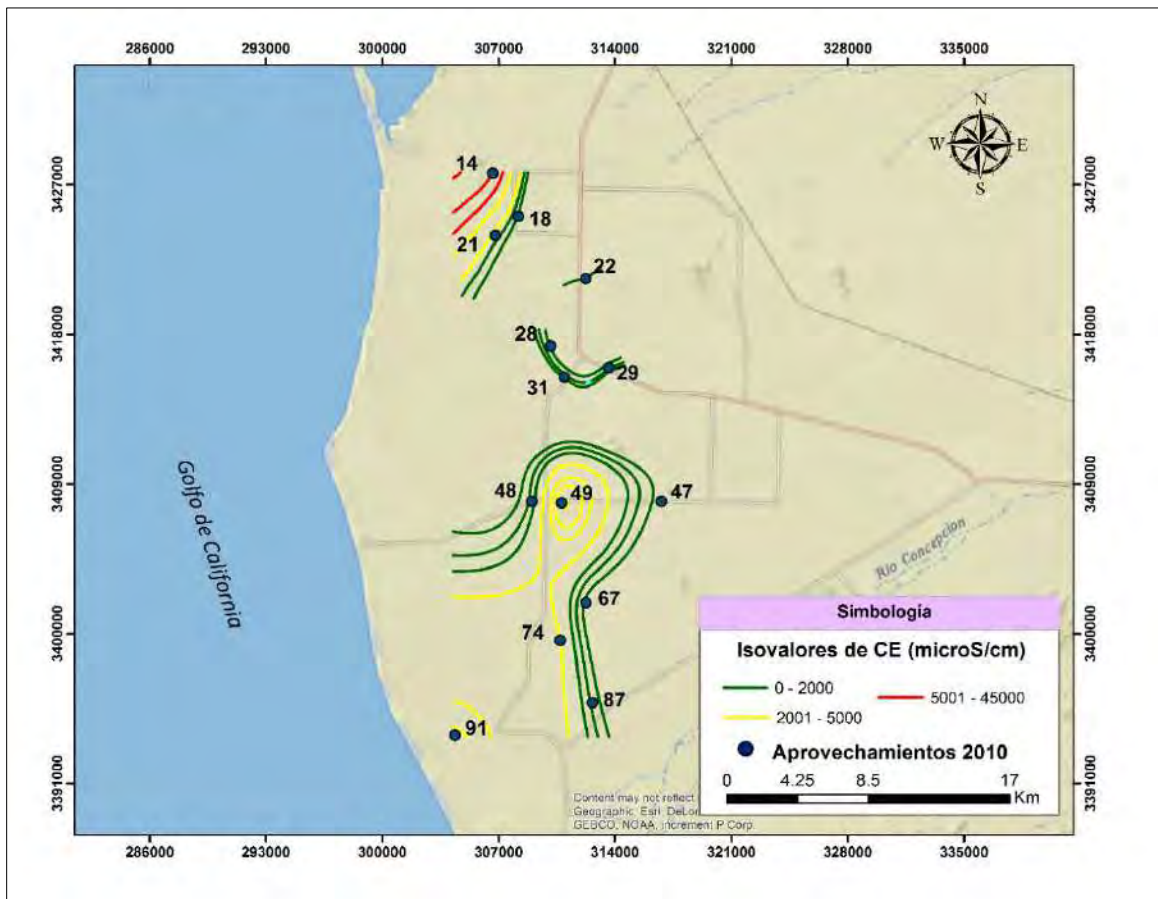


Figura 88. Distribución de isovalores de conductividad eléctrica para el año 2010.

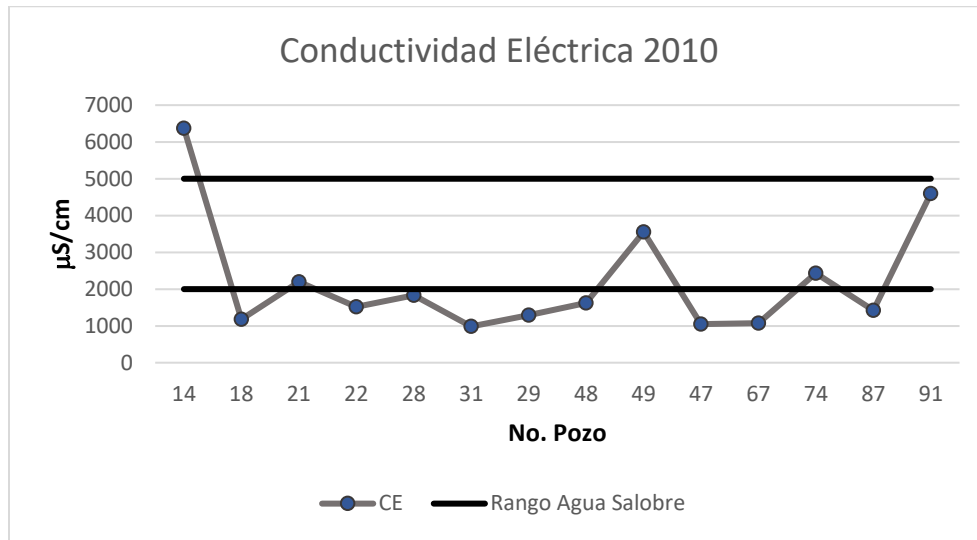


Figura 89. Valores de conductividad eléctrica para el año 2010.

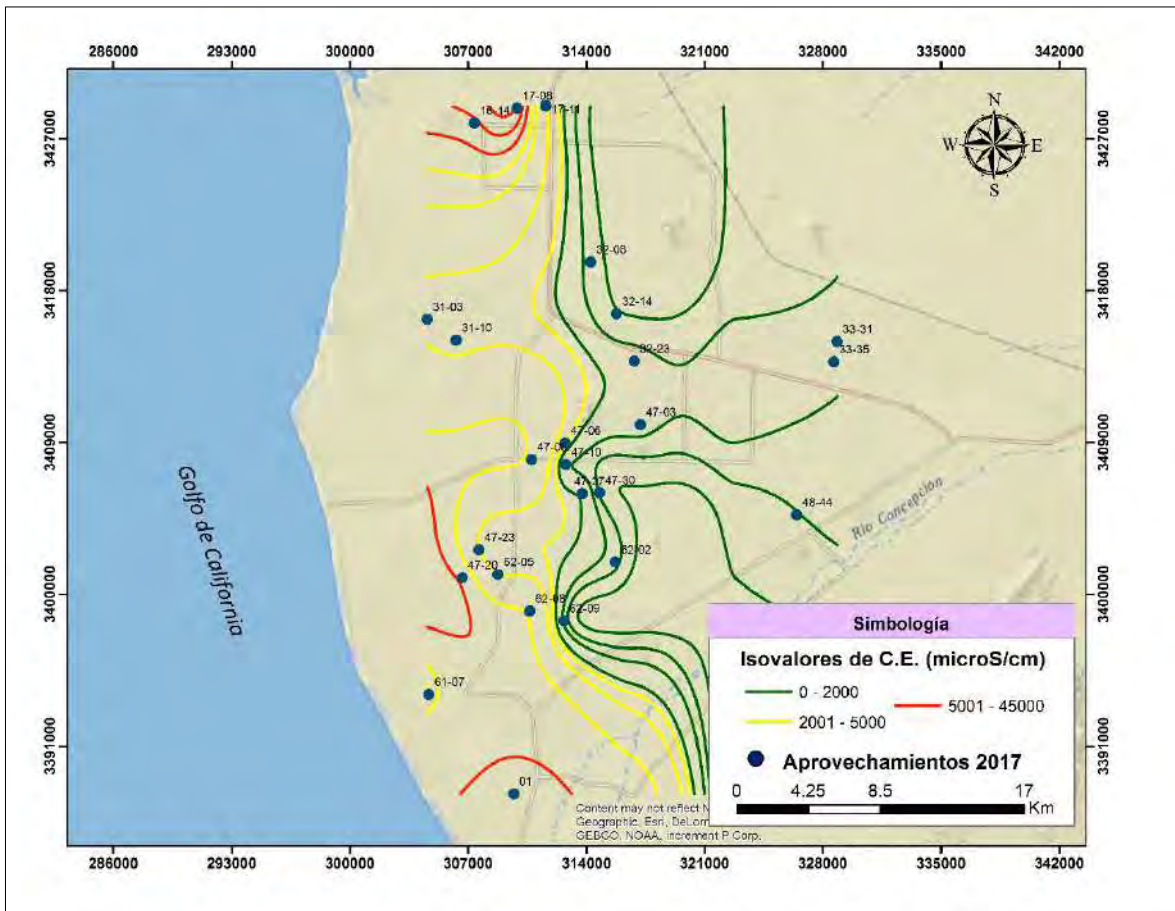


Figura 90. Distribución de isovalores de conductividad eléctrica para el año 2017.

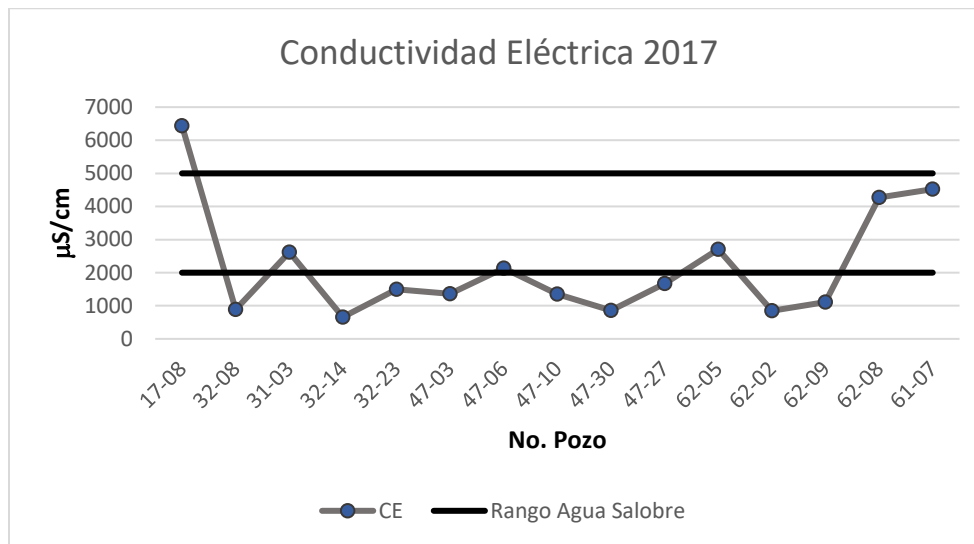


Figura 91. Valores de conductividad eléctrica para el año 2017.

4.2.11 Sólidos totales disueltos

Los sólidos totales disueltos comprenden las sales inorgánicas (principalmente de calcio, magnesio, potasio, sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y pequeñas cantidades de materia orgánica que están disueltas en el agua. Los sólidos totales disueltos presentes en el agua de consumo proceden de fuentes naturales, aguas residuales, escorrentía urbana y aguas residuales industriales (OMS,2003).

La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece un límite máximo permisible de 1,000 mg/l.

La salinidad del agua con base en los sólidos totales disueltos se clasificó según la clasificación de agua basada en sólidos totales disueltos utilizada por Fetter (2001), (Tabla 12). Esta clasificación ha sido utilizada y validada por diferentes autores como por ejemplo por Freeze y Cherry, 1979 en su libro *Groundwater*.



Tabla 12. Clasificación de agua con base en sólidos disueltos totales, según Fetter (2001).

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

En el año 1981 las concentraciones de sólidos totales disueltos en la costa de Caborca se encontraban en un rango de 394 a 2075 mg/l, registrándose el valor máximo en el pozo 12 y el mínimo en el pozo 115, localizándose las mayores concentraciones en el norte del área (Figura 92).

Tres de los 14 aprovechamientos muestreados en 1981 presentan concentraciones de sólidos totales disueltos altas. Según la clasificación de Fetter (2001) los pozos 5, 12 y 27 entran dentro de la categoría de agua salobre y a la vez exceden los límites máximos permisibles de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. El resto de los pozos presentan concentraciones de sólidos totales disueltos típicas de agua dulce (Figura 93).

En el año 2010, los valores obtenidos oscilan entre 739 y 4622 mg/l, encontrándose la máxima concentración en el pozo 14 y la mínima en el pozo 31. Las concentraciones más altas de sólidos totales disueltos se encontraban principalmente al norte y al sur del área, más cercanas al Golfo de California que las concentraciones que presentan valores menores (Figura 94).

Siete de los 14 aprovechamientos muestreados en el 2010 presentan concentraciones de sólidos disueltos altas. Según la clasificación de Fetter (2001) los pozos 14, 21, 23, 48, 74, 87 y 91 entran dentro de la categoría de agua salobre y exceden el límite máximo permisible de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. El resto de los pozos presentan concentraciones de sólidos totales disueltos típicas de agua dulce (Figura 95).



En el año 2017, las concentraciones de sólidos totales disueltos van de 297 a 4780 mg/l. La concentración máxima se encuentra en el pozo 01 y la mínima en el pozo 32-14. Los valores más altos de sólidos totales disueltos se encuentran hacia el norte y hacia el sur del área principalmente, desde el Golfo de California hacia el continente (Figura 96).

En el año 2017 12 de los 24 aprovechamientos muestreados presentan concentraciones de sólidos totales disueltos altas. Los pozos 47-08, 17-11, 31-10, 01, 17-08, 31-03, 62-05, 47-06, 61-07, 16-14, 47-20 y 47-23 presentan valores típicos de agua salobre según la clasificación de Fetter (2001) y exceden el límite máximo permisible de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, (Figura 97).

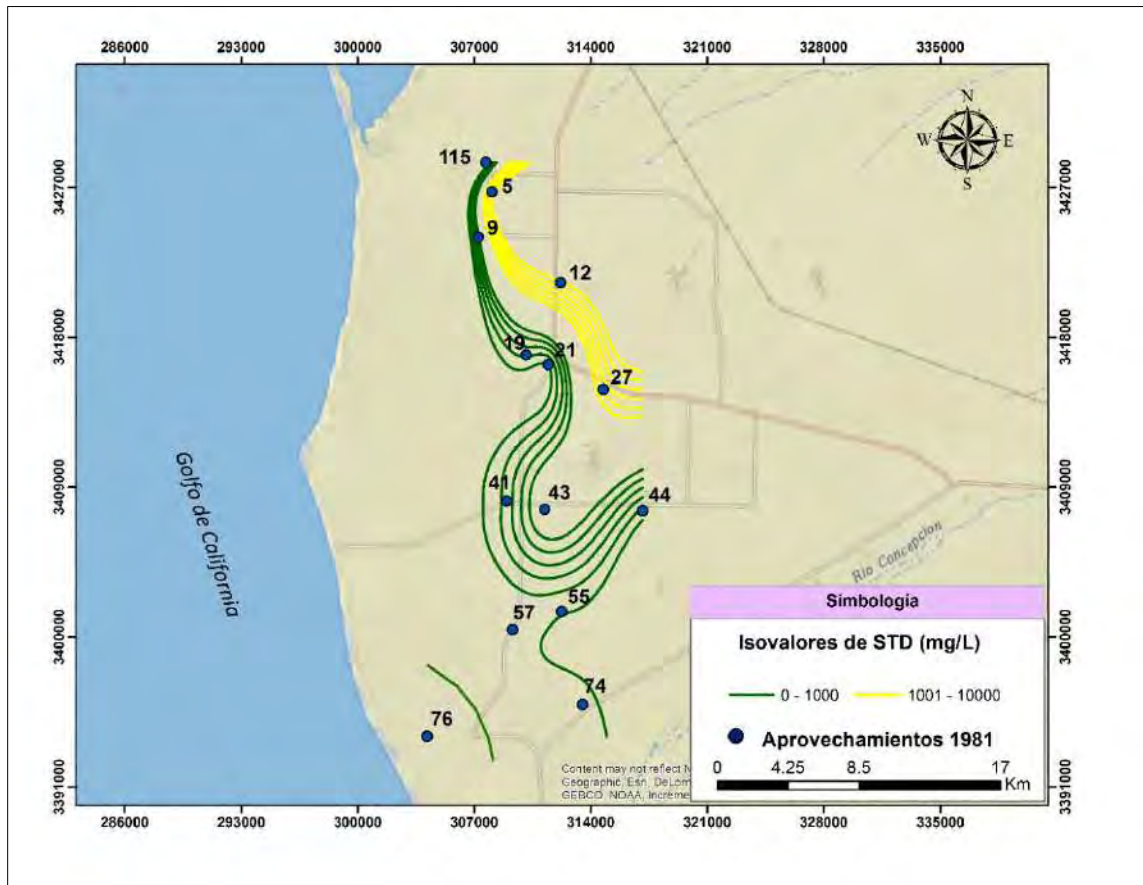


Figura 92. Distribución de isovalores de sólidos totales disueltos para el año 1981.

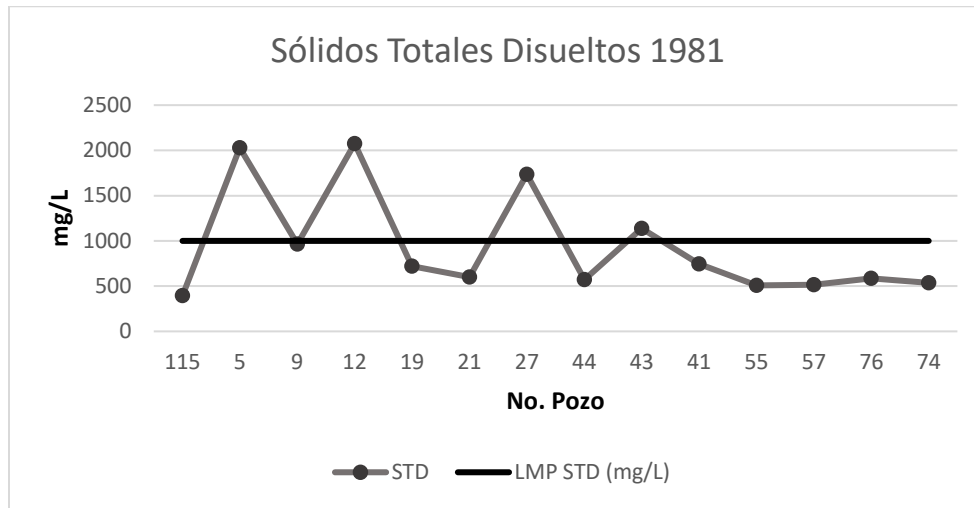


Figura 93. Valores de sólidos totales disueltos contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 1981.

