



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“Evaluación de intrusión salina y
presencia de plaguicidas en el acuífero
Río Sinaloa, región costera”.**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Geóloga

P R E S E N T A

María Fernanda Angulo Escotto

DIRECTORA DE TESIS

M. en I. Ana Alejandrina Castro Rodríguez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

DEDICATORIAS

A mis padres: Ericka Escotto Castillo y Alejandro Angulo Paz, por todo su amor, consejos, sacrificios, motivación, paciencia y apoyo incondicional a lo largo de mi vida.

A mis abuelitas y hermanos, por su compañía y apoyo incondicional.

A mi novio Daniel Sosa Sánchez por su apoyo, motivación y compañía a lo largo de mi carrera.

A toda mi familia que amo y llevo en mi corazón en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), a la Facultad de Ingeniería y al Instituto de Ingeniería de la UNAM.

A mi Directora de tesis, M. en I. Ana Alejandrina Castro Rodríguez por su apoyo, paciencia, explicaciones e ideas aportadas para este trabajo.

A José Antonio Barrera Mendoza y José Antonio Mendoza Millán por su apoyo, paciencia y explicaciones.

A la Dra. María del Rosario Iturbe Argüelles por asignarme el presente tema de tesis y ser una de mis sinodales.

A José Antonio Barrera Mendoza y a José Antonio Mendoza Millán por su apoyo en el manejo del SIG e interpretación del modelo del trabajo presente.

A mis sinodales, M. en C. Emiliano Campos Madrigal, Dr. José Antonio Hernández Espriú e Ing. Alberto Arias Paz.

INDICE

RESUMEN	i
ABSTRACT	iii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo	3
1.2 Objetivos particulares	3
2. ANTECEDENTES	4
2.1 Problemática de la intrusión salina en México	4
2.2 Problemática de los plaguicidas en México	5
3. MARCO TEÓRICO	7
3.1 Intrusión salina	7
3.1.1 Relaciones de salinidad	7
3.1.2 Relaciones de densidad	9
3.1.3 Relación de Ghyben – Herzberg (g-h)	9
3.1.4 Modelo de Glover	11
3.2 Plaguicidas	13
3.2.1 Clasificación de los plaguicidas	13
3.2.2 Compuestos organofosforados	16
4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	19
4.1 Ubicación	19
4.2 Fisiografía	19
4.3 Geomorfología	20
4.4 Clima	21
4.5 Hidrología	21
4.6 Geología	22
4.6.1 Estratigrafía	23
4.7. Hidrogeología	24
5. METODOLOGÍA	26
5.1 Calidad del agua	26
5.1.1 Concentración de iones mayoritarios	26
a) Diagramas hidrogeoquímicos	26
5.1.2 Propiedades fisicoquímicas del agua	27
5.2 Plaguicidas	27
5.3 Análisis de densidad	28
5.3.1 Intrusión salina por diferencia de densidades	30
5.4 Granulometría	30
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	32
6.1 Calidad del agua	32
Iones mayoritarios	32
Propiedades fisicoquímicas del agua	35

Diagramas de Piper y Stiff	41
6.2 Plaguicidas	44
6.3 Análisis de densidades	46
6.3.1 Intrusión salina por diferencia de densidades	47
6.4 Granulometría	51
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53
8. BIBLIOGRAFÍA	55
9. ANEXOS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Figura 3.1. Esquema de un acuífero costero.	8
2	Figura 3.2. Equilibrio del agua dulce-salada en una zona costera de acuerdo con los supuestos de Ghyben-Herzberg.	10
3	Figura 3.3. Red de flujo cerca de una playa, modificada de Glover, 1959.	12
4	Figura 4.1. Área de estudio, región costera del acuífero Río Sinaloa.	19
5	Figura 4.2. Fisiografía de la zona de estudio.	20
6	Figura 4.3. Cimas en el área de estudio.	21
7	Figura 4.4. Hidrología del área de estudio.	22
8	Figura 4.5. Geología del área de estudio	23
9	Figura 5.1. Sitios de muestreo para evaluar la concentración de iones mayoritarios y de plaguicidas.	27
10	Figura 5.2. Foto del frasco de litro color ámbar utilizado para preservar la muestra.	28
11	Figura 5.3. Sitios de muestro para los valores de densidad.	29
12	Figura 5.4. Foto del picnómetro utilizado para la prueba.	29
13	Figura 5.5. Malla de discretización.	30
14	Figura 5.6. Sitios de muestro para la granulometría.	31
15	Figura 6.1 Planos de isoconcentraciones de Cl^- de las 3 diferentes épocas del año.	32
16	Figura 6.2. Planos de isoconcentraciones de NO_3^- de las 3 diferentes épocas del año.	33
17	Figura 6.3. Planos de isoconcentraciones de Na^+ de las 3 diferentes épocas del año.	33
18	Figura 6.4. Comparación del pH en los diferentes sitios de muestreo en las 3 diferentes épocas del año.	35
19	Figura 6.5. Comparación de SDT en los diferentes sitios de muestreo en las 3 diferentes épocas del año.	36
20	Figura 6.6. Comparación de la CE en los diferentes sitios de muestreo en las 3 diferentes épocas del año.	36
21	Figura 6.7. Comparación de salinidad en los diferentes sitios de muestreo en las 3 diferentes épocas del año.	37
22	Figura 6.8. Planos de isoconcentraciones de CE, SDT y salinidad.	38
23	Figura 6.9. Arroyo cercano al sitio Las Culebras.	39
24	Figura 6.10. Diagrama de Piper de los 8 sitios de muestreo en las tres diferentes épocas del año.	41
25	Figura 6.11A. Diagramas de Stiff del pozo San Pedro.	42
26	Figura 6.11B. Diagramas de Stiff del pozo La Entrada.	42
27	Figura 6.11C. Diagramas de Stiff del pozo Las Culebras.	42
28	Figura 6.11D. Diagramas de Stiff del pozo El Dorado.	42
29	Figura 6.11E. Diagramas de Stiff del pozo Chuparrosa.	42
30	Figura 6.11F. Diagramas de Stiff del pozo Tamazula.	42
31	Figura 6.11G. Diagramas de Stiff del pozo La Mojonera.	43
32	Figura 6.11H. Diagramas de Stiff del pozo Palos Verdes.	43

33	Figura 6.12. Tipos de agua en los sitios de muestreo y geología de la zona En la presentación no quedaron claros los colores).	44
34	Figura 6.13. Resultado de la interpolación del muestreo de densidad.	47
35	Figura 6.14. Profundidad de la interfaz.	48
36	Figura 6.15. Modelo en tres dimensiones de la cuña de intrusión salina.	49
37	Figura 6.16. Intersección de la línea de intrusión con el acuífero a lo largo de la línea de costa.	49
38	Figura 6.17. Línea en superficie que representa el avance máximo de la cuña de intrusión.	50
39	Figura 6.18. Cercanía del pozo Cubiletito a la línea de costa y a la línea de intrusión.	51
40	Figura 6.19. Tipos de suelo en los sitios de muestreo y geología de la zona.	52

ÍNDICE DE TABLAS

1	Tabla 2.1. Estados con mayor número de intoxicaciones por plaguicidas (periodo 1995–2016).	5
2	Tabla 3.1. Tipo de agua según la cantidad de SDT (IMTA, 2007).	8
3	Tabla 3.2. CE para los diferentes tipos de agua (Rocha y Cardona, 2015).	9
4	Tabla 3.3. Criterios para la clasificación toxicológica de los plaguicidas según la OMS en 1978 (NOM-Y-302-1988; Jiménez, 2017; Bedmar, 2011).	16
5	Tabla 3.4. Ingredientes activos de plaguicidas organofosforados y sus subproductos de degradación.	18
6	Tabla 6.1. Precipitación acumulada (mm) en el área de estudio durante el periodo de junio 2016 - junio 2017.	34
7	Tabla 6.1. Compuestos identificados en la cromatografía.	45

“Evaluación de intrusión salina y presencia de plaguicidas en el acuífero Río Sinaloa, región costera”.

RESUMEN

La región costera del acuífero Río Sinaloa cubre prácticamente en su totalidad el municipio de Guasave, Sinaloa; debido a que este municipio abarca gran parte de dos distritos de riego (DR): DR 063 “Guasave” y DR 075 “Río Fuerte”, la agricultura en Guasave es la actividad económica que consume los mayores volúmenes de agua subterránea, pues el 79% de las localidades la utilizan para uso agrícola y sólo el 21% para uso público urbano. Es por ello que hay problemáticas que podrían suscitarse en esta región, como por ejemplo, que el considerable volumen de agua que se destina a la agricultura provoque un daño irreversible en el acuífero como la pérdida de carga hidráulica, originando un abatimiento de los niveles del agua subterránea, invirtiendo el flujo del agua del acuífero, permitiendo la penetración de agua salada; y como consecuencia, habría presencia de agua de mala calidad debido a las altas concentraciones de sales, que obligaría a abandonar campos agrícolas y a reubicar pozos, para evitar daños en los cultivos y el suelo. Otra de las problemáticas que podría suscitarse es el tema de los plaguicidas debido a la importancia de la actividad agrícola en la zona, pues son considerados como potenciales contaminantes de acuíferos debido a su alta toxicidad, persistencia y movilidad, aunado a la resistencia que presentan a la degradación biológica debido a sus propiedades fisicoquímicas.

Es por lo anterior que surge la necesidad de evaluar la situación en la que se encuentra el acuífero Río Sinaloa en su porción costera; y para ello se realizó un estudio de la calidad del agua en el área de estudio a través de tres muestreos en diferentes fechas del año (noviembre 2016, febrero 2017 y junio 2017). Uno de los análisis consistió en la evaluación de la concentración de iones mayoritarios en nueve pozos del acuífero situados en la zona agrícola de riego, de estos iones en estudio únicamente los cloruros (Cl^{-1}), nitratos (NO_3^{-}), sulfatos (SO_4^{-2}) y el sodio (Na), están normado en México bajo la NOM-127-SSA1-1994. En once pozos se obtuvieron propiedades fisicoquímicas del agua: pH, sólidos disueltos totales (SDT), conductividad eléctrica (CE) y salinidad.

También se realizó un análisis de densidades de diez muestras de agua dulce y dos de agua de mar mediante el método del picnómetro. Con los valores obtenidos se pudo realizar el modelo de profundidad y posición de la interfaz agua dulce-salada, basado en el método de Glover propuesto en el año 1959, usando como herramienta un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Los plaguicidas fueron evaluados en el agua subterránea, y el muestreo se realizó durante las tres fechas mencionadas. Dichos plaguicidas fueron del tipo organofosforados (paratión metílico, diazinón, dimetoato y clorpirifos), y su elección se basó en los plaguicidas principalmente utilizados en el área de estudio (o si quieres poner en los DR 063 y 075).

La finalidad de este estudio es que con los análisis realizados se pueda dictaminar si hay presencia de intrusión salina en el acuífero Río Sinaloa, así como conocer la calidad del agua subterránea con relación a plaguicidas y los subproductos en los que estos se degradan.

Palabras clave: acuífero, intrusión salina y plaguicidas.

"Evaluation of saline intrusion and presence of pesticides in the Sinaloa River aquifer, coastal region".

ABSTRACT

The coastal region of the Sinaloa River aquifer is located in the municipality of Guasave, Sinaloa; Because this municipality covers a large part of the irrigation districts (DR): DR 063 "Guasave" and DR 075 "Río Fuerte", agriculture in Guasave is the economic activity that consumes the largest volumes of groundwater, since the 79 % of localities for agricultural use and only 21% for urban public use. It is therefore there are problems that can be sustained in this region, such as, for example, the considerable volume of water that is destined to agriculture, irreversible damage to the aquifer occurs, such as the loss of hydraulic load, causing a reduction in the levels of groundwater, reversing the flow of water from the aquifer, through the penetration of salt water; and as a result, it has been necessary to take into account the best sales conditions, force farmers to abandon agricultural fields and relocate the wells, to avoid damage to crops and soil. Another of the problems that could be raised in the topic of pesticides due to the importance of agricultural activity in the area, in turn, in turn, its resistance, toxicity, persistence and mobility, coupled with the resistance that presents a biological degradation due to its physicochemical properties.

It is for the foregoing that the need arises to evaluate the situation in which the aquifer "Río Sinaloa" is found in its coastal portion; and for this a study of the quality of the water in the study area was carried out through three samplings in different dates of the year (November 2016, February 2017 and June 2017). One of the analyzes consisted of the evaluation of the concentration of major ions in nine wells of the aquifer located in the agricultural area of irrigation, of these ions under study only the chlorides (Cl⁻¹), nitrates (NO₃⁻), sulfates (SO₄⁻²) and sodium (Na), are regulated in Mexico under NOM-127-SSA1-1994. In eleven wells physicochemical properties of water were obtained: pH, total dissolved solids (TDS), electrical conductivity (EC) and salinity.

A densities analysis of ten samples of freshwater and two samples of seawater was also carried out using the pycnometer method. With the obtained values, it was possible to perform the depth and position model of the freshwater-salt interface, based on the Glover method proposed in 1959, using a Geographic Information System (GIS) as a tool.

The pesticides were evaluated in the groundwater, and the sampling was carried out during the three dates mentioned. These pesticides were of the organophosphorus type (methyl parathion, diazinon, dimethoate and chlorpyrifos), and their choice was based on the pesticides mainly used in the study area (or if you want to put in DR 063 and 075).

The purpose of this study is that with the analyzes carried out, it is possible to determine if there is presence of saline intrusion in the Sinaloa River aquifer, as well

as to know the quality of groundwater in relation to pesticides and the metabolites in which these degrade.

Key words: aquifer, saline intrusion and pesticides.

1. INTRODUCCIÓN

El agua subterránea constituye una fuente de suministro de gran importancia para México, pues representa el 70% del agua para consumo humano, pero a pesar de ello, los datos acerca de su cantidad y calidad son limitados (Jiménez et al., 2010); lo cual hace crecer la necesidad de evaluar la situación en que se encuentran los acuíferos de nuestro país (Peinado et al., 2011).

Gran parte del deterioro de la calidad del agua en los acuíferos costeros es a causa de la sobreexplotación, ya que esta actividad propicia la introducción de agua salada en dichos acuíferos, este fenómeno es conocido como intrusión salina (Jiménez et al., 2010). Otra de las causas por la cual la calidad del agua en los acuíferos se ve afectada es debido a la actividad agrícola, pues representa el factor contaminante más importante gracias a la cantidad de plaguicidas que utiliza (Rodríguez et al., 2008), los cuales se infiltran por el subsuelo hasta entrar en contacto con el agua subterránea.

La agricultura en el estado de Sinaloa a nivel nacional es de vital importancia, en 2012 ocupó el segundo lugar en el país en valor de producción agrícola con 35.6 mil millones de pesos y 10.3 millones de toneladas, y el séptimo lugar en superficie cultivada con 1.18 millones de hectáreas (5.87% de la superficie agrícola en México); los principales productos agrícolas producidos en dicho estado fueron granos y hortalizas, y en menor medida oleaginosas, caña de azúcar, frutas y otros cultivos (CODESIN, 2013). Los municipios que más aportaron fueron Culiacán con 20.06%, Ahome (19.97%), Guasave (17.61%), Navolato (12.75%) y Sinaloa de Leyva (5.97%) (CODESIN, 2013).

En 2017 Guasave ocupó el primer lugar estatal en tener la mayor superficie agrícola sembrada, con 196,622 hectáreas, y el segundo lugar en valor de producción agrícola con 8,505 millones de pesos (CODESIN, 2018). Este municipio abarca gran parte de dos distritos de riego (DR): DR 063 "Guasave" y DR 075 "Río Fuerte". El primero de ellos produce principalmente frijol, garbanzo, maíz, sorgo y trigo (Peinado et al., 2015); mientras que el segundo produce principalmente maíz, tomate, frijol, papa, caña de azúcar y jitomate, además de garbanzo, calabaza, cebolla, sorgo y pepino (Inzunza, 2008).

Es por esto que la agricultura en Guasave es la actividad económica que consume los mayores volúmenes de agua, tanto superficial como subterránea, debido a que en los periodos de sequía hay que extraerla del acuífero subyacente, de tal manera que, del total anual utilizado para la agricultura, el 17% proviene de pozos y el 83% restante es de origen superficial (Peinado et al., 2011). Además, con respecto al agua subterránea, el 79% de las localidades la utiliza para uso agrícola y sólo el 21% para uso público urbano (Iturbe et al, 2017).

El municipio de Guasave se encuentra en su totalidad dentro de la superficie del acuífero Río Sinaloa, en la región costera; debido a su ubicación y a la importancia que posee en la actividad agrícola, hay problemáticas que podrían suscitarse en

esta región, una de ellas se ejemplifica en el estado de Sonora, ya que el considerable volumen de agua que se destina a la agricultura ha provocado en acuíferos costeros un daño irreversible (Castillo, 2003), por ejemplo la pérdida de carga hidráulica, originando un abatimiento de los niveles del agua subterránea, modificando las líneas de flujo que en condiciones normales se dirigían del continente hacia el mar y que ahora el flujo se invirtió, yendo del litoral hacia el centro de la planicie, creando la penetración de agua salada (Corona y Gómez, 2001). Como consecuencia, la presencia de agua de mala calidad debido a las altas concentraciones de sales, obligó a abandonar campos agrícolas y a reubicar pozos, para evitar daños en los cultivos y el suelo, tal como ocurrió en el acuífero Costa de Hermosillo (Corona y Gómez, 2001).

Como se ha mencionado, Sinaloa es un estado agricultor de gran importancia a nivel nacional, y el municipio de Guasave aporta bastante para que esto sea posible; sin embargo, la actividad agrícola emplea una cantidad importante de plaguicidas (Rodríguez et al., 2008), los cuales son considerados como potenciales contaminantes de acuíferos debido a su alta toxicidad, persistencia y movilidad, (Hirata, 2002); aunado a la resistencia que presentan a la degradación biológica debido a sus propiedades fisicoquímicas (García y Rodríguez, 2012).

Los sistemas acuáticos y terrestres son los que se ven más amenazados por el uso de plaguicidas, debido al aumento de esta actividad antropogénica, alterando las condiciones naturales de los ecosistemas, incluyendo alteraciones o afectaciones al propio ser humano (García y Rodríguez, 2012); pues el uso excesivo de plaguicidas perjudica la salud humana tanto en personas que participan en la producción y aplicación de estos, así como en los consumidores de alimentos y agua contaminados por sus productos de degradación (Mellado, 2007).

El presente trabajo plantea obtener el grado de intrusión salina en el acuífero Río Sinaloa en su porción costera correspondiente al municipio de Guasave, a través del modelado físico de la interfaz agua dulce-agua salada, mediante la variación de densidades de estas, definiendo la profundidad de la interfaz, usando como herramienta un Sistema de Información Geográfica (SIG).

También se pretende obtener el grado de contaminación por plaguicidas, esto con la realización de tres muestreos en nueve pozos a lo largo de un año de estudio (noviembre de 2016, febrero de 2017 y junio de 2017), con la finalidad de abarcar tanto la época de estiaje como la de lluvia; evaluando y cuantificando compuestos. Cabe mencionar que previo al muestreo, se investigó acerca del tipo de plaguicidas empleados en los diferentes sitios dentro de los distritos de riego 063 y 075, en el área costera de Guasave, Sinaloa, de los cuales sobresalieron cuatro plaguicidas organofosforados, cuyas concentraciones fueron las que se analizaron.

1.1 Objetivo

Evaluar el acuífero Río Sinaloa, en su región costera (municipio de Guasave), en función de la intrusión salina y de la concentración de plaguicidas en la zona correspondiente a los DR 063 "Guasave" y DR 075 "Río Fuerte".

1.2 Objetivos particulares

- a) Obtener el grado de intrusión salina del acuífero.
- b) Determinar si existe contaminación por plaguicidas en el acuífero.

2. ANTECEDENTES

2.1. Problemática de la intrusión salina en México

México está dividido en 653 acuíferos, esto con la finalidad de administrar el agua subterránea en el territorio nacional, los nombres oficiales de estos fueron publicados en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 5 de diciembre de 2001 (CONAGUA, 2017).

En el año 2003 se identificaron 17 acuíferos costeros con problemas de intrusión salina distribuidos en los estados de Baja California, Baja California Sur, Colima, Sonora y Veracruz (CONAGUA, 2004); dicha condición se mantuvo así hasta el año 2007 (CONAGUA, 2005, 2006, 2008). Para el año 2008 y 2009 la problemática se presentó en 16 acuíferos, estos fueron: Ensenada, Maneadero, Camalú, Colonia Vicente Guerrero y San Quintín en Baja California; Santo Domingo, Los Planes, La Paz y Mulegé en Baja California Sur; Sonoyta-Puerto Peñasco, Caborca, Costa de Hermosillo, Valle de Guaymas y San José de Guaymas en Sonora; y finalmente Costera de Veracruz y Costera de Coatzacoalcos en Veracruz (CONAGUA, 2010, 2011). Para finales de 2012 y hasta el año 2014 se identificaron 15 acuíferos con la misma problemática en los estados de Baja California, Baja California Sur y Sonora (CONAGUA, 2013, 2014, 2015).

Finalmente, para el año 2015 y hasta el año 2018 fueron identificados 18 acuíferos costeros con el mismo problema en los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Quintana Roo y Yucatán (CONAGUA, 2016, 2017; CONAGUA SGT, 2018); de los cuales 12 presentan problemas de sobreexplotación (CONAGUA SGT, 2018).

En el estado de Sonora hay acuíferos que presentan ambas problemáticas, debido al considerable volumen de agua que se destina a la agricultura, lo cual produce el abatimiento de los niveles del agua subterránea (Castillo, 2003). El acuífero Costa de Hermosillo es un ejemplo de esto, pues su historia de explotación inicia desde el año 1946, alcanzando su máximo volumen de extracción en 1965, y el cual se ha tenido que reducir, ya que esta actividad propició la pérdida de carga hidráulica en el acuífero, originando un cono de abatimiento que modificó las líneas de flujo, pues en condiciones normales se dirigían del continente hacia el mar, y ahora se dirigen del litoral hacia el continente, creando la penetración de agua salada (Corona y Gómez, 2001). Como consecuencia, la presencia de agua de mala calidad debido a las altas concentraciones de sales, obligó a abandonar campos agrícolas y a reubicar pozos, para evitar daños en los cultivos y el suelo (Corona y Gómez, 2001).

La mayoría de los acuíferos costeros de la región noreste del país cumplen con el servicio de abastecimiento de agua para consumo humano y para el de riego agrícola (Román et al., 2010).

2.2 Problemática de los plaguicidas en México

México posee una superficie sembrada promedio anual de 21.85 millones de hectáreas (considerando el año agrícola y los cultivos perennes, en régimen de riego y temporal), tomando el periodo entre 2002 a 2017 (SIAP, 2018). En el decenio de 1992 a 2002 se apreció una tendencia de crecimiento en el consumo de plaguicidas por hectárea, siendo el consumo máximo de 1.8 toneladas por cada mil hectáreas, correspondiente a los años 1999 y 2002, y el mínimo, de 1.3 toneladas por cada mil hectáreas, a los años de 1992 y 1995 (SEMARNAT, 2005). En el año 2013 se estimó que el promedio anual de consumo de plaguicidas en México era de aproximadamente 35 mil toneladas, alcanzando en 2009 el valor más alto en consumo mundial con 36.3 mil toneladas (Ortíz, 2013).

Con los datos que se tenían disponibles para el año 2005 se determinó que los estados con mayor uso de plaguicidas fueron, en orden descendente: Sinaloa, Chiapas, Veracruz, Jalisco-Nayarit-Colima, Sonora-Baja California, Tamaulipas, Michoacán, Tabasco, Estado de México y Puebla-Oaxaca (Albert, 2005).

Las intoxicaciones registradas por plaguicidas que se presentaron en el país durante el periodo de 1995 a 2016 fueron de 82,783 casos (SS, 2016). En la tabla 2.1 se muestran los estados que presentaron el mayor número de casos, siendo Jalisco el que presenta la tasa más alta; sin embargo, a partir del año 2000 mostró una tendencia a la baja, exceptuando los años 2003 y 2004.

Tabla 2.1. Estados con mayor número de intoxicaciones por plaguicidas (periodo 1995–2016).

Estado	No. de intoxicaciones por plaguicidas
Jalisco	16,244
Nayarit	6,888
Chiapas	5,280
Michoacán	5,010
Sinaloa	4,867
Veracruz	4,825
Guerrero	4,491
Morelos	4,319
México	3,202
Guanajuato	2,658

Sinaloa es uno de los estados con mayor uso de plaguicidas debido a su importancia en la producción agrícola, pues abarca aproximadamente el 5% de la superficie total

agrícola de México, siendo el municipio de Guasave uno de los que más territorio aporta (CODESIN; 2013), pues en el año 2017 este municipio ocupó el primer lugar en tener la mayor superficie agrícola sembrada en dicho estado (CODESIN, 2018).

En el año 2007 se determinó que en Guasave se aplican más de 30 ingredientes activos, de los cuales la mayoría son organofosforados, y que el agua subterránea de dicho municipio no contiene ningún compuesto organoclorado que pudiera afectar la salud humana al utilizarlo o consumirlo, ya que este tipo de plaguicidas no se utiliza en esta región (Mellado, 2007).

En el trabajo de Gonzáles (2005) se mencionan los plaguicidas que más se utilizaron en el distrito de riego 063 "Guasave" en el ciclo otoño-invierno de 1998-1999, entre ellos se presentaron 3 compuestos organofosforados, los cuales se mencionan a continuación con base en el ingrediente activo: Paratión metílico el cual es extremadamente tóxico, Clorpirifos etil que es altamente tóxico y Diazinon 25 E de toxicidad moderada (Gonzáles, 2005).

Hernández y Hansen (2011) determinaron que el grupo de sustancias más utilizado en el DR 063 fue el organofosforado (Clorpirifos etílico y Metamidofós), presentando una toxicidad moderada; en segundo lugar el de sal de ácido benzoico (Dicamba), el cual es ligeramente tóxico; y en tercer lugar el grupo clorofenoxi (2,4-D), que es moderadamente tóxico. Estos autores concluyen que el peligro de contaminación de cuerpos de agua por estos tres plaguicidas es poco para los grupos organofosforados y sal de ácido benzoico, debido a su baja persistencia con vidas medias cortas, tendiendo a adsorberse y acumularse en la materia orgánica; mientras que para el grupo clorofenoxi el peligro es mayor, ya que a pesar de tener baja persistencia con vidas medias cortas, se adsorben y se acumulan poco, por lo que se espera que tengan más movilidad en los suelos.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Intrusión salina

En un acuífero costero, hay una relación de equilibrio natural entre el agua dulce del acuífero que descarga al mar y el agua salada de origen marino que pugna por penetrar tierra adentro (López y Gómez, 2007). La intrusión salina es un proceso dinámico, pues en los periodos de menor recarga del acuífero el frente de agua salada avanza tierra adentro y retrocede hacia el mar cuando la recarga aumenta (López y Gómez, 2007); es por ello que se define como el movimiento permanente o temporal del agua salada tierra adentro, desplazando al agua dulce (Custodio y Llamas, 1976). A la masa de agua salada que penetra o intrusión el acuífero se le llama cuña de agua salada, por su forma de cuña en sección y su vértice se apoya en la base del acuífero tierra adentro, debido a su mayor densidad (Custodio y Llamas, 1976; López y Gómez, 2007).

