

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Programa de Posgrado
en Ciencias de la Tierra**

**Caracterización y análisis comparativo de la salinidad de
suelos de cultivo de importancia económica de la región de
Ensenada, B.C. y zona vitícola de Caborca, Son.**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Anabel Del Toro Kobzeff

Ensenada, Baja California, México

2015

Tesis defendida por

Anabel Del Toro Kobzeff

y aprobada por el siguiente Comité

Dra. Zayre Ivonne González Acevedo
Directora del Comité

Dra. Sharon Zinah Herzka Llona

Dr. Thomas Günter Kretzschmar

Dra. Carmen Guadalupe Paniagua Chávez

Dr. Marco Antonio Pérez Flores



Dr. Juan García Abdeslem
Coordinador del Posgrado en Ciencias
de la Tierra

Dr. Jesús Favela Vara
Director de Estudios de Posgrado

Anabel Del Toro Kobzeff © 2015

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor

Resumen de la tesis que presenta **Anabel Del Toro Kobzeff** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales.

Caracterización y análisis comparativo de la salinidad de suelos de cultivo de importancia económica de la región de Ensenada B.C. y zona vitícola de Caborca Son.

Resumen aprobado por:

Dra. Zayre Ivonne González Acevedo
Directora de tesis

La tendencia climática actual para la región noroeste de México, ha causado un descenso en la precipitación pluvial, provocando estrés hídrico. Del total de suelos de cultivo que son afectados por sales, un 45.3 % pertenecen a la península de Baja California y un 13 % a Sonora. La alta cantidad de sales disueltas en el agua que se utiliza en la agricultura, podrían elevar las concentraciones de sales en el suelo. En este trabajo se describe y analiza comparativamente la salinidad en suelos de cultivo de importancia económica de la región de Ensenada B.C. y zona vitícola de Caborca Son. Se eligieron zonas de cultivo de tres regiones de Ensenada: Valle de Guadalupe (EVG), Valle de Ojos Negros (EVO) y Valle de Maneadero (EVM) y cinco localidades en Caborca (C). El tipo de muestreo fue por selección intencional de localidades con diferentes concentraciones de sólidos disueltos totales según reportes de la CONAGUA. Se realizaron análisis fisicoquímicos de aguas de riego y de suelos, identificando las subcuencas hidrológicas que las abastecen de agua, analizando su hidrodinámica y ubicando los tipos de suelo. De un análisis regional comparativo, resultó que todas las aguas de riego presentan un potencial riesgo de salinización del suelo, excepto las de EVO y C, que son aguas bicarbonatadas-cálcicas y sódicas de baja salinidad y poco sodio indicando que son de reciente infiltración. Dos localidades de EVG y todas las de EVM exceden los límites máximos de concentración permisibles de iones de la NOM-127-SSA-1994 de agua para uso y consumo humano. La mayoría de las muestras de suelo tienen texturas arenosas y areno limosas de clasificación mineralógica cuarzo-feldespática. En general los puntos de control, presentaron conductividades eléctricas (CE) más bajas que las muestras de los cultivos; excepto las localizadas cerca de la costa. En el caso del Mogor en EVG se esperaba tener suelos normales, por la calidad del agua de riego, sin embargo resultaron salinos (>2 mS/cm), posiblemente por el drenaje deficiente de este tipo de suelo. Finalmente, se obtuvo un modelo de correlación entre los valores de CE del suelo medido en extracto y la CE medida por métodos geofísicos, para muestras de Ensenada. La ecuación que resulta del algoritmo es: $y = 0.0304x + 0.0315$. Este estudio demuestra que el monitoreo exclusivo de la calidad del agua, usado como indicador de riesgo de salinización del suelo, no es el único factor que se debe analizar como fuente de sales; lo que indica un proceso más complejo, que debe ser evaluado de forma periódica con métodos más económicos y prácticos en zonas amplias, que permitan tomar medidas de mitigación a tiempo.

Palabras clave: noroeste de México, agua, riego, suelo, cultivo, salinización, conductividad eléctrica.

Abstract of the thesis presented by **Anabel Del Toro Kobzeff** as a partial requirement to obtain the Master degree in Earth Sciences with orientation in Environmental Geosciences.

Characterization and comparative analysis of salinity on agricultural soils of economic importance in the region of Ensenada B.C. and viticultural area of Caborca Son.

Abstract approved by:

Dra. Zayre Ivonne González Acevedo
Thesis Director

The current climate trends for the northwestern region of Mexico have caused a decrease in rainfall, producing hydric stress. From the total of cropland, which are affected by salts, 45.3 % belong to the peninsula of Baja California and 13 % to Sonora. The high amount of dissolved salts in the water used in agriculture could increase the concentrations of salts in the soil. This paper describes and analyzes comparatively salinity of croplands of economic significance in the region of Ensenada BC and the viticultural area of Caborca Son. Croplands were chosen from three regions in Ensenada: Guadalupe Valley (EVG), Ojos Negros Valley (EVO) and Maneadero Valley (EVM) and 5 locations in Caborca (C). The sampling was of intentional selection from sites with distinct total dissolved solids concentrations, as reported by CONAGUA. Physicochemical analysis of irrigation water and soil were made, identifying the water supply watersheds, analyzing its hydrodynamic and locating soil types. From a regional comparative analysis, resulted that all irrigation waters present a potential risk of soil salinization, except EVO and C, which are calcium or sodium-bicarbonated waters with low salinity and low sodium indicating its recent infiltration. Two locations from EVG and all in EVM exceed the maximum permissible concentration of ions recommended by NOM-127-SSA-1994, which presents the quality of water for human use and consumption. The majorities of soil samples have sandy and loam sandy textures of quartz-feldspar mineralogical classification. Overall, control points, presented lower electrical conductivities (EC); than the samples of the croplands, except zones located near the coast. In the case of Mogor in EVG, it was expected to have normal soils because of the good quality from irrigation water. However, its resulted saline (> 2 mS/cm), possibly by poor drainage of this soil type. Finally, a model of correlation between the values of the soil extract EC and the EC by geophysical methods for Ensenada samples was obtained. The resulting equation for the algorithm is: $y = 0.0315 + 0.0304x$. This study shows that the exclusive monitoring of water quality, used as an indicator for risk of soil salinization, is not the only factor to be analyzed as a source of salts; indicating a more complex process that must be evaluated periodically with economical and practical methods encompass large areas, to be able to propose mitigation actions on time.

Keywords: northwestern Mexico, water, irrigation, soils, croplands, salinity, electrical conductivity

Dedicatoria

A la vida bella.

A mi Padre y a mi Madre, quienes son mi ejemplo a seguir y por quienes hoy por hoy soy la mujer que soy, apoyándome incondicionalmente. Podría escribir miles de palabras, oraciones y párrafos, pero jamás sería suficiente para expresarles mi gratitud, al final quizá solo bastará decirles que los amo.

A mi Hermano, por su ejemplo y motivación para salir adelante a pesar de las dificultades, con trabajo y dedicación siguiendo nuestras metas y sueños, te quiero Manito...

A mi Familia y Amigos, por su apoyo y muestras de afecto, un placer en esta vida coincidir y aprender de todos y cada uno de ustedes.

En especial a Adalberto por su constante motivación, escuchar mis quejas, consolarme y apoyarme en momentos difíciles. ¡Pei, pei!!!

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada durante dos años para realizar mis estudios.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada y a todo su personal por las facilidades otorgadas.

A mi directora de tesis, Dra. Zayre Ivonne González Acevedo del Centro de Investigación Científica y Estudios Superiores de Ensenada, por la experiencia, enseñanzas, apoyo y sobre todo por su paciencia y dedicación para realizar esta tesis.

Al comité formado por la Dra. Sharon Z. Herzka Llona, Dr. Thomas Günter Kretschmar, Dra. Carmen Guadalupe Paniagua Chávez y Dr. Marco Antonio Pérez Flores, por sus observaciones, recomendaciones y sus consejos que me ayudaron a mejorar y terminar este trabajo.

A los técnicos y personal de las dependencias de CONAGUA, COTAS, INIFAP e IMIP, quienes me proporcionaron bases de datos, ayuda en campo y orientación.

A los dueños y encargados de los cultivos visitados por las facilidades brindadas en el muestreo.

Con gran aprecio al Técnico Gabriel Rendón, quien siempre me escucha y aconseja tanto en la vida, como en aprendizaje. Gracias por su amistad y su vocación a la enseñanza y amor a los minerales.

A los técnicos Mario Vega, Karina Espinoza, Vladimir Mendoza, Susana Rosas y Luis Gradilla, por la ayuda brindada en los análisis de las muestras.