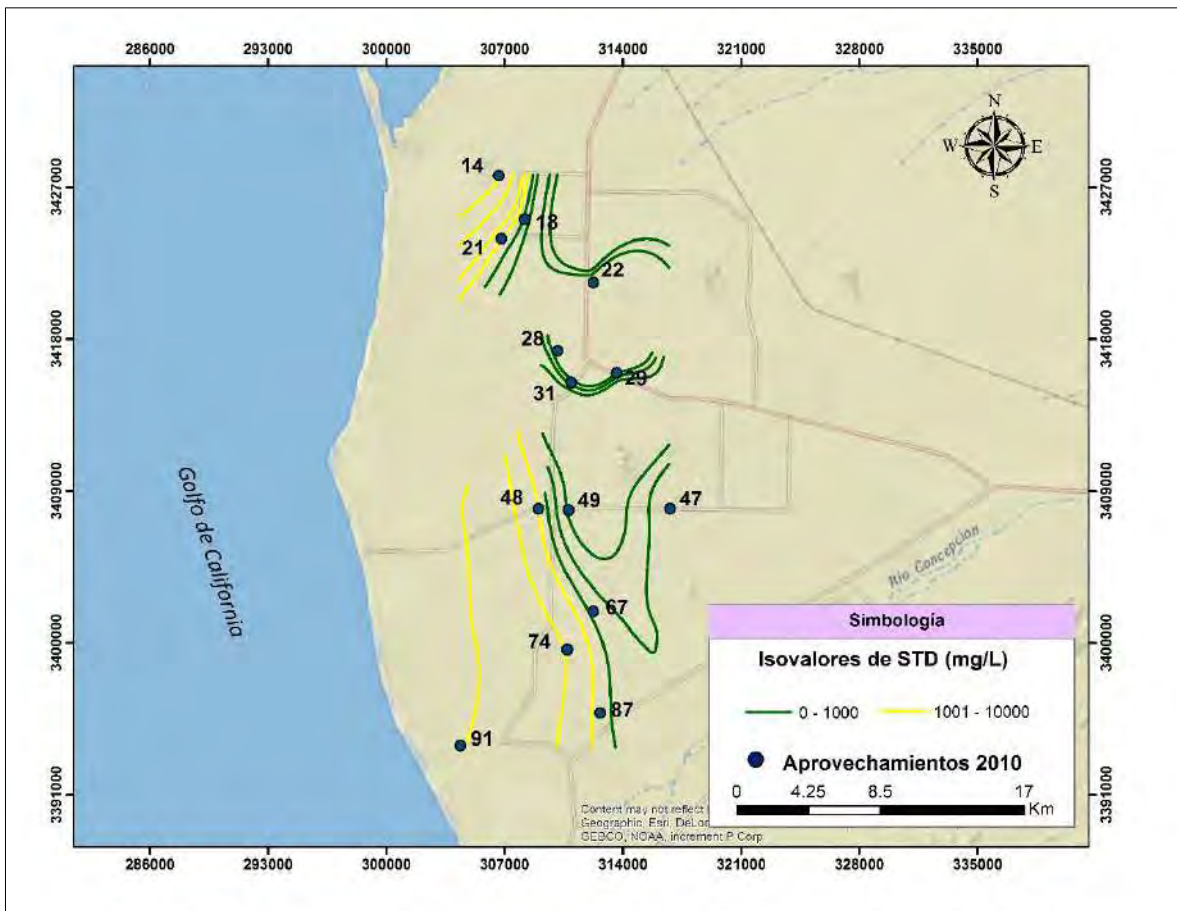


Figura 94. Distribución de isovalores de sólidos totales disueltos para el año 2010.

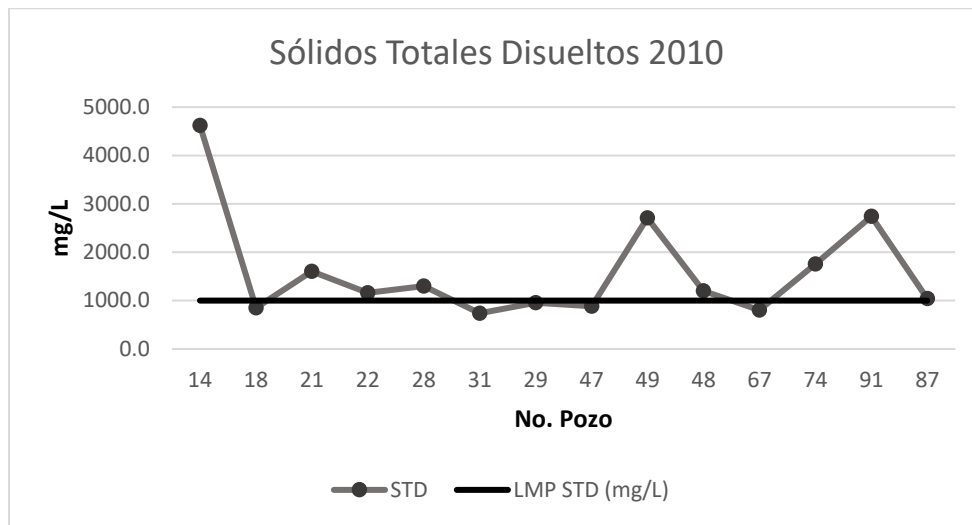


Figura 95. Valores de sólidos totales disueltos contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 2010.

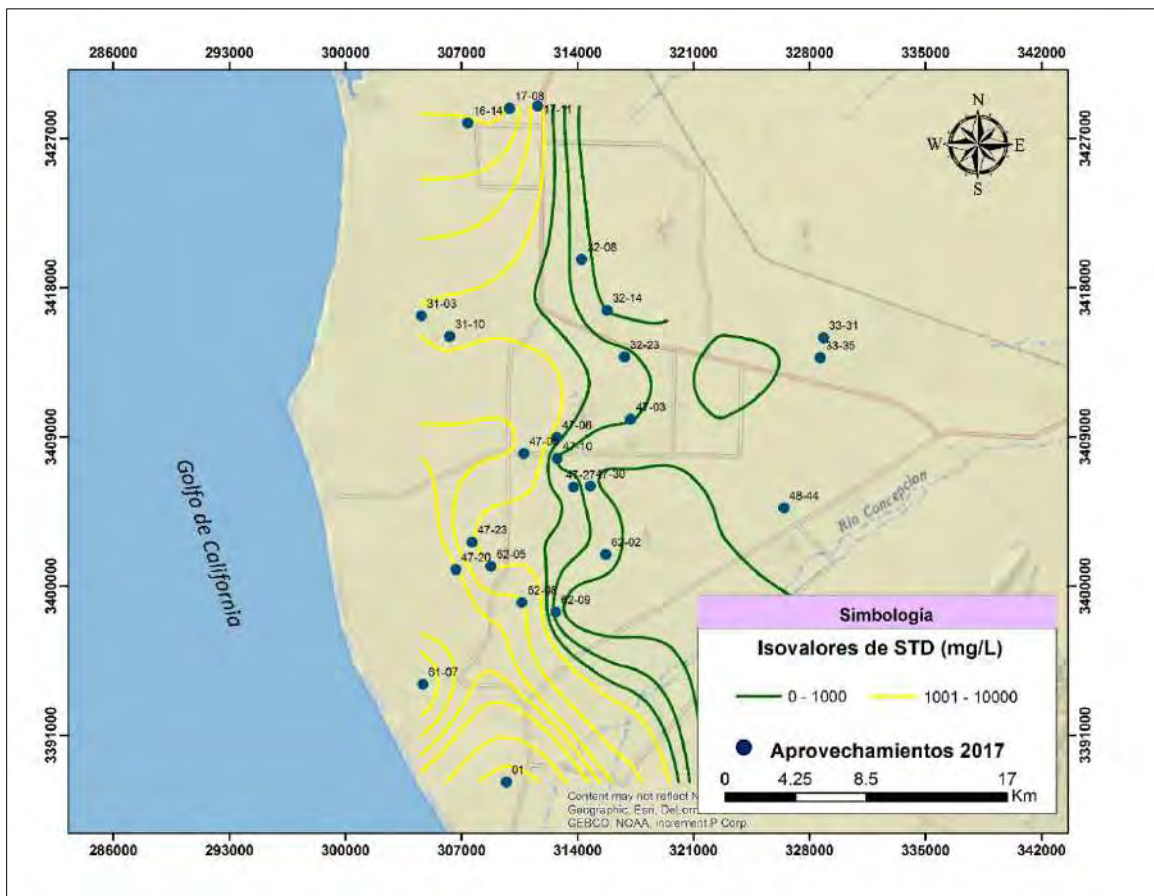


Figura 96. Distribución de isovalores de sólidos totales disueltos para el año 2017.

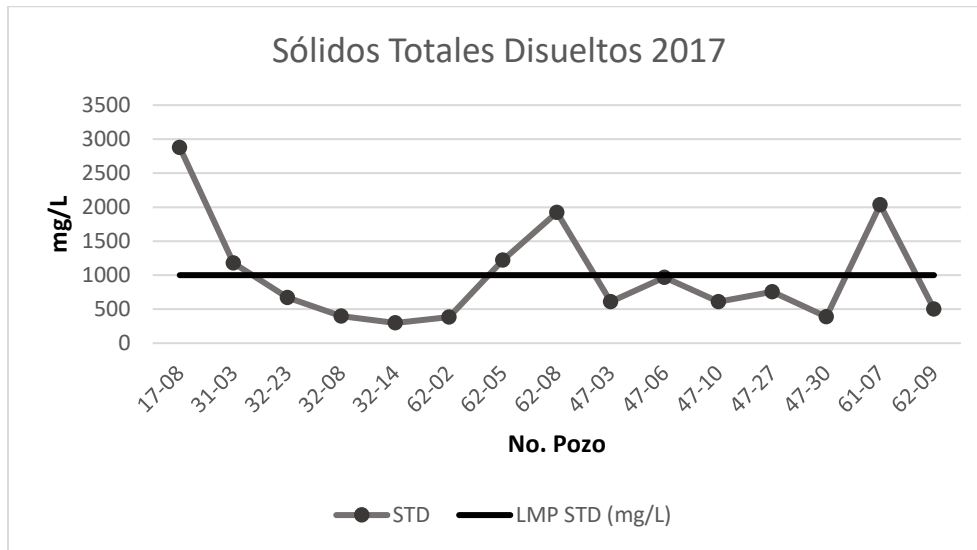


Figura 97. Valores de sólidos disueltos totales contra el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994 para el año 2017.

4.3 Clasificación del agua (diagramas hidroquímicos)

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

Para la caracterización de familias de agua se utilizaron los diagramas triangulares de Piper y los diagramas de Stiff, que se generaron utilizando el software AquaChem 2011.1.



4.3.1 Diagramas de Piper

Los diagramas triangulares se utilizan para representar la proporción de tres componentes en la composición de un conjunto o de una sustancia. La suma de los tres componentes debe representar el 100% de la composición de lo que se considera. En hidroquímica se utiliza un triángulo para los cationes principales y otro para los aniones, y un rombo que recoge la información de ambos triángulos.

En estos gráficos se pueden representar muchos análisis sin dar origen a confusión y ésta es una de sus mayores ventajas. Las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas (Custodio y Llamas, 1996).

En la Figura 98 se muestra el diagrama de Piper con las muestras obtenidas para el año 1981, en el cual se graficaron los iones mayoritarios de las 13 muestras analizadas. En él se distinguen 3 grupos de familias de agua: clorurada-sódica (Cl-Na), bicarbonatada-sódica-cálcica ($\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$), bicarbonatada-sódica ($\text{HCO}_3\text{-Na}$). Las familias de agua que predominan son la clorurada-sódica (53.84%) y la bicarbonatada-sódica (38.46%).

En la Figura 99 se muestra el diagrama de Piper con las muestras obtenidas para el año 2010, en el cual se graficaron los iones mayoritarios de las 15 muestras analizadas. En él se distinguen 2 grupos de familias de agua: el 35.71% pertenece a la familia clorurada-sódica (Cl-Na) y el 64.28% a la clorurada- cálcica (Cl-Ca).

En la Figura 100 se muestra el diagrama de Piper con las muestras obtenidas para el año 2017, en el cual se graficaron los iones mayoritarios de las 18 muestras analizadas. En él se distinguen 4 grupos de familias de agua: clorurada-cálcica (Cl-Ca), clorurada- sódica (Cl-Na), bicarbonatada-cálcica ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$) y clorurada- bicarbonatada- sódica- cálcica (Cl- $\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$). Estas facies o familias iónicas muestran una clara definición de la diversidad de carga iónica del agua subterránea (de menor a mayor salinidad), a partir de la cual se aprecia la dirección del flujo del agua continental hacia su descarga en el litoral.

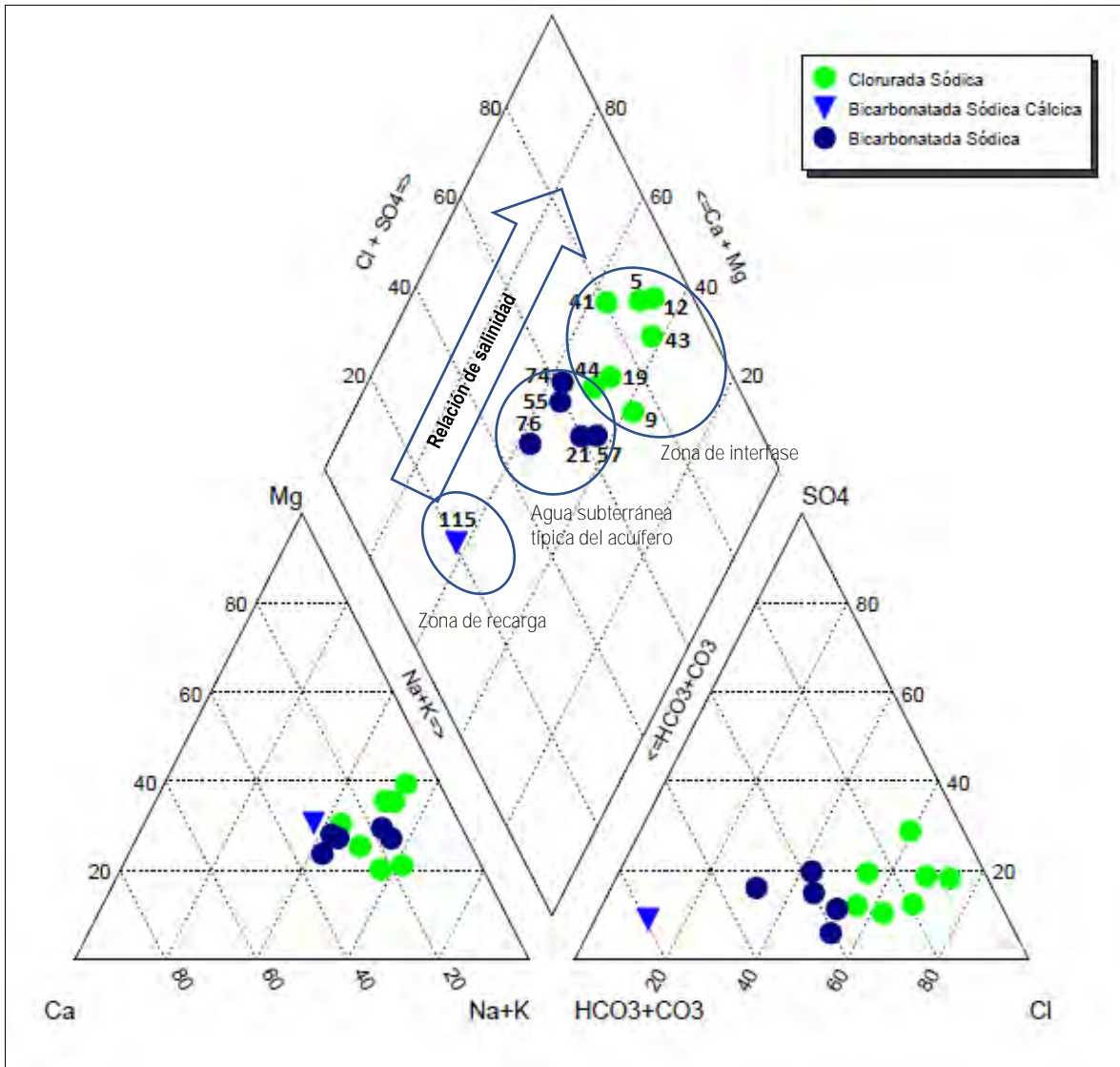


Figura 98. Diagrama de Piper 1981.

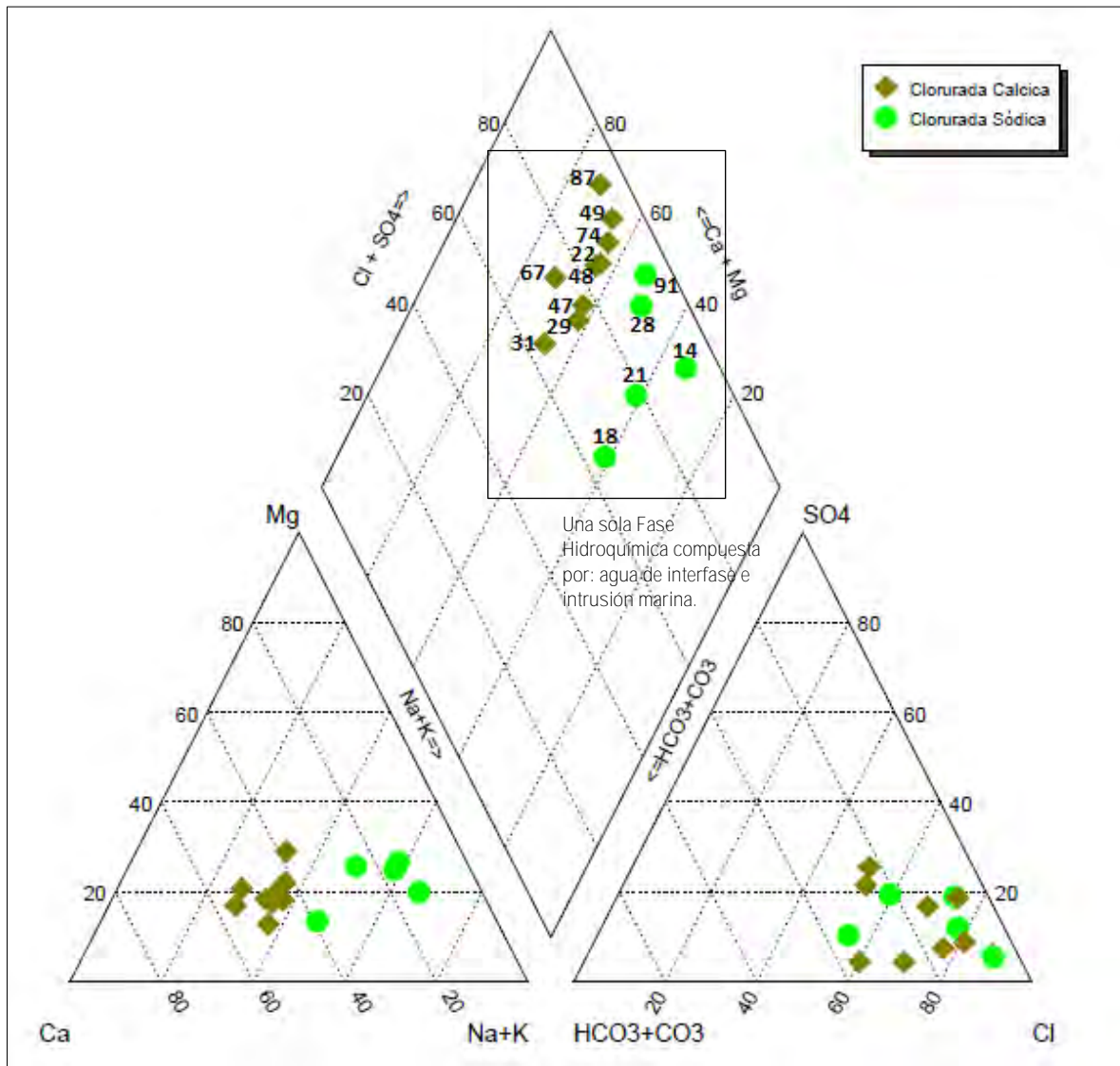


Figura 99. Diagrama de Piper 2010.