El equilibrio natural entre el agua dulce y la salada puede verse afectado por la acción humana al modificar la descarga de agua dulce al mar, esto debido fundamentalmente a la sobreexplotación del acuífero, propiciando el descenso de la superficie piezométrica y en consecuencia la intrusión de la cuña de agua salada tierra adentro (López y Gómez, 2007).

3.1.1. Relaciones de salinidad

Los acuíferos costeros se caracterizan generalmente por variaciones en la salinidad del agua subterránea en el espacio y el tiempo (Post y Abarca, 2009), debido a la interacción agua dulce y agua salada.

El agua dulce y el agua salada son líquidos que tienden a ser inmiscibles, por tal motivo su comportamiento en la interfaz no se presenta como un límite brusco, sino que se pasa de un fluido a otro a través de una zona de mezcla, también llamada zona de transición (Custodio y Llamas, 1976). En esta zona se origina un estado de equilibrio de las dos aguas dando como resultado la formación de agua salobre (Rocha y Cardona, 2015), como se muestra en la figura 3.1. El agua salada es aquella que posee un contenido en cloruros muy parecido al del agua de mar (Custodio y Llamas, 1976), lo que la diferencia es que ésta ha interactuado por un largo tiempo con la geología de la zona (Rocha y Cardona, 2015).

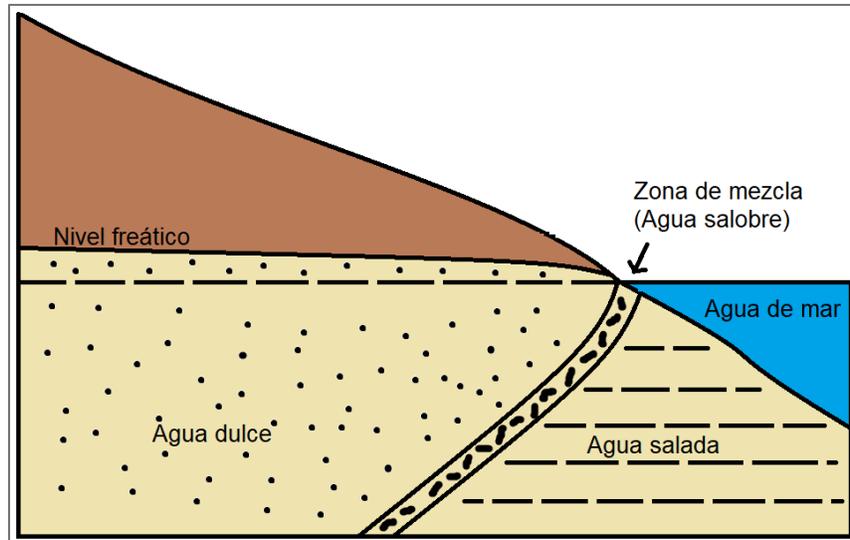


Figura 3.1. Esquema de un acuífero costero.

La salinidad se puede definir de diferentes maneras, Martín Knudsen en 1901, la definió como “el número total de gramos de material sólido disuelto en un kilo de agua de mar” (INVEMAR, 2003), o como “el contenido en gramos de sales disueltas por kilogramo de agua mar” (Cognetti et al., 2001). Ya que se habla de la proporción de masa disuelta con respecto al agua, normalmente se expresa en gramos por litro (gr/l) o partes por mil (ppt) (Tarbuck y Lutgens, 2005).

Con base en la cantidad de sólidos disueltos totales (SDT) se puede clasificar el agua en diferentes tipos (IMTA, 2007), como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 3.1. Tipo de agua según la cantidad de SDT (IMTA, 2007).

Tipo	SDT (mg/l)
Agua dulce (potable)	<1000
Agua salobre	1000 – 10000
Agua salada	10000 – 30000
Agua de mar	30000 – 50000

La conductividad eléctrica (CE) es el parámetro que más se utiliza para cuantificar la salinidad, esto tiene que ver con la velocidad que posee la corriente eléctrica para atravesar una solución salina, la cual es proporcional a la concentración de sólidos disueltos totales (Aguirre, 2009); es decir, que a mayor salinidad o SDT, mayor será la CE. Esto es debido a los iones cargados positiva y negativamente que se encuentran disueltos en el agua, pues son los que conducen la corriente, así que el valor de CE dependerá del número de iones presentes (Aguirre, 2009). A continuación se muestra una tabla con los valores de conductividad eléctrica para cada tipo de agua clasificada con base en los SDT:

Tabla 3.2. CE para los diferentes tipos de agua (Rocha y Cardona, 2015).

Tipo de agua	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$)
Agua dulce (potable)	<2500
Agua salobre	2500-15000
Agua salada	15000-50000
Agua de mar	>50000

3.1.2. Relaciones de densidad

La densidad es una propiedad del agua que depende de la salinidad, temperatura y presión; a temperatura y presión constantes, la densidad varía con la salinidad (Martínez, 2003). Se consideran como condiciones estándar 0 o 4° y presión de una atmósfera, para determinar la densidad del agua (Martínez, 2003); la densidad del agua dulce en estas condiciones es de 1000 kg/m³ y del agua de mar al igual que de la salada es de 1025 kg/m³. Su unidad en el Sistema Internacional es kg/m³, aunque con frecuencia también es expresada en g/cm³.

3.1.3. Relación de Ghyben – Herzberg (g-h)

Ghyben (1889) y Herzberg (1901) fueron los primeros en realizar estudios de la relación agua dulce y agua salada en regiones costeras de Holanda y Alemania (Custodio y Llamas, 1976), ellos fueron quienes abordaron la relación con la aproximación más clásica, la hidrostática, ya que consideran el agua dulce y el agua salada como líquidos estáticos e inmiscibles, limitados por una interfaz brusca. Bajo estas condiciones se establece una diferenciación estrictamente gravitatoria, debido a la diferencia de densidades, de forma que el agua dulce “flota” sobre la salada, separadas por una superficie o interfaz (Pulido, 2014). Las consideraciones básicas utilizadas para la fórmula de Ghyben – Herzberg son (Custodio y Llamas, 1976):

- a) El flujo subterráneo de agua dulce es perfectamente horizontal y por tanto el potencial hidráulico es constante a lo largo de cualquier vertical; es decir, que las superficies equipotenciales poseerán el mismo valor a lo largo de ellas, lo cual se cumple con gran aproximación lejos de la orilla (Pulido, 2014).
- b) El flujo de agua salada se contempla en reposo (Pulido, 2014).
- c) La interfaz entre agua dulce y salada se considera como un plano, no existiendo zona de mezcla.

En estas condiciones, en un punto cualquiera A (figura 3.2) de la interfaz debe equilibrarse la presión del agua dulce y del agua salada.

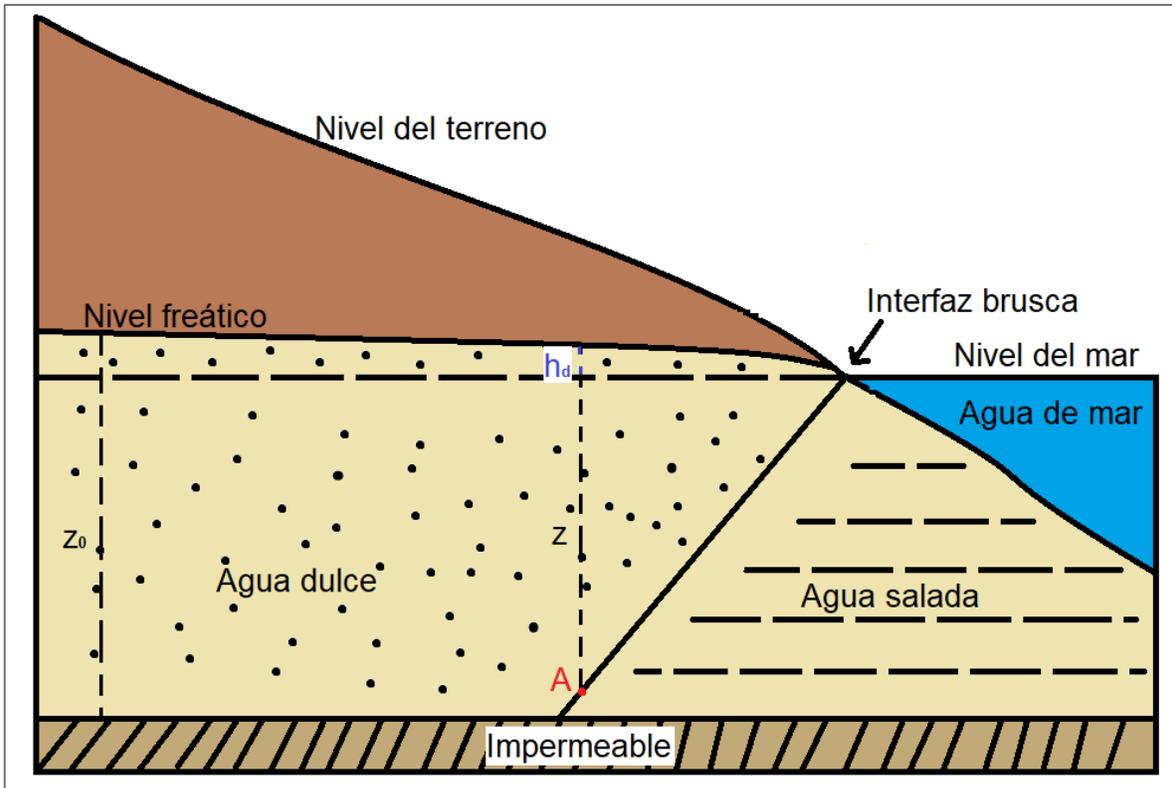


Figura 3.2. Equilibrio del agua dulce-salada en una zona costera de acuerdo con los supuestos de Ghyben-Herzberg.

La fórmula de Ghyben – Herzberg se expresa de la siguiente manera:

$$(h_d + z) \gamma_d = z \gamma_s \quad (1)$$

Donde:

h_d = cota sobre el nivel medio del mar del agua dulce en la vertical del punto A

z = profundidad bajo el nivel del mar del punto A

γ_d = peso específico del agua dulce $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$

γ_s = peso específico del agua salada $\approx 1025 \text{ kg/m}^3$

$1/\beta = \gamma_d / (\gamma_s - \gamma_d)$

así pues:

$$z = h_d (\gamma_d / (\gamma_s - \gamma_d)) \quad (2)$$

resulta que:

$$z = h_d (1 / \beta) \quad (3)$$

Con base en la figura 3.2 se puede decir que la máxima penetración de agua salada está limitada por la intersección del plano de la interfaz y el fondo impermeable del acuífero, y esto se produce cuando:

$$h_d = z_o (1/\beta) \quad (4)$$

Siendo z_o la profundidad de la base del acuífero bajo el nivel medio del mar (Custodio y Llamas, 1976).

3.1.4. Modelo de Glover

Glover en 1959, desarrolló unas fórmulas para determinar la profundidad de la interfaz agua dulce-salada y el ancho de la franja de agua dulce que descarga hacia el mar (Custodio y Llamas, 1976), él lo hizo a partir de la aproximación hidrodinámica (Pulido, 2014), pues consideró que a lo largo de la interfaz agua dulce-salada, la presión del agua salada se encuentra estática debido a la mayor densidad que posee, y ésta es contrarrestada por las presiones que impulsan el agua dulce hacia el mar, es por ello que el agua dulce escapa por un espacio entre la interfaz y la línea de costa al mar; un aumento en el flujo de agua dulce puede ampliar este espacio (Glover, 1959).

La diferencia principal entre Ghyben – Herzberg y Glover es el flujo de agua dulce que fluye hacia el mar escapando por un espacio estrecho; esta diferencia radica en que la interfaz brusca propuesta por los primeros autores es tal cual un límite entre ambos líquidos, mientras que Glover al considerar un flujo de agua escapando por un espacio presenta una migración de la interfaz, pues esta puede ir cambiando de lugar, es decir, en condiciones de flujo constante la interfaz se vería atenuada por la acción de la marea (pues al subir, el espacio por donde escapa el agua dulce se reduciría, moviéndose el plano de la interfaz hacia tierra adentro); y por el ascenso del flujo de agua dulce (pues el espacio de escape aumentaría moviendo el plano de la interfaz mar adentro), manteniendo una zona de difusión o mezcla entre el agua dulce y el agua salada.

Custodio y Llamas en 1976, describieron los supuestos básicos para la fórmula de Glover, la cual define la ecuación de la interfaz con mayor exactitud, estos son:

- a) La interfaz entre agua dulce y salada se considera como un plano, no existiendo zona de mezcla.
- b) El acuífero es confinado y su techo coincide con el nivel del mar.
- c) El agua dulce sale al mar por una superficie horizontal de longitud x_o .
- d) El mar no sufre fluctuaciones de nivel y el agua salada en el acuífero es estática.
- e) El acuífero es de gran espesor, de modo que en la zona de estudio la interfaz no toca a la base del mismo.

En cuanto a la red de flujo está representada por la figura 3.3 (Glover, 1959):

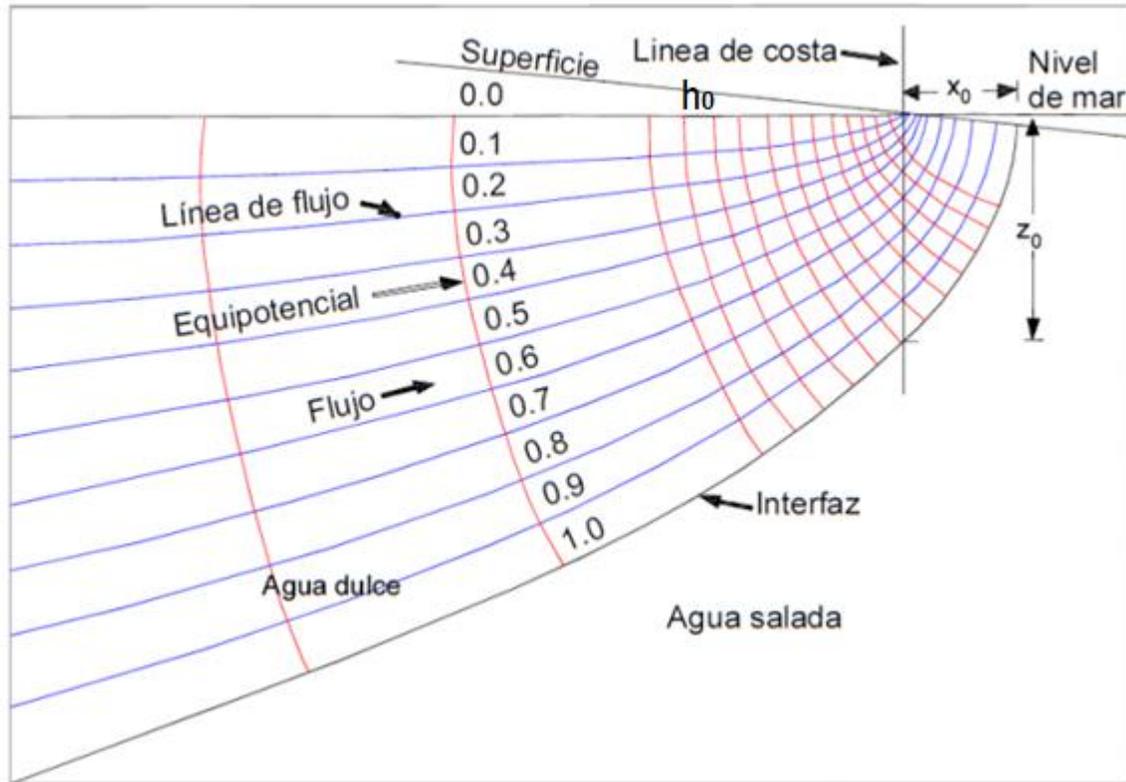


Figura 3.3. Red de flujo cerca de una playa, modificada de Glover, 1959.

La ecuación de la interfaz es (fórmula de Glover):

$$z^2 - (2 q_0 x / (\beta k)) - (q_0^2 / (K^2 \beta^2)) = 0 \quad (5)$$

donde:

- x = distancia de un punto en estudio a la línea de costa
- z_0 = profundidad de la interfase bajo el nivel del mar
- q_0 = caudal de agua dulce hacia al mar por unidad de longitud de costa
- k = permeabilidad (Conductividad hidráulica)
- $\beta = (\gamma_s - \gamma_d) / \gamma_d \approx 1/40 = 0.025$

y el agua escapa al mar por una franja de ancho:

$$x_0 = q_0 / (2 K \beta) \quad (6)$$

valiendo la profundidad de la interfaz z_0 y el nivel piezométrico h_0 en la costa:

$$z_0 = q_0 / (k \beta) ; h_0 = q_0 / k \quad (7)$$

Si q_0 disminuye, disminuya x_0 .

La fórmula puede aplicarse sin gran error a acuíferos libres con gradiente piezométrico pequeño y cuando la pendiente del terreno bajo el mar es pequeña (Custodio y Llamas, 1976).

3.2. Plaguicidas

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), en su Código Internacional de Conducta para la Distribución y Utilización de Plaguicidas (2006), un plaguicida es “cualquier sustancia o mezcla de sustancias destinadas a prevenir, destruir o controlar cualquier plaga, incluyendo los vectores de enfermedades humanas o de los animales, las especies de plantas o animales indeseables que causan perjuicio o que interfieren de cualquier otra forma en la producción, elaboración, almacenamiento, transporte o comercialización de alimentos, productos agrícolas, madera y productos de madera o alimentos para animales, o que pueden administrarse a los animales para combatir insectos, arácnidos u otras plagas en o sobre sus cuerpos”. Este término incluye las sustancias destinadas a utilizarse como reguladoras del crecimiento de las plantas, las que provoca la caída prematura de las hojas de los árboles y plantas, las utilizadas para eliminar humedad, los agentes para reducir la densidad de fruta o evitar la caída prematura de la fruta, y las aplicadas a los cultivos antes o después de la cosecha para proteger el producto contra la deterioración durante el almacenamiento y transporte.

En México la Ley General de Salud define como plaguicida a “cualquier sustancia o mezcla de sustancias que se destina a controlar cualquier plaga, incluidos los vectores que transmiten las enfermedades humanas y de animales, las especies no deseadas que causen perjuicio o que interfieran con la producción agropecuaria y forestal, así como las sustancias defoliantes y las desecantes” (Art 278). Mientras que la Ley Federal de Sanidad Vegetal lo define como “insumo fitosanitario destinado a prevenir, repeler, combatir y destruir a los organismos biológicos nocivos a los vegetales, sus productos o subproductos”. Dicha Ley también define insumo fitosanitario como “cualquier sustancia o mezcla utilizada en el control de plagas de los vegetales tales como plaguicidas, agentes de control biológico, feromonas, atrayentes, coadyuvantes y variedades de plantas cultivadas resistentes a plagas” (Art. 5).

3.2.1. Clasificación de los plaguicidas

El catálogo de plaguicidas publicado en México en el año 2004 es un documento oficial elaborado por las Secretarías que Integran a la Comisión Intersecretarial para el Control del Proceso y Uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas (CICOPLAFEST), este catálogo clasifica los plaguicidas de la siguiente manera:

1. Concentración

- a) Plaguicida técnico: la máxima concentración del ingrediente activo obtenida como resultado final de su fabricación, de la cual se parte para preparar un plaguicida formulado (NOM-045-SSA1- 1993).
- b) Plaguicida formulado: mezcla de uno o más plaguicidas técnicos, con uno o más ingredientes conocidos como “inertes”, cuyo objeto es dar estabilidad al ingrediente activo o hacerlo útil y eficaz; constituye la forma usual de aplicación de los plaguicidas (NOM-045-SSA1-1993).

2. Organismos que controlan

- a) Insecticida: Control de insectos
- b) Acaricida: Control de ácaros
- c) Fungicida: Control de hongos y levaduras
- d) Bactericida: Control de bacterias
- e) Antibiótico: Control de bacterias
- f) Herbicida: Control de hierba y maleza
- g) Rodenticida: Control de roedores
- h) Molusquicida: Control de moluscos

3. Modo de acción

- a) De contacto: Actúa principalmente al ser absorbido por los tejidos externos de la plaga y difundirse por su interior.
- b) De ingestión: Debe ser ingerido por la plaga pasando por su tubo digestivo (independientemente de que la plaga sea masticadora o chupadora) para su acción efectiva.
- c) Sistémico: Al aplicarse en plantas o animales, se absorbe y traslada por su sistema vascular a puntos remotos del lugar en que se aplica y en los cuales actúa.
- d) Fumigante: Se difunde en estado gaseoso o de vapor y penetra por todas las vías de absorción.
- e) Repelente: Impide que las plagas ataquen.
- f) Defoliante: Causa la caída prematura del follaje de las plantas.

4. Composición química

- a) Compuestos inorgánicos: Estos son compuestos que carecen de carbono. Ejemplos de esto son los derivados de cobre, azufre, zinc y aluminio.
- b) Compuestos orgánicos: Son aquellos que contienen átomos de carbono en su estructura química, la mayoría son de origen sintético, fabricados a partir de compuestos químicos básicos; algunos son extraídos de plantas, por lo que se conocen como botánicos. Los compuestos orgánicos sintéticos utilizados como plaguicidas

pertenecen a distintos grupos o familias químicas, algunos ejemplos de estos son: los compuestos organoclorados, los compuestos organofosforados, los carbamatos y los piretroides. Cada uno de estos grupos tiene algunas características comunes y en cualquiera de ellos puede haber insecticidas, acaricidas, herbicidas, fungicidas u otros tipos de plaguicidas.

- c) Plaguicidas biológicos: Se llama así a los virus, microorganismos o sus subproductos, formulados como insumos, que pueden controlar a una plaga en particular.

5. Uso al que se destinan

- a) Agrícolas: Uso en diversas extensiones, en sistemas de producción agrícola y en productos y subproductos de origen vegetal.
- b) Forestales: Uso en bosques y maderas
- c) Urbanos: Uso exclusivo en áreas urbanas, industriales, áreas no cultivadas, drenes, canales de riego, lagos, presas, lagunas y vías de comunicación.
- d) Jardinería: Uso en jardines y plantas de ornato.
- e) Pecuarios: Uso en animales o instalaciones de producción intensiva o extensiva cuyo producto será destinado al consumo humano o a usos industriales. Incluye el uso en animales domésticos.
- f) Domésticos: Uso en el interior del hogar.
- g) Industriales: Se utiliza como materia prima en el proceso industrial para la formulación de plaguicidas o productos de uso directo. (NOM-045-SSA1-1993, NOM-046-SSA1-1993).

Otra forma adicional de clasificar a los plaguicidas es de acuerdo a su persistencia y toxicidad (Botello y Rendón, 2005).

6. Persistencia

La persistencia de un plaguicida es su duración a partir del tiempo de aplicación. Los productos de degradación de los plaguicidas o subproductos pueden producir efectos adversos al ambiente y a la salud humana. Con base en esto pueden ser (CICOPLAFEST, 2002):

- a) Ligeramente persistentes: menos de cuatro semanas.
- b) Poco persistentes: de cuatro a veintiséis semanas.
- c) Moderadamente persistentes: de veintisiete a cincuenta y dos semanas.
- d) Altamente persistentes: más de un año y menos de 20.
- e) Permanentes: más de veinte años.

7. Toxicidad

Esta clasificación fue establecida por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 1978, basada en su peligrosidad o grado de toxicidad aguda, definida como “la capacidad del plaguicida de producir un daño agudo a la salud a través de una o múltiples exposiciones, en un período de tiempo relativamente corto”. La toxicidad se mide a través de la dosis letal media (DL50) o de la concentración letal media (CL50); en la tabla 3.3 se muestran los criterios para dicha clasificación.

La Dosis letal media (DL50) es la estimación estadística de la cantidad de tóxico necesaria para matar al 50 por ciento de una población representativa de la especie en experimentación (usualmente ratas de laboratorio), y se expresa en miligramos de tóxico por kilogramo de masa del animal (mg/kg); en este caso se ensaya el efecto letal de la sustancia, administrándola por vía oral o dérmica (NOM-Y-302-1988).

Cuando la exposición a la sustancia tóxica es a través del aire o el agua se le llama Concentración letal media (CL50) y se expresa en miligramos de tóxico por litro (mg/l), cuando se trata de volumen como vapores o gases, se expresa en partes por millón (Ramírez y Lacasaña, 2001; NOM-Y-302-1988).

Tabla 3.3. Criterios para la clasificación toxicológica de los plaguicidas según la OMS en 1978 (NOM-Y-302-1988; Jiménez, 2017; Bedmar, 2011).

Categoría	DL50 (ratas), mg/kg de plaguicida				
	Por vía oral		Por vía dérmica		Por vía respiratoria
	Sólidos	Líquidos	Sólidos	Líquidos	Exposición: 1 hora
Extremadamente tóxico	≤ 5	≤ 20	≤ 10	≤ 40	≤ 0.2
Altamente tóxico	5 – 50	20 - 200	10 - 100	40 - 400	0.2 - 2
Moderadamente tóxico	50 - 500	200 - 2000	100 - 1000	400 - 4000	2 - 20
Ligeramente tóxico	500 - 2000	2000 - 3000	> 1000	> 4000	> 20
Normalmente no ofrece peligro	> 2000	> 3000			

3.2.2. Compuestos organofosforados

Estos plaguicidas son sustancias orgánicas y su fórmula original deriva de la molécula del ácido fosfórico (Ferrer, 2003), tienen la característica de ser liposolubles y volátiles lo cual facilita su absorción (Fernández et al, 2010), por todas las vías: digestiva, dérmica y respiratoria (Ferrer, 2003). Poseen una toxicidad variable que puede ir de extrema a moderada, y los efectos pueden ser diferentes de acuerdo al grado de toxicidad y vía de entrada en el organismo (Fernández, 2010).

Su vía de entrada más importante es la absorción dérmica, ya que es la responsable del mayor número de intoxicaciones (Iglesia y Delgado, 2000); cuando la absorción

de estos plaguicidas es por esta vía, los efectos aparecen de inmediato, como existencia de lesiones dérmicas y fiebre (Ferrer, 2003), entre las 2 o 3 horas, pero en ocasiones es posible observarlos con anterioridad, entre los 30 y 60 minutos después del contacto, esto dependiendo de las circunstancias de la exposición (Iglesia y Delgado, 2000). Esta es seguida de la vía oral, considerada en caso de ingestión accidental y falta de higiene en los alimentos. Finalmente está la vía respiratoria que cuenta con menor importancia, ya que la inhalación depende de la volatilidad del compuesto, del tipo de formulación y de la técnica de aplicación (Iglesia y Delgado, 2000).

Las intoxicaciones por compuestos organofosforados pueden generar tres cuadros clínicos: la intoxicación aguda, el síndrome intermedio y una neurotoxicidad tardía (Fernández, 2010).