Tanto al personal del almacén (Mili, Manuel, Epi y Arturo), como al Dr. Canino Herrera, de la Facultad de Ciencias Marinas de la UABC y Arturo Siqueiros del IIO, por su amistad, confianza, asesoría y préstamo de materiales y reactivos.

A Ivonne Pedrín, Martha Barrera y Ana Rosa Soto por su orientación y apoyo administrativo.

A mis amigos Luis Alfonso Duarte, Carlos Aguirre, Diego Alonso Padilla, Brenda Anda, Jaqueline Chavira, Radha Flores, Karla y demás compañeros de CICESE por su ayuda en clases, campo y laboratorio, pero sobre todo por el apoyo en los momentos de estrés haciendo más agradable esta experiencia, siempre viendo el lado positivo y cómico de las cosas.

Tabla de contenido

Resumen en español	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas	xiv
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Áreas de Estudio	2
1.1.1 Ensenada Baja California	2
1.1.2 Caborca Sonora.....	6
1.2 Antecedentes.....	9
1.2.1 Ensenada.....	10
1.2.2 Caborca	12
1.3 Hipótesis	13
1.4 Justificación	13
1.5 Objetivos.....	14
1.5.1 Objetivo general.....	14
1.5.2 Objetivos particulares	14
Capítulo 2 Marco Teórico.....	15
2.1 Agua	15
2.1.1 Salinidad	16
2.1.1.1 Origen	16
2.2 Índice de severidad de sequía	17
2.3 Agricultura en México	18
2.4 Suelos y su formación	20
2.4.1 Textura y contenido de arcilla	21
2.4.2 Porción mineral	21
2.4.3 Salinización de suelos	22
2.4.3.1 Causas	22
2.4.3.2 Determinación	25
2.4.3.3 Clasificación	26

Capítulo 3. Metodología	29
3.1 Claves de identificación	29
3.2 Diseño del muestreo	30
3.2.1 Valle de Guadalupe	31
3.2.2 Ojos Negros	32
3.2.3 Maneadero	32
3.2.4 Caborca	33
3.3. Muestras de agua de riego	34
3.3.1 Trabajo de campo	35
3.3.1.1 Parámetros fisicoquímicos	35
3.3.2 Trabajo de laboratorio	38
3.3.2.1 Cationes	38
3.3.2.2 Aniones	38
3.3.3 Balance iónico y diagramas de caracterización hidroquímica	40
3.4 Mapas hidrológicos	42
3.5 Muestras de suelo	43
3.5.1 Conductividad eléctrica aparente	44
3.5.2 Trabajo de laboratorio	45
3.5.2.1 Textura	46
3.5.2.2 Mineralogía	48
3.5.2.3 Parámetros fisicoquímicos	48
3.6 Modelo de salinidad del suelo	51
3.7 Tipos de suelo	52
Capítulo 4 Resultados y discusiones	53
4.1 Muestreo	53
4.3 Aguas de riego	54
4.3.1 Parámetros fisicoquímicos	54
4.3.2 Aniones y cationes	56
4.3.3 Balance iónico y diagramas de caracterización hidroquímica	59
4.4 Mapas hidrológicos	70
4.4.1 Ensenada	70
4.4.2 Caborca	77

4.5 Suelos	81
4.5.1 Conductividad eléctrica aparente.....	81
4.5.2 Textura.....	82
4.5.3 Mineralogía	88
4.5.4 Parámetros fisicoquímicos	90
4.6 Modelo de salinidad del suelo	95
4.7 Tipos de suelo	98
4.8 Resumen regional de los resultados y discusiones	103
Capítulo 5 Conclusiones	107
Capítulo 6 Recomendaciones	109
Lista de referencias bibliográficas	111
Apéndice A Diagramas de Piper	120
Apéndice B Diagramas de la relación de adsorción del sodio (RAS) (Normas de Riverside)	121
Apéndice C Mapas de rasgos hidrológicos y fisiográficos	122
Apéndice D Método de Walkley & Black	131
Apéndice E Fotografías de las muestras de la fracción de arenas del suelo	133

Lista de figuras

Figura		Página
1	Mapa referencia de la ubicación de Ensenada, B.C. y de las zonas agrícolas y vinícolas de importancia de Ensenada B. C.....	3
2	Geología regional de Ensenada, B.C. (Beltrán-Abaunza y Quintanilla-Montoya, 2001).	5
3	Mapa referencia de la ubicación de la zona agrícola de Caborca Son.	7
4	Distribución regional de afloramientos ígneos en el noroeste de México y localización del batolito costero de Sonora (Ramos et al, 2008).	8
5	Geología del área de Caborca (CONAGUA, 2011).	9
6	Usos del agua en México. (SIAP, 2013).	15
7	Índice de severidad de sequía meteorológica para el territorio Mexicano (Arreguín, 2013).	17
8	Gráfica de evolución y porcentaje de área del país afectada por la sequía, periodo 2003-2015 (SMN, 2015).	18
9	Regiones aptas para la viticultura en México. (Meraz, Valderrama y Maldonado, s.f).	19
10	Proceso de formación de los suelos: 1-Roca madre; 2-Acción mecánica (cambios de temperatura, hielo, etc.); 3-Acción química del agua y de sus sales minerales; 4-Acción de los seres vivos; 5-Acción conjunta de todos los factores (tomado de Asociación Española para la Cultura, el Arte y la Educación (ASOCAE), s.f).....	20
11	Composición por volumen de un suelo en buen estado para el crecimiento vegetal (Modificado de Tarbuck y Lutgens, 2005).....	21
12	Esquema de funcionamiento del EM38-mk2: en modo vertical (Adaptado de Lesch, Corwin y Robinson, 2005).....	26
13	Ejemplo de la geolocalización dentro del cultivo, de los puntos de muestreo de suelo, en este caso Don Emilio en Caborca Son. (C-DE). Mapa geoespacial generado con datos de GPS y software ArcMap 10.1.	30

14	Distribución de SDT presentes en las aguas de los pozos de Valle de Guadalupe, los puntos rojos (derecha) y los puntos amarillos (izquierda), representan las localidades elegidas para ser muestreadas. Imagen satelital tomada de Google Earth, versión 7.1.5.1557. (COTAS, 2013).....	31
15	Distribución de SDT presentes en las aguas de los pozos de Valle de Ojos Negros, los puntos rojos representan las localidades muestreadas (derecha). Localización geoespacial con puntos amarillos (izquierda). Imagen satelital tomada de Google Earth, versión 7.1.5.1557. (COTAS, s.f)	32
16	Distribución de SDT presentes en las aguas de los pozos de Maneadero, los puntos rojos representan las localidades muestreadas (derecha). Localización geoespacial con puntos amarillos (izquierda). Imagen satelital tomada de Google Earth, versión 7.1.5.1557. (COTAS, 2010)	33
17	Posición geoespacial de las localidades muestreadas en puntos amarillos (izquierda) y evolución del nivel freático de los pozos de Caborca en el periodo 2004-2007 (derecha). Imagen satelital tomada de Google Earth, versión 7.1.5.1557. (CONAGUA, 2011)....	34
18	Imágenes del trabajo de campo, reconocimiento de la localidad muestreada y la determinación geoespacial de los puntos de muestreo con GPS.	35
19	Colecta para almacenamiento de la muestra de agua de riego y la determinación in situ de parámetros fisicoquímicos de una alícuota.....	35
20	Titulación potenciométrica in situ de alcalinidad de alícuota de agua de riego realizada en cada localidad. La bureta contiene HCl 0.1 N y el electrodo para pH conectado al potenciómetro dentro de la muestra.	36
21	Sistema de reacción de carbonatos que ocurre en una titulación potenciométrica por volumetría con un ácido fuerte (HCl 0.1 N) (Tomado de Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS), s.f).	37
22	Cromatograma generado por el software de cromatografía (CHROMELEON).	39
23	Estructura de formación del diagrama de Piper (Sánchez San Román, Sin año)-b.....	41
24	Mapa de las unidades de disgregación de la División Hidrológica de Aguas Superficiales escala 1:250 000 Serie I (INEGI, 2010).....	43
25	Toma de muestra de suelo.	44