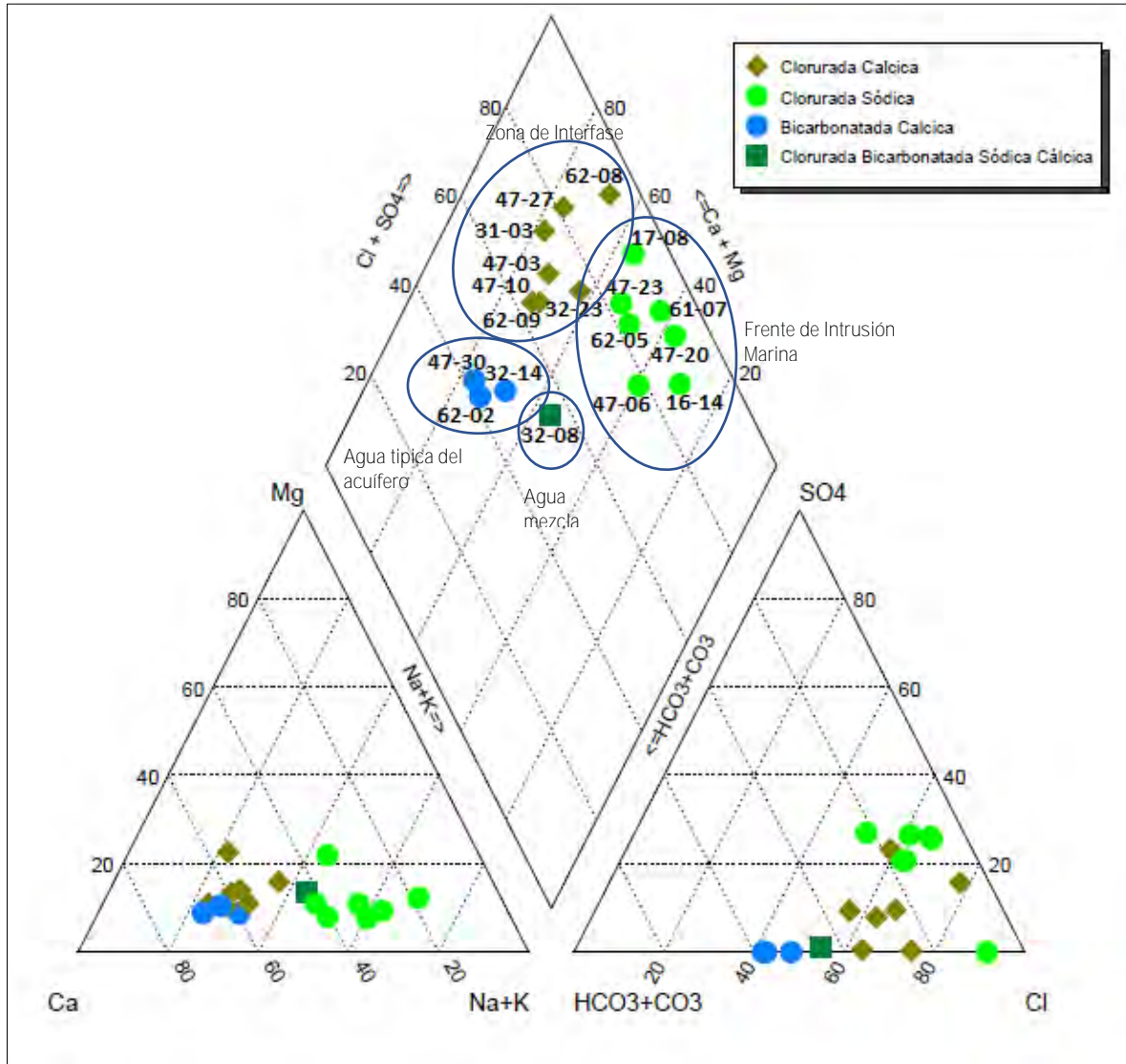


Figura 100. Diagrama de Piper 2017.



4.3.2 Diagramas de Stiff

Esta forma de interpretación gráfica consiste en tomar sobre semirrectas convergentes o paralelas segmentos proporcionales a los meq/l de cada ion y unir los extremos dando así un polígono. Sobre cada semirrecta se toma un solo ion o bien un catión y un anión simultáneamente. La forma de la figura resultante da idea del tipo de agua. Se prestan muy bien para realizar comparaciones a nivel espacial y por ello pueden ser utilizados en mapas hidrogeoquímicos (Custodio, 1996).

Según Custodio y Llamas, para aguas subterráneas es mejor utilizar la siguiente disposición utilizando tres o cuatro rectas base:



O bien



En este caso se utilizó la primera disposición.

En lo que se refiere a los planos hidrogeoquímicos la UNESCO (1963) ha establecido la siguiente normalización de colores.

	<i>Colores</i>
Aguas bicarbonatadas cálcicas	Azul claro
Aguas bicarbonatadas sódicas	Azul violeta
Aguas bicarbonatadas magnésicas	Azul oscuro
Aguas sulfatadas cálcicas	Amarillo
Aguas sulfatadas magnésicas	Naranja
Aguas sulfatadas sódicas	Marrón-amarillo



Caracterización Hidrogeoquímica y Situación Actual de la Intrusión Marina en la Porción Costera del Acuífero Caborca, Sonora, México



Aguas cloruradas cálcicas	Marrón-verde
Aguas cloruradas magnésicas	Verde-azul
Aguas cloruradas sódicas	Verde

Al colocar las figuras geométricas sobre un mapa del área, se puede apreciar claramente la zonificación de los tipos de aguas, sugiriendo la distribución de acuerdo con la composición y dirección predominante flujo subterráneo atribuido a cada familia que predomina en el acuífero.

En la Figura 101, se puede observar la distribución espacial de los diagramas de Stiff para el año 1981, que pueden ser acordes con la posición de las zonas de penetración y bombeo para ese año. Las familias de agua que predominan en este año son la bicarbonatada-sódica (46.15%) y la clorurada-sódica (38.46%).

La Figura 102, muestra la distribución espacial de los diagramas de Stiff para el año 2010. La distribución de las zonas hidrogeoquímicas es consistente con la interpretación de Piper en la que se interpreta una fuerte penetración sin presencia de agua dulce en el acuífero. En este año se puede observar que la mayor concentración de iones se encuentra en los sitios que se encuentran más pegados al mar y las familias de agua que predominan son la clorurada-cálcica (64.28%) y la clorurada-sódica (35.71%).

En la Figura 103, se puede apreciar la distribución espacial de los diagramas de Stiff para el año 2017. Se puede apreciar que la mayor concentración de iones se encuentra en la muestra localizada más hacia el norte, seguida por la muestra que se encuentra localizada más hacia el sur. Esto puede indicar las probables entradas de agua salina hacia el continente. Se muestra una incipiente recuperación del agua del acuífero, al mostrar la presencia de agua bicarbonatada cálcica. En este año las familias de agua que predominan en la porción costera son la clorurada-cálcica (38.88%) y la clorurada-sódica (38.88%).



Caracterización Hidrogeoquímica y Situación Actual de la Intrusión Marina en la Porción Costera del Acuífero Caborca, Sonora, México

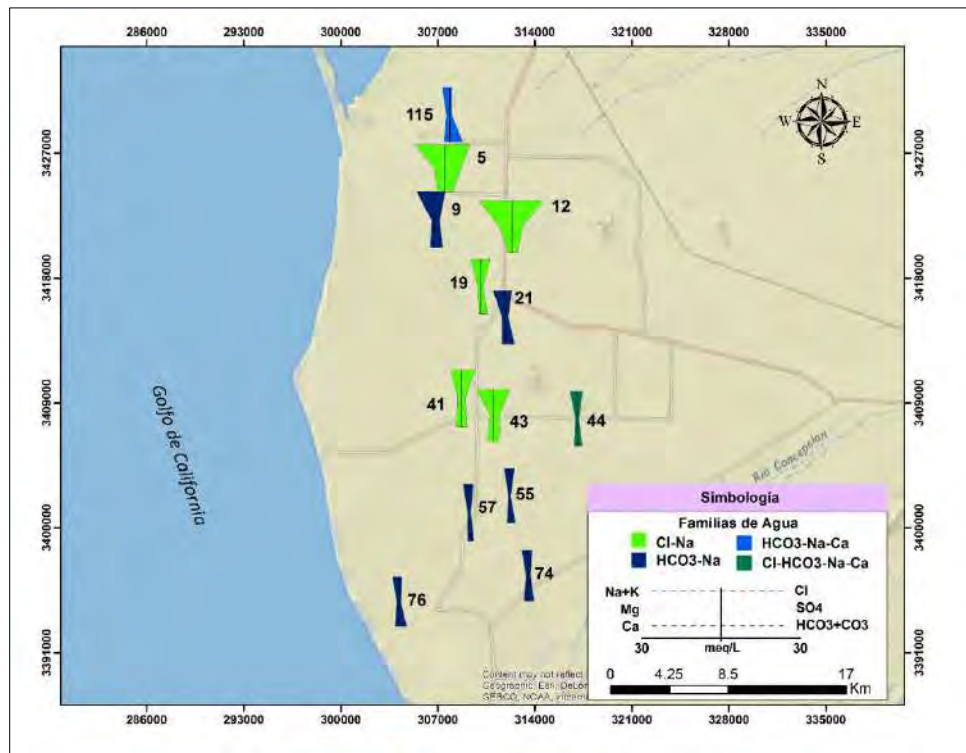


Figura 101. Distribución de Diagramas de Stiff 1981.

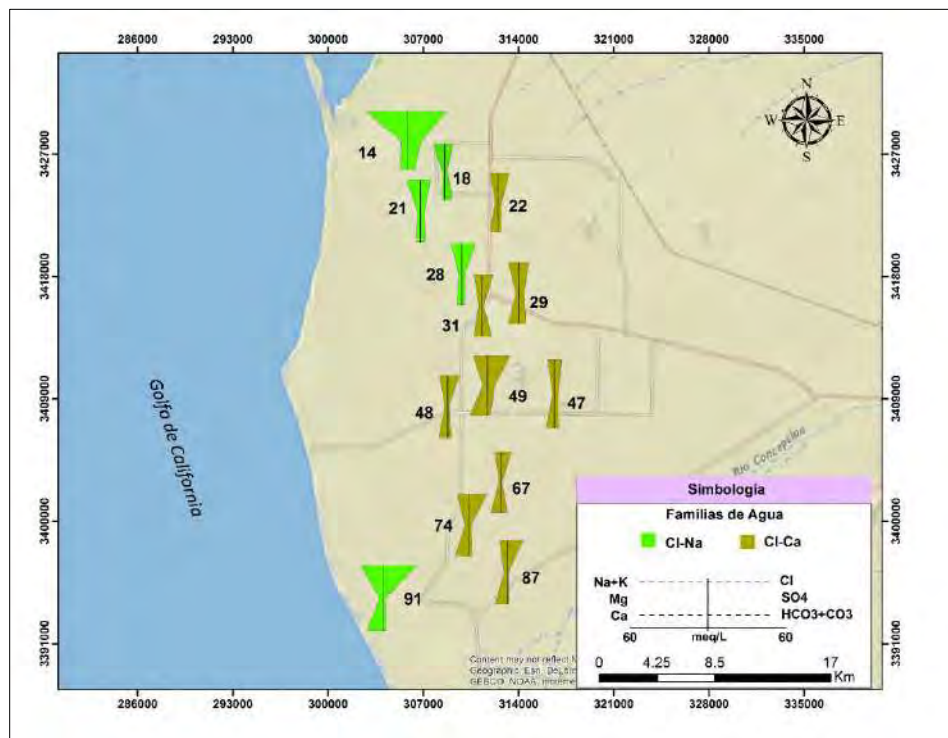


Figura 102. Distribución de Diagramas de Stiff 2010.

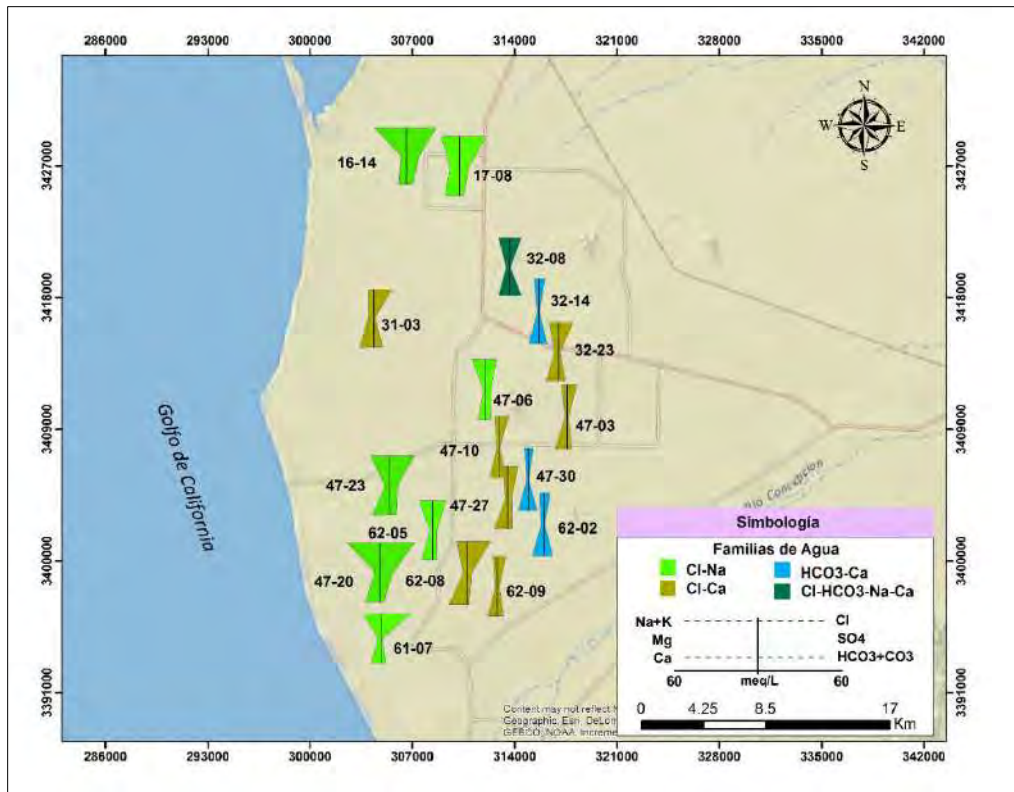


Figura 103. Distribución de Diagramas de Stiff 2017.

4.4 Isótopos Estables

Según Gonfiantini y Araguas-Araguas (1998), las variaciones en los isótopos ambientales, y especialmente en los isótopos estables de hidrógeno y oxígeno en el agua ayudan en la identificación y estudio del origen de la salinización de las aguas subterráneas, incluyendo el caso de la intrusión marina en los acuíferos costeros.

En términos generales, la intrusión de agua marina en un cuerpo de agua dulce puede ser identificada mediante análisis químicos, o incluso, en el caso más simple, a partir de la medida de conductividades. Sin embargo, la experiencia muestra que los mecanismos de salinización en aguas subterráneas son, en algunos casos, más complejos de lo esperado, y es



entonces cuando los isótopos ambientales contribuyen a la determinación de estos mecanismos.

La base teórica en la investigación de la intrusión del agua marina en las aguas subterráneas, o en términos más generales, la mezcla de agua del mar con agua dulce, utilizando las técnicas basadas en las variaciones de los contenidos isotópicos, es en principio bastante simple. De hecho, uno de los términos de la mezcla, el agua del mar, presenta composiciones químicas e isotópicas típicas y generalmente bien definidas. El otro término, que puede ser, por ejemplo, el agua de un acuífero costero, o el agua de un río que fluye a través de un estuario, es también a escala local, uniforme y diferente del agua de mar en la composición química e isotópica. Por otra parte, en los casos más simples el agua del mar y el agua dulce producen mezclas que presentan composiciones químicas e isotópicas correlacionadas linealmente y fijadas por las proporciones de mezcla. En otros casos, estas relaciones pueden ser más complejas, por ejemplo, a causa de los iones disueltos, pero en cualquier caso aportan información geoquímica e hidrogeológica de interés.

Tanto el hidrógeno como el oxígeno representan un conjunto de isótopos, cuyas variaciones en el agua natural son la base para su aplicación metodológica en hidrología y son utilizados ampliamente en esta disciplina. (Levin et al., 1988; Panarello et al., 1984; Gat, 1995; Dapeña y Panarello, 2004; Lavrushin et al., 2005; Vitòria et al., 2005; Quiroz Londoño et al., 2008; Azzaz et al., 2008; Carol et al., 2009).

El hidrógeno, cuyo isótopo de masa 1 es el protio (^1H), aparece en la hidrosfera con una masa de 99.985%, y está acompañado del 0,015% del isótopo pesado ^2H o deuterio. Incluso existe un isótopo más pesado, de masa 3, denominado tritio ^3H , es inestable y presenta un decaimiento β con una vida media de 12,32 años. Debido a que ese valor es compatible con el tiempo de permanencia de muchos reservorios subterráneos, es ampliamente utilizado en estudios hidrogeológicos.