La intoxicación aguda aparece entre pocos minutos hasta doce horas posterior al contacto con el tóxico, dependiendo de la edad del paciente, la cantidad ingerida y la toxicidad del compuesto (Fernández, 2010). Esta intoxicación se caracteriza por algunos efectos como: sudoración, salivación y lagrimeo, bronco constricción e hipersecreción bronquial, espasmos abdominales con vómitos y diarrea, taquicardia, temblor muscular, cefaleas, cansancio ligero, vértigo, ansiedad, confusión, convulsiones, depresión del centro respiratorio y coma (Iglesia y Delgado, 2000).

El síndrome intermedio aparece entre las 24 y 48 horas después de la exposición (Fernández, 2010); en él se han descrito síntomas como parálisis de algunos músculos incluyendo los respiratorios, comprometiendo la función respiratoria; en algunos casos ha producido la muerte de pacientes (Ferrer, 2003).

La neurotoxicidad retardada puede iniciarse entre una a cuatro semanas después de la exposición aguda al tóxico (Fernández, 2010), y se plasma en una polineuropatía (Ferrer, 2003), que consiste en una disfunción simultánea de varios nervios periféricos en todo el cuerpo predominantemente del tipo motor y sensorial (Ferrer, 2003).

Los plaguicidas organofosforados no se acumulan en la grasa de los organismos ni en el ambiente gracias a la rapidez con la que se biodegradan (Marcus y Ciudad, 1988; Ferrer, 2003), dicha biodegradación induce la transformación de estas sustancias en subproductos, que en algunos casos poseen mayor toxicidad que el compuesto original (Narváez et al., 2012). Los mecanismos fundamentales de la degradación de estos compuestos son la biológica, la hidrólisis catalizada por metales, la oxidación y fotólisis (Alcántara, 2014). La vida media de los organofosforados y sus productos de biotransformación es relativamente corta (horas o días) (Iglesia y Delgado, 2000), o dicho de otra manera, tienen una relativa baja persistencia en el medio ambiente (Badii y Varela, 2008).

Sin embargo, se ha observado que los compuestos organofosforados pueden preservarse por sorción dentro de suelos y sedimentos e inclusive en material

particulado, transportándose por el agua o aire y permaneciendo biodisponibles hasta encontrar las condiciones propicias para su liberación, lo cual se relaciona con su capacidad para asociarse con la materia orgánica y arcillas presentes en los materiales sólidos (Alcántara, 2014); tal es el caso del diazinón, clorpirifos y paratión, que tienen un considerable potencial de acumulación en el suelo y en la biota (Narváez et al, 2012).

En un plaguicida, el compuesto que causa el efecto contra las plagas se llama ingrediente activo (Wolansky, 2011). A continuación se presenta una tabla con el nombre del ingrediente activo de algunos compuestos organofosforados y los subproductos en los que se degradan.

Tabla 3.4. Ingredientes activos de plaguicidas organofosforados y sus subproductos de degradación.

Ingrediente activo	Subproductos	Referencia
Diazinon	2-isopropil-4-metil-6-hidroxipirimidina	INECC, 2019.
	Diazoxon	FAO y OMS, 1995.
	4-hidroxi-2-isopropil-6-metilpirimidina	FAO y OMS; 1995.
Paratión	Aminoparatión	Castro, 2008.
	paraoxón-metilo	ATSDR, 2017.
Dimetoato	Metoato	Marell y Candela, 1998.
Clorpirifos	oxon-clorpirifos	Cocca et al., 2015.
	3,5,6-tricloro-2-piridinol	Watts, 2012.
	3,5,6-tricloro-2-metoxipiridina	UH, 2017.
	O-etil-O-3,5,6-tricloro-2-piridol	Watts, 2012.

4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. Ubicación

El acuífero Río Sinaloa se localiza en la porción centro norte del estado de Sinaloa, cubriendo una superficie aproximada de 15,348 km². La región costera del acuífero cubre prácticamente en su totalidad el municipio de Guasave (figura 4.1), abarcando una superficie de 3005.14 km². Guasave colinda al norte con los municipios de Ahome, El Fuerte y Sinaloa; al este con Salvador Alvarado y Angostura, y al sur y oeste con el Golfo de California (INAFED, 2010).

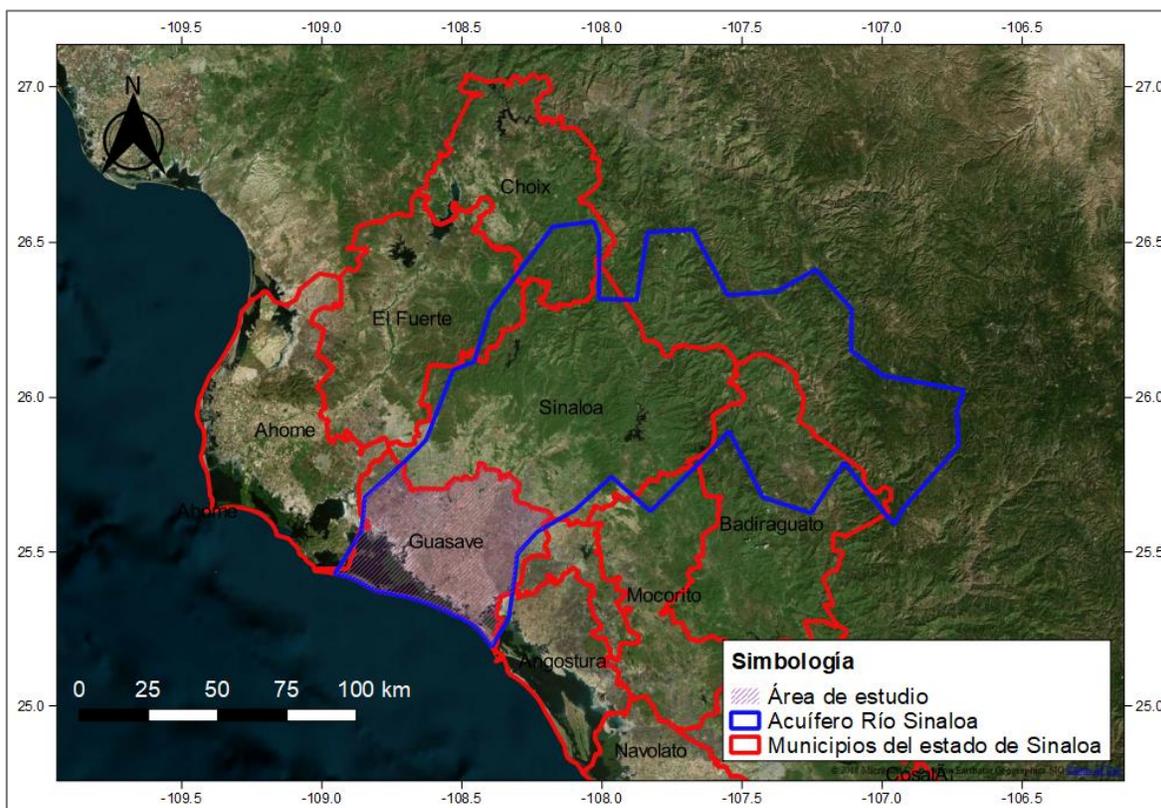


Figura 4.1. Área de estudio, región costera del acuífero Río Sinaloa.

4.2. Fisiografía

De acuerdo a la clasificación fisiográfica del INEGI, el área de estudio se encuentra ubicada en la Suprovincia Llanura Costera y Deltas de Sonora y Sinaloa, dentro de la Provincia Fisiográfica Llanura Costera del Pacífico, abarcando las zonas costeras de Sonora, Sinaloa y Nayarit (INEGI, 2018), como se muestra en la figura 4.2.

La Subprovincia Llanura Costera y Deltas de Sonora y Sinaloa, se caracteriza por tener abanicos aluviales, antiguos valles fluvio-deltaicos, pequeñas colinas, deltas actuales, estuarios, complejos lagunares, cauces de ríos y arroyos, ríos, depósitos eólicos y marinos (CONAGUA, 2015). Esta subprovincia tiene un relieve plano casi en su totalidad y está constituido por una planicie costera angosta y alargada, cubierta en su mayor parte de aluviones depositados por los ríos que bajan al mar desde la Sierra Madre Occidental (INEGI, 2008).



Figura 4.2. Fisiografía de la zona de estudio.

4.3 Geomorfología

La geomorfología de la región costera del acuífero Río Sinaloa, se conforma por amplias planicies que integran el valle agrícola del municipio de Guasave, presentándose planicies deltaicas detrás de planicies costeras (SEDATU, 2014). En las primeras, el río Sinaloa ha depositado materiales deltaicos a través del tiempo, formando numerosos meandros que hacia su desembocadura se vuelven divagantes, dejando las marcas de antiguos cauces, que en muchos casos han sido rehabilitados como drenes agrícolas (CONAGUA, 2015). Mientras que las planicies costeras están asociadas a zonas cercanas a las costas, siendo este rasgo geomorfológico, el que predomina en el área de estudio; además, debido a su proximidad con el mar existen playas, marismas y esteros pantanosos (SEDATU, 2014).

4.4. Clima

Debido a su ubicación geográfica, en el área de estudio prevalecen tres tipos de clima: el semiseco cálido, el seco cálido y el muy seco cálido (INEGI, 2018), (Figura 4.3). Dicha área presenta lluvias en verano y lluvias invernales, estas últimas con un porcentaje menor al 5% de la precipitación anual (CONAGUA, 2015). Los vientos que predominan en la región tienen una dirección suroeste, y llegan a alcanzar velocidades de hasta 2 m/s (SEDATU, 2014).

El municipio de Guasave, tiene registrada una temperatura media anual de 24° C (INEGI, 2018), y una precipitación pluvial anual media de 392.8 milímetros, con una máxima de 760.3 y una mínima de 231.1 milímetros (SEDATU, 2014).

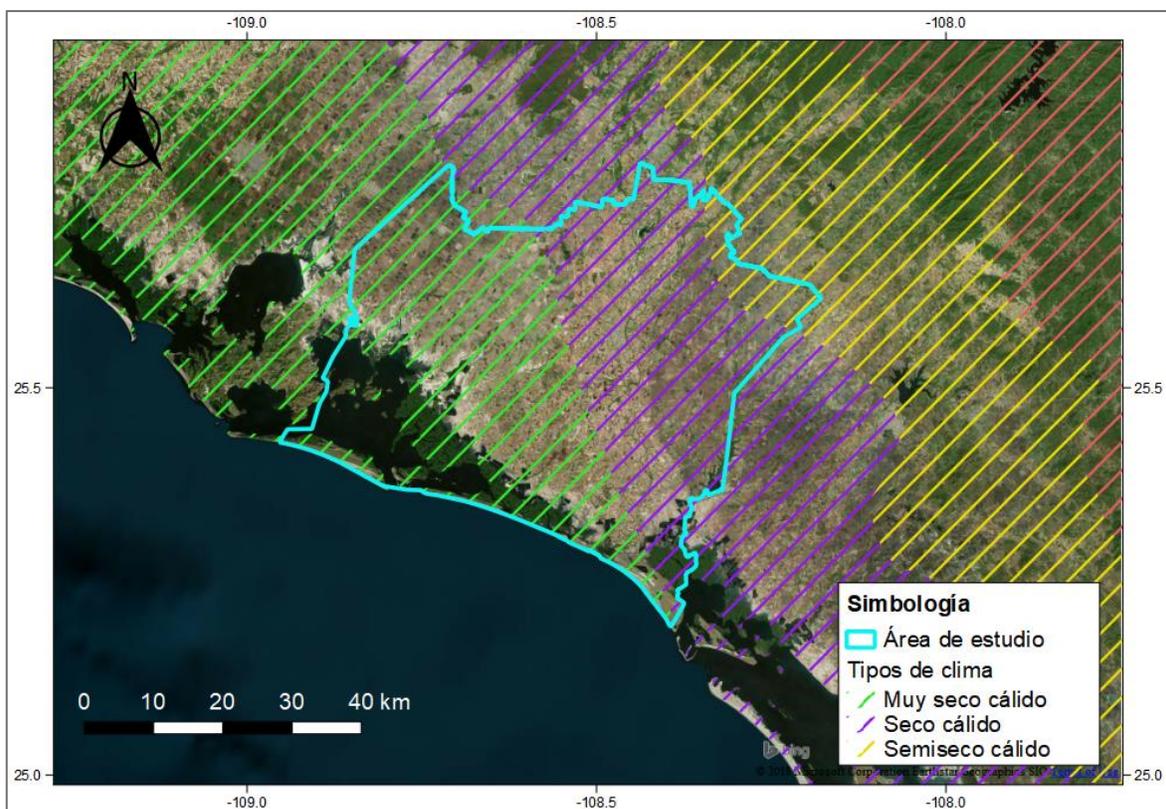


Figura 4.3. Cimas en el área de estudio.

4.5. Hidrología

La zona de estudio está ubicada dentro de la Región Hidrológica 10 "Sinaloa", y forma parte de tres cuencas, RH10F "Bahía Lechuguilla-Chuirá-Navachiste", RH10E "Río Sinaloa" y RH10D "Río Mocorito" (INEGI, 2001), como se aprecia en la figura 4.4.

La corriente superficial más importante en el área de estudio es el río Sinaloa o Petatlán (figura 4.4), el cual recibe los afluentes de los arroyos Ocoroni y Cabrera (SEDATU, 2014). Dicho río mide 70 kilómetros dentro de la superficie estudiada, es decir, el 17 por ciento de su longitud total, desembocando finalmente en el golfo de California (SEDATU, 2014). Otros de los arroyos que fluyen en la zona son El Mesquitillo y San Rafael; además de cuerpos de agua hacia la costa como las lagunas de Huyaqui y Chamicari, y los esteros La Presa y Cohui (COAGUA, 2015).

También existe una importante red de canales hidroagrícolas en los Distritos de Riego 075 “Río Fuerte” y 063 “Guasave”, que abarcan parte de la superficie de la región costera del acuífero Río Sinaloa (CONAGUA, 2015).

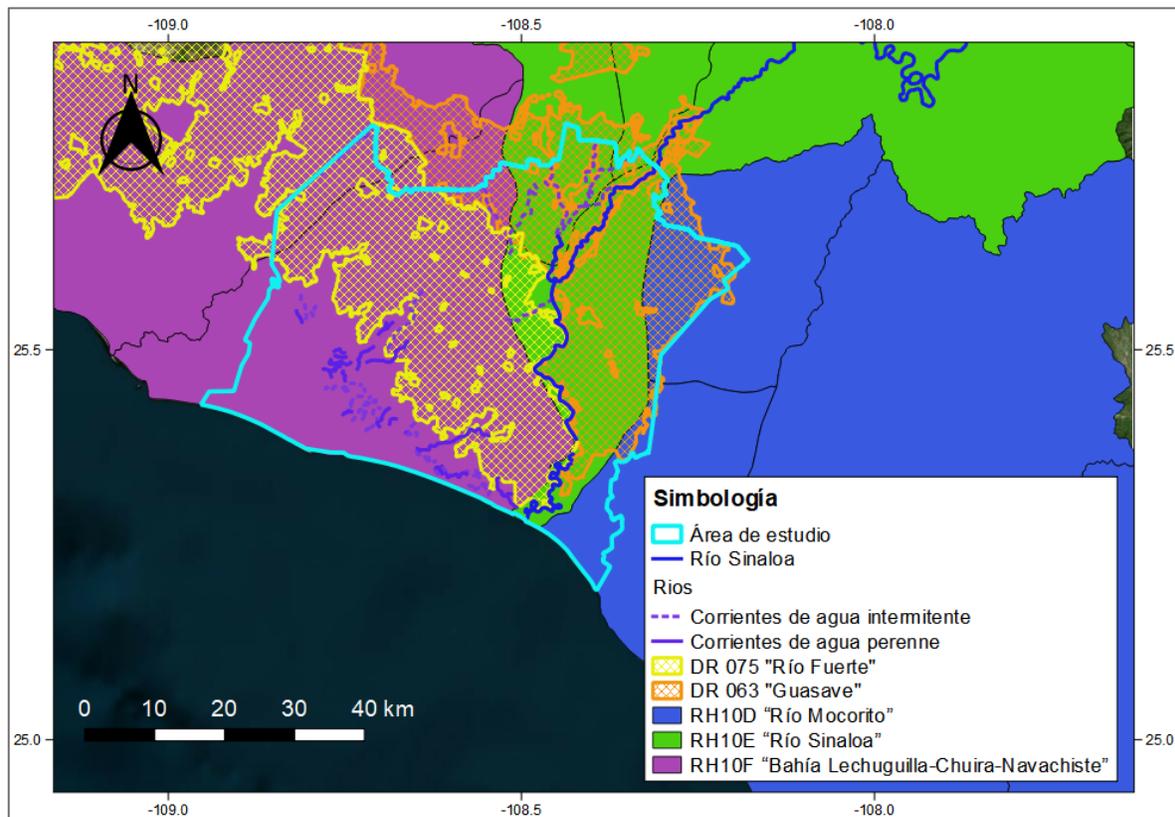


Figura 4.4. Hidrología del área de estudio.

4.6. Geología

La geología predominante en el área de estudio de acuerdo a la Carta Geológico-Minera “Los Mochis”, de clave G12-9 elaborada por el Servicio Geológico Mexicano, con escala 1:250,000, son depósitos aluviales, eólicos, lagunares y litorales; además, se puede observar que hay otros tipos de roca en pequeñas proporciones, como un conglomerado hacia la parte norte y pequeños afloramientos de brecha volcánica basáltica hacia el litoral, como se observa en la figura 4.5.

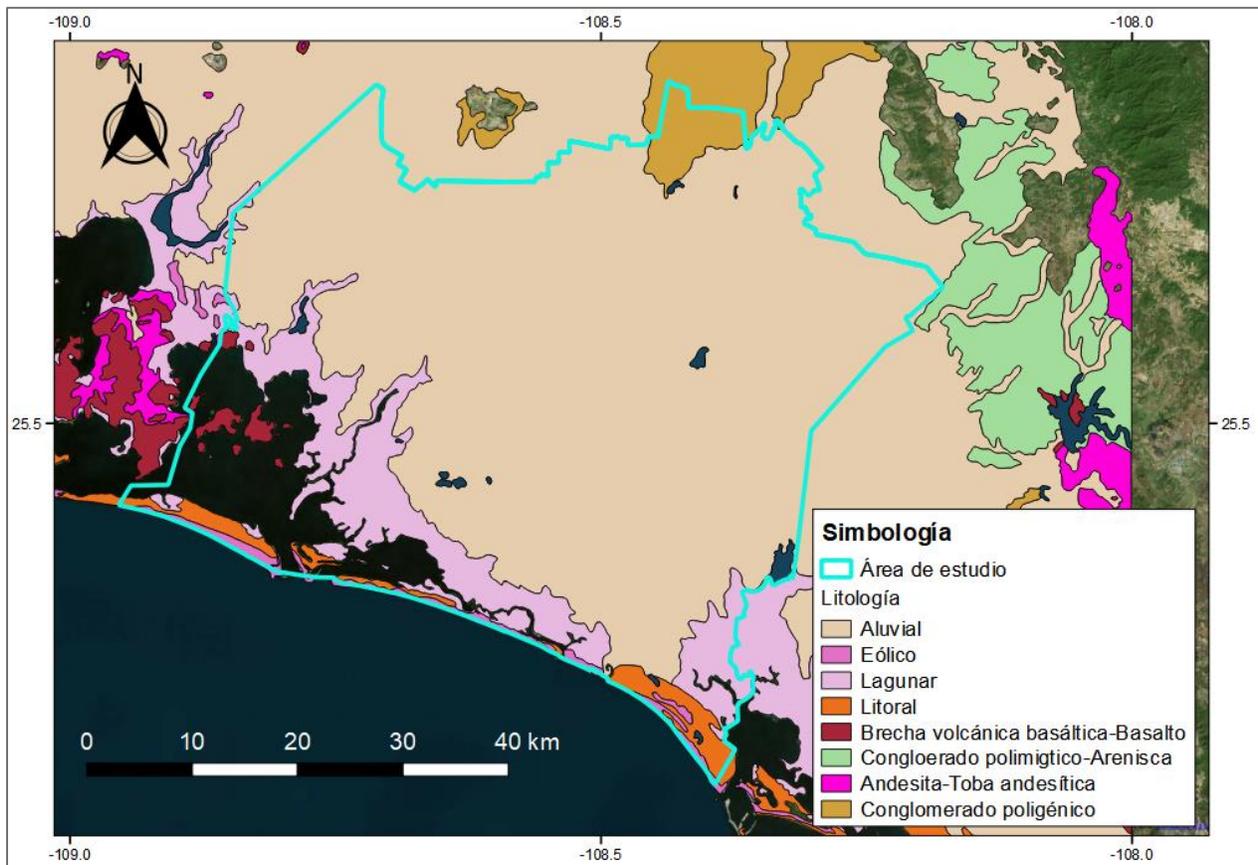


Figura 4.5. Geología del área de estudio.

4.6.1. Estratigrafía

La descripción de la estratigrafía de la región está basada en la carta anteriormente mencionada. Las unidades se encuentran en orden cronológico, de la más antigua a la más reciente:

Paleógeno

Paquete andesítico constituido por derrames, tobas y brechas que descansa discordantemente sobre rocas del Cretácico. Debido a su similitud litológica con la Formación San Blas y posición estratigráfica se le asigna un rango del Paleoceno-Eoceno. Dichas rocas se encuentran cubiertas discordantemente por riolitas al oriente de San Miguel.

El evento andesítico culmina a finales del Eoceno con un ciclo sedimentario, donde se depositaron areniscas provenientes de la desintegración de las andesitas, con intercalación de horizontes andesíticos y ocasionalmente conglomerados. La unidad subyace a paquetes riolíticos e ignimbríticos.

El Oligoceno Inferior se manifiesta por un conglomerado polimíctico con fragmentos de andesitas y/o rocas vulcanosedimentarias, bien consolidado con horizontes arenosos de origen volcánico; la edad se asignó en base a su posición estratigráfica.

Paleógeno – Neógeno

Durante el Oligoceno-Mioceno se presenta un vulcanismo de tipo extrusivo caracterizado por riolitas, tobas y brechas riolíticas e ignimbritas que coronan las partes altas de los cerros, mostrando comúnmente estructura de flujo y en ocasiones esferulitas; este depósito se encuentra cubriendo discordantemente a las rocas andesíticas.

Estos paquetes riolíticos fueron basculados y cubiertos en discordancia angular por depósitos piroclásticos de composición riolítica, constituidos por tobas arenosas; debido a su posición estratigráfica se les ubica a finales del Oligoceno e inicios del Mioceno, ya que forman parte del mismo paquete riolítico.

A finales del Neógeno y principios del Cuaternario se tiene el depósito de un conglomerado polimíctico semiconsolidado con fragmentos principalmente de andesita y riolita.

Cuaternario

Finalmente, el Cuaternario se constituye por coladas basálticas, brechas, depósitos conglomeráticos oligomícticos semiconsolidados, así como depósitos aluviales, lacustres, litorales y eólicos.

4.7. Hidrogeología

El acuífero Río Sinaloa es de tipo libre, y se encuentra alojado, en su porción superior, en los depósitos aluviales, eólicos, lagunares y litorales, así como en los conglomerados; esta es la unidad que actualmente se explota para satisfacer las necesidades de agua en la región (CONAGUA, 2015). La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas ígneas volcánicas y rocas sedimentarias, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las fronteras, barreras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico, están representados por las mismas rocas ígneas y sedimentarias al desaparecer el fracturamiento a profundidad, y por rocas metamórficas e ígneas intrusivas (CONAGUA, 2015).

Los parámetros hidráulicos como transmisividad y conductividad hidráulica fueron obtenidos de cuatro pruebas de bombeo de corta duración realizados por la CONAGUA, resultando un valor promedio de transmisividad de $0.012 \text{ m}^2/\text{s}$ ($928.2 \text{ m}^2/\text{día}$), y una conductividad hidráulica que varía de 2.9×10^{-5} a $2.3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (2.5 a 19.9 m/día), considerado un espesor saturado promedio de 100 metros (CONAGUA, 2015).

Del volumen total de recarga que recibe el acuífero Río Sinaloa (448.6 Mm³/año), el 6.4% (28.9 Mm³/año) es descargado al mar, como parte de su descarga natural comprometida, la cual sirve para mantener la posición de la interface marina (CONAGUA, 2015).

La descarga por bombeo ocurre por la extracción de agua subterránea para diferentes usos; el total de extracción es de 252.4 hm³/año, de los cuales, 140.3 hm³/año (55.6 %) son para uso agrícola, 65.9 hm³/año (26.1%) para uso doméstico, 44.4 hm³/año (17.6%) para uso público-urbano, 1.3 hm³ (0.5%) para abrevadero y 0.5 hm³/año (0.2%) para otros usos (CONAGUA, 2015).

5. METODOLOGÍA

5.1. Calidad del agua

Se determinó a través de la concentración de iones mayoritarios y las propiedades fisicoquímicas del agua.

5.1.1. Concentración de iones mayoritarios

Se realizaron tres muestreos (noviembre 2016, febrero 2017 y junio 2017) en nueve pozos del acuífero para evaluar los iones mayoritarios y la concentración de plaguicidas del agua subterránea. Estos fueron seleccionados por la Universidad de Occidente, considerando pozos de agua potable dentro de la zona agrícola de riego, dichos puntos de muestreo se pueden apreciar en la figura 5.1. La concentración de iones mayoritarios se midió en todos los sitios de muestreo con excepción de Guasave. Los cationes se analizaron en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Occidente, Unidad Guasave, con un cromatógrafo de líquidos (marca Shimadzu, modelo Prominence), equipado con detector de conductividad eléctrica. La concentración de aniones (SO_4^{2-} , Cl^{-1} y NO_3^{-}) se realizó en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía de la Universidad Nacional Autónoma de México (Instituto de Geología, Geoquímica Ambiental) con un cromatógrafo de iones Metrohm 883 Basic IC Plus con un detector de conductividad; y la determinación de HCO_3^{-} se realizó por medio de una titulación potenciométrica en 25 ml de muestra con HCl 20 mM. En todos los casos se realizaron duplicados para control de calidad.

Los tres muestreos se realizaron directamente de los pozos, dejándolos purgar aproximadamente entre cinco y 10 minutos; además, se obtuvo el nivel estático del agua mediante una sonda. Para los cationes se obtuvieron muestras de 250 ml y se preservaron a pH 2; para los aniones se obtuvieron muestras de un litro, y tanto para cationes como aniones se utilizaron envases de plástico; todas las muestras se conservaron a una temperatura de 4 °C. Los frascos se conservaron en hielo hasta su envío al laboratorio donde fueron analizados.

a) Diagramas hidrogeoquímicos

Para clasificar el tipo de agua que se presenta en la zona se utilizaron los resultados de los iones mayoritarios presentes en esta (Ca^{+2} , Na^{+2} , K^{+2} , Mg^{+1} , HCO_3^{-} , Cl^{-1} , SO_4^{-2} y NO_3^{-}), para ello se realizaron los diagramas de Piper y Sittff de los muestreos efectuados en las diferentes épocas del año, con el software Diagramme desarrollado por la Universidad de Avignon (Simler, 2012).