26	Diagrama de flujo para la calibración y registro de la conductividad eléctrica aparente de los puntos de muestreo con EM-38 GROUND CONDUCTIVITY METER de GEONICS y la homogenización del suelo.	44
27	Imágenes del procedimiento para el análisis textural (Bouyoucos)....	47
28	Imágenes del procedimiento para la determinación del contenido mineral de la fracción de arena de las muestras de suelo.....	48
29	Imagen del mecanismo de extracción al vacío del extracto de la pasta de saturación.	49
30	Imágenes del método Walkley y Black para determinación de materia orgánica de las muestras de suelo.	51
31	Distribución de SDT presentes en las aguas de los pozos de Valle de Ojos Negros, los puntos rojos representan las localidades muestreadas (derecha). Localización geoespacial con puntos amarillos (izquierda). (Imagen satelital tomada de Google Earth, versión 7.1.5.1557) (CONAGUA-COTAS)	53
32	Diagramas de Stiff típicos.	61
33	Diagramas de Stiff para iones presentes en muestras de agua de riego de cultivos, en el Valle de Guadalupe, Ensenada, B. C.....	62
34	Diagramas de Stiff para iones presentes en muestras de agua de riego de cultivos, en la región de Ojos Negros, Ensenada, B.C.....	62
35	Diagramas de Stiff para iones presentes en muestras de agua de riego de cultivos, en la región de Maneadero, Ensenada, B.C.....	63
36	Diagramas de Stiff para iones presentes en muestras de agua de riego de cultivos, en las localidades del municipio de Caborca Son..	64
37	Esquema general del diagrama de Piper y las clasificaciones de los tipos de agua en base a las relaciones de los iones que presentan..	65
38	Diagrama de Piper de las muestras de agua de riego de las localidades muestreadas.	65
39	Diagrama de la relación de adsorción de sodio (RAS) (Modificado de: U.S. Soil Salinity Laboratory Staff, 1954).	66
40	Diagrama de clasificación (Riverside) de las muestras de agua de riego de cultivos en las zonas de estudio, en función de la relación de la adsorción de sodio (RAS).	67

41	Diagrama de clasificación (Wilcox) del agua de riego en función de la conductividad (Martínez Alfaro, P. E., Martínez Santos, P. y Castaño Castaño S., 2006).	69
42	Diagrama de clasificación (Wilcox) del agua de riego en función de la conductividad para las muestras analizadas.	70
43	Geolocalización de las subcuencas (RH01Bg y RH01Cc) a las que pertenecen las localidades muestreadas de Ensenada, B. C.....	71
44	Principales corrientes que atraviesan los valles de EVO y EVG (Méndez, 2012).	72
45	Límites del acuífero de Maneadero (COTAS, 2010).	73
46	Geolocalización de las subcuencas (RH08Ba, RH08Bc y RH08Cd) a las que pertenecen las localidades muestreadas de Caborca, Son.	78
47	Regiones hidrológicas y acuíferos de Sonora (Vega et al., 2011).....	79
48	Diagrama de Shepard para las localidades de EVG.	84
49	Diagrama de Shepard para las localidades de EVO.....	85
50	Diagrama de Shepard para las localidades de EVM, Ensenada, B.C., los puntos encerrados en el óvalo, corresponden a las muestras de la localidad EVM-PA96.	86
51	Diagrama de Shepard para las localidades del municipio de Caborca Son.	87
52	Fotografías en aumento 10x, 20x y 25x de las muestras de arenas representativas de cada localidad muestreada (columna # FOTO de la Tabla 14).	88
53	Relación entre la CE (mS/cm) del extracto de suelo de muestras de cada localidad (1, 2, 3, 4 y PC representadas por las barras de colores) y la CE (mS/cm) del agua de riego de las localidades muestreadas (representadas por la línea roja).	94
54	Relación entre la CE (mS/cm) del extracto de suelo de cada muestra (representado por las barras azules, y su textura (representada por la línea roja).....	95
55	Gráfica del análisis de regresión lineal para las mediciones de CE aparente del H_1 Vs la CE real del extracto de la pasta saturada.	97
56	Tipos de suelos en Guadalupe (EVG), localidades muestreadas representadas por puntos amarillos.	98

57	Tipos de suelos presentes en Ojos Negros (EVO), localidades muestreadas representadas por puntos amarillos.	99
58	Tipos de suelos presentes en Maneadero (EVM), localidades muestreadas representadas por puntos amarillos.	100
59	Tipos de suelos presentes en Caborca (C), localidades muestreadas representadas por puntos amarillos.	101

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Parámetros más comunes para determinar la calidad del agua de riego, en relación con su salinidad. Sólidos Disueltos Totales (SDT), Conductividad Eléctrica (CE) y Riesgo de Salinidad.....	16
2	Clasificación de los suelos afectados por salinidad en función de la conductividad eléctrica (CE) y el potencial hidrógeno (pH) (Richards, 1954; Soils Science Society of America, 1987).....	27
3	Tabla de claves de identificación de las localidades muestreadas....	29
4	Parámetros considerados para la obtención de las lecturas de CEa.....	45
5	Relación de muestras de agua de riego y suelo en las localidades de estudio.....	53
6	Valores de los parámetros fisicoquímicos registrados en campo para las muestras de agua de riego en las localidades muestreadas, se resaltan en negritas las localidades con riesgo: Muy alto de salinidad de suelos debida a su contenido de SDT.....	55
7	Concentración (mg/L = ppm) de aniones (F ⁻ , Cl ⁻ , NO ₂ ⁻ , Br ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ⁻² y HCO ₃ ⁻) y cationes (Ca, Mg, Na y K) presentes en aguas de riego en las localidades muestreadas. Y concentraciones (mg/L = ppm) máximas permitidas por la NOM-127-SSA1-1994 (subrayado) y valores normales en aguas subterráneas (negritas) (Pulido J. L., 1978).....	59
8	Balance iónico entre las concentraciones (meq/L) de cationes (Ca, Mg, Na y K) y de aniones (F ⁻ , Cl ⁻ , NO ₂ ⁻ , Br ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ⁻² y HCO ₃ ⁻) presentes en aguas de riego en las localidades muestreadas y su porcentaje de error asociado.....	60
9	Localidades de muestreo del municipio de Ensenada B.C. y clave de la subcuenca a la que pertenece.....	71
10	Localidades de muestreo del municipio de Caborca, Son. y clave de la subcuenca a la que pertenece.....	78
11	Lecturas del EM-38 CEa de cada punto de muestreo (/ = muestra nula).....	81

12	Distribución porcentual de las fracciones de arena, limo y arcilla que constituyen la muestra total (100 %) de suelo de cada sitio de estudio.....	82
13	Resumen de las clasificaciones texturales obtenidas por el método de Bouyoucos, para cada una de las localidades muestreadas y su clasificación con el diagrama de Shepard.....	88
14	Mineralogía cualitativa de la fracción arenosa de las muestras de suelo.....	89
15	Valores de los análisis fisicoquímicos de las muestras de suelo.....	90
16	Clasificación de suelos según la presencia del % de materia orgánica.....	92
17	Coeficientes de determinación (r^2) y de correlación del análisis de regresión lineal para las lecturas (V_1 , $V_{0.5}$, H_1 y $H_{0.5}$) de diferente área de influencia del EM-38.....	96
18	Lecturas del dipolo $H_1 = CE_a$ de cada punto de muestreo y su equivalente CE_r medida en el extracto de la pasta saturada. (/ = muestra nula).....	96
19	Resumen de las unidades de suelo que presenta cada localidad de interés.....	101

Capítulo 1 Introducción

La salinización de suelos es un problema mundial. La evaluación de 1999 realizada por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación en conjunto con la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (FAO-UNESCO), mostró que los suelos salinos y los suelos sódicos están ampliamente extendidos y afectan a millones de hectáreas en todo el mundo. Una proporción significativa de la salinidad del suelo se debe a actividades humanas (Iannetta y Colonna, s.f).

Desde un punto de vista agronómico, suele hablarse de suelos salinos cuando éstos albergan niveles excesivos de sales (>4 ms/cm) (Richards, 1954). Tales moléculas de sales, en sí mismas, no son nocivas ya que suelen formar parte de los fertilizantes inorgánicos que se añaden a los cultivos. Una cantidad elevada de las sales puede llegar a impedir tanto la absorción de agua, como la de nutrientes a través de las raíces de las plantas, causando infertilidad en los suelos de cultivo (Ibáñez, 2007).

En las regiones áridas, semi-áridas y costeras, la salinización de los suelos es una característica común y podría representar un problema debido a su impacto negativo en el rendimiento de los cultivos (Abrol, Yadav and Massoud, 1988).

En México, se estima que existen 6 millones de hectáreas bajo riego; de las cuales un total de 1.4 millones se ubican en la región agrícola del noroeste del país.

El porcentaje nacional de suelos agrícolas afectado por sales, es de un 20 % (1.2 millones de ha); donde la península de Baja California tiene el mayor problema con un 45.3 % (0.5 millones de ha), seguido por Sinaloa con el 17.1 % (0.2 millones de ha) y Sonora con el 13 % (0.15 millones de ha).