Los isótopos radiactivos ^{14}O , ^{15}O , ^{19}O y ^{20}O tienen vidas medias de segundos, por lo tanto, no son significativos en este tipo de análisis. Sin embargo, tres de los isótopos estables



del oxígeno ^{16}O , ^{17}O y ^{18}O cuya abundancia es de 99,7590 % 0,037% y 0,20 % respectivamente, son importantes en isotopía aplicada a la hidrogeología (Gat, 2005).

La especie molecular más abundante del agua está formada por dos átomos de protio y un átomo de oxígeno de masa 16 ($^1\text{H}^1\text{H}^{16}\text{O}$). Además, existen otras especies más pesadas que incorporan un átomo de deuterio (^2H) o de oxígeno 18 (^{18}O).

La abundancia absoluta de los isótopos estables no se mide en agua u otros compuestos naturales. Solo se determina la diferencia relativa en la relación entre el isótopo pesado (generalmente el menos abundante) respecto del liviano (generalmente el más abundante) de la muestra respecto a una referencia. Esa diferencia se designa con la letra δ y se expresa en $\delta\%$, definiéndose como:

$$\delta\% = (R_M - R_R * 1000 R_R) / R_R$$

Donde δ , es la desviación isotópica en partes por mil; R , es la relación isotópica ($^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$); M , muestra; R , referencia internacional.

De esta manera se desprende que un valor positivo de $\delta^{18}\text{O}$ ó de $\delta^{2}\text{H}$ significa que en contenido de ^{18}O o ^2H de la muestra es mayor que el del patrón resultando una muestra enriquecida en isótopos pesados, y un valor negativo indica lo contrario, siendo una muestra empobrecida.

En el ciclo hidrológico, los rangos de valores pueden encontrarse entre $-450\% < ^2\delta < +100\%$ y $-50\% < ^{18}\delta < +50$. La composición estimada del agua primordial (juvenil) es $^2\delta_{\text{VSMOW}} = \sim -60\%$ y $^{18}\delta_{\text{VSMOW}} = \sim +5\%$. Esto difiere de los valores de la atmósfera actual, debido, por un lado, a la pérdida preferencial de ^1H relativo a ^2H en la atmósfera exterior en el lapso de la escala geológica, y por el otro, de la remoción del oxígeno enriquecido en la columna sedimentaria, en particular en carbonatos (Gat et al., 2000).

Los procesos que llevan al fraccionamiento isotópico natural del hidrógeno y del oxígeno del agua, se producen fundamentalmente en la evaporación y condensación, aunque también pueden colaborar con menor intensidad otros fenómenos de tipo de difusión térmica,



biológicos, etc. (Custodio y Llamas, 1996). Existen diversos factores que influyen en el contenido de deuterio y oxígeno 18:

- Distancia al mar: el vapor generado tiene δ ligeramente negativo ($\delta \sim -10\%$) y va disminuyendo a medida que penetra en las áreas continentales. La lluvia generada es tanto más ligera (menor δ) cuando más lejos del mar.

- Temperatura: en zonas frías se produce un vapor más ligero (menor δ) que en las zonas más cálidas, aunque existe una notable dependencia de las situaciones y de las condiciones climáticas locales. El valor medio de $\delta^{18}\text{O}$ varía según $\delta^{18}\text{O} = 0,7 t_a (\text{°C}) - 13,9$ (Dansgaard, 1964) siendo t_a la temperatura media anual, lo que conduce a una disminución de $0,5\%$ / grado de latitud, con notables excepciones.

- Altitud: la disminución de la temperatura con la altitud hace que en una cierta región la lluvia de zonas topográficamente más altas sea más ligera que en las zonas más bajas. En condiciones geográficas apropiadas se puede llegar a establecer una relación entre la composición isotópica y la altitud.

- Intercambio isotópico durante la precipitación: en regiones húmedas las gotas de lluvia pueden sufrir un intercambio isotópico con la humedad ambiental si su composición isotópica es diferente. Este efecto solo tiene importancia en lluvias de pequeña intensidad o en los primeros momentos de lluvias intensas y no afecta la precipitación nival.

La relación $\delta^2\text{H} / \delta^{18}\text{O}$ se estudia mediante un gráfico en el que se representan los valores de $\delta^{18}\text{O}$ en función de los correspondientes a $\delta^2\text{H}$. Este análisis se basa en que en una evaporación en condiciones de equilibrio la relación $\delta^2\text{H} / \delta^{18}\text{O} = 8$ de modo que los puntos representativos quedan sobre una línea cuya expresión para el agua de lluvia es $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$, estando δ en ‰ VSMOW. Ésta se denomina Línea Meteorica Mundial (LMM) o Global Meteoric Water Line (GMWL) en sus siglas en inglés. Cuando se produce la evaporación de aguas superficiales, en general no se está en condiciones de equilibrio dinámico y el agua residual se enriquece en $\delta^{18}\text{O}$ más que en deuterio, así, los puntos representativos de la composición isotópica formarán una recta cuya pendiente está entre 4 y 6 en el caso de intensa evaporación.



4.4.1 Aporte de deuterio y oxígeno a las aguas subterráneas

Cuando el terreno es muy permeable, el agua de lluvia pasa muy rápidamente a zonas en las que no actúa la evaporación y la poca agua que queda en la superficie evapora totalmente, de ese modo no existe alteración isotópica importante.

La composición isotópica del agua subterránea en climas templados refleja con una buena aproximación la composición isotópica media de la precipitación de una localidad (Gat y Tzur, 1967). Por otro lado, cuando la precipitación alcanza la superficie del suelo, puede modificarse por evaporación o mezcla de aguas de distinta composición (Gat, 1983) Estas modificaciones dependen de la permeabilidad de los materiales del suelo y del tiempo de permanencia del agua en la superficie.

Si la permeabilidad es alta la infiltración es rápida y la composición isotópica del agua infiltrada puede ser idéntica o similar a la de las precipitaciones, si ocurre lo contrario, se evapora previamente y se infiltra un agua más pesada.

En general, salvo en zonas desérticas, a profundidades mayores a 3 o 4 metros el agua deja de estar sometida a evaporación y su composición isotópica se mantiene constante. También puede ocurrir que se produzcan mezclas con aguas de distintas procedencias, y en el caso de aguas sometidas a altas temperaturas, puede modificarse debido al intercambio isotópico entre el oxígeno del agua y el de las rocas.

En lugares con abundante vegetación el agua es devuelta parcialmente a la atmósfera por evaporación, pero ello no supone un fraccionamiento importante ya que las plantas toman el agua del suelo casi sin alteración isotópica y la evaporan totalmente.

El efecto más importante es la infiltración preferencial en diferentes épocas el año, ya que en otoño-invierno la composición isotópica media del agua recargada es, en general, algo más ligera que la media de la lluvia anual. Esto se acentúa en climas semiáridos, ya que los húmedos pueden permanecer indiferentes a este fenómeno. En zonas muy frías la recarga puede desplazarse al verano produciéndose un enriquecimiento.



En lugares con muy escasa vegetación puede existir una evaporación directa del agua retenida en el suelo dando lugar a un enriquecimiento isotópico que se transmite al acuífero cuando el agua infiltra hasta el mismo. El intercambio con arcillas es en general pequeño y alcanza pronto el estado de equilibrio.

A partir de este análisis se puede identificar el área de recarga. En zonas áridas se pueden encontrar aguas subterráneas más livianas que las de la lluvia en cualquier zona de recarga, esto sugiere que se trata de aguas antiguas infiltradas en una época más lluviosa, por ejemplo, del último periodo pluvio-glacial.

En acuíferos recargados por ríos, lagos, embalses o canales, se produce la influencia de estos, y la composición isotópica puede variar notablemente, en general aumentando los valores de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$.

En ambientes marinos o costeros, donde la precipitación es el primer condensado, los puntos muestreados se distribuyen en el diagrama $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ en un círculo o elipsoide a lo largo de la línea meteórica local. En algunas circunstancias, especialmente en zonas relativamente áridas, la evaporación de las gotas que caen dicta el curso de la línea, la cual recuerda a la Línea de Evaporación de las aguas superficiales (Gat, 2005 op.cit.).

4.4.2 Isótopos estables (deuterio y oxígeno 18) en el acuífero costero de Caborca

Para el muestreo isotópico se seleccionaron 9 sitios distribuidos en toda el área de estudio, tratando de formar una línea perpendicular a la línea de costa por la parte central y otra de cada lado. También fue necesario tomar una muestra de agua de mar, la cual se tomó en la playa La Paloma (Figura 104).

Los resultados de deuterio (^2H) y oxígeno 18 (^{18}O) obtenidos del análisis se muestran en la Tabla 13.



Caracterización Hidrogeoquímica y Situación Actual de la Intrusión Marina en la Porción Costera del Acuífero Caborca, Sonora, México

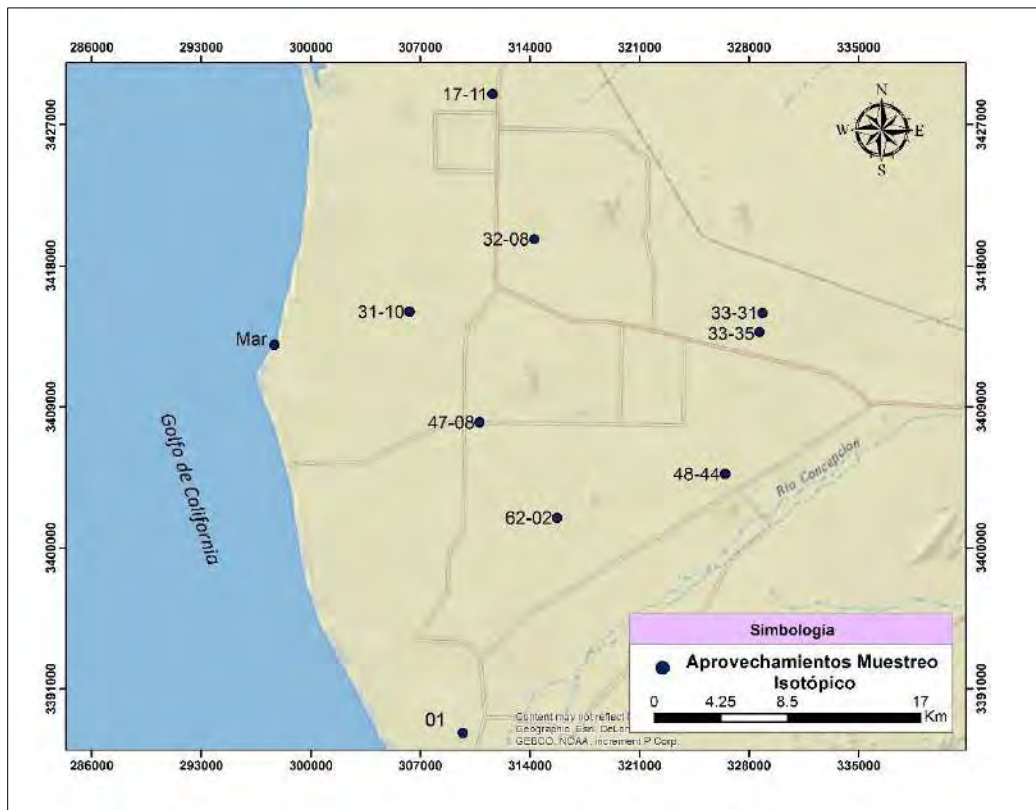


Figura 104. Distribución del muestreo de aguas subterráneas para análisis isotópico en el año 2018.

Tabla 13. Resultados del análisis isotópico.

Muestra	$\delta D H_2O$	$\delta^{18}O H_2O$
33-35	-49.3	-6.86
33-31	-50.0	-7.09
47-08	-52.3	-6.87
32-08	-48.4	-6.77
17-11	-56.9	-7.84
31-10	-48.9	-6.66
Mar	3.2	0.81
01	-44.8	-5.94
62-02	-50.3	-6.88
48-44	-49.3	-6.62



4.5 Geofísica

Entre todos los métodos geofísicos, los métodos resistivos y electromagnéticos son particularmente útiles en la exploración de las aguas subterráneas.

Existe una extensa literatura de las aplicaciones en la investigación hidrogeológica, hablando en particular sobre el Método Transitorio Electromagnético (TEM), (Barrett, B., Heinson, G., Hatch, M. & Telfer, 2006; Danielsen, Auken, Jorgensen, Sondergaard, & Sorensen, 2003; Eddy-Dilek, C.A., Looney, B.B., Hoekstra, P., Harthill, N., Blohm, M., Phillips, 1997; Fitterman, D.V., & Stewart, 1986; Guerin, R., Descloitres, M., Coudrain, A., Talbi, A., & Gallaire, 2001; Lepper, E. & Elmore, 2005; MacNeil, R.E., Sanford, W.E., Connor, C.B., Sandberg, 2007; Meju, Fenning, & Hawkins, 2000; Metwaly, M., Khalil, M., Al-Sayed, E.-S. & Osman, 2006; Richards, Troester, & M.I., 1998; Young, Macumber, Watts, & Al-Toqy, 2004), y para el estudio del problema específico de la intrusión salina (Chen, 1999; Hoekstra, P., Harthill, N., Blohm, M. & Phillips, 1996; Kontar & Ozorovich, 2006; Mills, T., Hoekstra, P., Blohm, M. & Evans, 1988; Nielsen, Jørgensen, & N.O. & Gelting, 2006; Richards, R.T., Troester, J.W. & Martinez, 1995; Young, M.E., De Bruijn, R.G.M. & Bin Salim Al-Ismaily, 1998; Yuhr, L. & Benson, 1995).

El fenómeno de conducción eléctrica se presenta por dos razones principales: la primera y menos importante hidrogeológicamente, es la presencia de minerales de tipo metálico, que hacen que la roca se comporte como un conductor, cuya conductividad aumentará al incrementarse el contenido de éstos y su interconexión. La segunda causa, la más interesante desde el punto de vista hidrogeológico, es la presencia de fluidos (agua) en los poros de las rocas.

Retomando el segundo punto de interés hidrogeológico, de acuerdo con el fenómeno de conducción eléctrica y a la propiedad física de interés que es la resistividad, cuando existe agua relleno de poros, fisuras y fracturas de las rocas, la resistividad global de éstas se modifica dependiendo en los siguientes parámetros:



- La porosidad de la roca.
- La resistividad de la roca con y sin la presencia de agua.
- La salinidad del agua contenida en la roca.
- El grado de saturación.
- La tortuosidad (relación entre la longitud de los poros y la longitud de la roca en estudio).

La Figura 105 muestra los rangos típicos de resistividad de algunos materiales. Podemos notar que el limo y las arcillas tienen valores bajos; estos materiales tienen importancia hidrogeológica puesto que constituyen capas sellos en los cuales se pudieran dividir en zonas acuíferas.

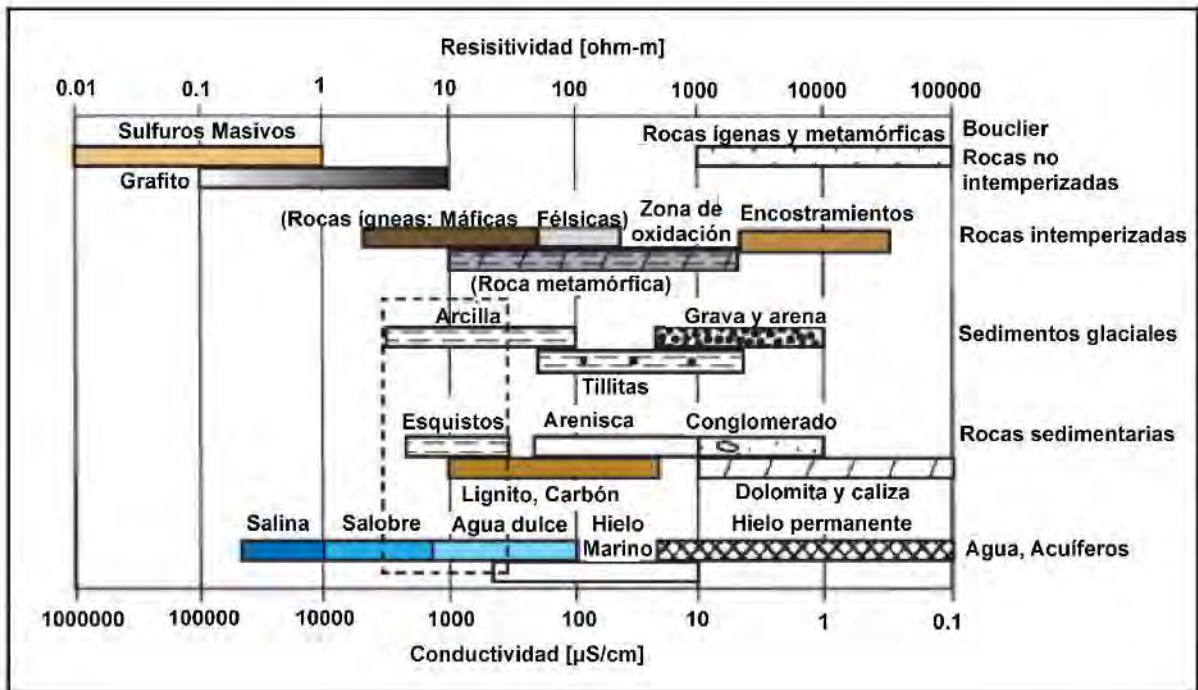


Figura 105. Rangos típicos de resistividades eléctricas de los materiales de la tierra. (Modificado de Palacky, 1987; Perttu, 2008)



Los valores de estos materiales son similares a materiales granulares saturados con agua salina, mostrados en el recuadro con línea discontinua de la Figura 105, esto implica que los valores resistivos pueden llegarse a “enmascarar”, aunque hidrogeológicamente pudiera distinguirse la diferencia entre un material resistivo en este caso arcilla puesto que su conductividad eléctrica será similar a lo largo del tiempo esto es, porque hidrogeológicamente los limos y las arcillas tienen una conductividad hidráulica muy baja, aunque pueden contener una porosidad considerable, su coeficiente de retención es alto, algunos materiales de limos y arcillas pueden estar fracturadas así que pueden tener un coeficiente de almacenamiento considerable, en muchos de los casos estos constituyen capas sellos o lentes que presuricen esa zona y aumente así su drenaje.