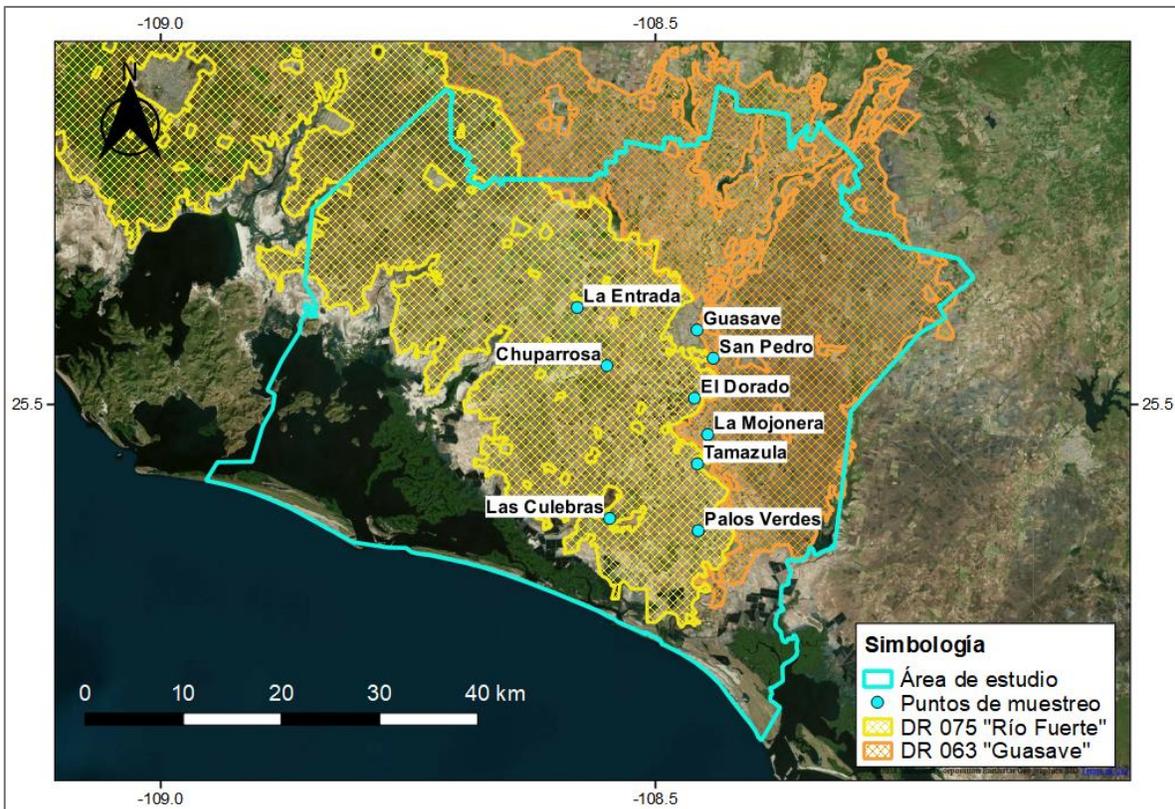


Figura 5.1. Sitios de muestreo para evaluar la concentración de iones mayoritarios y de plaguicidas.

5.1.2. Propiedades fisicoquímicas del agua

Durante los tres muestreos que se realizaron (noviembre 2016, febrero 2017 y junio 2017), se obtuvieron en campo los parámetros de pH, sólidos disueltos totales (SDT), conductividad eléctrica (CE) y salinidad. Estos datos se obtuvieron de once pozos, dos más que los utilizados para los iones mayoritarios y plaguicidas, estos dos sitios adicionales son La Uba y La Cuestona (la primera a 2.7 km al norte de la localidad de La Mojonera y la segunda a 1.7 km al sur de la misma localidad). Estos parámetros fueron obtenidos con una sonda multiparamétrica (marca YSI, modelo Professional Plus).

5.2. Plaguicidas

De los mismos puntos de muestreo para iones mayoritarios se obtuvieron muestras para evaluar la concentración de plaguicidas en el agua subterránea, incluyendo el sitio de Guasave. Se obtuvo un litro de agua en envases ámbar (figura 5.2) y se preservó a 4°C.

La concentración de plaguicidas en agua se evaluó en el laboratorio del Instituto de Ingeniería de la UNAM, mediante un cromatógrafo de gases GC/MS (Agilent Technologies, model 7890A GC System) con detector selectivo de masas (Agilent Technologies, model 5975C insert MSD with Triple-Axis Detector).

Con la finalidad de obtener las curvas de calibración en el cromatógrafo utilizado, se investigó acerca del tipo de plaguicidas empleados en diferentes zonas dentro de los distritos de riego 063 y 075 en el área de estudio, para posteriormente efectuar los análisis con las muestras extraídas de los pozos. Los plaguicidas que sobresalieron fueron cuatro organofosforados (paratión metílico, diazinón, dimetoato y clorpirifos) (González, 2005; Mellado, 2007).



Figura 5.2. Foto del frasco de litro color ámbar utilizado para preservar la muestra.

5.3. Análisis de densidad

Para obtener los valores de densidad que se aplicaron al modelo de Glover, se muestreó el agua subterránea de diez pozos, los cuales no todos son coincidentes con los pozos muestreados para iones mayoritarios y plaguicidas; además, se obtuvieron dos muestras de agua de mar, como se observa en la figura 5.3. Todas las muestras fueron preservadas a una temperatura de 4 °C. En cada pozo se tomó una muestra de 100 ml con el objetivo de llevar a cabo el análisis de densidad. Cabe señalar que a partir de dichos datos de densidad se inició el modelo matemático de Glover.

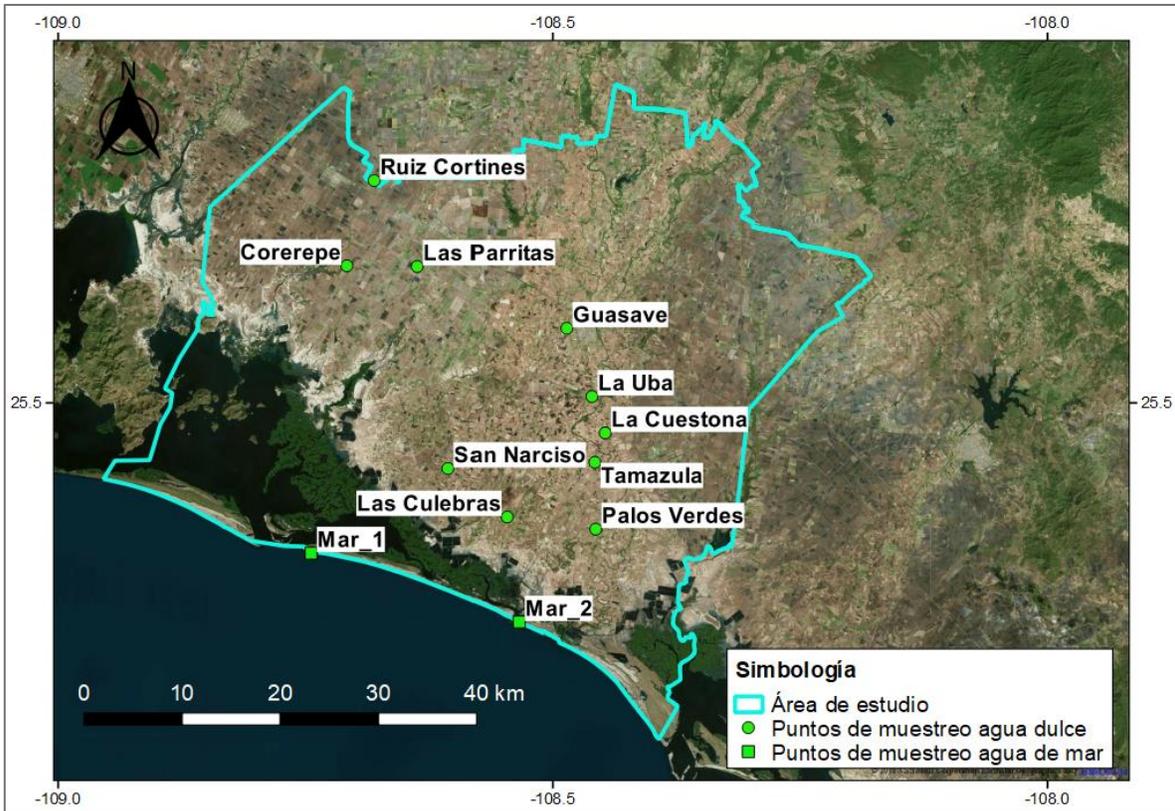


Figura 5.3. Sitios de muestro para los valores de densidad.

La densidad del agua se determinó mediante el método del picnómetro descrito por Atarés (2011), el picnómetro utilizado se muestra en la figura 5.4; dicha metodología consiste en mantener un volumen fijo del líquido, pesar el picnómetro con el líquido contenido y posteriormente obtener la masa del mismo. La sensibilidad del picnómetro es muy perceptible a los cambios de concentración de sales en el agua y es por ello que se emplea para la determinación de la densidad.

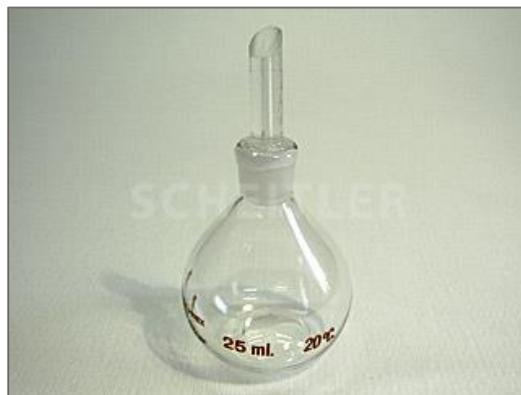


Figura 5.4. Foto del picnómetro utilizado para la prueba.

5.3.1 Intrusión salina por diferencia de densidades

Para determinar la profundidad y posición de la interfaz agua dulce-salada, se realizó un modelo basado en el método de Glover propuesto en el año 1959, usando como herramienta un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Para la discretización del modelo se diseñó una malla distribuida uniformemente en el área de estudio, en dicha malla la separación entre cada nodo es de dos kilómetros, para de esta manera obtener resultados con una resolución que no se aleje tanto de la distancia a la que cada muestra fue tomada. Además, para cada uno de los puntos de la malla se realizó el cálculo de la distancia que existe entre el punto y la línea de costa, de tal manera que la distancia sea perpendicular a dicha línea, esto se llevó a cabo mediante un análisis de distancia en el SIG. En la figura 5.5 se presenta la malla a partir de la cual se asignó a cada punto los valores necesarios para el empleo del modelo de Glover.

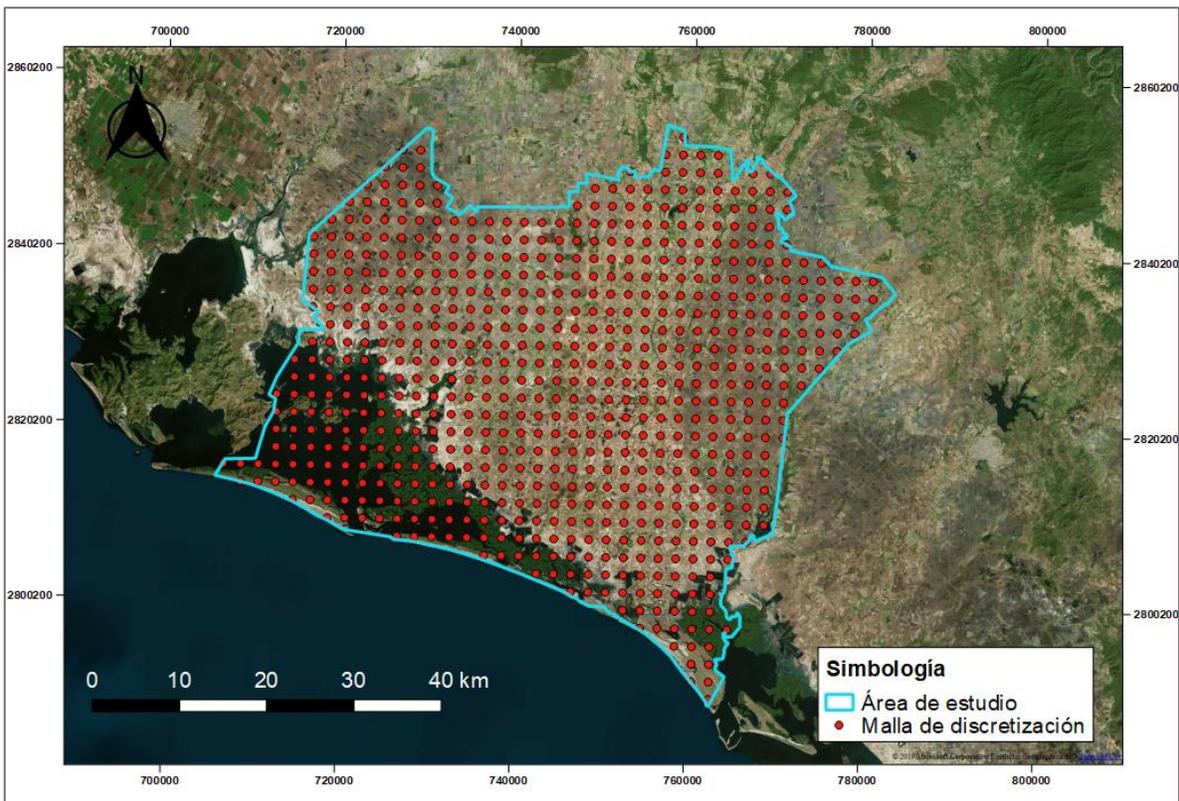


Figura 5.5. Malla de discretización.

5.4. Granulometría

Se obtuvieron siete muestras de suelo, las cuales fueron extraídas cercanas a la ubicación de los pozos que se han mencionado anteriormente (figura 5.6). El análisis granulométrico se realizó con el método mecánico, utilizando una serie de

mallas (Badillo y Rodríguez, 1977), en el laboratorio de dinámica de suelos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Una vez que la muestra fue secada, se disgregó con un mazo para separar las partículas que la constituían, y posteriormente pesarla. Seguido de esto, las diferentes mallas se colocaron en el equipo vibratorio mecánico, en ellas se puso el suelo y se pesaron las fracciones retenidas en las diferentes mallas. Finalmente, se calculó el porcentaje en peso que pasó en cada malla, para que con estos valores se graficara la distribución granulométrica (porcentaje que pasa contra tamaño de la partícula).

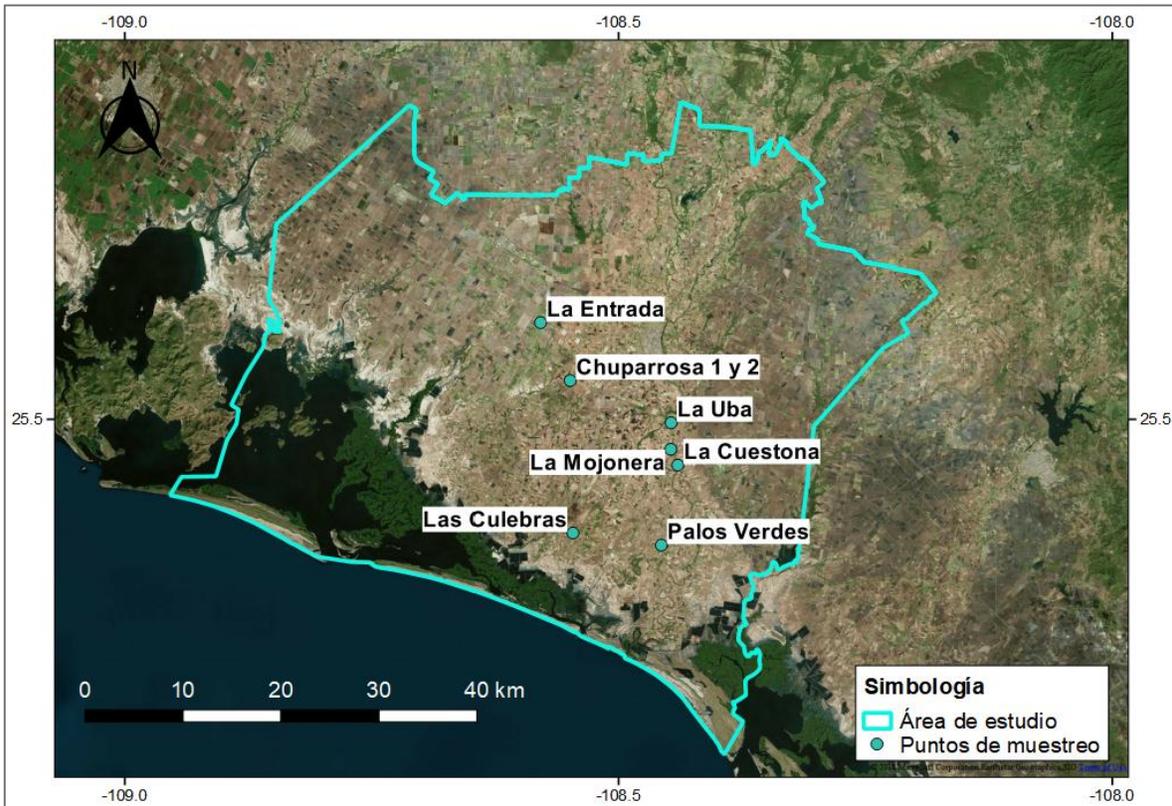


Figura 5.6. Sitios de muestro para la granulometría.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. Calidad del agua

Iones mayoritarios

Los iones mayoritarios que están normados en México son los cloruros (Cl^{-1}), nitratos (NO_3^{-}), sulfatos (SO_4^{-2}) y el sodio (Na), siendo el límite de cada uno 250 mg/l, 10 mg/l, 400 mg/l y 200 mg/l respectivamente (NOM-127-SSA1-1994). De acuerdo con esta norma, hubo valores que sobrepasaron el límite permisible de dichos iones para uso y consumo humano de agua en los tres muestreos realizados.

En el caso de los cloruros se puede observar (figura 6.1) que en los sitios de La Entrada y Tamazula en los tres muestreos se rebasa el límite permisible, mientras que en Palos Verdes sólo se rebasa en noviembre, quedando todos los demás dentro de la norma.

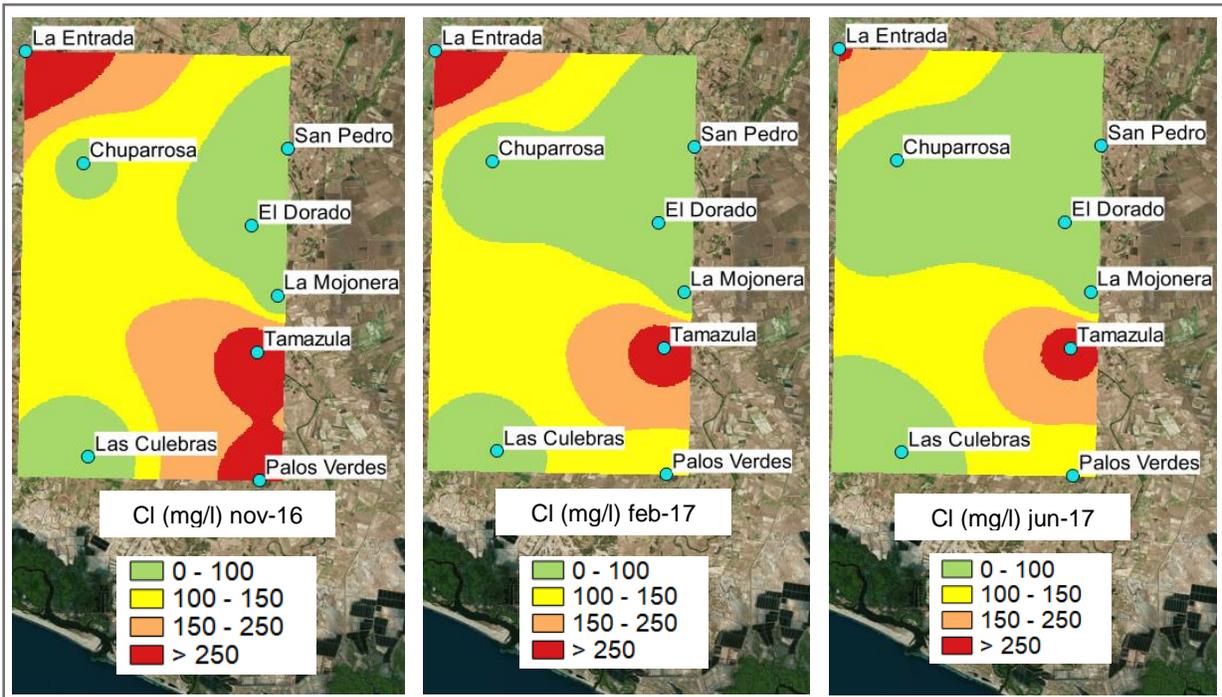


Figura 6.1 Planos de isoconcentraciones de Cl^{-} de las 3 diferentes épocas del año.

Para los nitratos se aprecia (figura 6.2) que en el primer muestreo los sitios que sobrepasan el límite son San Pedro y La Mojonera, mientras que en febrero todos los pozos presentan valores dentro de la norma, y para junio el límite es rebasado por El Dorado, La Mojonera y Palos Verdes.

En el caso de los sulfatos, ningún sitio de muestreo rebasa el límite permisible.

Para el sodio se aprecia (figura 6.3) que en el primer muestreo los sitios que sobrepasan el límite son San Pedro, La Entrada, Chuparrosa, Tamazula y Palos verdes, mientras que en febrero disminuyen los valores de este ion quedando todos los pozos dentro de la norma, y para junio Las Culebras es el único sitio que rebasa el límite.

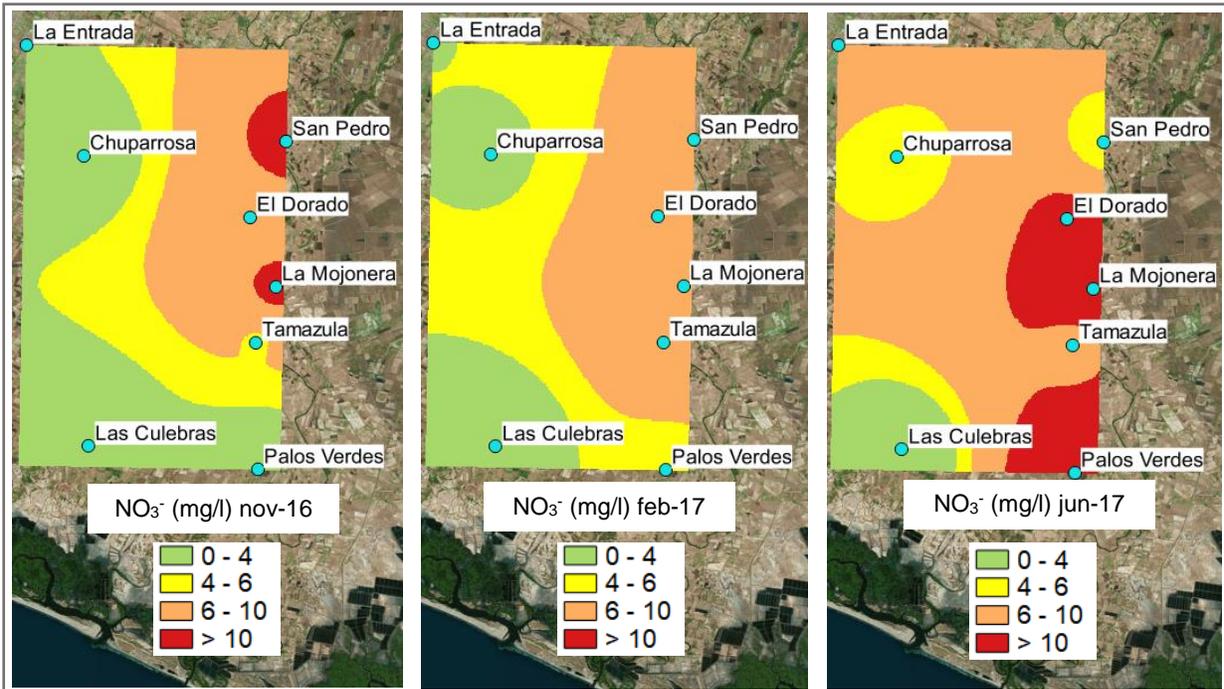


Figura 6.2. Planos de isoconcentraciones de NO_3^- de las 3 diferentes épocas del año.

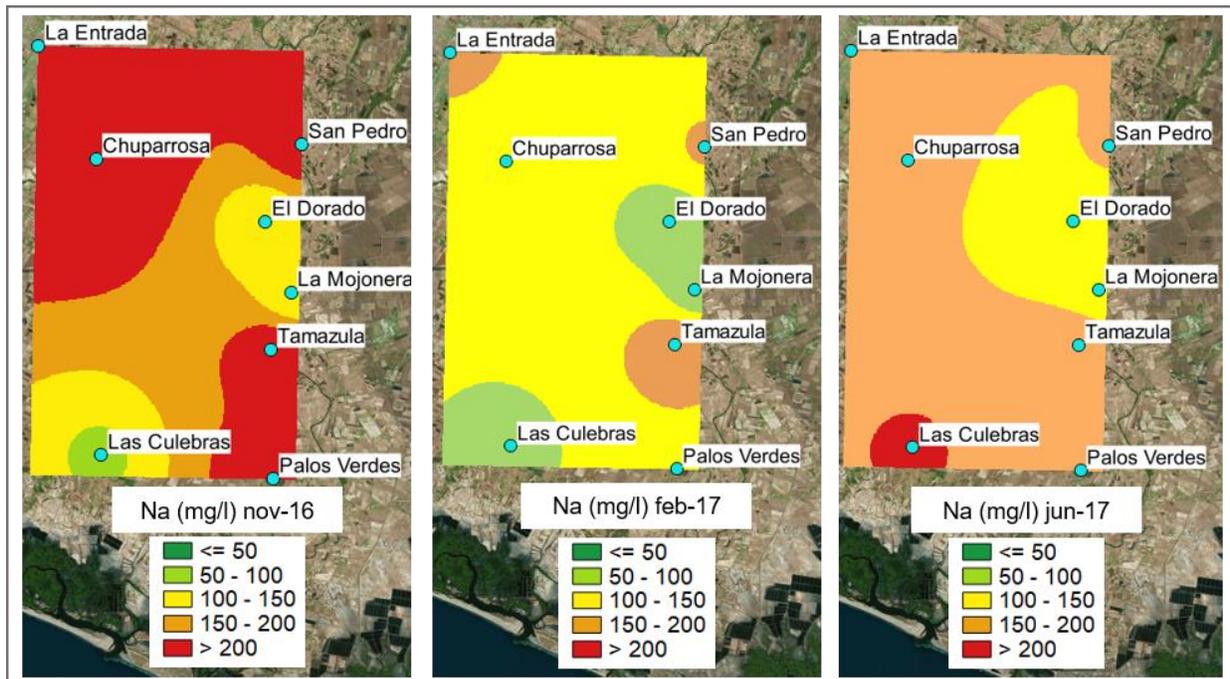


Figura 6.3. Planos de isoconcentraciones de Na^+ de las 3 diferentes épocas del año.