Las causas y consecuencias de la salinidad son muy similares en cualquier región agrícola del mundo por lo que las estrategias generales son de aplicación

universal y el manejo específico estará condicionado por las condiciones del lugar (Osorio y Uvalle, s.f).

Es fundamental disponer de información periódica de la condición de la salinidad del suelo para analizar y evaluar su dinámica y la eficacia de las medidas de mitigación y/o recuperación implementadas. Sin embargo, el monitoreo es complicado debido a su variabilidad espacial y a su naturaleza dinámica a consecuencia de las prácticas de manejo, profundidad de los niveles freáticos, lluvia, la salinidad de las aguas subterráneas, entre otros (Corwin y Rhoades, 1984). Además resulta costoso realizar caracterizaciones frecuentes en áreas afectadas con el uso de métodos convencionales (Hermosillo, 2014).

Es del interés de este estudio, el de evaluar las condiciones actuales de cultivos representativos del noroeste del país. Otra aportación del presente estudio, será la obtención de un modelo para evaluar la salinidad de los suelos mediante técnicas geofísicas; que puede ser una alternativa más eficiente y de menor costo comparada con los métodos convencionales.

1.1 Áreas de Estudio

El presente trabajo se realizó en zonas agrícolas de importancia económica de dos municipios del noroeste de México: Ensenada B.C. y Caborca Son.

Cabe mencionar que para fines prácticos a partir de esta sección, la nomenclatura de los sitios de interés se efectuó en base a la Tabla 3 descrita en la sección 3.1 de la metodología.

1.1.1 Ensenada Baja California

El Estado de Baja California está conformado por 5 municipios: Mexicali, Ensenada, Tecate, Tijuana y Rosarito; se encuentra situado en la parte noroeste del territorio mexicano entre los paralelos 32° 43' al norte siendo frontera con Estados

Unidos de América y al sur en el paralelo 28° con Baja California Sur y entre los meridianos $112^{\circ} 45'$ longitud este y al oeste $117^{\circ} 19'$.

La península de Baja California está caracterizada por climas árido-seco debido a que las lluvias son escasas en la mayor parte del territorio, donde el agua se encuentra almacenada en acuíferos, cuya fuente de abastecimiento es a causa de la precipitación pluvial (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), s.f; Kurczyn, Kretschmar e Hinojosa, 2007).

En el municipio de Ensenada (Figura 1), se localiza la zona productora de vinos, responsable de alrededor del 90 % de la producción total nacional, su zona principal comprende 10 000 hectáreas de cultivo (Larousse de los vinos, 2008; Meraz, 2009), con un aproximado de 72 casas vinícolas distribuidas en sus distintos valles (Venegas, 2012).

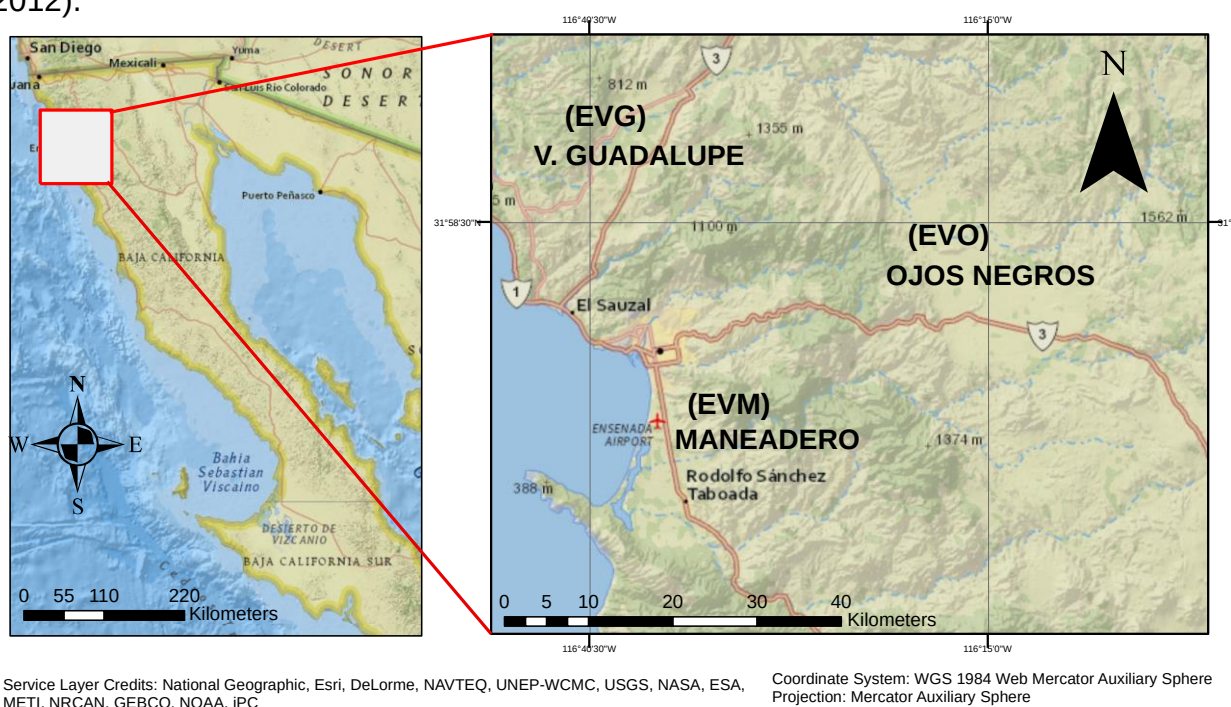


Figura 1.- Mapa referencia de la ubicación de Ensenada, B.C. y de las zonas agrícolas y vinícolas de importancia de Ensenada B.C.

Destacándose el Valle de Guadalupe (EVG), ubicado entre los paralelos $31^{\circ} 51'$ y $32^{\circ} 15'$ latitud norte y los meridianos $115^{\circ} 52'$ y $116^{\circ} 51'$ de longitud oeste (Beltrán, 2001), siendo el más reconocido por sus casas vitivinícolas y por su ruta turística, la llamada “ruta del vino”.

En el Valle de Ojos Negros (EVO) ubicado a sólo 38 kilómetros al este del puerto de Ensenada entre las coordenadas 31° 52' a 31° 57' de latitud norte y 116° 12' a 116° 19' de longitud oeste (Cardoso, V., Raúl, F., y López García, J., 2005), la extensión de suelos cultivados abarcan un total aproximado de 2076 hectáreas y actualmente constituye una zona agrícola de importancia, ya que sus productos se comercializan tanto en México como en EUA, los cuales incluyen alfalfa, cebolla, sandía, avena y vid (Ponce, et al., 2000). En el 2010 esta localidad se proyecta como el hogar de nuevas casas vitícolas debido a que tiene características propicias para desarrollarse (Lammers, 2010).

El Valle de Maneadero (EVM) está situado a 12 km al sur de Ensenada entre las coordenadas 31° 32' y 31° 58' de latitud norte y 115° 54' y 116° 40' de longitud oeste, en él se cultivan alrededor de 2 890 ha. Maneadero participa con el 16 % en cuanto a superficie hortícola del distrito de riego 001 y con el 15 % de productividad. Ante el crecimiento poblacional del sur de Estados Unidos en los años 30's, éste demandaba gran cantidad de alimentos, generando un incremento en la producción agrícola de la región y con ello fuertes inversiones, instituyendo una agricultura moderna de alto desarrollo tecnológico (Mena, 2002).

La posición de estas regiones con respecto del centro de la ciudad de Ensenada es: EVG al norte, EVO al este y EVM al sur, se encuentran en un radio promedio de 30 Km de distancia, donde las carreteras federales 1 y 3 son las vías de transporte que se encuentran intercomunicadas entre sí y ayudan al fácil acceso a ellas.

Mineralogía de Ensenada

El reconocimiento geológico de Ensenada ha sido sintetizado y descrito por Gastil et al. (1975). Los tres grupos de rocas denominados pre-batolítico, batolítico y postbatolítico (Figura 2), constituyen los principales conjuntos litológicos. (Beltrán-Abaunza y Quintanilla-Montoya, 2001)

El grupo pre-batolítico está constituido por formaciones sedimentarias marinas que datan del Cretácico temprano (Albiano) y por rocas metamórficas típicas de depósitos eugeosinclinales. El grupo batolítico está compuesto por rocas plutónicas cristalinas de tipo tonalita, gabro y granodiorita (Vidal, Welhan y Vidal, 1982). El grupo postbatolítico está constituido por formaciones sedimentarias marinas del Cretácico superior (Maestrichtiano), depósitos marinos del Plioceno, basaltos del Mioceno, andesitas volcánicas y sedimentos no marinos de aluvión cuaternario (Quintanilla-Montoya y Suárez-Vidal, 1992; Vidal et al., 1982).