Hidrogeológicamente se presentan en suelos no confinados, con transmisividades variables generalmente altas, con porosidades efectivas no homogéneas; en dichas condiciones se presentan muchas heterogeneidades (presencia de paleocauces, horizontes evaporíticos), aunque no se pudiera determinar su procedencia para saber si es de origen continental o si es de origen marino, esto es más evidente cuando se trata de una intrusión en un acuífero carbonatado a un acuífero granular reciente, los cambios en resistividad se controlarían no por su salinidad si no por el cambio en su porosidad (Uri Kafri & Goldman, 2006).

4.5.1 Reinterpretación de Secciones Geofísicas

A partir de los resultados obtenidos del levantamiento de los 39 TEMs realizados por la Universidad de Sonora para la Comisión Nacional del Agua en el año 2007 dentro del acuífero costero de Caborca (Figura 106), se modelaron varios perfiles de resistividad con el objetivo de calibrar el modelo hidrogeoquímico a partir de las unidades resistivas observadas. Se realizaron perfiles con información de pozos tales como gasto, profundidad y parámetros geoquímicos para el año 2010 y 2017 y se hizo una comparación gráfica de las variaciones que se observan junto con las resistividades obtenidas de los TEMs.



Figura 106. Levantamientos de TEMs realizado por la Universidad de Sonora en el área de la costa de Caborca. (Fuente Comisión Nacional del Agua, 2007)

Lo anterior permitió delimitar un total de 4 unidades resistivas, una de las cuales presenta rangos de variación internos, provocados seguramente por la influencia de agua de mala calidad y por la presencia de material granular más grueso, por lo que ésta se dividió en tres sub-unidades (Tabla 14).

Tabla 14. Unidades resistivas interpretadas dentro del área estudiada.

UNIDAD	SIMBOLOGÍA	RESISTIVIDAD		LITOLOGÍA
		DE	HASTA	
U1		Variable		Relleno Superficial
U2		0	2	Intrusión Marina
U3 a		5	20	Arena arcillosa con gravas
U3 b		2	10	Arena arcillosa con gravas saturada con agua salobre
U3 c		20	45	Grava arenosa mal clasificada
U4		> 50		Roca Intrusiva



La unidad resistiva **U1** es la más superficial en la mayoría de los perfiles, presentándose con un espesor muy reducido y con rangos de resistividad muy variables que van desde menores a los 5 Ohm*m hasta mayores de 200 Ohm*m.

La unidad resistiva **U2** presenta un rango entre 1 y 2 Ohm*m, y se interpreta como una zona de intrusión marina; Kafri, (1997) encontró en estudios similares que resistividades por debajo de 2 Ohm*m son solamente indicativas de salinidad en el agua en un rango normal perteneciente al agua de mar, y no pueden ser el resultado de ninguna combinación litológica.

Duque et al., (2008) encontraron rangos resistivos correlacionando con información de pozos, para condiciones similares de materiales saturados con agua de mar con un rango de 0.5 a 5 Ohm*m, en un acuífero costero español.

Goldman et al., (1991), encontraron que los valores de resistividad en acuíferos Israelís intrusionados, variaban con un rango de 1.1 a 2.9 Ohm*m, mientras que los valores mínimos de resistividad para la litología eran aproximadamente de 10 Ohm*m.

Ayolabi et al., (2013) en un estudio reciente en la universidad de Lagos en África, encontraron valores de resistividad para intrusión marina de 0.11 a 5 Ohm*m.

La sub-unidad resistiva **U3-a** presenta una resistividad entre 5 y 20 Ohm*m, interpretándose como un paquete dominado por sedimentos del tamaño de la arcilla a arena fina con un poco de gravas en algunos casos; Duque et al., 2008 mencionan que las variaciones de estas resistividades están influenciadas por el tamaño de grano y el grado de compactación del material (Duque, Calvache, Pedrera, Martín-Rosales, & López-Chicano, 2008).

Para el caso de la sub-unidad **U3-b**, esta hidrofacies cuenta con valores resistivos entre 2 y 10 Ohm*m. Goldman et al., (1991), registraron una variación 2 y 10 Ohm*m, lo que representa las mismas arenas y gravas, pero con una saturación de agua salobre (Goldman, Gilad, Ronen, & Melloul, 1991). Esto representa una zona de transición con una calidad de agua variable. El contraste en la resistividad viene influido en gran medida con el cambio en



la porosidad de una hidrofacies en particular (Kafri, 2013), Goldman et al., (1991), designaron un valor de $4 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$ al agua salobre.

En cuanto a la sub-unidad **U3-c**, ésta se trata de arena y grava de gran tamaño con resistividad variable desde 20 hasta $45 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$. Esta unidad se presenta en forma de “lentes” dentro de la unidad **U3-a**, los cuales son interpretados como probables paleocauces sepultados.

Finalmente, la unidad **U4** corresponde a resistividades mayores de $50 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$ que localmente aparecen en algunos perfiles, y representan la secuencia rocosa de los afloramientos que se encuentran cerca del área. Se tomó como una condición de borde impermeable dicha unidad.

Para propósitos de presentación, en el presente apartado se describen los dos perfiles de resistividad más representativos del subsuelo del área estudiada.

Perfil de Resistividad 15

Este perfil fue construido y reinterpretado a partir del análisis de 4 TEMs desarrollados en la campaña (CB-03, CB-04, CB-38 y CB-32); tiene una orientación general norte-sur y una longitud aproximada de 19 km (Figura 107).

La unidad U1 se tiene de manera continua casi a todo lo largo de la porción más superficial del perfil, con valores de resistividad entre 36 y $84 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$ y un espesor máximo de 25 m.

De manera general, la unidad resistiva que caracteriza el relleno sedimentario en este perfil es la U3-a, representando arenas arcillosa y gravas cuyas resistividades están entre 6 y $22 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$, identificada en todos los TEM, principalmente en la porción central, y con el espesor máximo de 100 m en este perfil.

La unidad resistiva U3-b ($4\text{-}9 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$) está dominando el subsuelo a partir de una elevación de -20 msnm. Esta porción se interpreta como una secuencia de arena arcillosa con



gravas con resistividades bajas que pueden corresponder a la zona de interfase de agua salobre, esta unidad está dentro de la unidad U3-a.

La unidad U4 se identificó en 2 de los TEMs, a partir de la elevación de -20 msnm, con resistividades entre 46 y 191 Ohm*m y un espesor de casi 120 m. Probablemente esta porción corresponda a las rocas intrusivas de la Sierra El Álamo que se localiza al SE del perfil. En la Figura 108 se puede observar como la roca funciona como una barrera impermeable que frena la penetración del agua salobre.



Figura 107. Perfil de Resistividad 15.

En la Figura 108 se puede observar la profundidad, el gasto y la clasificación del agua (dulce o salobre) la cual se determinó por medio de los parámetros geoquímicos obtenidos en el año 2010. En la Figura 109 se puede observar esa serie de datos para el año 2017.

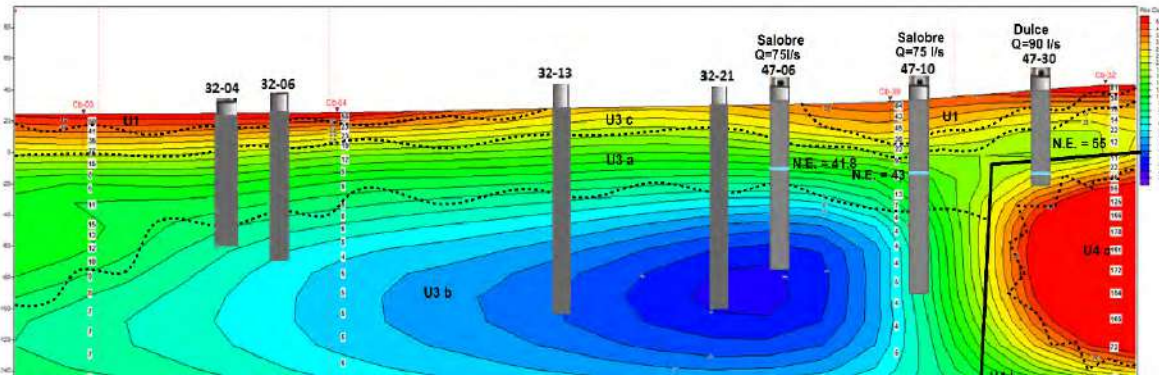


Figura 108. Perfil de Resistividad 15 con valores en pozos del año 2010.

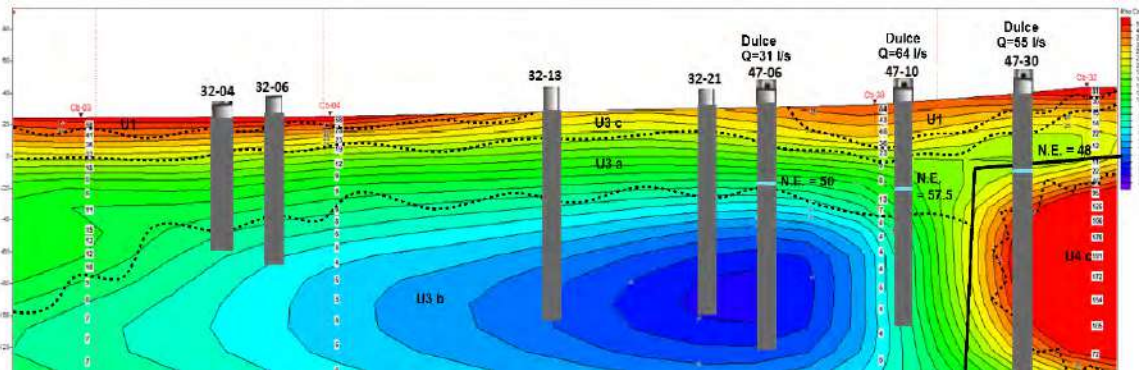


Figura 109. Perfil de Resistividad 15 con valores en pozos del año 2017.

Perfil de Resistividad 16

Este perfil fue construido y reinterpretado a partir del análisis de 8 TEMs desarrollados en la campaña (CB-40, CB-03, CB-04, CB-38, CB-22, CB-09, CB-24 y CB-28); tiene una orientación general norte-sur y una longitud aproximada de 41 km (Figura 110) y abarca de extremo a extremo en línea paralela a la costa el área de estudio.

La unidad U1 se tiene de manera continua casi a todo lo largo de la porción más superficial del perfil, con valores de resistividad entre 34 y 153 Ohm*m y un espesor máximo de 30 m.



De manera general, la unidad resistiva que caracteriza el relleno sedimentario en este perfil es la U3-a, representando arenas arcillosa y gravas cuyas resistividades están entre 6 y 19 Ohm*m, identificada en todos los TEM, principalmente en la porción central, y con el espesor máximo de casi 140 m en este perfil.

La unidad resistiva U3-b (3-10 Ohm*m) domina el subsuelo a partir de una elevación de -20 msnm. Esta porción se interpreta como una secuencia de arena arcillosa con grava con resistividades bajas que pueden corresponder a la zona de interfase de agua salobre, esta unidad está dentro de la unidad U3-a.

Dentro de la unidad resistiva U3-b se encuentra la unidad U2 que presenta resistividades de 2 Ohm*m y presenta un espesor máximo de 20 m. Esta unidad representa la probable cuña de intrusión salina.



Figura 110. Perfil de Resistividad 16.



En la Figura 111 se puede observar la profundidad, el gasto y la clasificación del agua (dulce o salobre) la cual se determinó por medio de los parámetros geoquímicos obtenidos en el año 2010. En la Figura 112 se puede observar esa serie de datos para el año 2017.

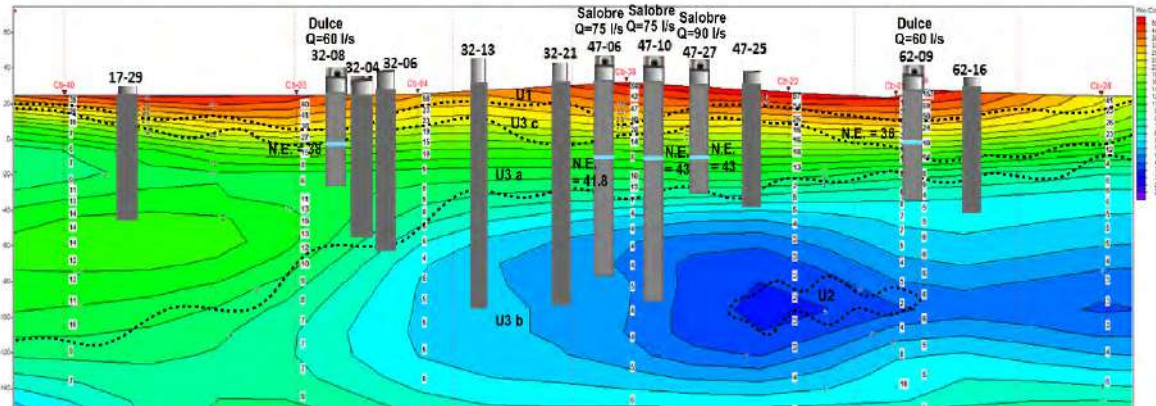


Figura 111. Perfil de Resistividad 16 con valores en pozos del año 2010.

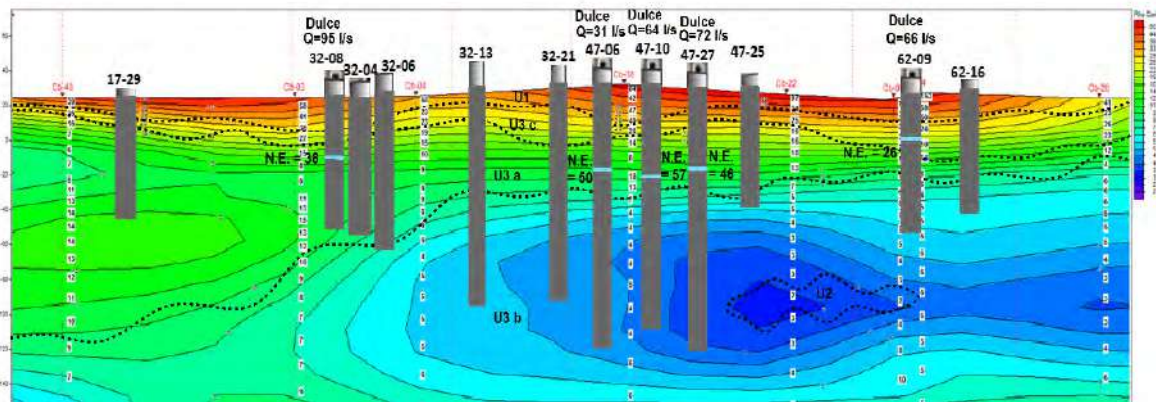


Figura 112. Perfil de Resistividad 16 con valores en pozos del año 2017.



V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Calcio

Según los valores típicos de agua dulce y agua de mar señalados por Custodio y Llamas, en el año 1981 ningún pozo se puede asociar a los valores típicos de agua de mar. En cambio, en el 2010 el pozo 49 se puede asociar a los valores típicos de agua de mar y en el 2017 el pozo 62-08 también alcanza esos valores.

Hay varios pozos que se encuentran por arriba de los valores típicos de agua dulce sin llegar a los valores típicos de agua de mar. Estas muestras se pueden asociar a una zona de mezcla de agua subterránea dulce con agua de mar conocida como zona de interfase. En el año 2010 los pozos 74 y 91 se pueden asociar a la zona de interfase y en el año 2017, los pozos 12 y 27. En el año 1981 todos los valores de calcio son típicos de agua dulce.

En 1981 las mayores concentraciones de calcio se localizan en la parte norte del área, mientras que en el año 2010 las mayores concentraciones se localizan en la parte sur del área y en el 2017 en la parte norte y sur del área principalmente

Las mayores concentraciones de calcio se registraron en el año 2017, seguido por el 2010 y finalmente el año 1981.

El principal aporte de calcio para esta zona probablemente sea el contacto del agua subterránea dulce con el calcio proveniente del agua marina.

5.2 Magnesio

Según los valores típicos de agua dulce y agua de mar señalados por Custodio y Llamas, ningún pozo se puede asociar a los valores típicos de agua de mar. Sin embargo, hay varios pozos que se encuentran por arriba de los valores típicos de agua dulce sin llegar a los valores típicos de agua de mar. Estas muestras se pueden asociar a la zona de interfase.



En el año 1981 los pozos 12 y 27 se pueden asociar a la zona de interfase. En este año las mayores concentraciones de magnesio se localizan desde el centro al norte del área. Para el año 2010 solo el pozo 14 se puede asociar a la zona de interfase y en el año 2017 solo el pozo 17-08.

El magnesio en el área de estudio proviene posiblemente de la disolución de rocas carbonatadas de la región.

5.3 Sodio

Según los valores típicos de agua dulce y agua de mar señalados por Custodio y Llamas, ningún pozo se puede asociar a los valores típicos de agua de mar. Sin embargo, hay varios pozos que se encuentran dentro de un rango de valores que se pueden asociar a la zona de interfase.

En el año 1981 los pozos 5, 9, 12, 19, 27 y 43 se pueden asociar a la zona de interfase. En este año se encuentran las muestras de mayor concentración en el norte y centro del área principalmente

Para el año 2010 los pozos 14, 18, 21, 22, 28, 29, 49, 48, 74, y 91 se pueden asociar a la zona de interfase. En este año se puede observar que las muestras con mayor concentración de sodio se encuentran localizadas al norte y al sur de la región principalmente.

En el año 2017 los pozos que se pueden asociar a la zona de interfase son el 17-08, 62-05, 62-08, 47-06 y 61-07, encontrándose las mayores concentraciones de sodio de la parte del centro al sur del área.

El año que presentó las mayores concentraciones de sodio fue el 2010, seguido por el año 2017 y finalmente el año 1981.

El sodio en el área puede provenir de la disolución de las rocas carbonatadas de la región y también se puede asociar al fenómeno de mezcla del agua subterránea del acuífero con el agua del golfo de California.



5.4 Potasio

Según los valores típicos de agua dulce y agua salada señalados por Custodio y Llamas, en el año 1981 y 2010 todos los pozos pertenecen a los valores típicos de agua dulce.

En el año 2017 solo el pozo 17-08 se puede asociar a la zona de interfase ya que es el único que se encuentra por arriba de los valores típicos de agua dulce y ningún pozo alcanza los valores típicos de agua de mar en este año. Las mayores concentraciones se localizan en la parte norte y sur del área principalmente

5.5 Bicarbonatos

El contenido de bicarbonato en el área de estudio probablemente se debe a que, en la costa de Caborca en general, las rocas más antiguas estudiadas de la región y que probablemente constituyen el basamento, son una serie de calizas, dolomitas y conglomerados calcáreos. Los carbonatos en los sedimentos al reaccionar con el óxido carbónico libre del agua forman el bicarbonato. El contenido de bicarbonatos es mayor que el de carbonatos debido a que el carbonato solo puede superar al bicarbonato cuando existe un pH de 10 o más (Logan, 1965). Otro factor que puede ser influyente, además de los sedimentos, es el clima árido ya que el bicarbonato precipita a temperaturas elevadas.