Las concentraciones de iones mayoritarios que se presentan durante las tres épocas de muestreo se atribuyen a las precipitaciones y ciclos de cultivos en el área de estudio. Para conocer la influencia de la precipitación sobre las concentraciones de los iones en época de estiaje y de lluvia, se hizo una revisión de los milímetros de lluvia que se tuvo durante los meses que abarcó el estudio y algunos anteriores a este (junio 2016 a junio 2017).

Los meses con mayor lluvia fueron agosto y septiembre de 2016 (tabla 6.1), desde octubre del mismo año hasta junio de 2017 las lluvias fueron muy escasas, es por ello que en el riego de los cultivos sembrados en mayo se utilizó agua del acuífero, y dichos cultivos fueron cosechados en el periodo de junio-julio de 2017, por lo que en este periodo de cosecha ya no fue necesaria la aplicación de agua. Estas condiciones de sequía y sin riego importante, hicieron que la acumulación de sales en la superficie de los suelos aumentara, esto pudo haber acontecido debido a que el agua del acuífero aplicada en el riego no fue capaz de lavar el exceso de estas, lo cual puede estar relacionado a que el agua utilizada ya poseía cierto contenido en sales.

El agua precipitada por lluvia también puede arrastrar sólidos de otros sitios a través de su trayectoria antes de llegar al acuífero y no únicamente de las zonas de cultivo, contribuyendo a la liberación de una cantidad mayor de sales; resultando así en la mayor acumulación de iones en el mes de noviembre de 2016, pues desde el periodo de lluvias de agosto y septiembre del mismo año, el agua ya tuvo el tiempo para poder disolver y concentrar las sales del suelo de cultivo y de arrastrar sales de otros sitios. También se debe considerar que los niveles freáticos son someros (entre 1 y 10 metros).

Tabla 6.1. Precipitación acumulada (mm) en el área de estudio durante el periodo de junio 2016 - junio 2017.

AÑO 2016		AÑO 2017	
Mes	Total precipitación (mm)	Mes	Total precipitación (mm)
Junio	1	Enero	0
Julio	60	Febrero	21.4
Agosto	218	Marzo	4.5
Septiembre	129.1	Abril	0
Octubre	7.4	Mayo	0
Noviembre	0	Junio	1.2
Diciembre	2		

Propiedades físicoquímicas del agua

Del análisis de las propiedades pH, sólidos disueltos totales (SDT), conductividad eléctrica (CE) y salinidad, se obtuvo que:

El pH como se muestra en la figura 6.4 presenta poca variación al compararse en las tres diferentes épocas del año en los sitios de muestreo, observándose que en junio los valores se acercan más al valor neutro. El pH más bajo que se presenta es de 6.97 y el mayor de 8.56, lo cual está dentro de los límites permisibles para uso y consumo de agua en México según la NOM-127-SSA1-1994, ya que estos van de 6.5 a 8.5 unidades de pH.

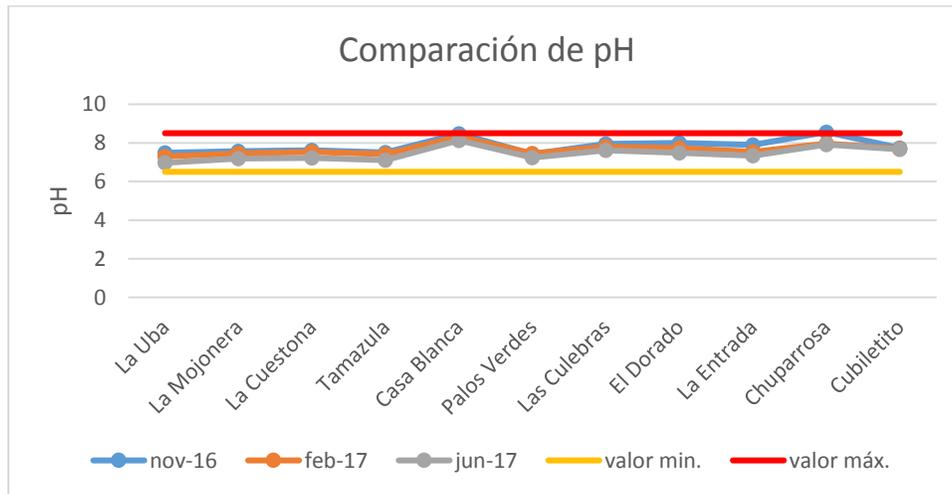


Figura 6.4. Comparación del pH en los diferentes sitios de muestreo en las 3 diferentes épocas del año.

Los valores de sólidos disueltos totales (SDT) en general varían poco (figura 6.5), en la mitad de los sitios de muestreo sobrepasaron los 1000 mg/l que representa el límite permisible para uso y consumo de agua en México según la NOM-127-SSA1-1994.

Rodríguez et al. 2008 en el apartado de SDT del estudio “*Monitoreo de la calidad del agua del acuífero de Guasave, Sinaloa*”, además del límite permisible para uso y consumo de agua en México, también contempla los valores reportados para el agua potable de Tucson, Arizona (275 mg/l en promedio) y el estándar secundario de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los E.U.A. (USEPA) para SDT, con un valor de 500 mg/l; lo cual aplicado en este estudio, en el primer caso, todos los sitios de muestreo rebasan el valor promedio de Tucson, mientras que el valor tomado por la USEPA, es rebasado por todos los sitios excepto por El Dorado.

En la mayoría de los países de América el límite permisible de SDT en el agua potable es similar al de México (1000 mg/l); algunos de los países que se diferencian son: Canadá, Estados Unidos, Guatemala, Panamá y Colombia con valores

menores (500 mg/l) y El Salvador con 600 mg/l; mientras que por arriba del nivel máximo permisible utilizado en México se encuentran Argentina y República Dominicana con 1500 mg/l (Truque, 2012).

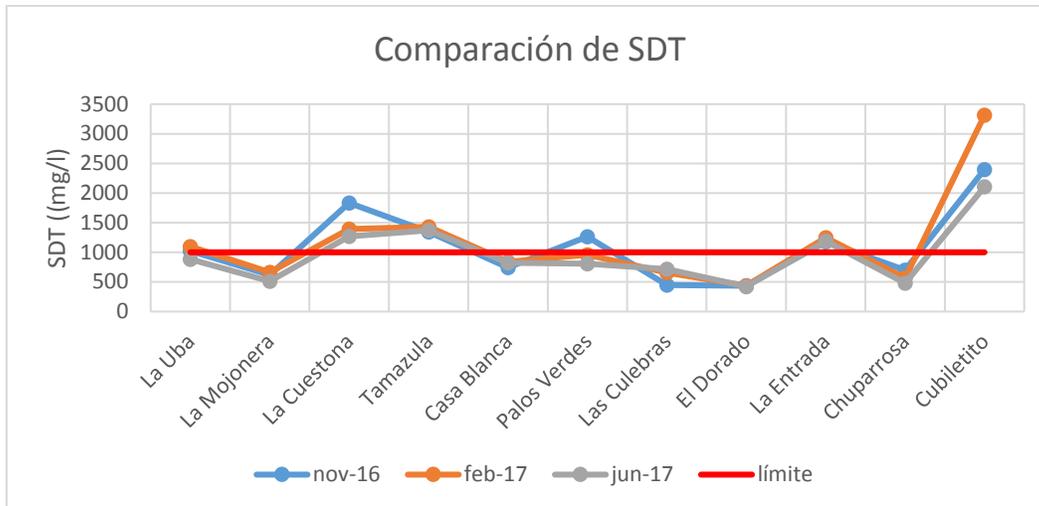


Figura 6.5. Comparación de SDT en los diferentes sitios de muestreo en las 3 diferentes épocas del año.

En general los valores de conductividad eléctrica (CE) (figura 6.6) no presentan gran variación en los sitios de muestreo en las tres diferentes épocas del año, siendo el valor mayor promedio de 1973.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el menor de 610 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

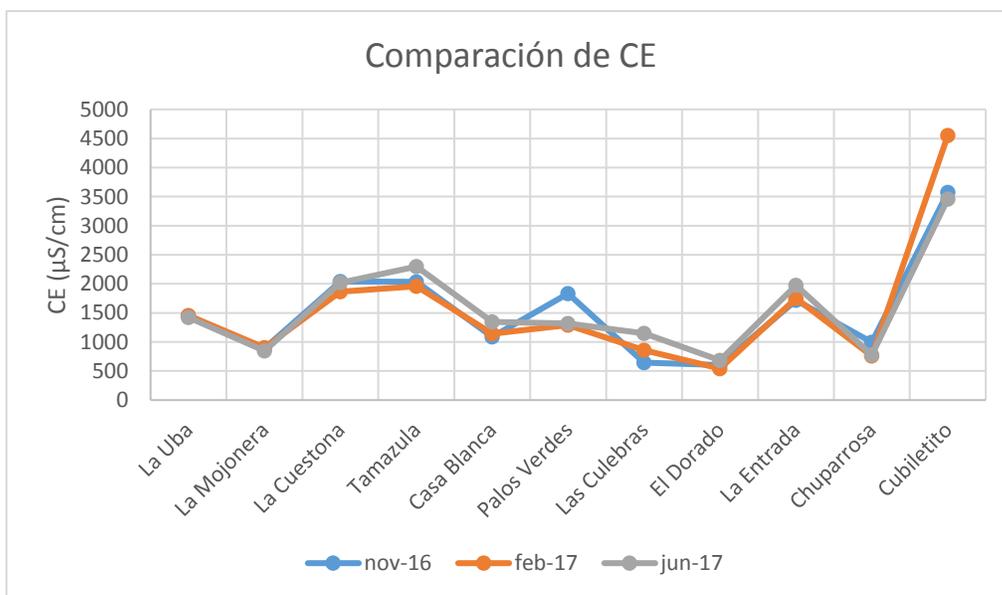


Figura 6.6. Comparación de la CE en los diferentes sitios de muestreo en las 3 diferentes épocas del año.

En cuanto a la salinidad (figura 6.7) se observa que hay poca variación en los valores de los sitios en los tres muestreos. El valor más bajo es de 0.31 partes ppt y el mayor de 2.75 ppt.

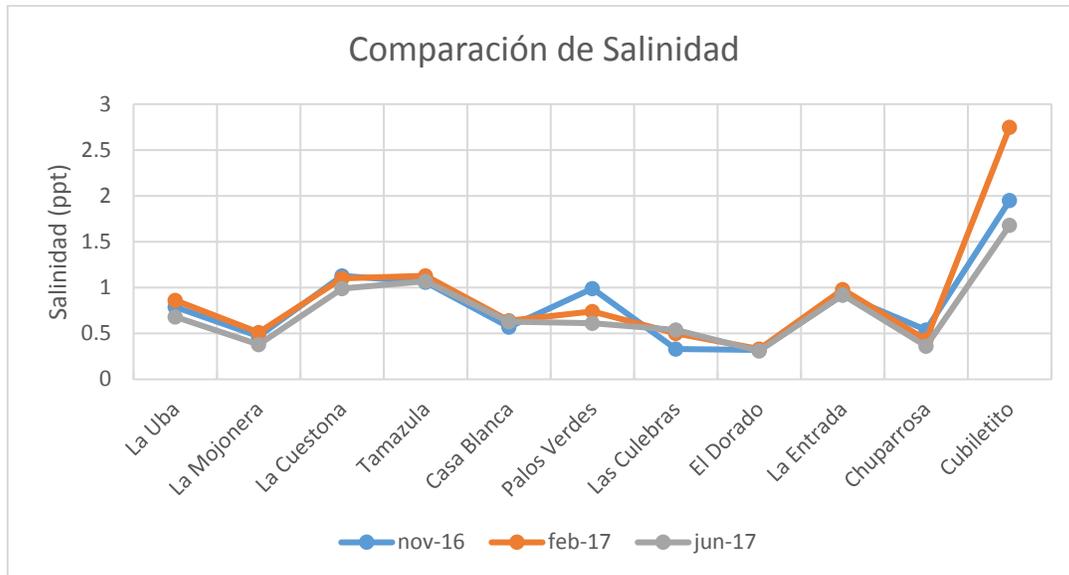


Figura 6.7. Comparación de salinidad en los diferentes sitios de muestreo en las 3 diferentes épocas del año.

Al analizar la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos totales y la salinidad, se pudo observar que en general, prácticamente no existieron cambios en los muestreos de noviembre 2016, febrero y junio 2017, con excepción de los pozos Palos Verdes y Cubiletito que mostraron fluctuaciones. Debido a esta falta de variación, se realizaron los planos de isoconcentraciones con los promedios de los tres muestreos como se aprecia en la figura 6.8.

Además, en los planos de isoconcentraciones se puede observar que el valor promedio más alto para las tres propiedades antes mencionadas es en el pozo Cubiletito, que corresponde al punto más cercano a la costa, y el valor promedio más bajo se encuentran en el pozo El Dorado, que es de los más alejados de la costa. La relación que existe entre la conductividad eléctrica y el contenido de SDT en el agua o salinidad se debe a la proporcionalidad entre estas tres propiedades, pues mientras mayor sea la cantidad de sólidos disueltos totales en el agua o salinidad, mayor será la CE (Aguirre, 2009).

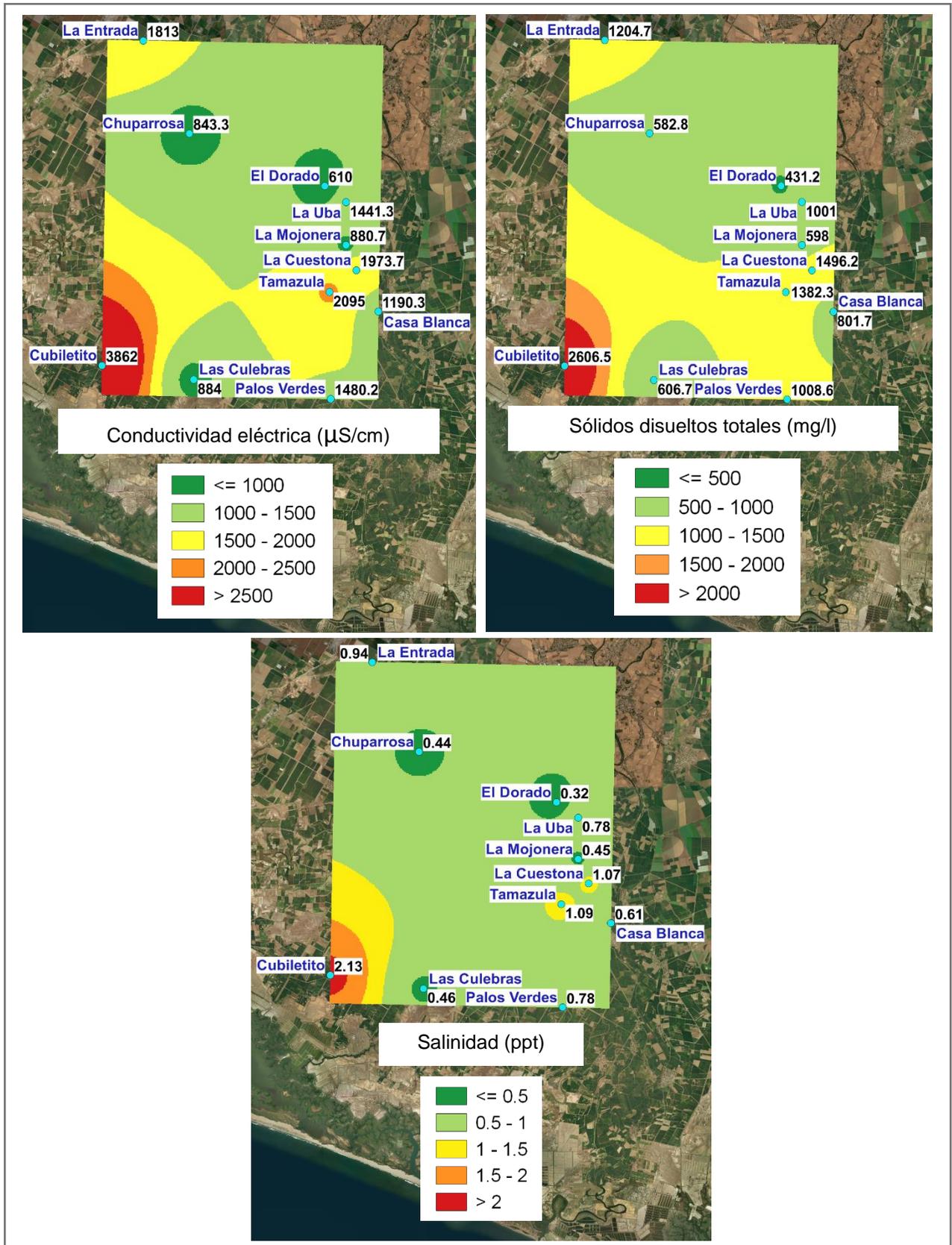


Figura 6.8. Planos de isoconcentraciones de CE, SDT y salinidad.

Sin embargo, se presenta una diferencia en el pozo Las Culebras, ya que a pesar de su cercanía con la costa no presenta valores promedio altos para conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y salinidad tal como lo hace Cubiletto; dicha diferencia se relaciona con la cercanía de este sitio a un cuerpo de agua dulce que provoca el mezclado de las aguas y disolución de los SDT o salinidad, este cuerpo de agua dulce es un arroyo que se observó con ayuda del mapa de hidrología del área de estudio, sin embargo se desconoce su nombre; en la figura 6.9 se muestra una ampliación del arroyo y su cercanía con el sitio Las Culebras (punto amarillo).

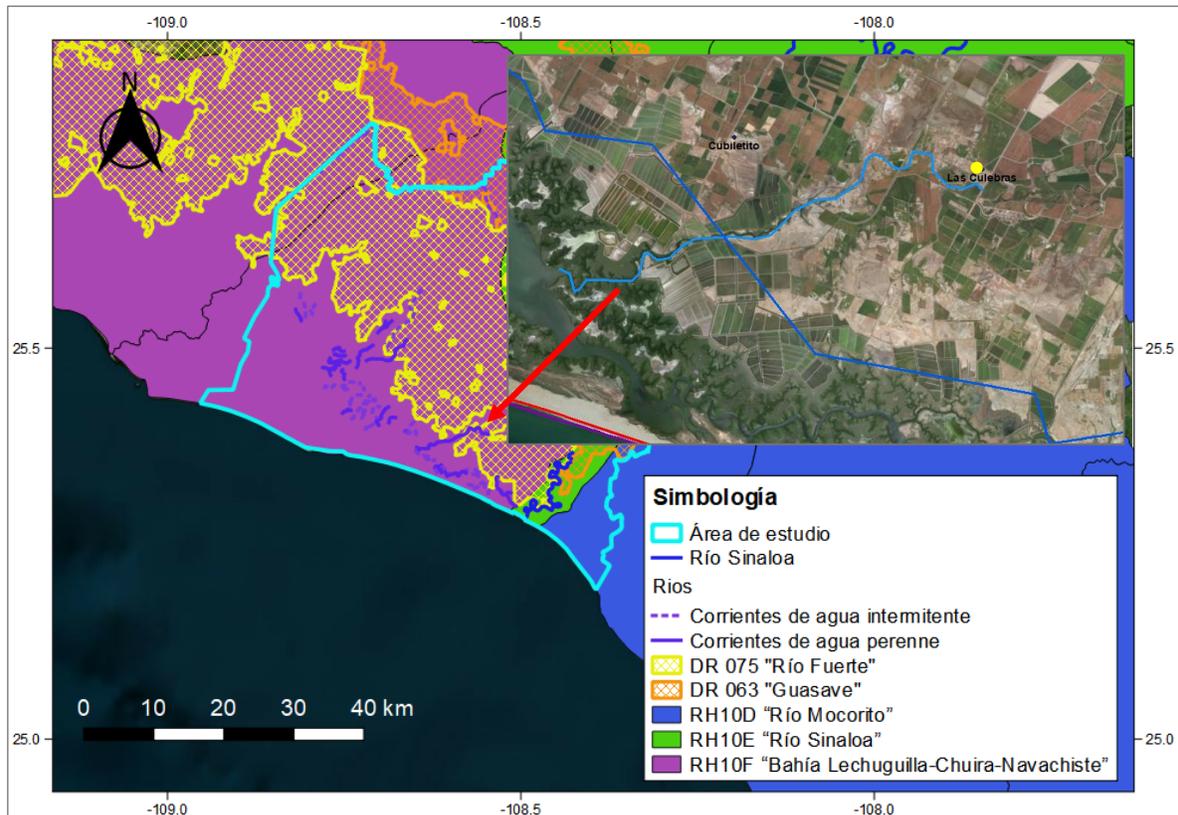


Figura 6.9. Arroyo cercano al sitio Las Culebras.

También hay sitios que no se encuentran cerca de la costa, pero presentan valores promedio altos en CE, SDT y salinidad (La Entrada y Tamazula). Esta manifestación de salinidad en dichos sitios muy probablemente se relacione a la profundidad de la cual se obtiene el agua subterránea, ya que estos pozos presentan una profundidad del nivel freático de poco más de 30 metros, a diferencia del resto de los pozos que presentan niveles freáticos someros (varían entre tres y diez metros); además La Entrada y Tamazula poseen los valores más altos de cloruros.

Por otro lado, La Cuestona, que tampoco se encuentra cerca de la costa, también presenta valores altos de CE, SDT y salinidad, más no de cloruros pues no se obtuvo la concentración de estos en el agua subterránea, dichos valores pueden estar altamente relacionados a la cercanía del sitio con el pozo Tamazula.

Peinado et al. 2011 mencionan que el comportamiento de la salinidad en la región costera del acuífero Río Sinaloa es compleja debido a la cercanía que tiene con la costa, pero también destaca que la profundidad del nivel freático es de solo algunos centímetros hasta máximo siete metros, lo cual origina el ascenso del agua por capilaridad, pudiendo generar acumulaciones de sales en la superficie del suelo. Un proceso similar fue documentado por Coras et al. 2014, en el cual las lluvias dieron lugar al ascenso y exceso del agua en el suelo, la cual se evaporó favoreciendo el ascenso de sales a la superficie por capilaridad. En este estudio se encontraron valores de profundidad del nivel freático similares a los encontrados por Peinado et al. 2011, de entre dos a 12 metros aproximadamente; al encontrarse a niveles tan someros el agua se evapora o evapotranspira (Ribera, 2016), generando la acumulación de sales en la superficie.

También es probable que los valores promedio altos de CE, SDT y salinidad estén relacionados con actividades agrícolas realizadas en el área de estudio. González et al. 2014 documentaron que el uso de agua para riego agrícola del dren colector el Burrión ubicado en Guasave, Sinaloa, según la clasificación de calidad del agua para riego de la FAO (restricción de grado ligero a moderado $700 \mu\text{s/cm} < \text{CE} < 3000 \mu\text{s/cm}$, restricción de grado severo $\text{CE} > 3000 \mu\text{s/cm}$), puede representar un riesgo para los suelos y los cultivos de la región, debido al valor de conductividad eléctrica que presenta, pues en la mayoría de la estaciones de muestro está por arriba de los $700 \mu\text{s/cm}$ y solo en dos estaciones mayor a los $3000 \mu\text{s/cm}$; la mala calidad de esta agua puede estar altamente relacionada a que a lo largo de la trayectoria de este dren se descargan aguas residuales municipales sin tratamiento, descargas puntuales y no puntuales agrícolas. En este tipo de salinización antrópica también es probable la existencia de otras sales de otros compuestos como los plaguicidas (Ribera, 2016).

Diagramas de Piper y Stiff

Con los resultados obtenidos de la evaluación de la concentración de los iones mayoritarios, se realizaron los diagramas de Piper y Stiff para representar los muestreos de los ocho sitios en las tres diferentes épocas del año, y de esta manera determinar los diferentes tipos de aguas.

Para diferenciar los tres muestreos en el diagrama de Piper (figura 6.10), se utilizaron las iniciales de los nombres de los pozos, seguidas del número 1, 2 o 3, que representan el muestreo en noviembre de 2016, febrero y junio de 2017 respectivamente.

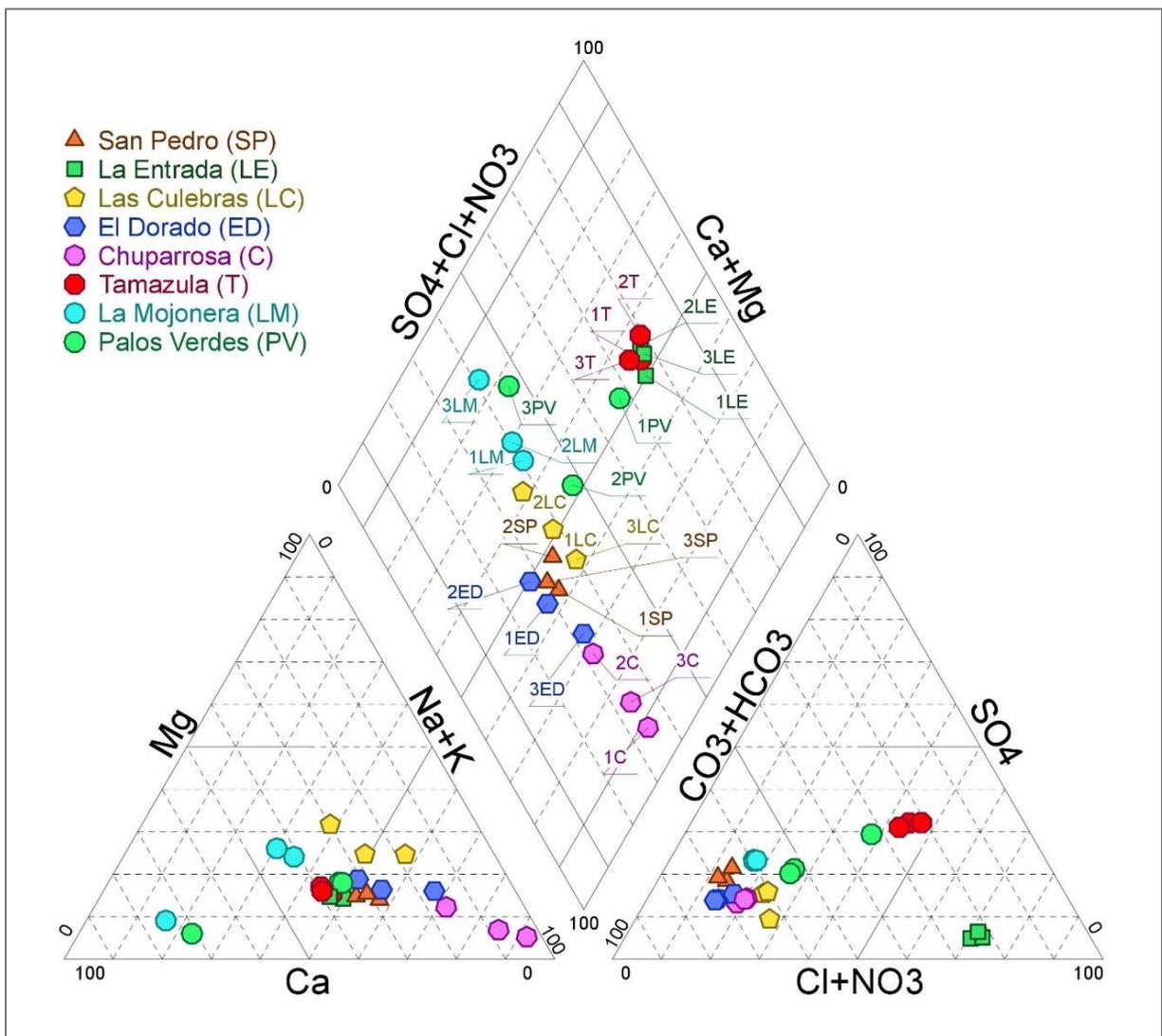


Figura 6.10. Diagrama de Piper de los ocho sitios de muestreo en las tres diferentes épocas del año.