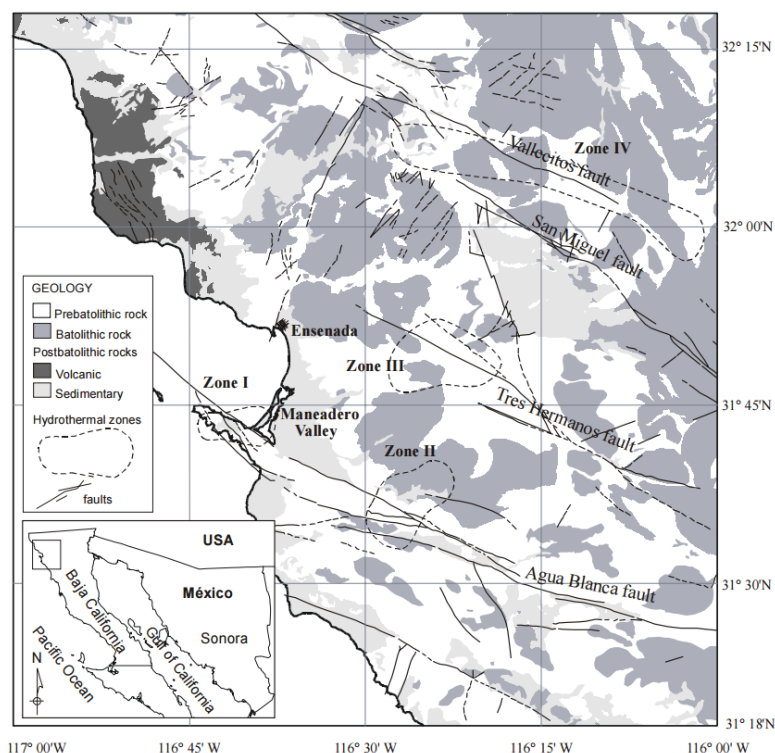


Figura 2.- Geología regional de Ensenada, B.C. (Beltrán-Abaunza y Quintanilla-Montoya, 2001).

El Cinturón Batolítico Peninsular es parte de un arco magmático y está expuesto desde el sur de California, EE.UU., hasta la mitad de la península de Baja California (Torres, Delgado, Espinosa y Romo, 2011). Los batolitos son afloramientos de rocas ígneas intrusivas de lento enfriamiento (Tarbuck y Lutgens, 2005).

1.1.2 Caborca Sonora

El estado de Sonora se ubica al noroeste de México, dentro de las coordenadas 26° 14' y 32° 29' latitud norte y en los 108° 27' y 115° 03' longitud oeste (Ojeda, 1994); en una franja que incluye a los grandes desiertos del mundo, dentro de la región II noroeste, se caracteriza por cambios climáticos extremos, con valores altos de temperatura, evaporación y bajos de precipitación, escurrimiento e infiltración, con una precipitación promedio anual de 336 mm de agua.

Debido a la extracción desmedida a la que han sido sometidos los acuíferos del Estado de Sonora, se encuentran sobreexplotados y con intrusión salina (Vega, Cirett, De la Parra y Zavala, 2011).

El desarrollo de la viticultura, es una actividad que impacta significativamente la economía de Sonora, sin embargo, los distritos de riego por bombeo del estado, se han visto seriamente afectados por la problemática de escasez y contaminación del agua subterránea, ocasionando una baja rentabilidad agrícola, que se ve reflejada en el decremento de las utilidades que generan los cultivos en la región.

La gran importancia de realizar estudios en la zona vitícola ubicada dentro del Distrito de Riego 037, en la Región Noroeste del Estado de Sonora en el Municipio de Caborca ubicada en las coordenadas 30° 03' - 31° 45' de latitud norte y 112° 06' - 113° 08' de longitud oeste (Figura 3), es debido a que produce cultivos altamente rentables, cuyo destino son el mercado internacional en un gran porcentaje (Reyes y Quintero, 2009).

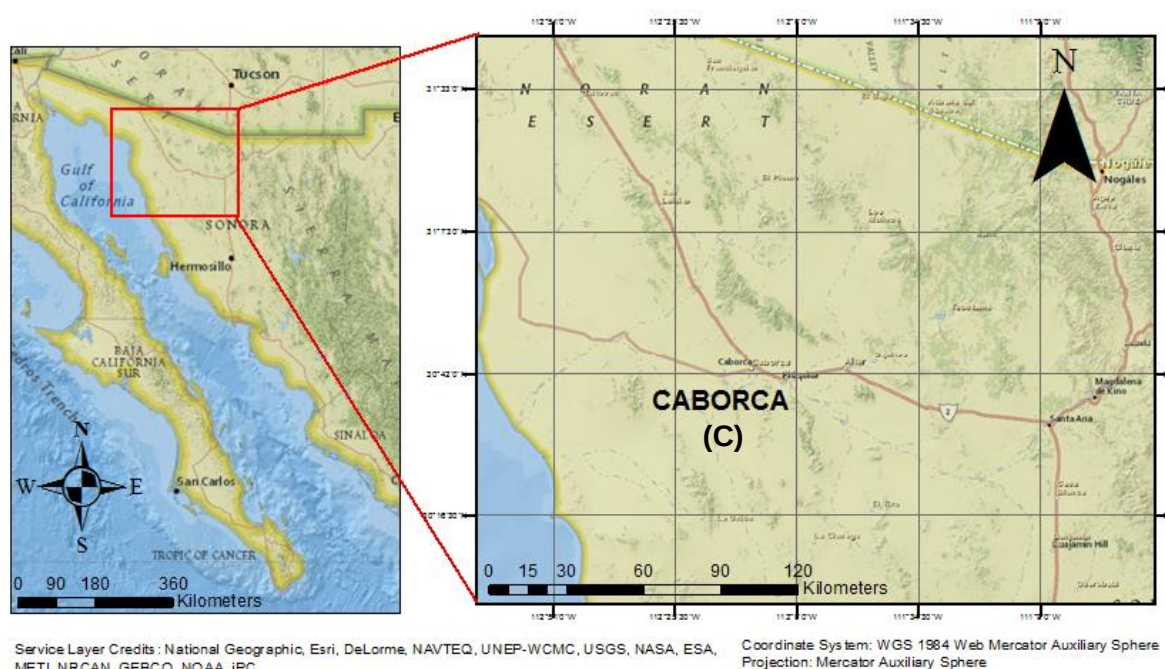


Figura 3.- Mapa referencia de la ubicación de la zona agrícola de Caborca Son.

El centro de la ciudad de Caborca se encuentra a una distancia aproximada de 120 Km de la costa del Golfo de California. Cuenta con 2 vías de transporte principales para su fácil acceso (carreteras federal 2 y estatal 37).

Mineralogía de Caborca

Dentro de la parte continental de México, principalmente en Sonora y Sinaloa, se formaron numerosos batolitos de entre 90 y 40 Ma, formando un cinturón dirección NW-SE, que se conoce como el cinturón plutónico Laramide (Valencia, Ruiz y Roldán, 1999). Este cinturón se compone principalmente de plutones granodioríticos a tonalíticos y cuerpos incrustados de diorita y granito. El batolito costero de Sonora (CSB) y batolitos más al este en Sonora y Sinaloa (Figura 4) se interpretan como una continuación de la EPRB (Eastern Peninsular Ranges Batholith), que actualmente se separa de Baja California por el Golfo de California (Ramos et al., 2008)