El año donde se encontraron las concentraciones más bajas de bicarbonatos fue el 2010, seguido por el 2017 y finalmente 1981.

5.6 Cloruros

Según los valores típicos de agua dulce y agua salada señalados por Custodio y Llamas, en ningún año se puede asociar algún pozo con valores típicos de agua de mar. Sin



embargo, hay varios pozos que se encuentran por arriba de los valores típicos de agua dulce y estas muestras se pueden asociar a una zona de mezcla de agua subterránea dulce con agua de mar conocida como zona de interfase.

En el año 1981 los pozos que se pueden asociar a la zona de interfase son el 5, 12, 27 y 43. Las concentraciones más altas de se encuentran principalmente en la parte norte del área. En este año se encontraron las concentraciones más bajas de cloruros en comparación con los años 2010 y 2017.

Para el año 2010 los pozos 14, 21, 22, 28, 49, 48, 74, 91 y 87 se pueden asociar a la zona de interfase. Estos pozos se encuentran en la parte norte y desde el centro hacia el sur del área de estudio. En este año se encontraron las concentraciones más altas de cloruros con respecto a los otros años.

En el año 2017 los pozos que se pueden asociar a la zona de interfase son el 17-08, 31-03, 32-23, 62-05, 62-08, 47-03, 47-06, 47-27 y 61-07. Estos pozos se encuentran localizados principalmente en la zona sur del área de estudio. En este año las concentraciones de cloruros son altas, pero un poco menos elevadas que en el 2010.

5.7 Bromuros

Se analizaron las muestras de los pozos que presentaban mayor conductividad eléctrica y se determinó la cantidad de bromuros para confirmar la procedencia de la salinidad. El bromuro, al ser un ion abundante en el agua de mar, es un buen indicador de la procedencia del agua.

Con los resultados obtenidos se confirma que efectivamente los pozos que presentan mayor salinidad son los que presentan mayor contenido de bromuros, y estos pozos son los que se encuentran más cerca del Golfo de California. Se puede observar que conforme el sitio se aleja del golfo, el contenido de bromuros va disminuyendo.



5.8 Nitratos

Conforme a los resultados de nitratos, se puede observar una anomalía en el año 2010, al presentar concentraciones mucho más elevadas que en 1981 y 2017.

En 1981 solo la muestra identificada como 12 presenta una concentración por encima del límite máximo permisible establecido en la NOM-127-SSA1-1994, en cambio en el año 2010 solo las muestras 18, 28 y 48 se encuentran dentro del límite máximo permisible según la NOM. En el año 2017, todas las muestras tomadas presentan concentraciones que se encuentran dentro del límite máximo permisible.

Debido a que el área de estudio es una zona agrícola, las altas concentraciones de nitratos en el año 2010 posiblemente sean consecuencia del uso de fertilizantes nitrogenados utilizados en las siembras.

5.9 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica es un parámetro que puede ser útil para delimitar las zonas de agua dulce, agua salobre y agua de mar.

En el año 1981 se localiza al norte del área una franja de agua con alta conductividad con dirección NW. Las conductividades en ese año no alcanzan a llegar al valor típico de agua de mar, sin embargo, tres aprovechamientos entran dentro de la categoría de agua salobre.

En el año 2010 se puede observar en el norte y sur del área, dos franjas con valores típicos de agua salobre provenientes del golfo de california, siendo más pronunciada la que se encuentra en el sur.



En el año 2017 continúa el patrón observado en el año 2010 donde al norte se encuentra una zona de alta conductividad y al sur se puede observar una franja de agua con conductividad típica de agua salobre que proviene del golfo de California.

Los valores altos de conductividad, al ser puntuales, se pueden asociar a intrusión de agua salada ocasionada por el sobrebombeo de los pozos agrícolas que se localizan en la costa de Caborca.

5.10 Sólidos totales disueltos

Los sólidos totales disueltos, al igual que la conductividad eléctrica y al estar directamente relacionados con ella, pueden servir para delimitar la zona de agua dulce, salobre y salada en un acuífero.

En el año 1981 las concentraciones más altas de sólidos totales disueltos se localizaban en los pozos 5, 12 y 27, al norte del área. Estos aprovechamientos se encuentran ubicados detrás de una franja de pozos que presentan concentraciones de sólidos totales disueltos típicas de agua dulce (pozos 115, 9, 19 y 21). Esto quiere decir que probablemente los pozos 5, 12 y 27 se encontraban a una mayor profundidad y extraían una mayor cantidad de agua que los pozos que tienen enfrente que están más cercanos al golfo de California (pozos 115, 9, 19 y 21).

En los años 2010 y 2017 la mayor concentración de sólidos totales disueltos se encuentra al norte y al sur del área principalmente. Esas concentraciones altas son típicas de aguas salobres. Las concentraciones altas del norte en estos años, al contrario que en el año 1981, se encuentran más cercanas al golfo de California, rodeadas por concentraciones típicas de agua dulce donde se tenía concentraciones de agua salada en 1981. Esto quiere decir que probablemente esos pozos que estaban generando las concentraciones altas de sólidos totales disueltos en el año 1981, pero que actualmente no bombean. Esto también ayuda a confirmar



que la salinización que se presenta en los pozos ubicados en el área es causada por el sobrebombeo de ciertos pozos agrícolas que se encuentran en la costa de Caborca.

No se tiene registro de alguna concentración de sólidos totales disueltos típica de agua de mar en ninguno de los tres años (1981, 2010 y 2017).

5.11 Diagramas hidroquímicos

Utilizando los diagramas de Piper y de Stiff (Figuras 98-103) se puede interpretar lo siguiente:

En el año 1981, hacia el norte del área de estudio predominaba la familia de agua clorurada-sódica y hacia el sur la bicarbonatada-sódica. Las aguas cloruradas presentan como anión principal el cloruro, el cual, dada la solubilidad de sus sales, este pasa rápidamente a la fase acuosa y puede alcanzar concentraciones muy altas. Una fuente importante del ion cloruro es la lluvia en zonas próximas a la costa y puesto que el cloruro es el principal compuesto disuelto en el agua de mar, puede estar relacionado con intrusión marina. La evolución química del agua dependerá de los minerales con los que entre en contacto y de la duración de dicho contacto. Como norma general, a mayor tiempo de permanencia en el terreno, mayor será la salinidad del agua. Aunque las reacciones y procesos químicos que se desarrollan son muy variados, como norma general, se observa que las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo son generalmente bicarbonatadas. En el diagrama de Piper se puede apreciar una relación de salinidad por presencia de concentraciones iónicas en el agua subterránea del acuífero, donde se ve una posible incipiente pero consistente penetración de agua marina.

Para el año 2010, se puede apreciar que hacia el norte sigue predominando la familia clorurada-sódica, mientras que en el centro y sur la familia bicarbonatada-sódica evolucionó a clorurada-cálcica-sódica y clorurada-cálcica. En este año se puede apreciar que la familia de agua clorurada cálcica sugiere que podría haber un fenómeno de intrusión marina prolongado en el tiempo y coexistente con otros procesos de intercambio iónico del sodio



disuelto por el calcio cedido del terreno y proveniente del agua de mar. En el diagrama de Piper se aprecia la condición de un acuífero probablemente intrusionado por agua marina, afectando al agua subterránea en las posiciones de agua dulce, formando una amplia zona de interfase y un frente de intrusión marino.

En el año 2017 se puede apreciar que la familia clorurada-cálcica-sódica ya no se encuentra en tanta cantidad como en el año 2010, en cambio abundan las familias clorurada-cálcica y clorurada-sódica. En este año fue posible tomar muestras que representan a la familia Bicarbonatada- cálcica. Según el esquema trazado por Domenico (1972, citado en Freeze y Cherry, 1979) se puede definir que las aguas bicarbonatadas y poco salinas corresponden a una zona superior, con flujo activo, generalmente con recorridos cortos y tiempos de permanencia de años o decenas de años. En cambio, las aguas cloruradas y salinas corresponden a una zona inferior con flujo muy lento, largos recorridos y tiempo de miles a millones de años. Por lo tanto, es posible definir la zona de recarga del acuífero básicamente en la parte norte baja y sur alta, en los pozos más alejados de la línea de costa. En el diagrama de Piper (Figura 100) se puede ver que la condición actual muestra una probable retracción de la intrusión marina a la fecha (2010-2017), reaparece agua dulce continental cuya posición se había perdido en el año 2010.

5.12 Isótopos estables

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis isotópico, se obtuvieron datos que permiten clasificar a estos aprovechamientos de acuerdo con su relación de agua de recarga o de zona de interfase.

Los resultados de isótopos estables oscilan entre -44.8 y -56.9 de $\delta D\text{‰}$ y entre -5.94 y -7.84 de $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ y se graficaron de acuerdo con la línea meteórica mundial propuesta por el VSMOW.



Conforme a la línea meteórica mundial propuesta por VSMOW se ubicaron los valores de isótopos estables obtenidos en las muestras de agua, resultando tres grupos de agua (Figura 113).

- **Agua de mezcla:** Se caracteriza por su alto fraccionamiento isotópico, es decir proviene de agua precipitada que se generó en zonas lejanas a la costa, probablemente zonas más altas con menor temperatura. Los aprovechamientos que forman este grupo son el 17-11 y 47-08.
- **Agua típica del valle:** Los valores de esta agua tienen mayor peso isotópico y provienen de la mezcla del agua del acuífero regional con el agua que se infiltra de manera vertical (agua que antes de infiltrarse se enriquece isotópicamente debido a la evaporación que sufre en la superficie). Este grupo está conformado por los aprovechamientos 33-35, 33-31, 32-08, 31-10, 62-02 y 48-44.
- **Zona de interfase:** Dado que el acuífero costero de Caborca tiene una interacción con Golfo de California, se genera un proceso de mezcla de agua dulce con agua salada, que provoca enriquecimiento isotópico dadas las características del agua de mar. El aprovechamiento que presenta esta caracterización isotópica es el 01.

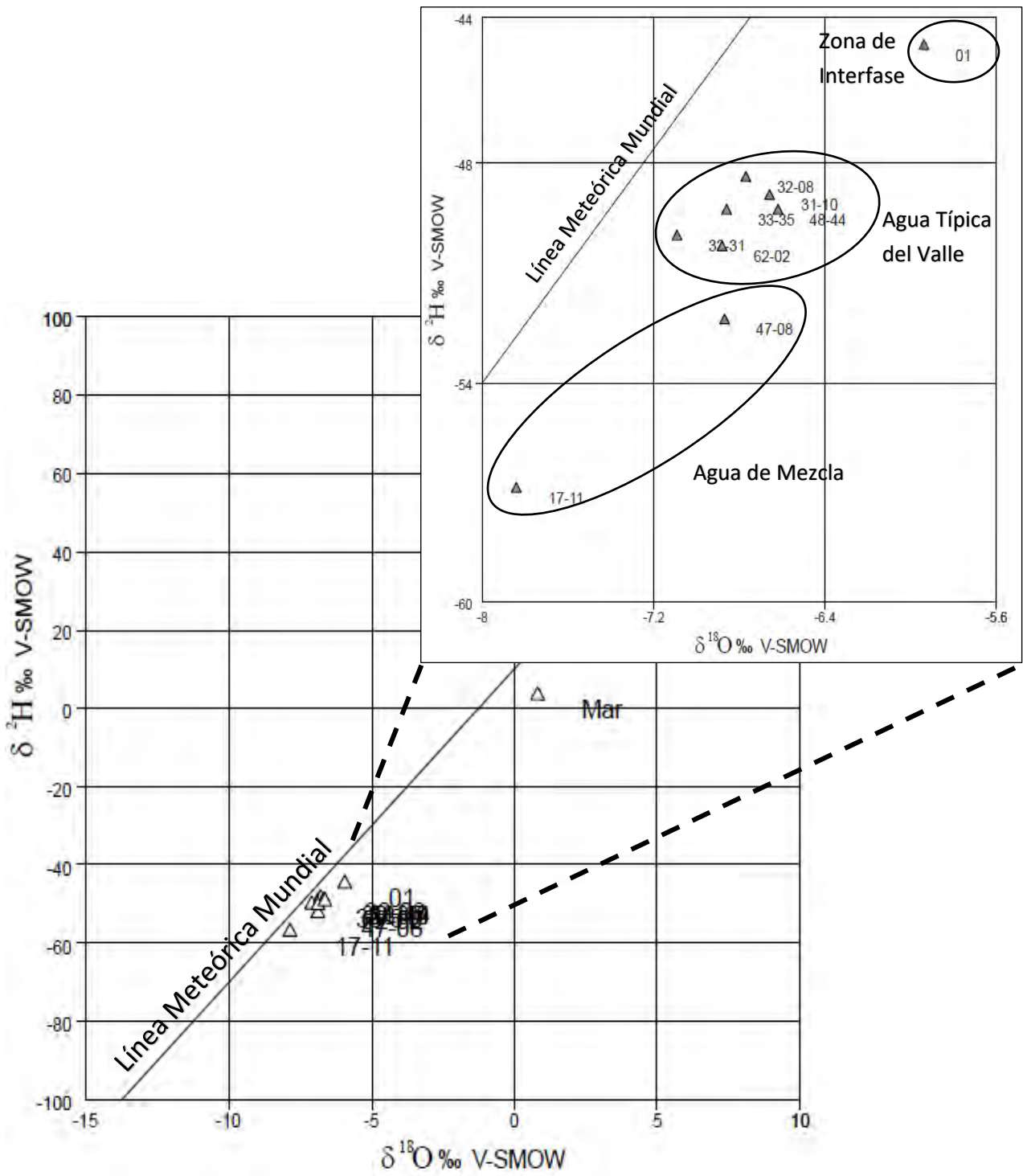


Figura 113. Zonificación de aguas a partir del contenido de ^2H y ^{18}O .



5.13 Reinterpretación de secciones geofísicas

Con la reinterpretación de los diferentes perfiles formados por los sondeos realizados en la costa de Caborca, la información geoquímica y los datos de construcción y operación de los pozos localizados dentro de los perfiles se pudo determinar que, en la mayoría de los casos, el hecho de disminuir la cantidad de agua que se extrae del pozo tuvo un impacto positivo en cuanto a la calidad del agua. Esto ayuda a confirmar que la salinización de los pozos ubicados en el área de estudio está directamente influenciada por el sobrebombeo que tienen los pozos, más que por procesos naturales.

La reinterpretación de los perfiles también fue muy útil para saber cómo está conformado el medio acuífero y las condiciones de barreras impermeables que existen.

En la Figura 114 se puede observar gráficamente la comparación entre pozos en los años 2010 y 2017 en cuanto a gasto, nivel estático y salinidad.

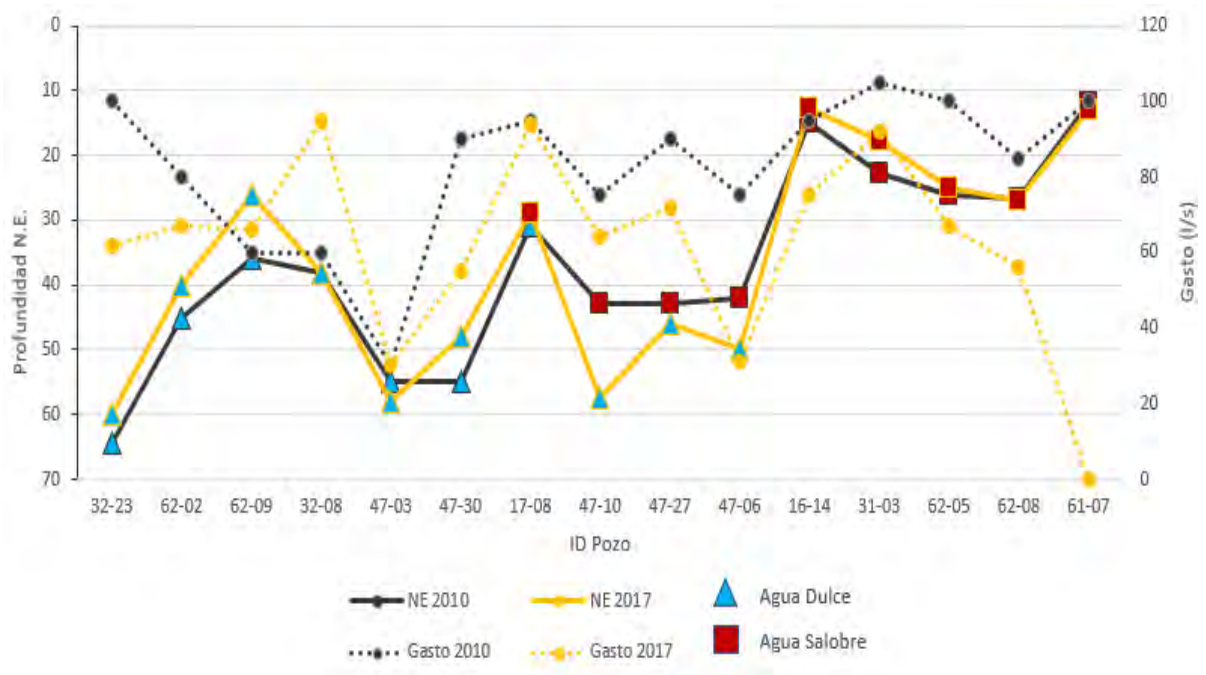


Figura 114. Comparación de gasto, nivel estático y calidad del agua en los pozos para los años 2010 y 2017.



VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

En la porción costera del acuífero administrativo de Caborca es donde se tienen mayores extensiones agrícolas y por ende existe más extracción del agua subterránea. Se analizó la evolución piezométrica de la subcuenca, se trabajó con datos de la profundidad al nivel estático de diferentes años y se encontró que los niveles han sufrido grandes cambios desde el inicio de la extracción del agua subterránea, sin embargo, en los últimos años (2014-2015) la piezometría indica una aparente ligera recuperación, mientras que entre los años 2003 y 2014 se observa el mayor abatimiento del acuífero.

La comparación de la química del agua en los años 1981, 2010 y 2014 indica que la composición del agua ha estado cambiando constantemente ya que en ninguno de los tres años se muestra un patrón o una estabilidad en cuanto la composición del agua. La mayoría de los pozos existentes en el área son de uso agrícola, aunque también se encuentran aprovechamientos para uso pecuario y doméstico.