En cuanto a los diagramas de Stiff de cada sitio (figuras 6.11A a 6.11H), se utilizaron los colores naranja, verde y amarillo para diferenciar los muestreos, donde los polígonos de color naranja representan el muestreo realizado en noviembre, los verdes el realizado en febrero y en amarillo el realizado en junio.

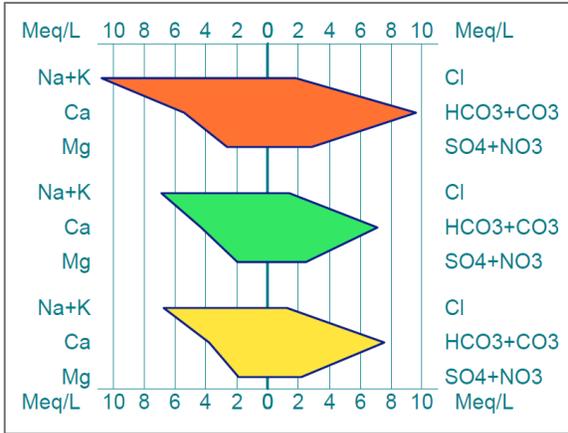


Figura 6.11A. Diagramas de Stiff del pozo San Pedro.

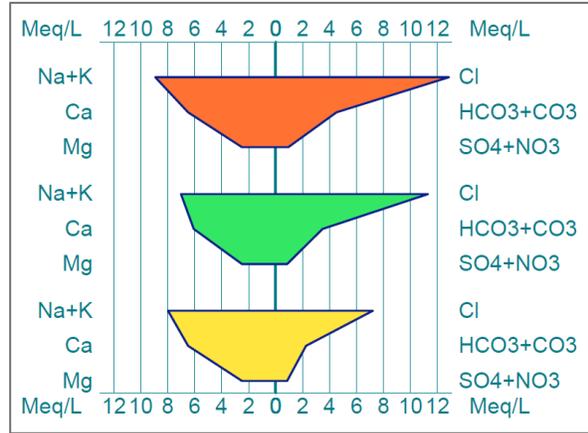


Figura 6.11B. Diagramas de Stiff del pozo La Entrada.

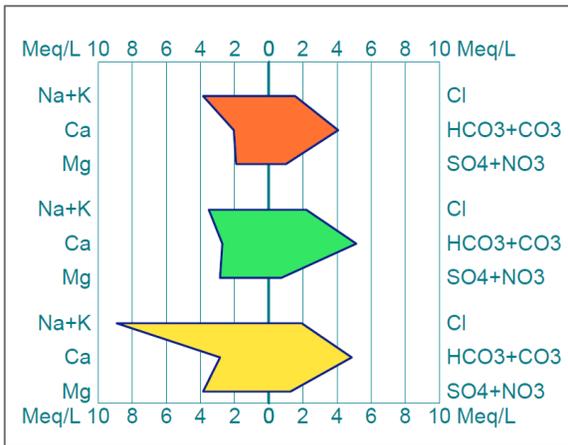


Figura 6.11C. Diagramas de Stiff del pozo Las Culebras.

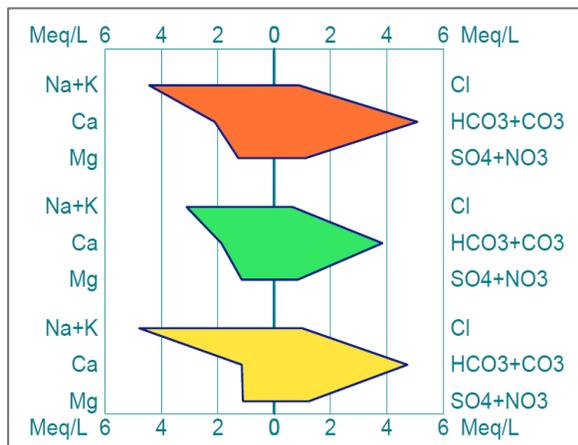


Figura 6.11D. Diagramas de Stiff del pozo El Dorado.

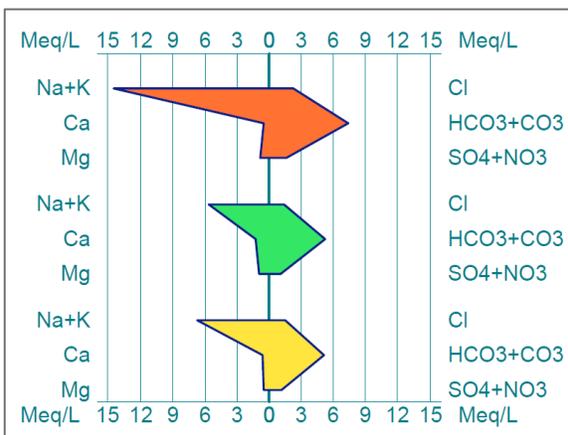


Figura 6.11E. Diagramas de Stiff del pozo Chuparrosa.

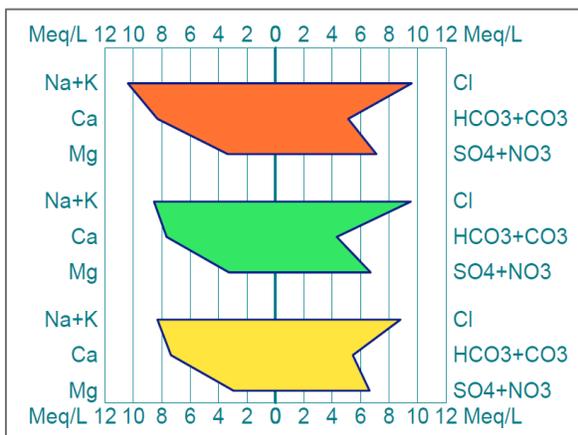


Figura 6.11F. Diagramas de Stiff del pozo Tamazula.

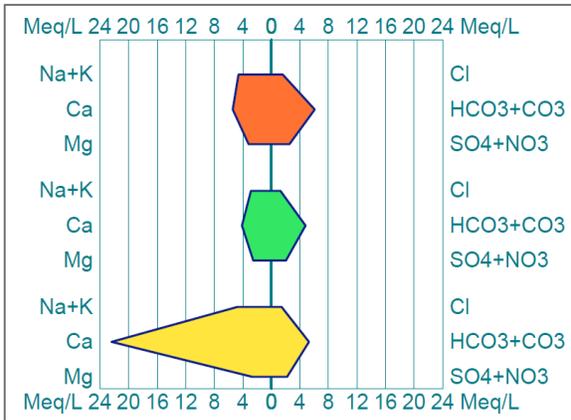


Figura 6.11G. Diagramas de Stiff del pozo La Mojonera.

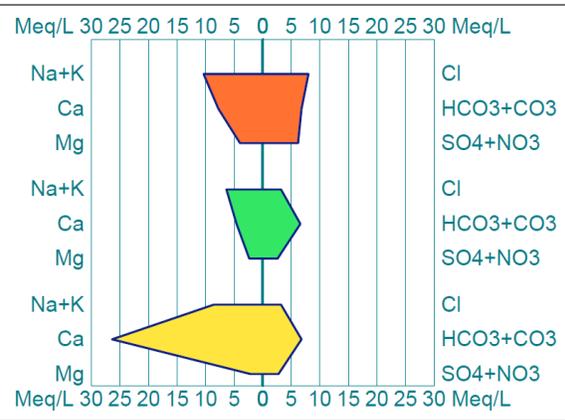


Figura 6.11H. Diagramas de Stiff del pozo Palos Verdes.

Conjuntando los diagramas anteriores, se puede observar que en general no hay cambios significativos en la composición del agua subterránea durante los tres muestreos, con excepción del pozo Palos Verdes, que muestra variaciones en las tres diferentes épocas del año.

El tipo de agua que predomina en los sitios de muestreo es la bicarbonatada sódica (Bs), presente en los pozos San Pedro, Las Culebras, El Dorado, Chuparrosa, y Palos Verdes (sólo en el muestreo de febrero de 2017). En menor proporción se encuentra la clorurada sódica (Cs), presente en los pozos La Entrada, Tamazula y en Palos Verdes (este último sólo en el muestreo de noviembre). Y bicarbonatada cálcica (Bc) presente sólo en los pozos La Mojonera y Palos Verdes (sólo en el muestreo de junio).

No se puede llegar a ninguna conclusión acerca de la distribución y evolución del agua pues se desconoce la profundidad total de los pozos y es probable que el agua subterránea obtenida en el muestreo corresponda a diferentes horizontes; además, no fue posible realizar una correlación de las muestras de agua con la geología de la zona, ya que todos los pozos se encuentran ubicados en los depósitos aluviales (figura 6.12).

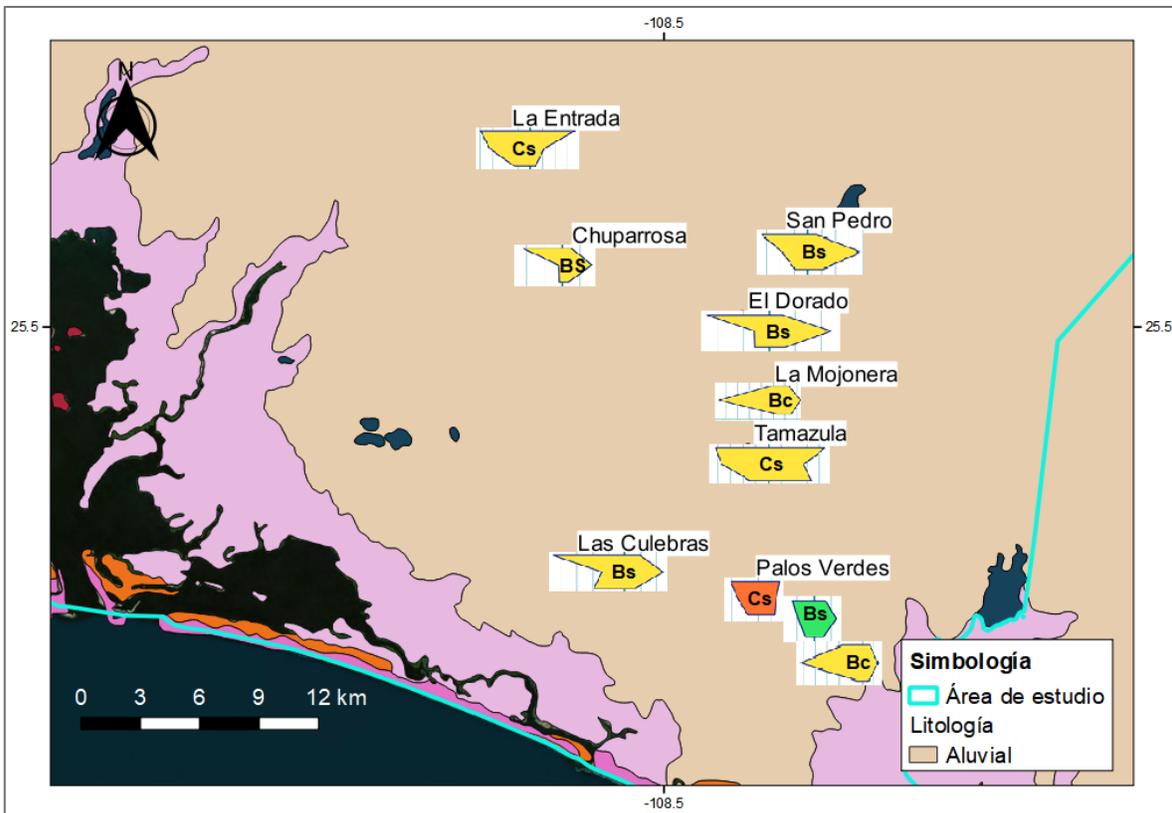


Figura 6.12. Tipos de agua en los sitios de muestreo y geología de la zona En la presentación no quedaron claros los colores).

6.2 Plaguicidas

Dentro de la tabla de resultados (tabla 6.1) se observó que, de los cuatro plaguicidas utilizados para las curvas de calibración del cromatógrafo, sólo se hizo presente el dimetotato (resaltado en color amarillo), el cual se encontró en seis de los pozos (San Pedro, La Mojonera, Las Culebras, Guasave, Tamazula y Palos Verdes), pero únicamente en el muestreo de junio de 2017; además, se muestran los diferentes subproductos presentes en el agua subterránea en las tres diferentes épocas del año. Los resultados no muestran la concentración de estos subproductos ni del plaguicida, sólo su identificación; ninguno de los subproductos concordó con los que cita la literatura como productos de degradación de los plaguicidas organofosforados utilizados en el cromatógrafo.

La mayoría de los subproductos presentes en la tabla no tienen estudios de su toxicología. Sin embargo, se encontró información de algunos de los subproductos, como:

- El phtalic anhydride (ftálico anhídrido), que presenta efectos en los ojos después de la exposición ocupacional como conjuntivitis, lagrimeo, etc; este metabolito en forma de vapor, humo o polvo es un irritante primario (UNEP, 2005). La exposición inicial a este produce tos, estornudos, ardor, mientras

que las exposiciones repetidas o continuas pueden resultar en inflamación general del tracto respiratorio, ulceración nasal y sangrado, entre otras; no hay informes sobre reacciones cutáneas en humanos (UNEP, 2005).

- El 1-hexanol, 2-ethyl (2-etilhexanol), que no presenta toxicidad aguda en humanos, y es ligeramente irritante para la piel humana (INSST, 2018).
- El 2-Ethylhexyl salicylate, que no presenta riesgo de toxicidad aguda (Santa Cruz Biotechnology, Inc., 2016).
- El Dimethoate (dimetoato) no es un metabolito, es el ingrediente activo de un plaguicida organofosforado, este activo es moderadamente tóxico según la EPA (Agencia de Protección Ambiental), el síntoma principal que presenta es irritación ocular, y a largo plazo es pérdida de memoria, concentración, desorientación, depresiones, irritabilidad y confusión (UNA, 2019).

También se puede apreciar que la mayoría de los compuestos de los subproductos registrados no presentan persistencia, con excepción del benzoic acid, 4-ethoxy-, ethyl ester (resaltado en color rojo), que muestra persistencia en los pozos La Entrada y Chuparrosa; y el Dibutyl phtalate (resaltado en color azul) en el pozo Chuparrosa.

Tabla 6.1. Compuestos identificados en la cromatografía.

Puntos de muestreo	Compuesto químico identificado		
	Muestreo 1 Noviembre 2016	Muestreo 2 Febrero 2017	Muestreo 3 Junio 2017
La Entrada	Nonanal (nonaldehyde) Benzoic acid, 4-ethoxy-, ethyl ester	Benzene,1,2-dichloro Dibutyl phtalate Benzoic acid, 4-ethoxy-, ethyl ester	1,3 difluoro-2-propanol Dimethyl-t-butylphosphonite
El Dorado	Dibutyl phtalate Cyclopropene.2-bromo-2,3,3-trifluoro	1-hexanol,2-ethyl Benzene,1,4-dichloro 1-nonanol	
San Pedro	1-Hexadecanol Benzoic acid, 4-ethoxy-, ethyl ester	Benzene,1,2-dichloro Phtalic anhydride	Dimethoate 1,3-Dioxolane,2-methyl-2-(4 methyl-3-methylenepentyl)
Chuparrosa	Benzoic acid, 4-ethoxy-, ethyl ester Dibutyl phtalate 1,3,5-Pentanetriol, 3-methyl	Benzene,1,2-dichloro Dibutyl phtalate Benzoic acid, 4-ethoxy-, ethyl ester	Cyclopropene,1-bromo-2,3,3trifluoro 1-Azabicyclo(2.2.2)octan-3-one

La Mojonera	2-Ethylhexyl salicylate Homomenthyl salicylate	Benzene,1,2-dichloro Dibutyl phtalate	Dimethoate Dimethyl-t-butylphosphonite 1,3-Dioxolane,2-methyl-2-(4 methyl-3- methylenepentyl)
Las Culebras	Benzoic acid, 4-ethoxy-, ethyl ester	Benzene,1,2-dichloro Benzene,1,4-dichloro	Dimethoate Dimethyl-t-butylphosphonite
Guasave	Dibutyl phtalate Benzoic acid, 4-ethoxy-, ethyl ester	Benzene,1,2-dichloro Phthalic acid,isobutyl octyl ester	Dimethoate Dimethyl-t-butylphosphonite
Tamazula	Diethyl Phtalate Cyclooctasiloxane, hexadecamethyl-	Benzoic acid, 4- etoxy-, ethyl ester Dibutyl phtalate Benzene,1,2-dichloro	Dimethoate 1-Azabicyclo(2.2.2)octan-3- one Cyclopropene,1-bromo- 2,3,3trifluoro
Palos Verdes	Propanoic acid, 3-ethoxy-, ethyl ester Phtalic acid , isobutyl octadecyl ester	1-hexanol,2-ethyl Benzene,1,2-dichloro Dibutyl phtalate	Dimethoate Dimethyl-t-butylphosphonite 1,3-Dioxolane,2-methyl-2-(4 methyl-3- methylenepentyl)

6.3. Análisis de densidad

Con los resultados obtenidos se pudo conocer la distribución de la densidad del agua subterránea en los pozos y realizar una comparación entre la densidad del agua dulce y el agua de mar, esto con la finalidad de obtener un panorama inicial del resultado final del modelo de intrusión salina. La densidad del agua dulce para las diez muestras obtenidas, varió entre los 0.9973 y 0.9991 g/cm³, y para las dos muestras de agua de mar la densidad varió entre 1.025 y 1.026 g/cm³. En la figura 6.13 se observa un plano de la interpolación de los datos de densidad muestreados, la intención de este es tener una aproximación del comportamiento de la interfaz, pues esta depende en gran medida de los valores de densidad del agua en cada punto.

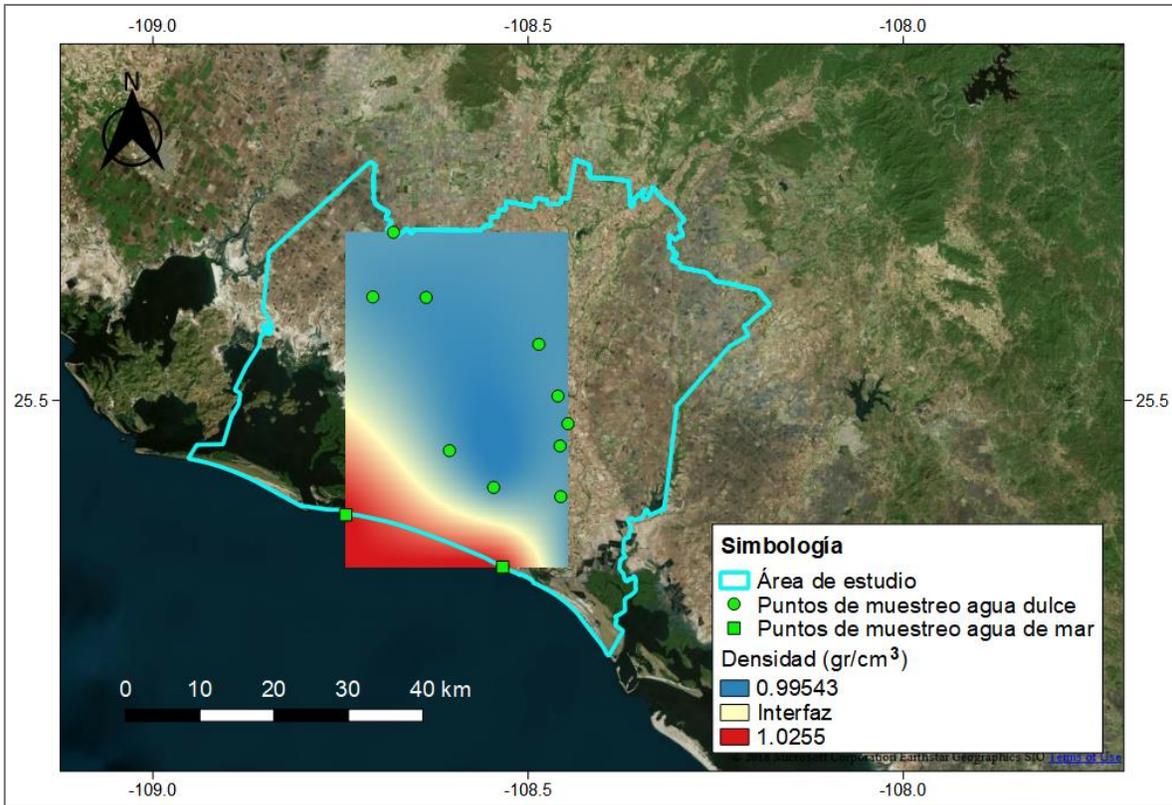


Figura 6.13. Resultado de la interpolación del muestreo de densidad.

6.3.1. Intrusión salina por diferencia de densidades

Una vez obtenidos todos los parámetros necesarios para realizar el cálculo de la profundidad de la interfaz con el método de Glover para cada uno de los puntos de la malla de distribución, los datos fueron registrados en una hoja de cálculo, con la cual se pudo hacer la representación gráfica en un SIG a través de una interpolación en dos dimensiones. En la figura 6.14 es posible apreciar el comportamiento de la interfaz de intrusión salina en el eje vertical, cuyo resultado muestra la profundidad a la cual la cuña de intrusión entra en contacto con el acuífero, lo cual ocurre aproximadamente a los 10 metros de profundidad a partir de la línea de costa.

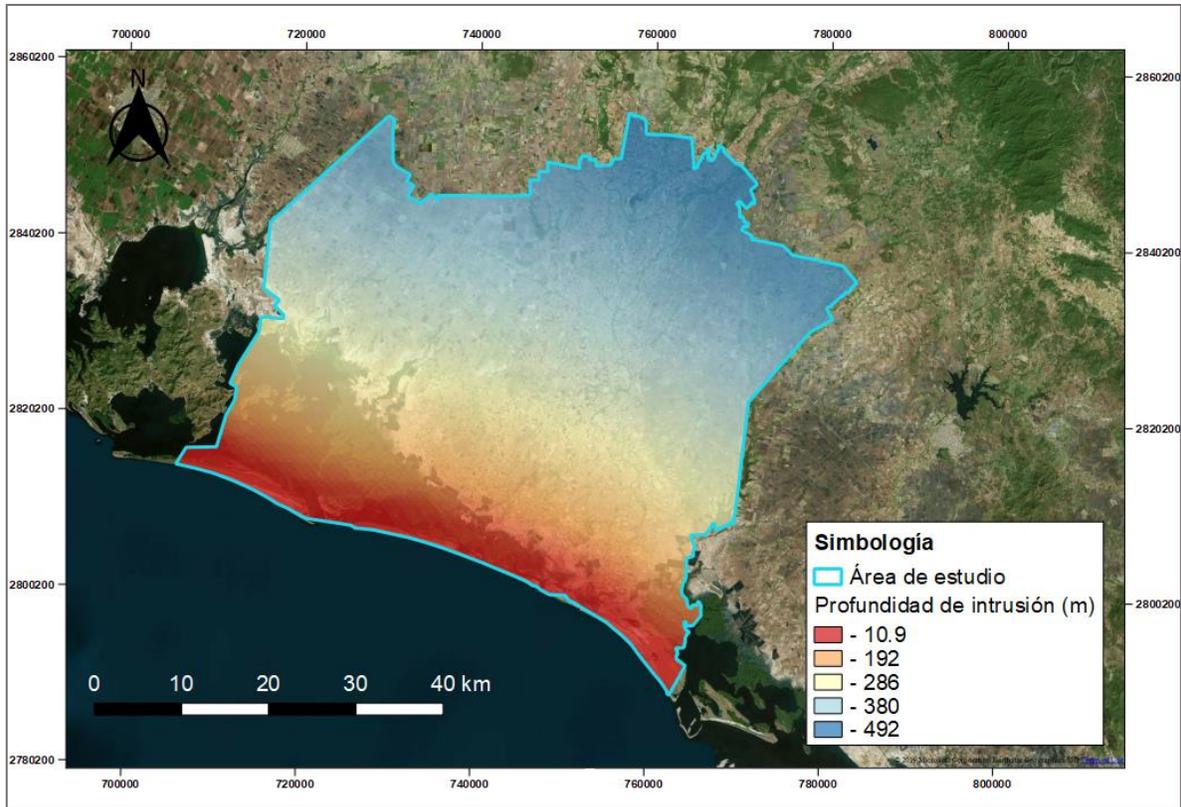


Figura 6.14. Profundidad de la interfaz.

Aunque el modelo abarca en su totalidad la zona de estudio, para poder evaluar la evolución de la cuña de intrusión salina se contempló el avance de la misma hasta los 100 metros de profundidad con los que cuenta el espesor saturado del acuífero Río Sinaloa, valor que fue reportado por la CONAGUA (CONAGUA, 2015). Con la finalidad de obtener una mejor apreciación de la cuña de intrusión se procesó la interpolación en tres dimensiones en el SIG, para lo cual fue necesario introducir al modelo una capa correspondiente al acuífero (espesor saturado de 100 metros) y una correspondiente a la zona vadosa, la cual se obtuvo a partir de los valores de profundidad del nivel estático en pozos que se encontraban dentro de la zona de estudio; además se observa que aproximadamente son 3.5 kilómetros lo que la cuña ha intrusado en el espesor saturado (figura 6.15).