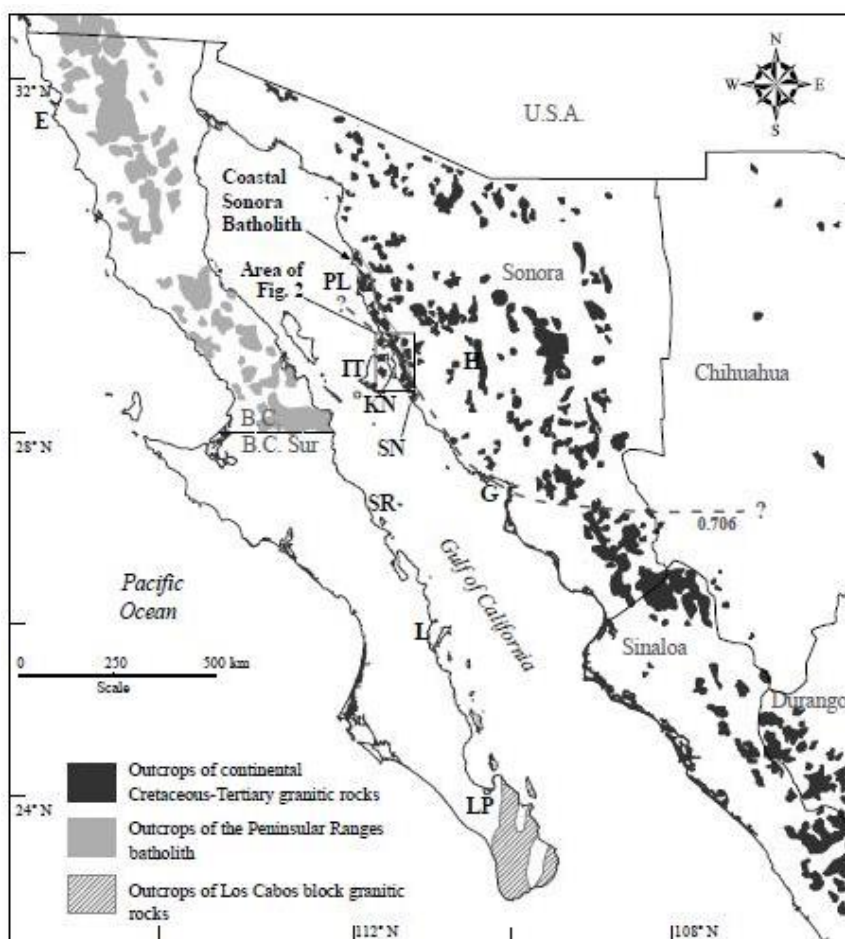


Figura 4.- Distribución regional de afloramientos ígneos en el noroeste de México y localización del batolito costero de Sonora (Ramos et al, 2008).

En general, la geología regional de Caborca (Figura 5), está constituida por un basamento ígneo metamórfico constituido por gneises y esquistos afectados por un granito micrográfico denominado Granito Aibó, fechado en 1 100 Ma. Al Norte de Sierra El Álamo en la porción central del acuífero, afloran calizas, limolitas, areniscas, lutitas y conglomerados, en las planicies aluviales y eólicas hacia la costa, donde se desarrollan las actividades agrícolas, de manera aislada afloran rocas graníticas y granodioríticas (CONAGUA, 2011).

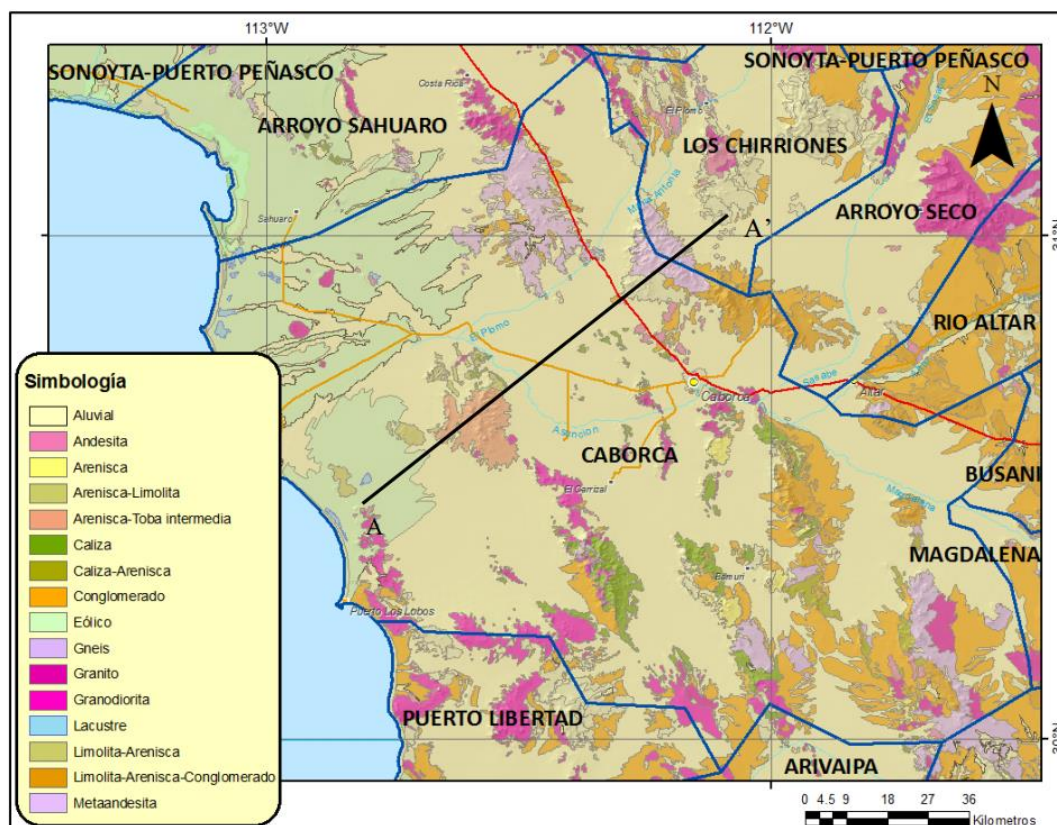


Figura 5.- Geología del área de Caborca (CONAGUA, 2011).

1.2 Antecedentes

En México, la distribución y extensión de suelos con problemas de sales se está incrementando en áreas de riego de las zonas áridas (Ortiz, 1992). De forma simultánea, la calidad del agua de riego en estas áreas es deteriorada progresivamente debido al exceso de sales (Pulido, 1994); aunado a esto, cuando existe un mal manejo del agua y del suelo, desatendiendo los factores promotores de acumulación de sales, el proceso de salinización de los suelos se acelera y agrava (Rhoades, 1990). Esto trae como consecuencia un deterioro progresivo de los suelos por salinización, lo cual repercute en una disminución de la productividad de éstos y del rendimiento y de la calidad de las cosechas (Bayuelo, Craig y Lynch, 2002; Carter, 2002).

1.2.1 Ensenada

En 2003 en el reporte técnico: “Estudios relacionados con la instalación de una planta desaladora de agua para la ciudad de Ensenada, B.C.” realizado por la Comisión Estatal del Agua (CEA), Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (CESPE) y el CICESE, se presentó la siguiente información:

“El acuífero del valle de Maneadero manifiesta en la actualidad que su aprovechamiento no es sustentable. Con los datos existentes, la CONAGUA ha determinado que las extracciones son del orden del 23 % superiores a la cuota de recarga del acuífero y han producido abatimientos en los niveles freáticos hasta de 12 m, ocasionando que en algunos sitios la intrusión del agua de mar ha elevado la salinidad del agua subterránea hasta concentraciones superiores a las 6 000 ppm” (CONAGUA, 2003).

“Los usos actuales del agua del acuífero del valle de Maneadero son principalmente el abastecimiento urbano y la producción agrícola, ambos sectores: urbano y agrícola requieren evaluar con certeza la disponibilidad real del recurso, para planear su desarrollo. La situación en el valle indica que la sobreexplotación estimada es de 4.9 millones de m³ por año, aproximadamente 155 L por segundo”.

“Es importante tomar en cuenta que la sobreexplotación se estimó utilizando el valor promedio de la precipitación y que en los últimos 5 años la intensidad de las lluvias ha sido menor a la media. Esto ha ocasionado efectos negativos como la pérdida de productividad de 1 200 ha y la degradación de la calidad del agua para el abastecimiento público urbano. La situación se agrava con el tiempo, por lo que debe considerarse con urgencia poner en marcha un plan de manejo que asegure la sustentabilidad del aprovechamiento del acuífero del valle de Maneadero”.

Lara (2011) reporta que los pozos de Maneadero cercanos a la costa mostraron las mayores salinidades y las concentraciones de estroncio (Sr) indican un aporte de Sr marino muy bajo o inexistente. Concluye que la alta salinidad de algunos de los pozos en el Valle de Maneadero no es debida a la intrusión de agua marina reciente y que se requieren más estudios para la identificar otras fuentes de sales.

Salgado, Palacios, Galvis, Gavi y Mejía (2012) presentan el estudio “Efecto de la calidad de agua del acuífero Valle de Guadalupe en la salinidad de suelos agrícolas” donde precisan lo siguiente: La salinidad del agua está presente en todo acuífero del Valle de Guadalupe (clasificada como C3 y C4 en 85.9 %), pero la salinidad del suelo no es homogénea en el total de la superficie del Valle; por lo tanto el agua del acuífero no es la única causante de dicho problema, el manejo del agua para riego y la aplicación de fertilizantes deben ser estudiados para cuantificar su contribución a la salinidad del suelo.