Con base en la comparación de todos los resultados analizados, tanto geoquímicos como geofísicos, se realizaron planos de las clasificaciones de agua para cada año (1981, 2010 y 2017) donde se representan zonas con agua típica del acuífero, zona de interfase y zona de probable intrusión marina. Además, con flechas amarillas se señalan las posibles entradas de agua salada (Figuras 115, 116 y 117).

Los resultados de la química muestran que la familia de agua clorurada-sódica es la que presenta la mayor concentración de iones, sobre todo en las muestras que se encuentran más cercanas a la costa, lo cual indica que probablemente el mayor aporte de iones provenga de la mezcla con el agua de mar. En cambio, las aguas tipo bicarbonatada sódica son las que presentan la menor concentración de iones lo cual indica que son aguas de reciente infiltración y no han estado mucho tiempo en contacto con el medio geológico.



Caracterización Hidrogeoquímica y Situación Actual de la Intrusión Marina en la Porción Costera del Acuífero Caborca, Sonora, México

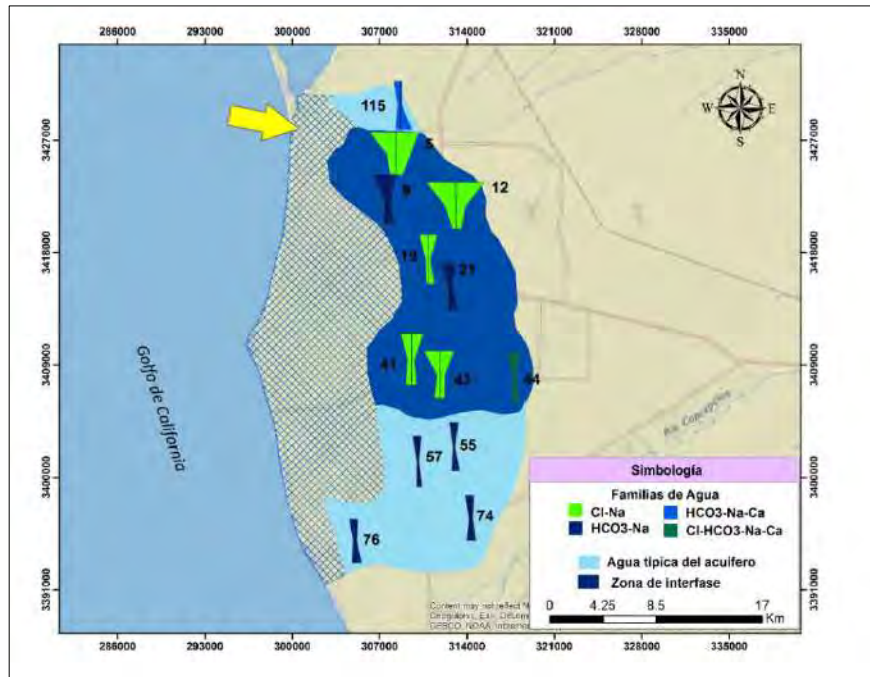


Figura 115. Distribución de los tipos de agua encontrados en el acuífero de la Costa de Caborca en el año 1981.

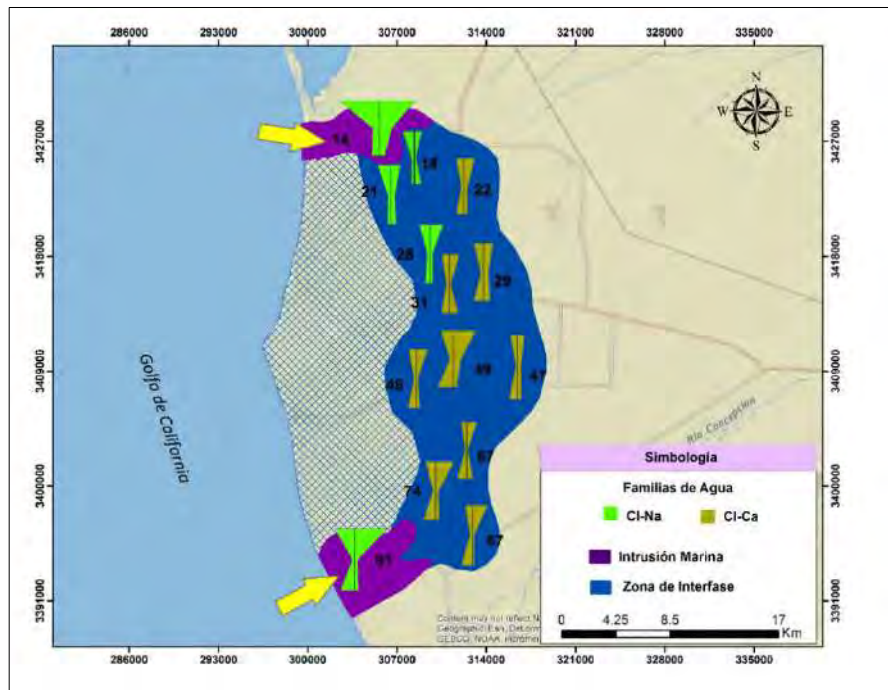


Figura 116. Distribución de los tipos de agua encontrados en el acuífero de la Costa de Caborca en el año 2010.



Caracterización Hidrogeoquímica y Situación Actual de la Intrusión Marina en la Porción Costera del Acuífero Caborca, Sonora, México

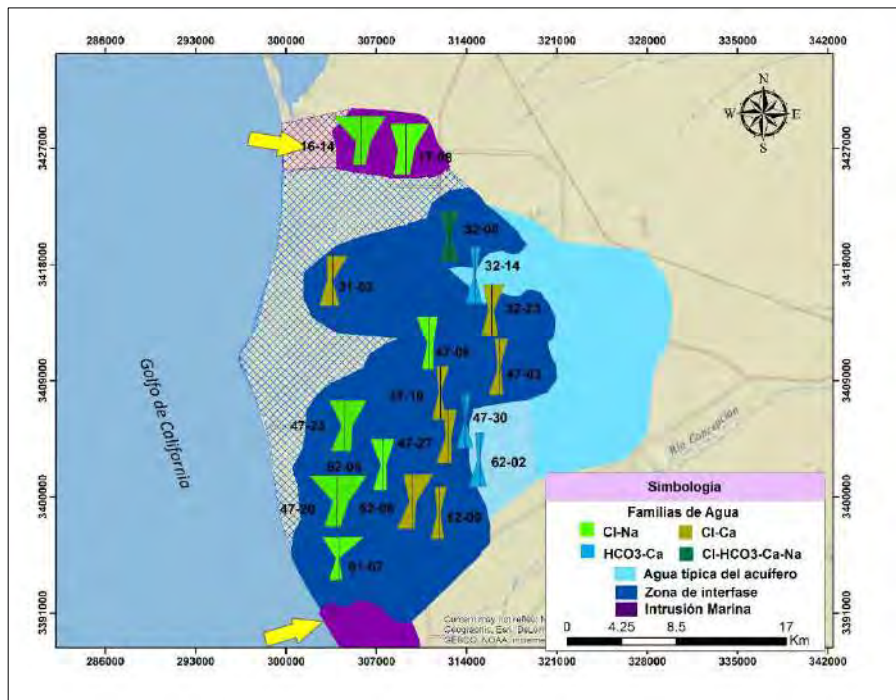


Figura 117. Distribución de los tipos de agua encontrados en el acuífero de la Costa de Caborca en el año 2017.

Hay sitios puntuales en los cuales se puede encontrar un agua con mayor salinidad, lo cual nos confirma, con base en los datos de extracción de agua de los pozos, que los pozos que más bombean son los que presentan agua con menor calidad. Esto lleva a la conclusión de que el deterioro de la calidad del agua ha sido provocado por el sobrebombeo de los pozos.

Un claro ejemplo se puede observar en las Figuras 118 y 119, donde con base en los niveles piezométricos, gastos, datos hidrogeoquímicos y sondeos electromagnéticos (perfil 16 específicamente) se ilustra gráficamente el estado del acuífero en los años 2010 y 2017.

Los datos obtenidos con el muestreo geoquímico no indican que haya una intrusión marina como tal. Los resultados de los pozos que se encuentran más salinos arrojan valores de un agua típica de una zona de interfase, sin embargo, con los resultados de la reinterpretación de los perfiles geofísicos se puede ver que si existe una posible penetración



de agua marina; sin embargo, esto no es posible confirmar ya que no se pudo llegar a tomar muestras de agua debido a que la mayoría de los pozos no llegan a esa profundidad.

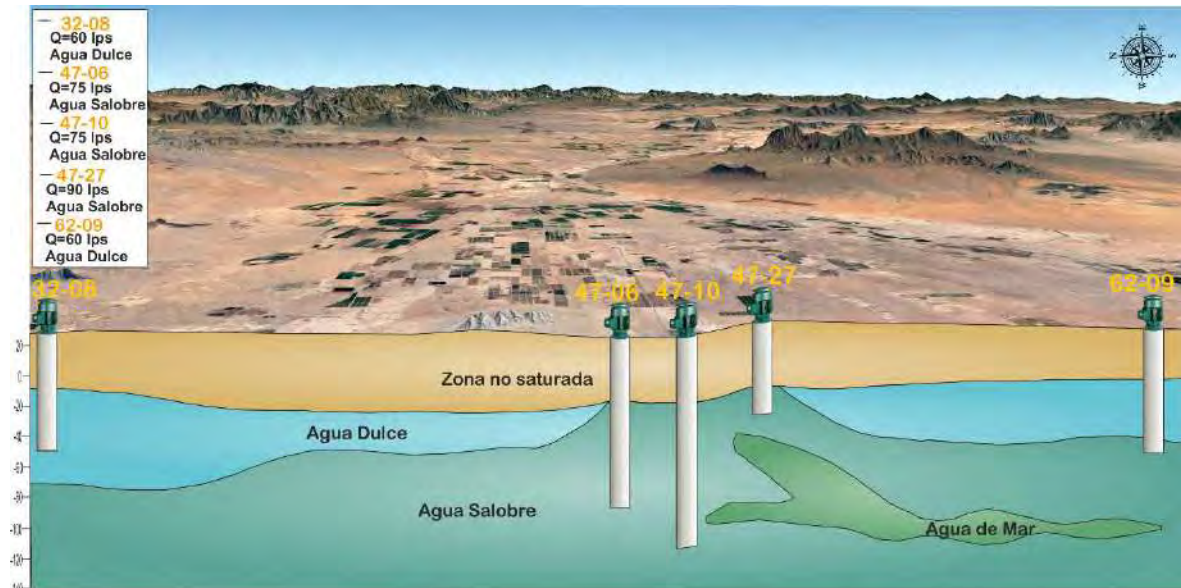


Figura 118. Perfil hidrogeoquímico del acuífero de la costa de Caborca para el año 2010.

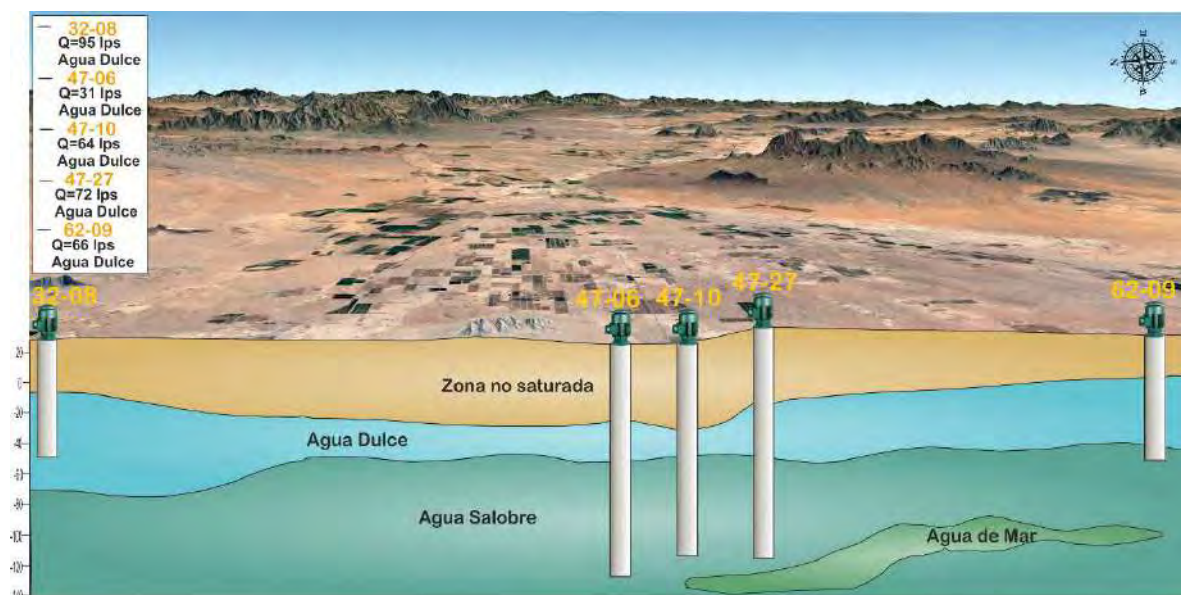


Figura 119. Perfil hidrogeoquímico del acuífero de la costa de Caborca para el año 2017.



6.2 Recomendaciones

1. Se recomienda continuar con el monitoreo piezométrico e hidrogeoquímico tratando de tomar muestras que sean del mismo periodo de tiempo para poder hacer un seguimiento con mayor precisión del comportamiento del acuífero.
2. Se recomienda cancelar concesiones que corresponden a captaciones que se encuentren abandonadas, para tener mejor información a la hora de calcular la disponibilidad del acuífero.
3. Se recomienda tomar en cuenta el título de concesión otorgado al Distrito de Riego 037 a la hora de hacer los cálculos administrativos del acuífero, ya que la información proporcionada no toma en cuenta este título que contiene una gran cantidad de pozos de elevada extracción y la disponibilidad de aguas subterráneas no es precisa.
4. El valor del volumen de extracción de los aprovechamientos es clave para determinar el avance de intrusión marina, por lo que debería recalcularse con mayor precisión para una extracción que mantenga la calidad óptima del agua subterránea.
5. Se recomienda hacer una nueva campaña de sondeos TEM's para poder hacer una modelación de la geometría de la cuña de intrusión salina actualizada.



VII. REFERENCIAS CITADAS

- Alcalá, F., & Custodio, E., 2005, *Groundwater and saline intrusion*. Retrieved from https://books.google.com/books?id=wk1_ipJZTjUC&pgis=1
- Allow, K. A., 2011, *The use of injection wells and a subsurface barrier in the prevention of seawater intrusion: a modelling approach*. Arabian Journal of Geosciences, 5(5), 1151–1161. <http://doi.org/10.1007/s12517-011-0304-9>
- Antonio Godina González, 2018, *Aumenta la producción de espárrago en México*, de El Economista Sitio web: <https://www.economista.com.mx/opinion/Aumenta-la-produccion-de-esparrago-en-Mexico-II-20180111-0082.html>
- Archie, G., 1942, *The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics*. Transactions of the AIME. Retrieved from <https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-942054-G>
- AVI-CT95-73, A., 2000, *Salt water intrusion management in coastal aquifers*. EC Initiative AVICENNA, European Commission, 238–254.
- Arreguín Cortés Felipe, 2011, *El Agua Subterránea en México*. Comisión Nacional del Agua Sitio web: http://sociedadgeologica.org.mx/pdfs/12_AguaSubterraneaMexico1.pdf
- Arturo Ojeda de la Cruz, 1994, *Explotación futura del acuífero del valle de Caborca, Sonora*. Monterrey, Nuevo Leon: Universidad Autónoma de Nuevo Leon.
- Azzaz H., Cherchali M., Meddi M., Houha B., Puig J. M., Achachi A., 2008, *The use of environmental isotopic and hydrochemical tracers to characterize the functioning of karst systems in the Tlemcen Mountains, northwest Algeria*. Hydrogeology Journal 16: 531-546.
- Barrett B., Heinson G., Hatch M. and Telfer A, 2006, *River sediment salt-load detection using a water-borne transient electromagnetic system*. Journal of Applied Geophysics 58, 29-44.



- Campos, A. D. F., 1996, *Procesos del ciclo hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
- Carol E., Kruse E., Mas-Pla J, 2009, *Hydrochemical and isotopical evidence of groundwater salinization in coastal plain of Samborombón Bay, Argentina*. *Journal of Hydrology*. 365. 335-345 p.
- Castillo Gurrola José, 2003, *Tecnología de la intrusión de mar en acuíferos costeros: países mediterráneos*. Alicante, España: Juan Antonio López Geta, José Antonio de la Orden, Juan de Dios Gómez, Gerardo Ramos, Miguel Mejías, Luis Rodríguez.
- Chen, C. -S., 1999, *TEM Investigations of Aquifers in the Southwest Coast of Taiwan*. *Ground Water*, 37(6), 890–896.
- CJ, H., 1999, *Transient well flow in vertically heterogeneous aquifers*. *J Hydrol*, 225, 1–18.
- Comisión Nacional del Agua, 2007, *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero 2605 Caborca, estado de Sonora*. 2016, de CONAGUA Sitio web: www.conagua.gob.mx/OCNO07/Noticias/2605%20Caborca.pdf
- Comisión Nacional del Agua, 2015, *Atlas del Agua en México 2015*. De CONAGUA Sitio web: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/ATLAS2015.pdf>
- Cooper Jr. , H.H. , Jacob , C. E. , 1946 , *A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history*. *Trans. Am. Geophys. Union*, 27, 526–534.
- Custodio, E. - Llamas, M.R., 1996, *Hidrología Subterránea*. España: Editorial Omega.
- Danielsen, J. E., Auken, E., Jorgensen, F., Sondergaard, V., & Sorensen, K. I., 2003, *The application of the transient electromagnetic method in hydrogeophysical surveys*. *Journal of Applied Geophysics*, 53(4), 181–198.
- Dansgaard W., 1964, *Stable isotopes in precipitation*. *Tellus Series B-Chemical and Physical*



Meteorology 16: 436-468.

Dapeña Cristina , Panarello Hector , 2004 , *Composición isotópica de la lluvia de Buenos Aires*. Su importancia para el estudio de los sistemas hidrológicos Pampeanos. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, 4, 17-25.

Dirección General de Investigación en Política y Economía Ambiental, 2009, *Análisis del Subsidio a la Tarifa 09*. De Instituto Nacional de Ecología Sitio web: http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgipea/analisis_subsidio_tarifa_09.pdf

De Louw , P. G. B. , Vandenhede , A. , Werner , A. D. , & Oude Essink , G. H. P. , 2013, *Natural saltwater upconing by preferential groundwater discharge through boils*. *Journal of Hydrology*, 490, 74–87. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.025>

Domenico, P. A. and F. W. S., 1998, *No Physical and Chemical Hydrogeology*. New York: Wiley and Sons.