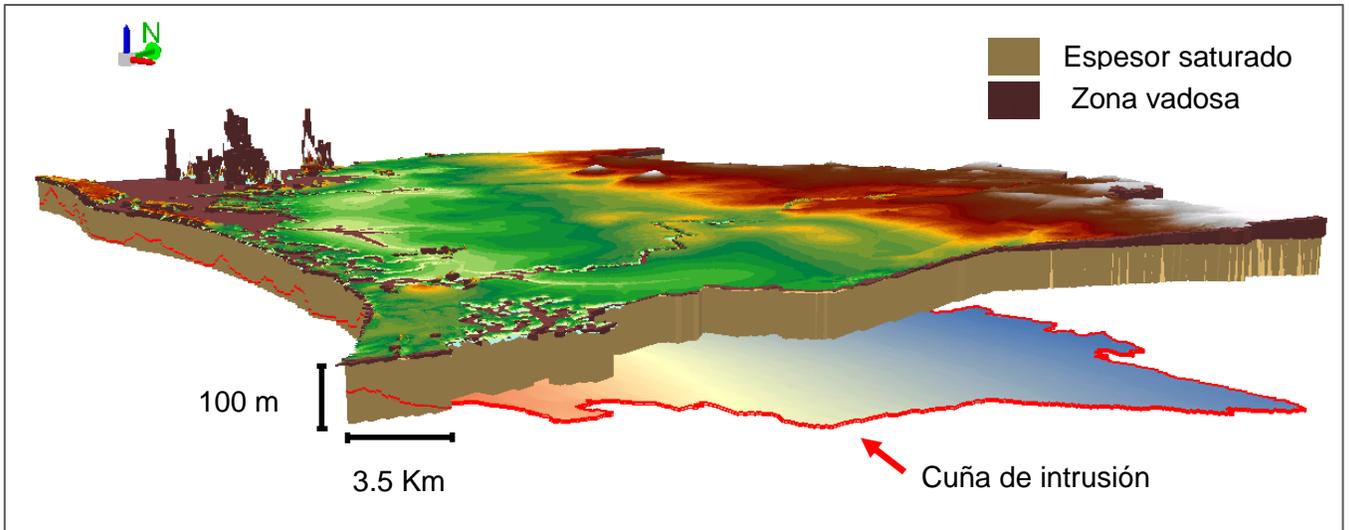


Figura 6.15. Modelo en tres dimensiones de la cuña de intrusión salina.

En la figura 6.16 se observa el comportamiento de la cuña de intrusión una vez que entra en contacto con el acuífero a lo largo de la línea de costa, y como la profundidad de la zona de contacto varía entre 15 y 90 metros.

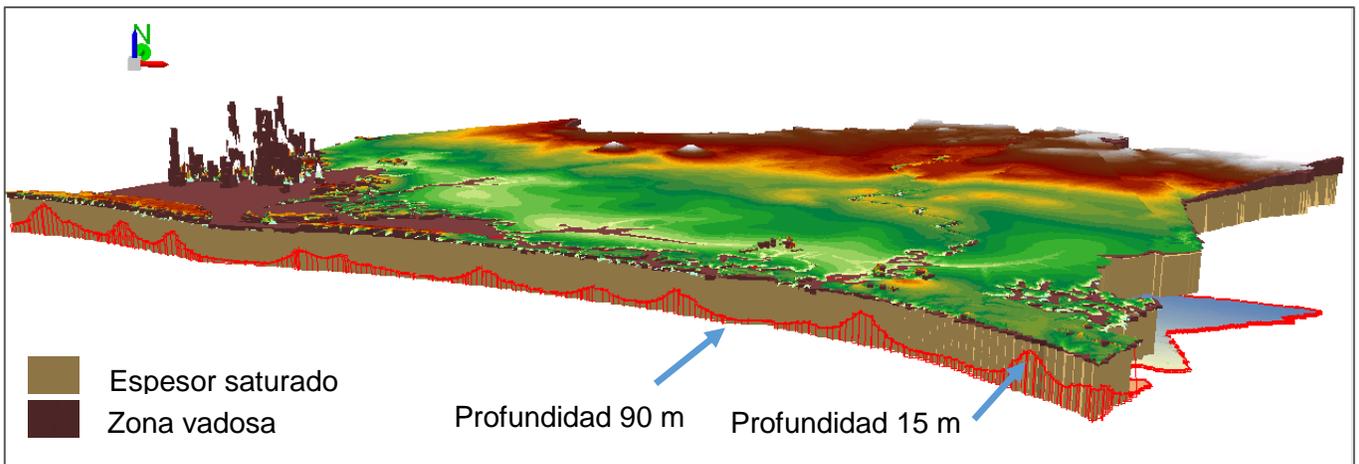


Figura 6.16. Intersección de la línea de intrusión con el acuífero a lo largo de la línea de costa.

También se obtuvo una línea en superficie que representa el alcance máximo de la cuña en el plano XY a la máxima profundidad del acuífero (figura 6.17).

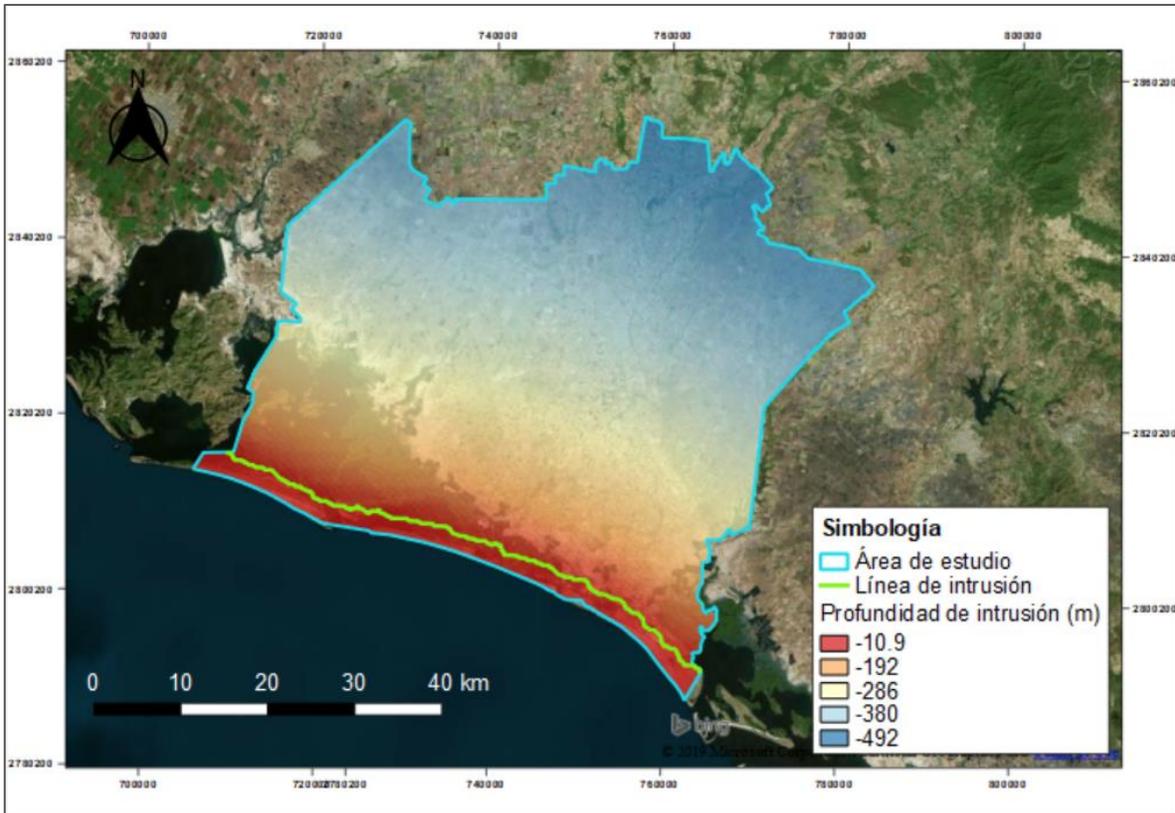


Figura 6.17. Línea en superficie que representa el avance máximo de la cuña de intrusión.

Debido a la geometría de la cuña, se entiende que la intrusión salina ha afectado al acuífero entre los 11 y 90 metros de profundidad sobre la línea de costa y hasta aproximadamente 3.5 km en la horizontal (en el continente); es por esto que en esa área, la cual corresponde a la zona agrícola costera, tiene mayor riesgo de extraer agua marina mezclada con agua dulce. El caso contrario ocurre en los pozos que se encuentran a menos de 11 m de profundidad y más allá de 3.5 km de la línea de costa hacia el continente, pues la probabilidad de bombear agua salina ahí es mínima.

En el apartado de propiedades fisicoquímicas del agua se mencionó que el valor promedio más alto para las tres propiedades (CE, SDT y salinidad) es en el pozo Cubiletito, que corresponde al punto más cercano a la línea de costa, y se encuentra a una distancia aproximada de ocho kilómetros; por esa misma razón es el pozo más cercano a la línea de intrusión (figura 6.18).

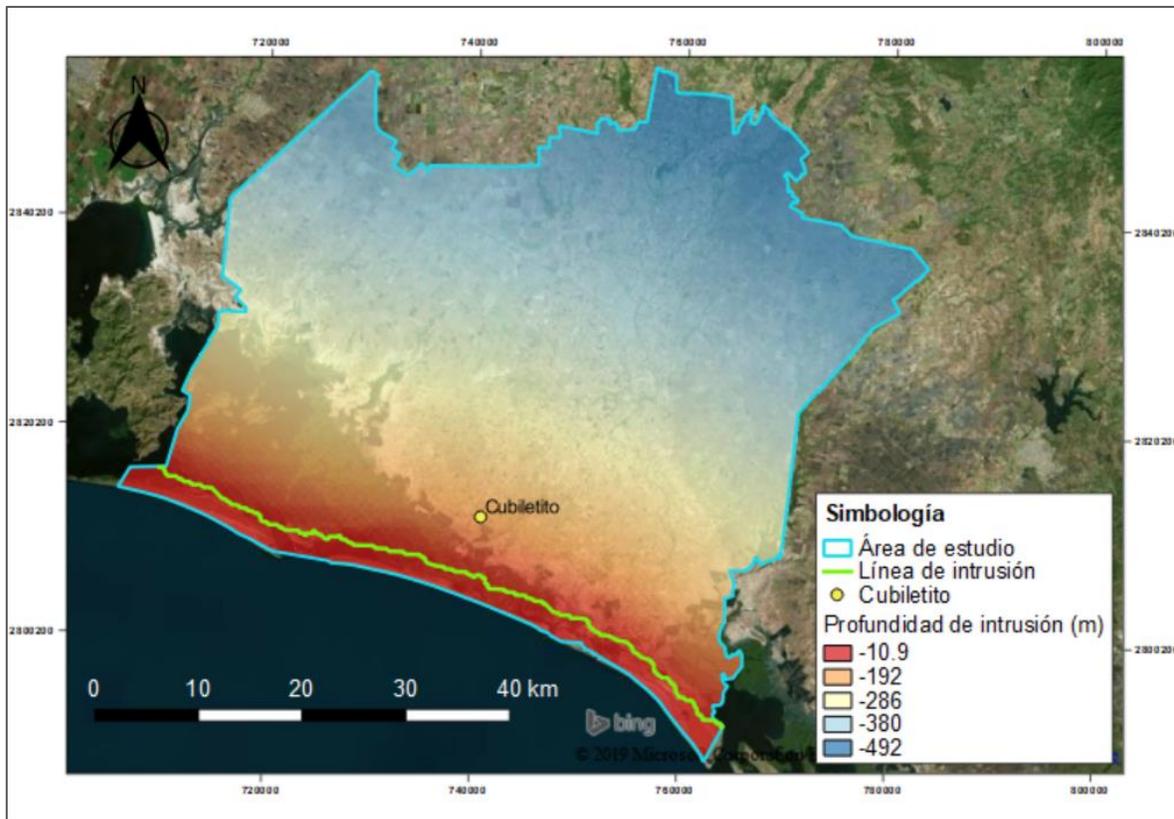


Figura 6.18. Cercanía del pozo Cubiletito a la línea de costa y a la línea de intrusión.

6.4. Granulometría

Finalmente, con los resultados obtenidos del análisis granulométrico se realizó la curva granulométrica para cada muestra (Anexo 1); con estas curvas y la carta del Sistema Unificado de la Clasificación de Suelos (SUCS), se determinó el tipo de suelo de cada sitio de muestreo (Figura 6.19): Palos verdes, La Entrada, La Uba, Las Culebras y La Cuestona, resultaron arenas medias (Am); Chuparrosa 1 (Zona de cultivo), Chuparrosa 2 (Dren) y La Mojonera, resultaron arenas finas (Af). Todos los sitios muestreados forman parte de los depósitos de aluvial.

Además, en cada sitio se obtuvo el coeficiente de uniformidad (C_u) y el coeficiente de curvatura (C_c), pero ya que ninguna de las muestras de suelo resultó con porcentaje de finos menor al 5%, no se tomaron en cuenta ninguno de los dos coeficientes para una clasificación más detallada.

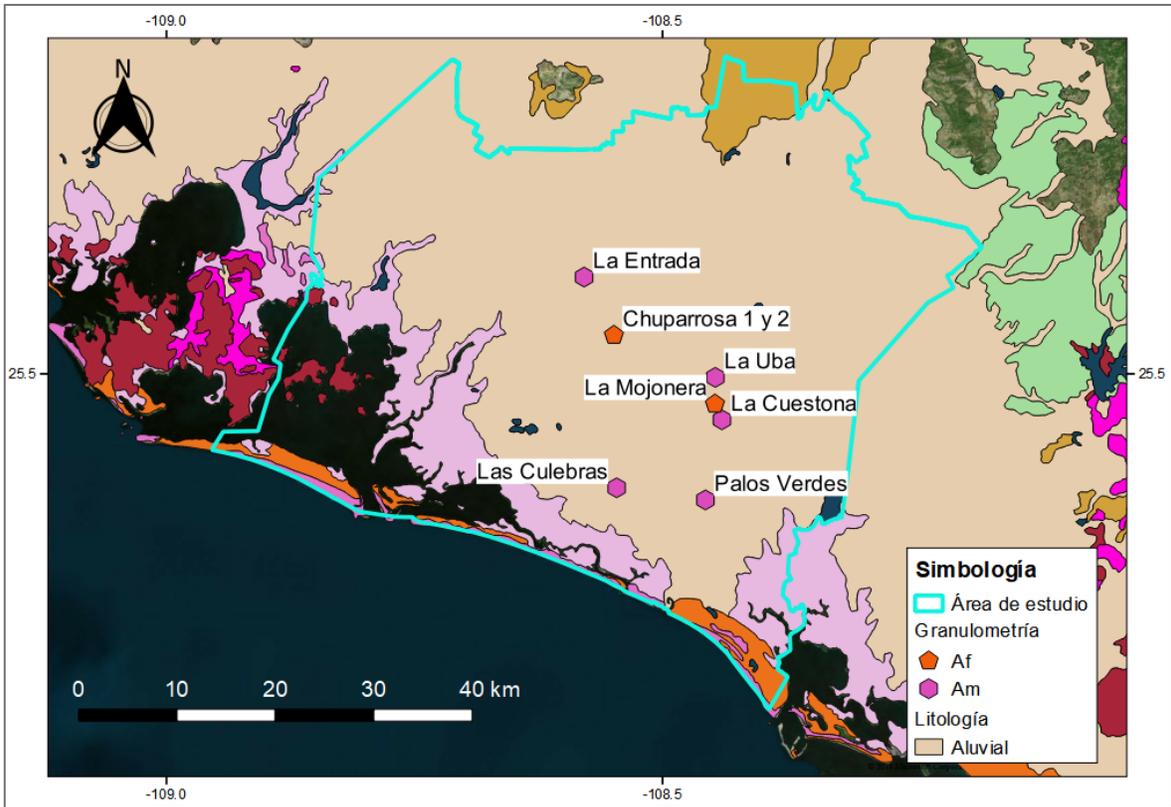


Figura 6.19. Tipos de suelo en los sitios de muestreo y geología de la zona.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los valores de las concentraciones de iones mayoritarios normados en México presentes durante las tres épocas de muestreo fueron atribuidos a las precipitaciones y ciclos de cultivos en el área de estudio. De los cuales se obtuvo que en la mayoría de los iones los valores más altos se presentaron en el mes de noviembre, puesto que para esta época el agua ya tuvo el tiempo para poder disolver y concentrar las sales del suelo del periodo de cosecha y de las sales arrastradas de otros sitios, además de considerarse que los niveles freáticos son someros (entre 1 y 10 metros).

En cuanto a las propiedades fisicoquímicas del agua: contenido de SDT, salinidad y CE, se observó que el valor promedio más alto para las tres propiedades corresponde al punto más cercano a la costa (Cubiletito), y el valor promedio más bajo se encuentra en uno de los puntos más alejados de la costa. Sin embargo, hay un sitio (Las Culebras) en donde esto no se cumple, pues a pesar de su cercanía con la costa no presenta valores promedio altos, lo cual se relaciona con la cercanía de este sitio a un cuerpo de agua dulce que provoca el mezclado de las aguas y disolución de los SDT. Y también hay sitios que no se encuentran cerca de la costa (La Entrada y Tamazula), pero presentan valores promedio altos de estas propiedades, lo cual se puede relacionar a la profundidad de la cual se obtiene el agua subterránea, ya que estos pozos presentan una profundidad del nivel freático de poco más de 30 metros; y por otro lado, hay un sitio (La Cuestona) que presenta valores altos de CE, SDT y salinidad, que puede estar altamente relacionado a la cercanía de este con otro sitio con valores altos.

El tipo de agua que predomina en los sitios de muestreo es la bicarbonatada sódica, en menor proporción la clorurada sódica, seguida de la bicarbonatada cálcica. Sin embargo, no se puede llegar a ninguna conclusión acerca de la distribución y evolución del agua pues se desconoce la profundidad total de los pozos y es probable que el agua subterránea obtenida en el muestreo corresponda a diferentes horizontes; además, no fue posible realizar una correlación de las muestras de agua con la geología de la zona, ya que todos los pozos se encuentran ubicados en los depósitos aluviales.

Los plaguicidas utilizados para las curvas de calibración del cromatógrafo tienen un potencial considerable de acumulación en el suelo y en la biota (muy probablemente es la razón por la cual no se encuentran en el agua subterránea) y de acuerdo a la literatura consultada, los subproductos encontrados en el agua subterránea no corresponden a ninguno de ellos, es por esto que muy probablemente provengan de otros plaguicidas. Además, no fueron encontrados los mismos compuestos en el muestreo de noviembre, febrero y junio, lo cual es muestra de su baja persistencia.

El análisis de densidades mostró que, debido a la geometría de la cuña, la intrusión salina ha afectado al acuífero entre los 11 y 90 metros de profundidad sobre la línea de costa y hasta aproximadamente 3.5 km en la horizontal (en el continente); es por esto que en esa área, la cual corresponde a la zona agrícola costera tiene mayor

riesgo de extraer agua marina mezclada con agua dulce. El caso contrario ocurre en los pozos que se encuentran a menos de 11 m de profundidad y más allá de 3.5 km de la línea de costa hacia el continente, pues la probabilidad de bombear agua salina es mínima.

Es importante empezar a tomar medidas precautorias acerca del avance de la cuña de intrusión, porque si bien todavía no se ven afectados pozos para suministro de agua potable ni para riego agrícola, al aumentar este consumo por una mayor población, lo cual a su vez aumentaría la superficie de zonas agrícolas, influiría en el fenómeno de intrusión llegando a ser determinante en la actividad agrícola del área de Guasave, Sinaloa.

BIBLIOGRAFÍA

1. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de enfermedades (ATSDR). (2017) "Paratión" (Parathion). https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts205.html
2. Aguirre, A. (2009). "El manejo de la conductividad eléctrica en fertirriego". Tesis de especialidad. Centro de Investigación de Química Aplicada. Saltillo, Coahuila. <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/344/1/Alberto%20Aguirre%20Hernandez.pdf>.
3. Albert, L. (2005). "Panorama de los plaguicidas en México". Revista de Toxicología en línea. Tepic, Nayarit. <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd56/panorama.pdf>
4. Alcántara Concepción, Víctor. (2014). Caracterización y diagnóstico de la contaminación por plaguicidas en el lago de Xochimilco. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.
5. Atarés, L. (2011). "Determinación de la densidad de un líquido con el método del picnómetro". Artículo docente de la Universidad Politécnica de Valencia.
6. Badii, M. y Varela, S. (2008). "Insecticidas Organofosforados: Efecto sobre la Salud y el Ambiente. Toxicología de insecticidas. Culcyt. No. 28, pp. 5-17.
7. Badillo J y Rodríguez R (1977). Mecánica de Suelos. Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Tomo I. 3ª Edición. Limusa. México.
8. Bedmar, F. (2011). "¿Qué son los plaguicidas?". Informe especial sobre plaguicidas agrícolas. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Volumen 21 número 122. pp. 10-16.
9. Botello, V. y Rendón, O. (2005). "Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencia". 2da Edición. Univ. Autón. de Campeche, Univ. Nal. Autón. de México, Instituto Nacional de Ecología.
10. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2011). Ley Federal de Sanidad Vegetal. CAPITULO II. "Conceptos", Art. 5°. <https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/normatividad/vigente/SAGARPA/LFSV.pdf>
11. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2016). Ley General de Salud. CAPITULO XII: "Plaguicidas, Nutrientes Vegetales y Substancias Tóxicas o Peligrosas", Art. 278. <http://www.wipo.int/edocs/lexdocs/laws/es/mx/mx159es.pdf>
12. Castillo, J. (2003). "Aplicación de diferentes métodos para estudiar la intrusión salina en acuíferos costeros Sonora, México". Tecnología de la intrusión salina de agua de mar en acuíferos costeros: Países mediterráneos. Madrid: IGME. ISBN. 84-7840-470-8, pp. 3-10. <http://aguas.igme.es/igme/publica/tiac-01/Area%20I-1.pdf>
13. Castro, F. (2008). "Syllabus de la asignatura Tratamiento de Aguas 1". Universidad de Aquino Bolivia, Facultad de Ciencia y Tecnología. <https://studylib.es/doc/191344/syllabus-tratamientos-de-aguas-i---udabol-virtual>.

14. CICOPLAFEST (Comisión Cntersecretarial para el Control del Proceso y uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Toxicas. (2004). "Catálogo de Plaguicidas". México.
15. CICOPLAFEST (Comisión Cntersecretarial para el Control del Proceso y uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Toxicas. (2002). "Catálogo de Plaguicidas". México.
<http://www.cofepris.gob.mx/CAS/establecimientos%20y%20productos%20biologicos/fundamentos/antecedentes/Catalogo%20de%20plaguicidas/INTRO.pdf>
16. Cocca, C., Ventura, C., Nunez, M., Randi, A. y Venturino, A. (2015). "El organofosforado clorpirifos como disruptor estrogénico y factor de riesgo para el cáncer de mama". Acta toxicológica argentina. Volumen 23, no. 3. Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-37432015000300005.
17. Cognetti, G., Sará, M. y Magazzú, G. (2001). "Biología marnia". Barcelona: Ed. Ariel.
18. Comisión Nacional de Agua (CONAGUA) (2015). "Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Río Sinaloa (2502), estado de Sinaloa". Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 20 de abril 2015.
19. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Subdirección General Técnica (SGT). (2018). Sistema de Nacional de Información del Agua, Detalles de los Acuíferos de México.
<http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos&ver=reporte&o=1&n=nacional>
20. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2004). "Estadística del Agua en México". México, D.F.
21. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2005). "Estadística del Agua en México". México, D.F.
22. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2006). "Estadística del Agua en México". México, D.F.
23. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2008). "Estadística del Agua en México". México, D.F.
24. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2010). "Estadística del Agua en México". México, D.F.
25. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2011). "Estadística del Agua en México". México, D.F.
26. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2013). "Estadística del Agua en México". México, D.F.
27. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2014). "Estadística del Agua en México". México, D.F.
28. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). "Estadística del Agua en México". México, D.F.

29. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2016). "Estadística del Agua en México". México, D.F.
30. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2017). "Estadística del Agua en México". México, D.F.
31. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018). "Estadística del Agua en México". México, D.F.
32. Consejo para el Desarrollo Económico de Sinaloa (CODESIN), Comité Ciudadano de Evaluación Estadística del Estado de Sinaloa (CCEES). (2013). "Reporte sobre la agricultura en Sinaloa al año 2012". Boletín No. 47/2013. Culiacán, Sinaloa.
33. Consejo para el Desarrollo Económico de Sinaloa (CODESIN), Unidad de estadística y análisis. (2018). "Reporte sobre la agricultura en Sinaloa al año 2017". Boletín No. 31/2018. Culiacán, Sinaloa.
34. Coras, P., Ontiveros, R. y Diakite, L. (2014). "Movimiento del agua freática y concentración de sales en suelos agrícolas". Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Volumen 5, Núm. 4. pp. 537 – 548.
35. Corona, E. y Gómez, G. (2001). "La intrusión salina en el acuífero de la Costa de Hermosillo, Sonora". AIMMGM, AC. XXIV Convención Internacional. Acapulco, Guerrero, pp. 101-106.
36. Custodio, E. y Llamas, R. (1976). "Hidrología subterránea". Vol. 1 y 2. Barcelona: Ed. Omega.
37. Custodio, E., Bruggeman, G.A. 1987. Groundwater problems in coastal areas. UNESCO. Belgium.
38. Diario Oficial de la Federación (DOF). (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización".
39. Dirección de Capacitación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2008). "Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México". Octubre 02, 2018, de Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Sitio web: http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/INTERNET/1-GEOGRAFIADEMEXICO/MANUAL CARAC EDA FIS VS ENERO 29_2_008.pdf
40. DOF (Diario Oficial de la Federación). (1988). Norma Oficial Mexicana NOM-Y-302-1988, Plaguicidas clasificación toxicológica.
41. DOF (Diario Oficial de la Federación). (1993). Norma Oficial Mexicana NOM-045-SSA1-1993, Plaguicidas. productos para uso agrícola, forestal, pecuario, de jardinería, urbano e industrial. Etiquetado.
42. DOF (Diario Oficial de la Federación). (1993). Norma Oficial Mexicana NOM-046-SSA1-1993, Plaguicidas-productos para uso doméstico-etiquetado.
43. FAO, (2006). "Código Internacional de Conducta para la Distribución y Utilización de Plaguicidas". Roma: FAO.
44. Fernández, A., Mancipe, L. y Fernández, D. (2010). "Intoxicación por organofosforados". Revista Med, Vol.18, No. 1, pp. 84-92.