Del Toro (2012) con el trabajo “Cuantificación del aporte hidrogeológico de la subcuenca el Mogor a la recarga del acuífero del Valle de Guadalupe, B.C.”, cuantifica mediante fórmulas empíricas una recarga (vertical, de sistema montañoso, horizontal y de percolación por agua de riego) de $\sim 489\,000\text{ m}^3/\text{año}$ que fue equivalente al 12 % de la precipitación infiltrable en el año hidrológico 2010-2011 para este acuífero.

Se tiene como dato de campo proporcionado por personal de COTAS, que en la región de EVG, específicamente en la zona de las localidades de CE y RC, que años atrás operaban industrias olivareras, en las cuales el subproducto de desecho son salmueras, éstas se vertían directamente al suelo al parecer sin un pretratamiento; se cree que estas prácticas pueden ser la fuente de altas salinidades de las aguas subterránea, reflejadas en los mapas de SDT como focos de concentración.

1.2.2 Caborca

Zamudio, et al. (2004), encuentran que existe una correlación estadísticamente significativa entre propiedades físicas (estructura grumosa, textura fina de limos-arcillas y drenaje interno) y la conductividad eléctrica del suelo; con estos datos es posible delimitar zonas de distribución y así generar mapas de salinidad potencial, utilizando sistemas de información geográfica. De acuerdo con estas variables indicadoras, un poco más de la mitad de la superficie de la cuenca experimenta, en la actualidad, algún grado de salinización. De un total de 738 887 ha que cubre la cuenca de Caborca, 29 % de la superficie, presenta un alto potencial de salinización.

Vega, et al. (2011) establecen que la escasez de agua superficial en Sonora provoca que el recurso subterráneo sea la principal fuente de suministro. En la actualidad, debido a un manejo no sustentable, los acuíferos ubicados a lo largo de la costa se encuentran en estado de sobreexplotación y con problemas de intrusión salina. Del balance entre descarga y recarga se concluye que de los 15 acuíferos estudiados por la Comisión Nacional del Agua, 11 de ellos presentan déficit de agua, siendo los más afectados los de la Costa de Hermosillo. Además encontraron que con respecto a la calidad del recurso subterráneo en Sonora, existe contaminación debida principalmente a desechos industriales, agrícolas, mineros e intrusión salina. En Caborca, se ha detectado la presencia de plaguicidas usados en la agricultura.

1.3 Hipótesis

La alta cantidad de sales disueltas en el agua de los acuíferos debida a su sobreexplotación, sus características naturales y la evaporación provocada por la sequía. Podría elevar las concentraciones de sales en el suelo, por su uso en el riego de los cultivos de importancia económica en las regiones de Ensenada B.C. y Caborca Son.

1.4 Justificación

Debido a que actualmente existen muy pocos estudios que evalúen, tanto la calidad de los suelos de cultivo, como la disponibilidad y calidad de agua para su irrigación, sumado a que los patrones de precipitación han sido modificados en los últimos 100 años a causa del cambio climático global (Lobell, Field, Cahill y Bonfils, 2006) y los índices de severidad de sequía para el noroeste del país indican una condición crítica para la disponibilidad del recurso hídrico; es del interés de este estudio, el de evaluar las condiciones actuales de cultivos representativos del noroeste del país. Ya que como se mencionó, es fundamental disponer de información periódica de la condición de la salinidad del suelo para analizar su dinámica y la eficacia de las medidas de mitigación y/o recuperación que se puedan implementar en sitios afectados.

Otra aportación del presente estudio, será la obtención de un modelo para evaluar la salinidad de los suelos mediante técnicas geofísicas; que puede ser una alternativa más eficiente y de menor costo comparada con los métodos convencionales.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

El objetivo general del presente estudio es caracterizar y analizar comparativamente la salinidad en suelos de cultivo de la región de Ensenada B.C. y zona vitícola de Caborca Son.

1.5.2 Objetivos particulares

Para los fines del objetivo general se determinaron los siguientes objetivos particulares para cada zona de estudio:

- a) Caracterizar, elegir y ubicar geoespacialmente las localidades representativas en ambas zonas de estudio mediante la revisión de mapas temáticos de Sólidos Disueltos Totales (SDT) y evolución del nivel freático.
- b) Medir la salinidad y otros parámetros fisicoquímicos en suelos de cultivo y aguas de riego de cada uno de los puntos de muestreo.
- c) Cuantificar la conductividad eléctrica del suelo en cada uno de los puntos de muestreo por métodos geofísicos y relacionarlos con los valores obtenidos de los métodos analíticos.
- d) Identificar geoespacialmente las subcuencas hidrológicas las cuales abastecen de agua para el riego de los cultivos de las localidades en estudio, analizando su hidrodinámica.
- e) Ubicar geoespacialmente los tipos de suelo a los cuales pertenecen los cultivos de las localidades en estudio.
- f) Realizar un análisis comparativo de los resultados con base a las diferencias regionales de los sitios en cuestión.

Capítulo 2 Marco Teórico

2.1 Agua

En los procesos geológicos, químicos y biológicos, el agua es indispensable como recurso y sustento de la vida en la Tierra.

Hoy en día, el crecimiento poblacional y económico ejerce mayor presión sobre las reservas de agua en el país, a tal grado, que los volúmenes demandados son mayores que los disponibles (Reyes et al., 2009). De la cantidad de agua superficial y subterránea aprovechable en México, el 77 % se usa en actividades agrícolas; el 14 % en abastecimiento público; el 4 % en la industria autoabastecida y el 5 % en termoeléctricas (Figura 6); (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) 2013).



Figura 6.- Usos del agua en México. (SIAP, 2013).

2.1.1 Salinidad

La salinidad del agua se refiere a la cantidad total de sales disueltas en el agua, pero no indica que sales están presentes.

El principal problema relacionado con la calidad del agua de riego es la salinidad del agua, un nivel alto de sales en el agua de riego (Tabla 1) reduce la disponibilidad del agua para el cultivo (debido a la presión osmótica) y causa la reducción del rendimiento.

Por encima de cierto umbral, la reducción en el rendimiento de los cultivos es proporcional al aumento en el nivel de salinidad. Los distintos cultivos varían en su tolerancia a la salinidad y por tanto tienen diferentes umbrales y diferentes tasas de reducción del rendimiento (Delgado, Mendieta y Ormaza, 2015).

Tabla 1.- Parámetros más comunes para determinar la calidad del agua de riego, en relación con su salinidad. Sólidos Disueltos Totales (SDT), Conductividad Eléctrica (CE) y Riesgo de Salinidad (Smart Fertilizer Management, 2014).

SDT ppm o mg/L	CE dS/m	Riesgo de Salinidad
< 500	< 0.8	Bajo
500 – 1000	0.8 - 1.6	Medio
1000 – 2000	1.6 - 3	Alto
> 2000	> 3	Muy Alto

2.1.1.1 Origen

La principal fuente natural de las sales minerales en el agua, es debido al intemperismo, causado por la erosión de las rocas y minerales. Otras fuentes naturales secundarias incluyen la deposición atmosférica de sales oceánicas (sales en el agua de lluvia), el agua salina de las aguas subterráneas.

Entre las fuentes antropogénicas más importantes están el uso de: productos químicos, fertilizantes, etc., que lixivian a los cuerpos de agua afectando su calidad (Delgado, et al. 2015).

2.2 Índice de severidad de sequía

Uno de los fenómenos climáticos que más afecta a las actividades económicas del país es la sequía. El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se encarga de monitorear el estado actual y la evolución de este fenómeno. Para ello, se ha desarrollado un programa de visualización llamado: Monitor de Sequía en México (MSM), que a su vez forma parte del Monitor de Sequía de América del Norte por sus siglas en inglés (NADM). A partir del 2014 adquirió su carácter nacional, lo que le permitió emitir mapas de sequía quincenalmente siempre basada en la metodología utilizada por el Monitor de Sequía de los Estados Unidos por sus siglas en inglés (USDM) y el NADM. Esta información se puede consultar de manera electrónica a través del portal: <http://smn.conagua.gob.mx/index.php>, en la opción Climatología > Monitor de Sequía.

De acuerdo al MSM, en la región noroeste el índice de severidad de sequía meteorológica va de severo a extremadamente severo para el año 2013 (Figura 7).