Domenico , P. , & Schwartz , I F. , 1990 , *Physical and chemical hydrogeology*. *Wiley*.

Duque-Calvache, C., Calvache, M. L., Pedrera, A., Hódar, A., López Chicano, M., Martín Rosales, W., J.C., R., 2006, *Characteristics of the fresh water-salt water contact in the Motril-Salobreña aquifer (Southern Spain) using time domain electromagnetic soundings*. 19th SWIM 2006 Proceedings.

Duque, C., Calvache, M. L., Pedrera, A., Martín-Rosales, W., & López-Chicano, M., 2008, *Combined time domain electromagnetic soundings and gravimetry to determine marine intrusion in a detrital coastal aquifer (Southern Spain)*. *Journal of Hydrology*, 349(3–4), 536–547. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.031>

Echarri Luis, 1998, *Contaminación del Agua Subterránea*. Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente (Tema 11). España: Teide.

Eddy-Dilek C.A. , Looney B.B. , Hoekstra P., Harthill N., Blohm M., and Phillips D.R., 1997, *Definition of a critical confining zone using surface geophysical methods*. *Ground Water*, vol. 35, no. 3, pp. 451-462.



Enciclopedia de Los Municipios y Delegaciones de México. Caborca, 2016, de Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal Sitio web: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM26sonora/municipios/26017a.html>

Fimbres-Fontes Adán, Miranda-López Raymundo, García-Molina Martín Francisco, 2008, *Efecto del agua y nitrógeno en vid cv superior bajo patrón freedom y riego por goteo*. De BIOTecnia, UNISON Sitioweb :<http://biotecnia.ojs.escire.net/index.php/biotecnia/article/view/52>

Fitterman , D. V. and Stewart , M. T. , 1986 , *Transient Electromagnetic Sounding for Groundwater*. *Geophysics*, 51, 955-1005.

Foster , S. , & Hirata , R ., 1988 , *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas: una metodología basada en datos existentes*. Retrieved from <http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=LILACS&lang=p&nextAction=lnk&exprSearch=86305&indexSearch=ID>

Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., & Paris, M., 2003, *Protección de la calidad del agua subterránea*. Retrieved from http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2009/01/12/000334955_20090112030526/Rendered/PDF/25071PUB01Spanish10BOX0334116B01PUBLIC1.pdf

Foyle, A., Henry, V., & Alexander, C., 2002, *Mapping the threat of seawater intrusion in a regional coastal aquifer-aquitard system in the southeastern United States*. *Environmental Geology*, 43(1–2), 151–159. <http://doi.org/10.1007/s00254-002-0636-6>

Fresenius, W., Quentin, K. E., & Schneider, W., 1996, *Water Analysis: A Practical Guide to Physico-Chemical*. Chemical and Microbiological Water Examination and Quality Assurance.

Gat , J.R. , 1983 , *Precipitation , groundwater and surface waters*. In: *Paleoclimates and*



- paleowaters: A collection of environmental isotope studies. International Atomic Energy Agency, 3-12.
- Gat, J.R., 1995, *Stable isotopes of fresh and saline lakes*. In: Physics and Chemistry of Lakes (A. Lerman, D.M. Imboden and J.R. Gat, eds.) Springer Verlag: 139-165.
- Gat, J.R., 2005, *Some classical concepts of isotope hydrology*. In Aggarwal, P.K.; Gat, J.R. y Froehlich, K.F. (Eds.) *Isotopes in the Water Cycle: Past, Present and Future of a Developing Science*. Dordrecht, Springer Netherlands.
- Gat J.R. , Mook W.G. y Meijer H.A.J., 2000, *Atmospheric water*. En: Mook W.G. Ed. *Environmental isotopes in the Hydrological Cycle*, pp. 1-111, UNESCO/IAEA, Groningen.
- Gat J.R., Tzur Y., 1967, *Modification of the isotopic composition of rainwater by processes which occur before groundwater recharge*. In *Isotopes in Hydrology*, pp. 49-60. Vienna: Int. At. Energy Agency.
- García de Miranda, E. E. G., 1973, *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. Retrieved from <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=UADY.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expression=mfn=006802>
- Gerencia de Aguas Subterráneas. SGT. CNA, 2003, *Agua en México*. De: El Colegio de San Luis, A.C. (COLSAN) Sitio web: <http://www.colsan.edu.mx/investigacion/aguaysociedad/proyectorfrontera/AGUA%20EN%20M%C3%89XICO.pdf>
- Goldman , M. , & Gendler , M. , 2002 , *Detection of fresh and brackish groundwater bodies within deep sub-aquifers and mapping freshwater/seawater interface along the coastal aquifer of Israel using geophysical (TDEM) method*. Geophys. Inst. Israel Rep. 914/210.
- Goldman , M. , Gilad , D. , Ronen , A. , & Melloul, A., 1991, *Mapping of seawater intrusion into the coastal aquifer of Israel by the time domain electromagnetic method*. *Geoexploration*, 28, 153–174.



- Goldman, M., Gilad, D., Ronen, A., & Melloul, A. J., 1990, *Mapping of seawater intrusion into the coastal aquifer of Israel by the time domain electromagnetic method*. *Geoplotation*, 28, 153–174. [http://doi.org/10.1016/0016-7142\(91\)90046-F](http://doi.org/10.1016/0016-7142(91)90046-F)
- Goldman, M., & Kafri, U., 2004, *The use the time domain electromagnetic (TDEM) method to evaluate porosity of saline water saturated aquifers*. In 18 SWIM. Cartagena 2004, Spain. (pp. 327–340).
- Goldman, M., Kafri, U., & Yechieli, Y., 2003, *Application of the TDEM method for studying groundwater salinity in different coastal aquifers in Israel*. In: Lopez-Geta, J.A., De Dios Gomes, J., de la Orden, J.A., Ramos, G., Rodriguez, L., eds. Coastal aquifers intrusion technology: Mediterranean count. *The Institute of Geology and Mineralogy of Spain (IGME)*.
- González Rojas Delia, 2005, *Simulación numérica y análisis de escenarios de manejo del acuífero del valle de Caborca, Sonora*. Morelos, México: Universidad Autónoma de México.
- Guerin, R., Descloitres, M., Coudrain, A., Talbi, A., & Gallaire, R., 2001, *Geophysical surveys for identifying saline groundwater in the semi-arid region of the central Altiplano, Bolivia*. *Hydrological Processes*, 15(17), 3287–3301.
- Hudak Paul F., 2005, *Principles of Hydrogeology*. United States of America: CRC PRESS.
- Hoekstra P., Harthill N., Blohm M., Phillips D.R., 1996, *Definition of a critical confining zone using surface geophysical methods*. SAGEEP 1996 P.387-391.
- Infoagro. (s.f.), 2017, *Conductividad Eléctrica*. De: Infoagro Systems, S.L. C Sitio web: http://www.infoagro.com/instrumentos_medida/doc_conductividad_electrica.asp?k=53
- Kafri, U., & Goldman, M., 2006, *Are the lower subaquifers of the Mediterranean coastal aquifer of Israel blocked to seawater intrusion? Results of a TDEM (time domain electromagnetic) study*. *Israel Journal of Earth Sciences*, 55, 55–68. <http://doi.org/10.1560/Q567-832K-0420-067V>



- Kafri, U. , Goldman, M., & Lang, B., 1997, *Detection of subsurface brines, freshwater bodies and the interface configuration in between by the Time Domain Electromagnetic (TDEM) method in the Dead Sea rift, Israel*. J. Env. Geol., 31, 42–49.
- Kafri , U. , Goldman , M. , Lyakhovsky , V. , Scholl , C. , Helwig , S. , & B. , T. , 2007, *The configuration of the fresh-saline groundwater interface within the regional Judea Group carbonate aquifer in northern Israel between the Mediterranean and the Dead Sea base levels as delineated by deep geoelectromagnetic soundings*. Journal of Hydrology, 344(1–2), 123–134.
- Kontar, E.A. and Ozorovich Yu. R., 2006, *Geo-Electromagnetic Survey of Fresh/Salt Water Interface in the Coastal Southeastern Sicily*. *Continental Shelf Research*, 26, 7, 843-851.
- Kopsiaftis, G., Mantoglou, a., & Giannouloupoulos, P., 2009, *Variable density coastal aquifer models with application to an aquifer on Thira Island*. *Desalination*, 237(1–3), 65–80. <http://doi.org/10.1016/j.desal.2007.12.023>
- Lavrushin V. Yu., Dubinina E.O., Avdeenko A.S., 2005, *Isotopic composition of Oxygen and Hydrogen in Mud-Volcanic waters from Taman (Russia) and Kakhetia (Eastern Georgia)*. *Lithology and Mineral Resources* 40, 123-137.
- Lenntech BV, 2016, *Intrusión de agua salada en las aguas subterráneas*. De Lenntech BV
Sitio web: <http://www.lenntech.es/agua-subterranea/intrusion-agua-salada.htm>
- Lepper , E. & Elmore , A. C. , 2005 , *Groundwater development in Lemoa , Guatemala*. *Environmental Geology*, 48(1), 49–56.
- Levín, M., Alberó, M.C., Panarello, H.O., Hernández, M. Lorenzo, F. y Kersfeld, A., 1988, *Uso de isótopos ambientales (oxígeno-18, deuterio y tritio) para la determinación de recarga y trazado de procesos hidrodinámicos en un sector costero de la provincia de Buenos Aires*. *Actas Segundas Jornadas Geológicas Bonaerenses*: 599-607. Bahía Blanca.
- López-Geta J.A. , Loredó Pérez J. , Fernández Ruiz L., Pernía Llera J.M., 2008, *Investigación*



y gestión de los recursos del subsuelo. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

Lugo A. E. y García Martinó, 1996 , *Cartilla del agua para Puerto Rico*. San Juan, Puerto Rico: Servicio forestal del departamento de agricultura de los Estados Unidos.

MacNeil , R .E. , Sanford , W. E. , Connor , C. B. , Sandberg , S. K. , and Diez , M. , 2007, *Investigation of the groundwater system at Masaya Caldera, Nicaragua, using transient electromagnetics and numerical simulation*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 166, no. 3-4, p. 217-232.

Meju, M.A. , P.J. Fenning , and T.R.W. Hawkins, 2000, *Evaluation of small-loop transient electromagnetic soundings to locate the Sherwood Sandstone aquifer and confining formations at well sites in the Vale of York, England*, J. Applied Geophysics 44, 217-236, 2000.

Melloul, A., & Aberbach, S., 1984, *An evaluation of seawater intrusion in the coastal plain aquifer of Israel*. Tahal Rep. No. 1/84/80, Tahal Co.,. Tel-Aviv and Hydrological Service. Jerusalem.

Melloul , A. , & Bibas , M. , 1991 , *Water quantities according to quality standards in the coastal plain aquifer of Israel, localization of areas reaching critical water quality in 1987-1992 and their consequences on the aquifer water resources management*. Sr. Hydrol. Serv. Rep. Hydro/4/1991.

Metwaly , M.A. , Khalil, M., Al-Sayed, E.S., and Osman, S., 2006, *A hydrogeophysical study to estimate water seepage from northwestern Lake Nasser, Egypt*. Journal of Geophysics and Engineering, Vol. 3, pp. 21-27.

Mills , T. , Hoekstra , P. , Blohm, M. & Evans , L. , 1988 , *Time domain electromagnetic soundings for mapping sea-water intrusion in Monterey County, California*. Ground Water, 26(6), 771–782.

Miguel Rangel - Medina, Rogelio Monreal, Christopher Watts, 2011, *Coastal Aquifers of Sonora: Hydrogeological Analysis Maintaining a Sustainable Equilibrium*. De ResearchGate Sitio web:



https://www.researchgate.net/publication/226450850_Coastal_Aquifers_of_Sonora_Hydrogeological_Analysis_Maintaining_a_Sustainable_Equilibrium

Morales Morales Heliodoro , 2012 , *Hidrogeología e hidrogeoquímica del acuífero transfronterizo de Agua Prieta, Sonora*. Hermosillo, Sonora: Universidad de Sonora. División de Ciencias Exactas y Naturales.

Muñoz Carlos , García Helena , Rivero Edgar , Ángeles Gabriela , Nieto Sue Helen , Rivera Johannan, 2010, *Explotación racional de acuíferos y conservación de humedales*. De Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático Sitio web: <http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgipea/ine-agri-pc-01-2010.pdf>

Nielsen L. , Jorgensen N. , Gelting P. , 2006 , *Mapping of the freshwater lens in a coastal aquifer on the Keta Barrier (Ghana) by transient electromagnetic soundings*. J Appl Geophys 62:1–15.

Ordoñez Gálvez Juan Julio , 2011 , *Cartilla técnica : aguas subterráneas - acuíferos*. De: Sociedad Geográfica de Lima Sitio web: http://www.gwp.org/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/aguas_subterranas.pdf

OMS , 2003, *Total dissolved solids in drinking - water*. Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para la calidad del agua potable. Ginebra (Suiza), Organización Mundial de la Salud (WHO/SDE/WSH/03.04/16).

Oroz Ramos Lucas Antonio , 2011, *Disponibilidad de aguas nacionales*. De : Sociedad Geológica Mexicana, A.C. Sitio web: <http://sociedadgeologica.org.mx/pdfs/03%20DisponibilidadAguaSubterranea.pdf>

Otero González M^a Asunción , Pividal Escriche Ana Jacqueline, Fraile Enguita M^a Jesús , Centeno Carrillo Juan de Dios , Senderos Domínguez Agustín, 1997, *Geología*. España: Ediciones del Laberinto S. L.

Palacky, G. J., 1987, *Resistivity characteristics of geologic targets*. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, 1, 53–129.



- Panarello, H.O. y Parica, C.A., 1984, *Isótopos del oxígeno en Hidrogeología y Geología. Primeros valores en agua de lluvia de Buenos Aires*. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 39 (1-2): 3-11.
- Park, C., 2004, *Saltwater Intrusion in Coastal Aquifers*, (September).
- Perttu, N., 2008, *Assessment of Hydrogeological and Water Quality Parameters, Using MRS and VES in the Vientiane Basin, Laos*.
- Pinder, G. F., & Celia, M. A., 2006, *Subsurface Hydrology*. *Subsurface Hydrology*.
<http://doi.org/10.1002/0470044209>
- Qahman, K., & Larabi, A., 2006, *Evaluation and numerical modeling of seawater intrusion in the Gaza aquifer (Palestine)*. Hydrogeology Journal, 14(5), 713–728.
<http://doi.org/10.1007/s10040-005-003-2>
- Quiroz Londoño O.M., Martínez, Dapeña C., Massone H., 2008, *Hydrogeochemistry and isotopes of groundwater in low gradients catchments of the province of Buenos Aires, Argentina Hydrogeology Journal*. Volumen 16. Número 6. Pp 1113-1127. ISSN 1431-2174.
- Reilly, T. E., & Goodman, A. S., 1987, *Analysis of saltwater upconing beneath a pumping well*. Journal of Hydrology, 89(3–4), 169–204. [http://doi.org/10.1016/0022-1694\(87\)90179-X](http://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90179-X)
- Reyes Martínez Amelia y Quintero Soto María Luisa, 2009, *Problemática del agua en los distritos de riego por bombeo del estado de Sonora*. De: Revista Digital Universitaria UNAM Sitio web: <http://www.revista.unam.mx/vol.10/num8/art51/art51.pdf>
- Richards, R.T., Troester, J.W. & Martínez, M.I., 1995, *A comparison of electromagnetic techniques used in a reconnaissance of the ground-water resources under the coastal plain of Isla de Mona, Puerto Rico*. The Symposium on the Applications of Geophysics to Environmental and Engineering Problems (SAGEEP'95) Proceedings, Orlando, Florida: 251-260.



- Richards R.T., Troester J.W., and Martinez M.I., 1998, *An electromagnetic geophysical survey of the freshwater lens of Isla de Mona, Puerto Rico*. Journal of Cave and Karst Studies, 60, 115-120. 2018, De U.S. Geological Survey Base de datos.
- Santa Cruz, J., Amato, S., Silva, A., Guarino, M., Villegas, D. Y Cernadas, M., 1995, *El Acuífero Puelches*. Propiedades y Circunstancias. Revista A Água Em Revista. Brasil.
- Salud, S. de., 1994, *Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994: Salud ambiental.: Agua para uso y consumo humano*. Diario Oficial de La Federación DVIII.
- Sanders, L. L., 1998, *A Manual of Field Hydrogeology*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.
- U.S. Department of the Interior | U.S. Geological Survey, 2016, *El agua de la Tierra: Agua subterránea*. De: USGS Sitio web: <http://water.usgs.gov/gotita/earthgw.html>
- U.S. Department of the Interior | U.S. Geological Survey, 2016, *El ciclo del agua*. De: USGS Sitio web: <http://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>
- Universidad Jaime I de Castellón. Recursos Hídricos, 2016, *Lección 8*. De : Instituto Universitario de Plaguicidas y Aguas Sitio web: <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionRH08.pdf>
- Vega Granillo Eva Lourdes, Cirett Galán Samantha, De la Parra Velasco María Luisa y Zavala Juárez Raúl, 2011, *Hidrogeología de Sonora, México*. In Calmus, Thierry, ed., Panorama de la geología de Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118, cap. 8, p. 267–298.
- Vereecken Harry, Binley Andrew, Cassiani Giorgio, Revil Andre and Titov Konstantin., 2004, *Applied Hydrogeophysics*. Russia: Springer.
- Vitória L., Soler A., Aravena R., Canals A., 2005, *Multi-isotopic approach 15N, 13C, 34S*,



- 18O and D) for tracing agriculture contamination in groundwater (Maresme, NE Spain). In: Environmental Chemistry (Eds. E. Lichtfouse, J. Schwarzbauer and D. Robert). Springer-Verlag, Heidelberg, 43-56.*
- Young, M.E., de Bruijn, R.G., & bin Salim Al-Ismaïly, A., 1998, *Exploration of an alluvial aquifer in Oman by time-domain electromagnetic soundings*. Hydrogeology Journal, 6, 383-393.
- Young, M. E. , Macumber, P. G. , Watts , M. D. , & Al-Toqy, N., 2004, *Electromagnetic detection of deep freshwater lenses in a hyper-arid limestone terrain*. Journal of Applied Geophysics, 57, 43-61.
- Yuhr, L. and Benson, R. C., 1995, *Saltwater intrusion: concepts for measurements and a regional characterization for Broward County, Florida*. Proc. Symp. on the application of geophysics to engineering and environmental problems, 231 – 242.