45. Ferrer, A. (2003). "Intoxicación por plaguicidas". Anales del Sistema Sanitario de Navarra, 26(Supl. 1), 155-171. Recuperado en 23 de agosto de 2018, de http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1137-66272003000200009&lng=es&tlng=es.
46. García, C. y Rodríguez, G. (2012). "Problemática y riesgo ambiental por el uso de plaguicidas en Sinaloa". Ra Ximhai. El Fuerte, México, Vol. 8, No. 3b, pp. 1-10.
47. Glover, R. (1959). "The Pattern of Fresh-Water Flow in a Coastal Aquifer". U. S. Geological Survey, Vol. 64, No. 4. Denver, Colorado. pp. 457-459.
48. Gonzáles, C. (2005). "Migración de herbicidas (atrazina y 2,4-D) en suelo del distrito de riego 063, Guasave, Sinaloa". Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, División de Estudios de Posgrados, Facultad de Ingeniería. Jiutpec, Morelos.
49. González Márquez, Luis. (2005). "Migración de herbicidas (Atrazina Y 2,4-D) en suelo del distrito de riego 063, Guasave, Sinaloa". Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Jiutepec, Morelos.
50. González, L., Hansen, I., Trigueros, A., Rodríguez, H. y Moreno, M. (2014). "Fosfatos en agua de drenaje agrícola: Cuenca baja del río Sinaloa". Ciencia desde el Occidente. Volumen 1, No. 2. pp. 19 – 28.
51. Hernández, A. y Hansen, A. (2011). "Uso de plaguicidas en dos zonas agrícolas de México y evaluación de la contaminación de agua y sedimentos". Rev. Int. Contam. Ambie. 27, 115-127. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v27n2/v27n2a3.pdf>
52. Hirata, R. (2002). "Carga contaminante y peligros a las aguas subterráneas". Revista Latino-Americana de Hidrogeología. São Pablo, Brasil, No.2, pp. 81-90. <http://gaia.geologia.uson.mx/academicos/monreal/IntrusionSalinaCostaHillo.pdf>
<http://gaia.geologia.uson.mx/academicos/monreal/IntrusionSalinaCostaHillo.pdf>
<http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/7010manualTecnicasanaliticas.pdf>
53. Iglesia, A., y Delgado, P. (2000). "Plaguicidas: Neurotoxicidad y vigilancia de la salud". Sevilla-INSHT, núm. 8-2000, pp. 4-14. http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/Rev_INSHT/2000/8/seccionTecTextCompl.pdf
54. IMTA. (2017). "La desalación del agua". Gaceta del IMTA, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 6. <https://www.imta.gob.mx/gaceta/anteriores/g06-10-2007/desalacion.html>
55. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2019). "Diazinon". <http://www2.inecc.gob.mx/sistemas/plaguicidas/pdf/diazinon.pdf>
56. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2001). "Estado de Sinaloa Cuaderno Estadístico Municipal Edición 2000, Guasave, Sinaloa". México: INEGI.

57. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2018). Consulta de mapa fisiográfico de México. Consultado en octubre de 2018. <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/fisiografia/>
58. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2018). Consulta de mapa climatológico de México. Consultado en octubre de 2018. <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/climatologia/>
59. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). (2018). "2-etilhexanol. Documentación toxicológica para el I v establecimiento del límite de exposición profesional del 2-etilhexanol". Documentación Límites Exposición Profesional. España.
60. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED) (2010). "Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Estado de Sinaloa, Guasave". Septiembre 29, 2018, de Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED) y Secretaría de Gobernación (SEGOB). Sitio web: <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM25sinaloa/municipios/25011a.html>
61. INVEMAR. (2003). "Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos (aguas, sedimentos y organismos)". Programa Calidad Ambiental Marina. pp. 24.
62. Inzunza, J. (2008). "Optimización de patrones de cultivo de distritos de riego del Noroeste de México". Revista Chapingo Serie Zonas. México, Vol. 7, pp. 157-163.
63. Iturbe, R., González, L., Castro, A., Barrera, J. y Mendoza, J. (2017). "Evaluación de intrusión salina y presencia de plaguicidas en el acuífero Río Sinaloa". Informe interno del Instituto de Ingeniería UNAM.
64. Jiménez, B., Durán, J. y Méndez, J. (2010). "El agua en México: cauces y encauces". México: Ed. Academia Mexicana de Ciencias.
65. Jiménez, R. (2017). "Introducción a la contaminación de suelos". España: Ed. Mundi-Prensa.
66. López, J. y Gómez, J. (2007). "La intrusión marina y su incidencia en los acuíferos españoles". Enseñanza de las Ciencias de la Tierra 15.3, pp 266-273.
67. Marcus, D. y Ciudad, C. (1988). "Pesticidas organofosforados y carbamatos: Toxicología y precauciones". IPA La Platina No. 49. Instituto de Nutrición y Tecnología de los Alimentos (INTA), Universidad de Chile. pp. 42-45.
68. Marell, I. y Candela, L. (1998). "Plaguicidas: aspecto ambientales, analíticos y toxicológicos". Asociación Internacional de Hidrogeólogos, Grupo Español. Ed. Universidad Jaume I. Servicio de Comunicación y Publicación.
69. Martínez, F. (2003). "Meteorología aplicada a la navegación". Barcelona: Ed. UPC.
70. Mellado, K. (2007). "Determinación de plaguicidas organoclorados por cromatografía de gases, en agua subterránea del municipio de Guasave, Sinaloa". Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, División de Agronomía. Coahuila.

71. Narváez, J., Palacio, J. y Molina, F. (2012). "Persistencia de plaguicidas en el ambiente y su ecotoxicidad: Una revisión de los procesos de degradación natural". Revista Gestión y Ambiente. Volumen 15 - No. 3. Medellín ISSN 0124.177X. pp 27-38.
72. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y Organización Mundial de la Salud (FAO y ORG). (1995). "Residuos de plaguicidas en los alimentos, estudio FAO producción y protección vegetal". https://books.google.com.mx/books?id=KWJ_IB3YHlgC&pg=PA44&lpg=PA44&dq=metabolito+Diazoxon&source=bl&ots=0HF8a4zHDK&sig=ACfU3U3ejq6fSeafb9mc7x6sa3pQhX7t2g&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwi9i9fg09jgAhUvooMKHbiUB98Q6AEwAHoECAkQAQ#v=onepage&q=metabolito%20Diazoxon&f=false.
73. Organización Mundial de la Salud (OMS). (1993). "Organización Panamericana de la Salud (OPS). Plaguicidas y salud en las Américas. Washington: OMS/OPS, División Salud y Ambiente.
74. Ortiz, I., Avila, M. y Torres, L. (2013). "Plaguicidas en México: usos, riesgos y marco regulatorio". Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal Vol. 4 No. 1. Xalapa, Veracruz. pp. 26-46
75. Pedroza, E. e Hinojosa, G. (2014). "Manejo y distribución del agua en distritos de riego. Breve introducción didáctica". México: Ed: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
76. Peinado, H., Green-Ruiz, C., Herrera, J., Escolero-Fuentes, O., Delgado, O., Belmonte, S. y Ladrón de Guevara, M. (2011). "Calidad y aptitud de uso agrícola y doméstico del agua del acuífero del río Sinaloa, porción costera". Hidrobiológica, Vol. 21, No.1, pp. 63-76.
77. Peinado, V., Peinado, H., Campista, S. y Delgado, O. (2015). "Análisis de la producción agrícola y gestión del agua en módulos de riego del distrito 063 de Sinaloa, México". Estudios Sociales. Hermosillo, Sonora, Vol. 23, No. 46, pp. 113-136.
78. Post, V. y Abarca, E. (2009). "Preface: Saltwater and Freshwater Interactions in Coastal Aquifers". Hydrogeology Journal 18, pp. 1-4.
79. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP). 2005. "Phtalic anhydride". OECD, Screening Information Dataset (SIDS). Paris, Francia.
80. Pulido, A. (2014). "Nociones de Hidrogeología para Ambientólogos". Almería: Ed. Universidad de Almería.
81. Ramírez, J. y Lascasaña, M. (2001). "Plaguicidas: clasificación, uso, toxicología y medición de la exposición". Arch Prev Riesgos Labor Vol. 4 No. 2, pp. 67-75. <https://sistemamid.com/preview.php?a=99004&material=-1&socio=-1>
82. Ribera, F. (2016). "Salinidad y aguas subterráneas". Hidrogeología emergente. pp. 97-110.
83. Rocha, H. y Cardona, A. (2015). "Interfase de agua dulce y agua salobre en la región Mérida-Progreso, Yucatán". Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VI, núm. 6, pp. 90.

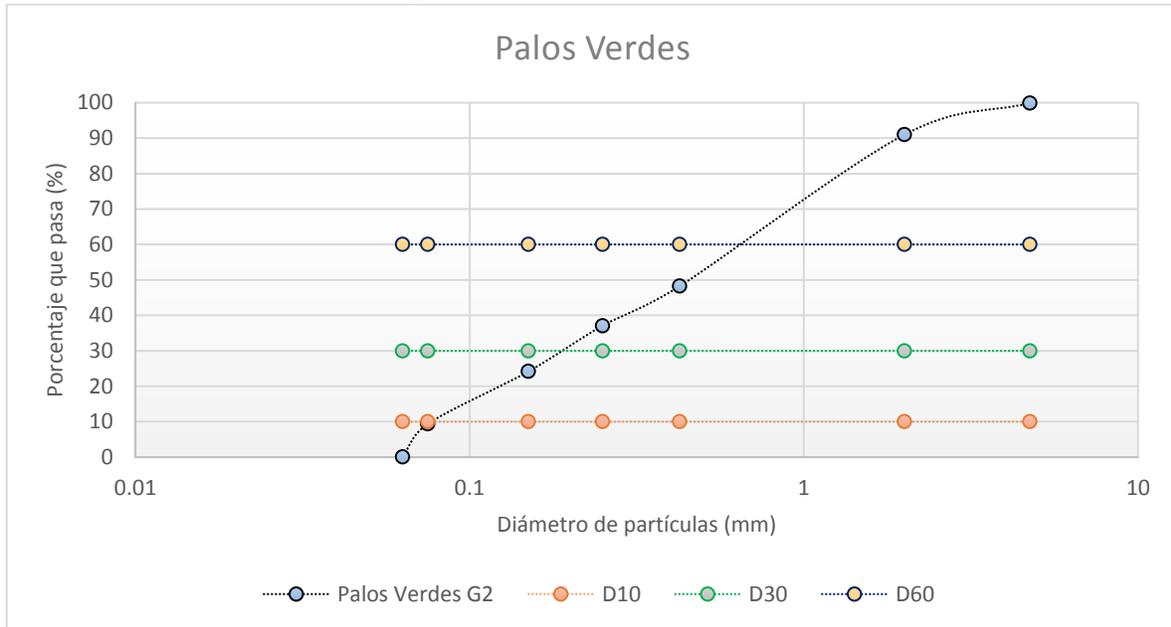
84. Rodríguez, D., Rodríguez, G., Sapozhnikov, D., Vargas, C., Vallejo, A., Verdugo, G. y Michel, A. (2008). "Monitoreo de la calidad del agua del acuífero de Guasave, Sinaloa". México, SIP 20080587. http://sappi.ipn.mx/cgpi/archivos_anexo/20080587_6101.pdf
85. Román, J., Cortez, A., Soto, R., Escoboza, F. y Viramontes, O. (2010). "El agua en México: cauces y encauces. El agua en el noreste". México: Ed. Academia Mexicana de Ciencias.
86. Sánchez, J. (2012). "Evolución geoquímica de las aguas subterráneas". Universidad de Salamanca, España. http://hidrologia.usal.es/temas/Evolucion_geoquimica.pdf
87. Santa Cruz Biotechnology, Inc. (2016). "Ficha de datos de seguridad: 2-Ethylhexyl Salicylate". Estados Unidos.
88. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) (2014). "Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Guasave, Sinaloa, 2014". México, D.F. http://guasave.gob.mx/s/wp-content/uploads/files/Art96/3/k/atlas%20de%20riesgo25011_GUASAVE.pdf
89. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2005). "Indicadores básicos del desempeño ambiental de México: 2005". México, D.F.
90. Secretaría de Salud (SS). (2016). "Boletín epidemiológico". Sitio web: <https://www.gob.mx/salud/acciones-y-programas/direccion-general-de-epidemiologia-boletin-epidemiologico>.
91. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2018). "Anuario Estadístico de la Producción Agrícola". Sitio web: <https://nube.siap.gob.mx/cierreaagricola/>
92. Servicio Geológico Mexicano (SGM). (1997). Carta Geológico-Minera "Los Mochis" G12-9, escala 1:250 000.
93. Simler. (2012). Software Diagrammes. <http://www.lha.univ-avignon.fr/Fichiers/Manuel%20DIAGRAMMES.pdf>
94. Tarbuck, E. y Lutgens, F. (2005). "Ciencias de la Tierra Una introducción a la geología física". Madrid: Ed. Pearson Educación. pp. 673.
95. Truque, B.P.A.; (2012). "Armonización de los estándares de agua potable en las Américas". <https://www.oas.org/DSD/publications/classifications/Armoniz.EstandaresAquaPotable.pdf>.
96. University of Hertfordshire (UH). (2017). "PPDB: Pesticide Properties DataBase, 2,3,5-trichloro-6-methoxy pyridine". <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/footprint/es/Reports/3124.htm>.
97. Universidad Nacional de Costa Rica (UNA). (2019). "Dimetoato". Manual de Plaguicidas de Centro América. Sitio web: <http://www.plaguicidasdecentroamerica.una.ac.cr/index.php/base-de-datos-menu/198-dimetoato>.
98. Watts, M. (2012). "Clorpirifos: Un posible COP a nivel global". Red de Acción en Plaguicidas y sus Alternativas de América Latina, Santiago de Chile. https://rap-al.org/wp-content/uploads/2017/09/Clorpirifos_Rev_-2.pdf.

99. Wolansky, M. (2011). "Plaguicidas y salud humana". Informe especial sobre plaguicidas agrícolas. Departamento de Química Biológica, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Volumen 21 número 122. pp. 23-29.

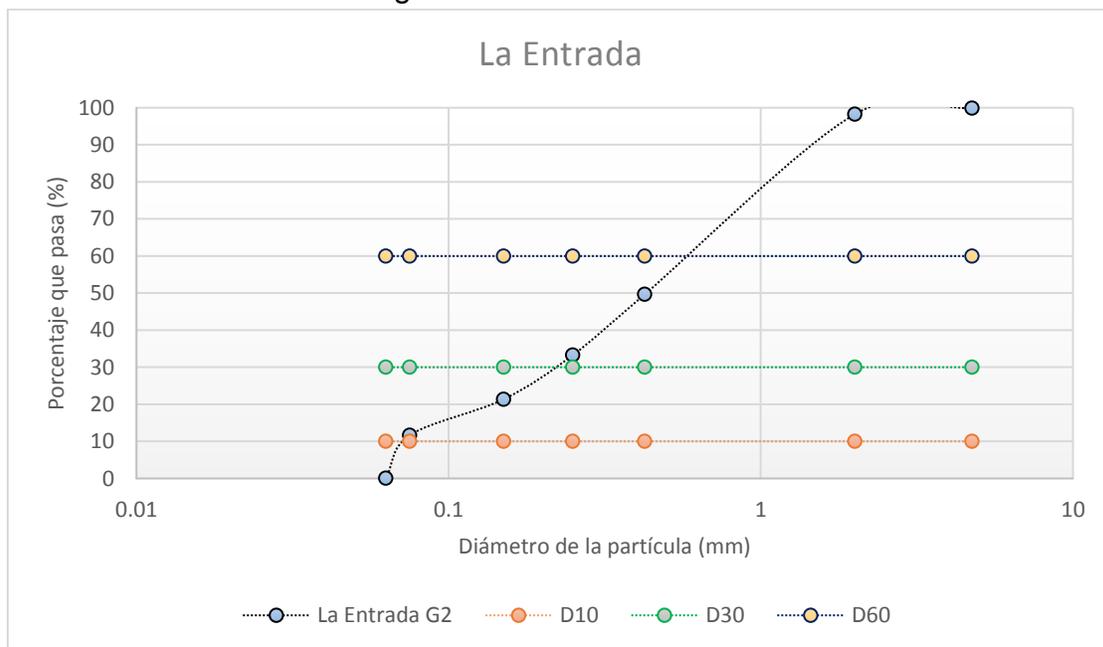
ANEXOS

Anexo1

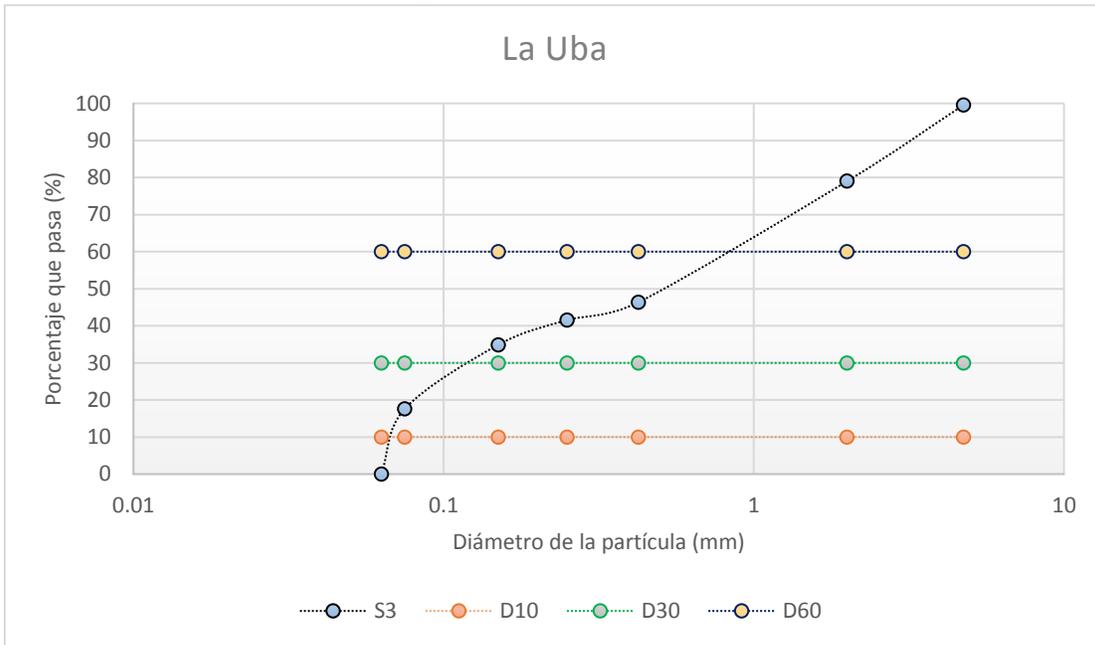
Curva granulométrica de Palos Verdes.



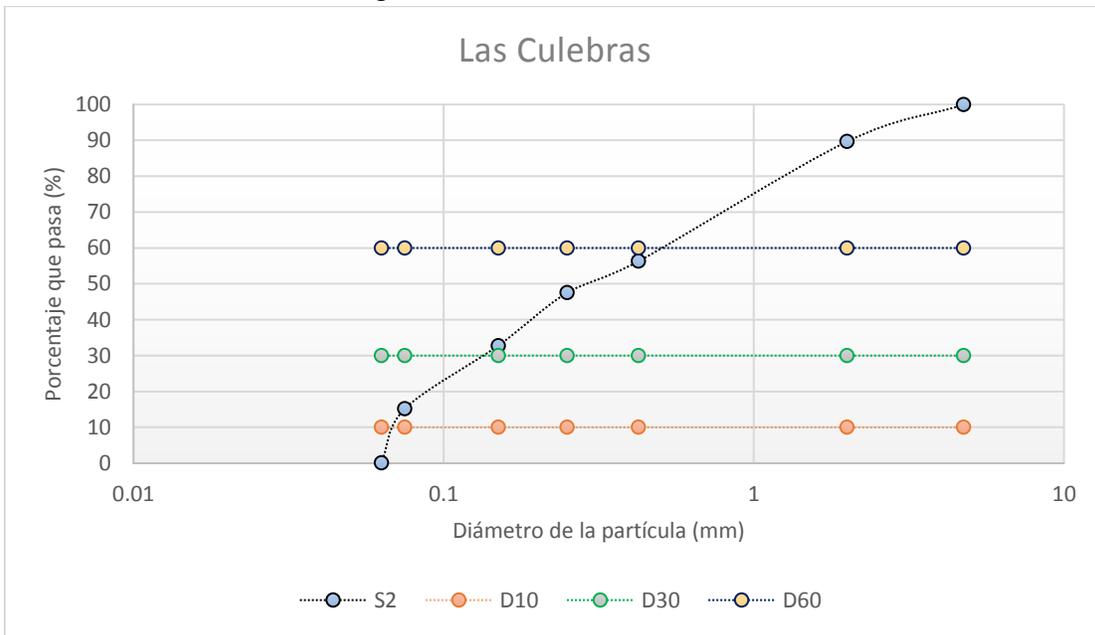
Curva granulométrica de La Entrada.



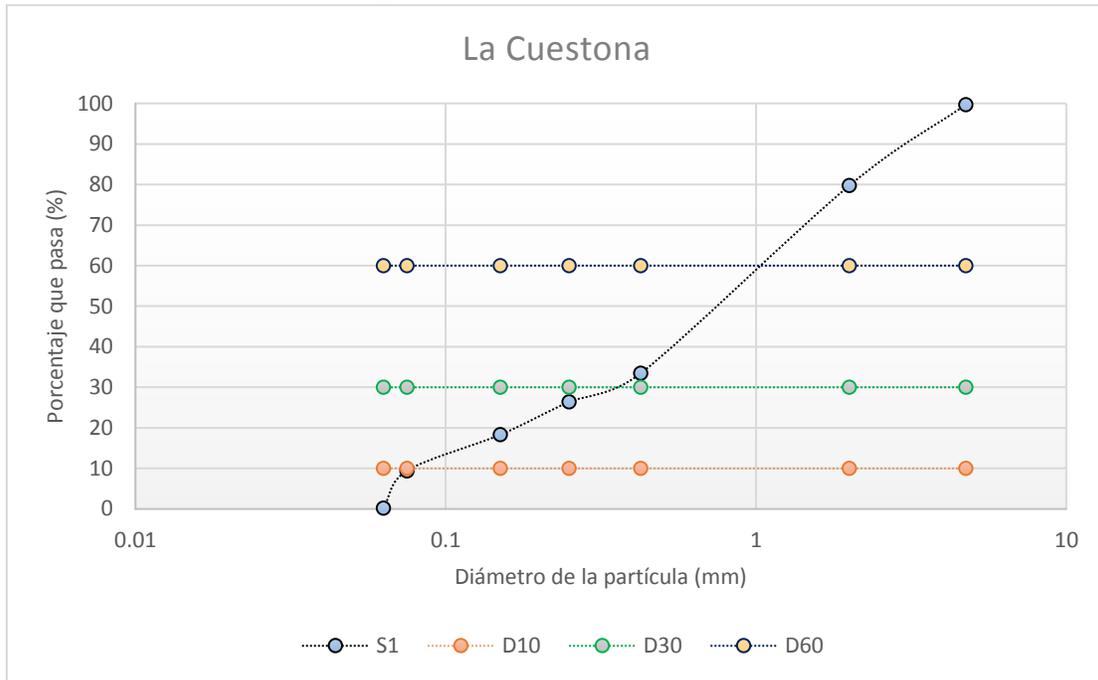
Curva granulométrica de La Uba.



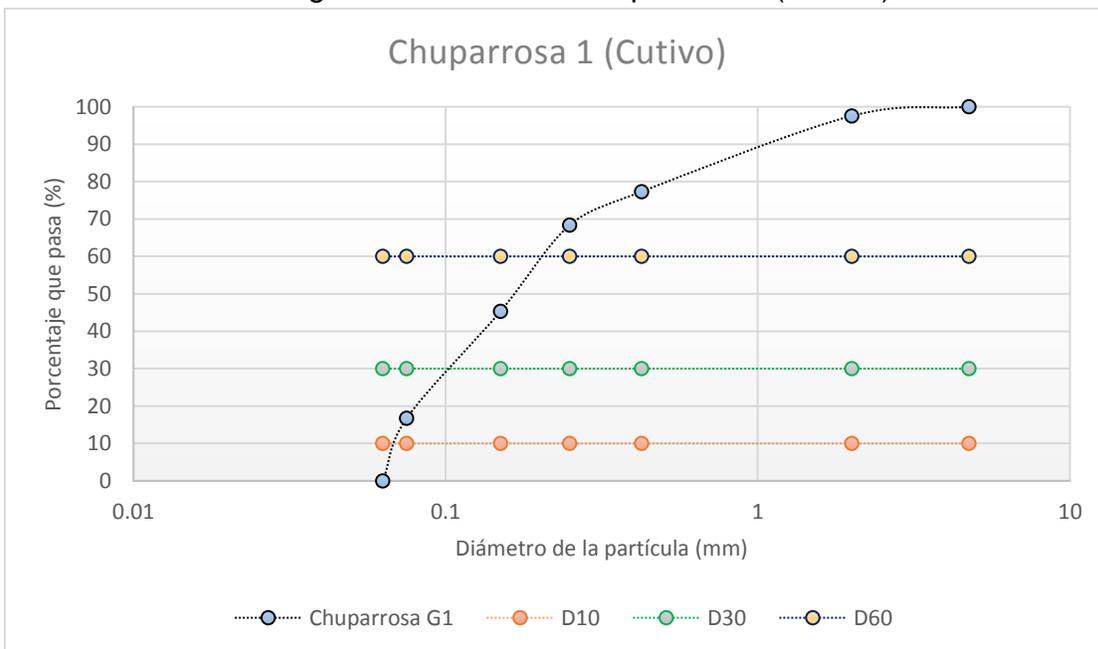
Curva granulométrica de Las Culebras.



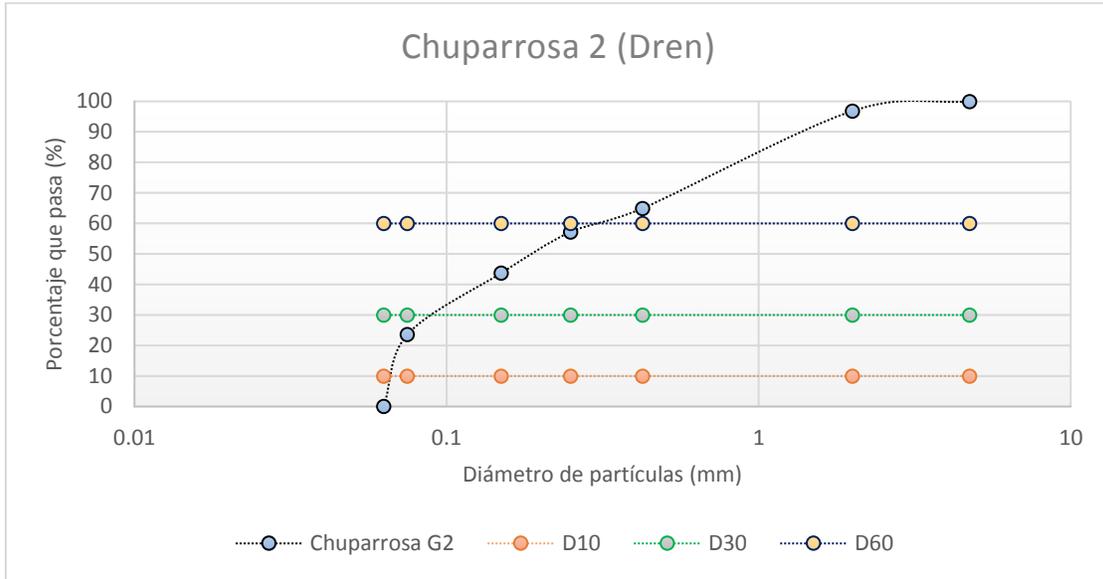
Curva granulométrica de La Cuestona.



Curva granulométrica de Chuparrosa 1 (Cultivo).



Curva granulométrica de Chuparrosa 2 (Dren).



Curva granulométrica de La Mojonera.