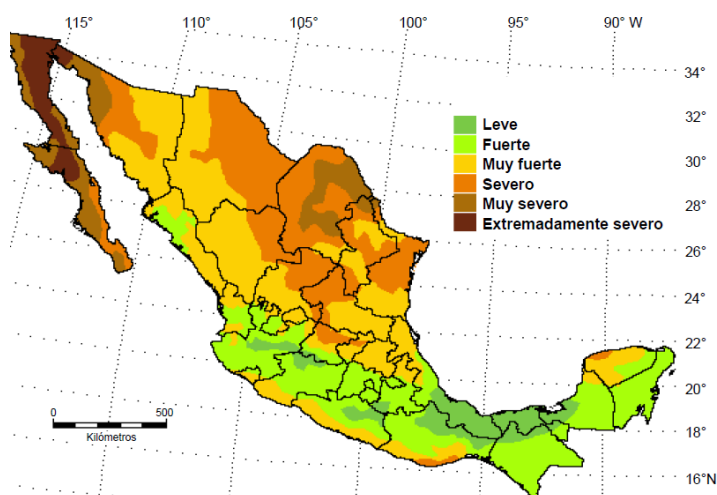


Figura 7.- Índice de severidad de sequía meteorológica para el territorio Mexicano (Arreguín, 2013).

La evolución de éste fenómeno durante el periodo 2003-2015 se puede observar en la Figura 8 donde se muestra el porcentaje del territorio nacional que presenta esta situación.

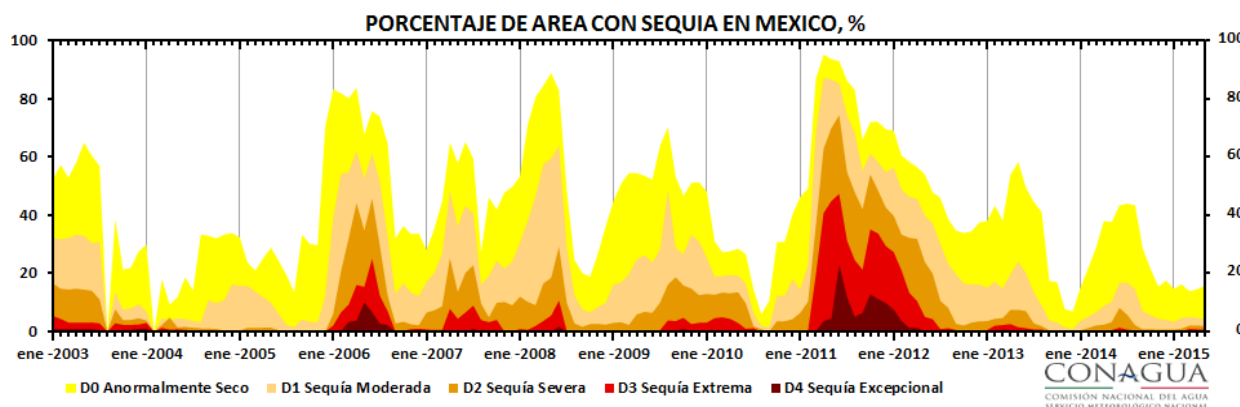


Figura 8.- Gráfica de evolución y porcentaje de área del país afectada por la sequía, periodo 2003-2015 (SMN, 2015).

2.3 Agricultura en México

El territorio mexicano goza de una amplia variedad de suelos y climas al estar situada al sur del Trópico de Cáncer, entre los paralelos 20 y 30 grados (Larousse de los vinos, 2008; Meraz, 2009) México cuenta con un territorio nacional de 198 millones de hectáreas de las cuales 112 millones se dedican a la actividad agropecuaria, cerca de 30 millones de hectáreas son tierras de cultivo (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 2009). De las cuales cerca de 0.5 millones de ha corresponden a Baja California y 18 millones de ha a Sonora.

Las condiciones de la región noroeste (relieve plano y la corta distancia entre poblaciones y EUA), favorecen las actividades económicas y por lo tanto un mayor desarrollo en este sector (Soto, 2003).

La condición geográfica hace apto al territorio nacional para el cultivo de la vid; actualmente los estados en donde se desarrolla la viticultura son Sonora, Chihuahua, Coahuila, Durango, Zacatecas, Aguascalientes, San Luis Potosí, Guanajuato, Querétaro y Baja California (Figura 9), este estudio comprende la zona noroeste (Baja California y Sonora) que si bien no es la única zona productora si es la de mayor

importancia, (Larousse de los vinos, 2008; Meraz, 2009). La importancia de la viticultura repercute en la economía, turismo y aspectos sociales de la región debido a su auge en recientes fechas.



Figura 9.- Regiones aptas para la viticultura en México. (Meraz, Valderrama y Maldonado, s.f).

Un problema que aqueja en la actualidad a las zonas rurales de producción agrícola de México, es la degradación del suelo. Este problema afecta el 45 % de la superficie del país a diferentes niveles, desde ligera, leve, severa, hasta muy severa. Debido a que la agricultura se desarrolla de manera insostenible. Entre las causas de la degradación se encuentran: la erosión y salinización de suelos, la sobreexplotación de los recursos hídricos y la contaminación de los cuerpos de agua y suelos (FAO-SAGARPA, 2014).

Los altos costos del bombeo para el riego y el decremento del rendimiento de los cultivos sembrados en suelos con problemas de sales son los factores que bajan la rentabilidad de estos cultivos (Reyes y Quintero, 2009). Estas son las principales limitantes de la actividad agrícola.

2.4 Suelos y su formación

El suelo es la parte exterior de la corteza terrestre en donde las rocas se han fragmentado por efecto de la meteorización mecánica o química de las rocas (Tarbuck y Lutgens, 2005). Está constituido por una capa de este material fragmentario no consolidado que se conoce con el nombre de “regolita” y que se apoya en la roca subyacente (roca madre).

Así, el suelo es el resultado de la interacción del clima, la roca madre, el drenaje, la topografía, los microorganismos y la vegetación a lo largo del tiempo (Figura 10).

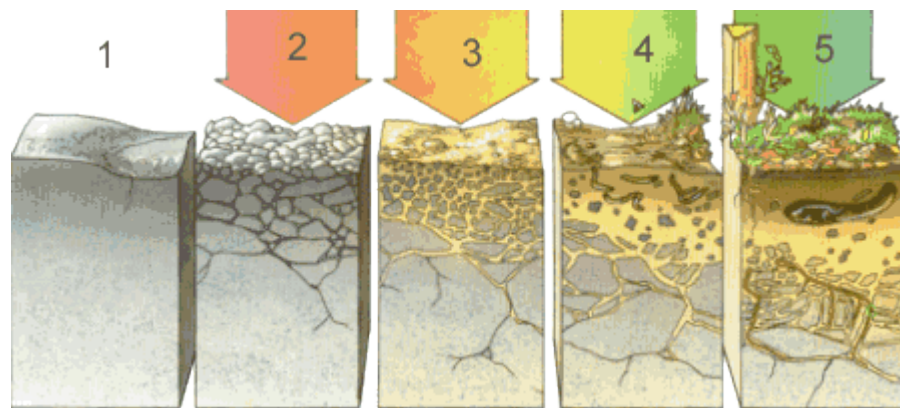


Figura10.- Proceso de formación de los suelos: 1-Roca madre; 2-Acción mecánica (cambios de temperatura, hielo, etc.); 3-Acción química del agua y de sus sales minerales; 4-Acción de los seres vivos; 5-Acción conjunta de todos los factores (tomado de Asociación Española para la Cultura, el Arte y la Educación (ASOCAE), s.f).

El suelo, junto con el agua en forma de lluvia o corrientes, permite el establecimiento de las actividades forestales, ganaderas y agrícolas; donde la calidad del suelo se basa en su capacidad para sostener la productividad vegetal y animal, así como mantener o mejorar la calidad del aire y agua (Doran, 1996).

2.4.1 Textura y contenido de arcilla

Debido al proceso de formación de suelos, las rocas son fragmentadas en partículas más pequeñas: grava, arena, limo y arcilla (Tarbuck y Lutgens, 2005).

La textura indica el contenido relativo de las partículas de diferente tamaño presentes en una muestra de suelo y tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra en el suelo y lo atraviesa (FAO, 1988).

La importancia de la denominada fracción arcillosa se basa en su actividad fisicoquímica como: dispersión, retención y movimiento de agua y de gases, poder de absorción de fertilizantes y determinación de la fertilidad natural del suelo.

Cuando un suelo contiene grandes cantidades de arcilla trae como consecuencia un drenaje deficiente e insuficiente aireación (González, 1960).

2.4.2 Porción mineral

La porción mineral que compone el suelo (Figura 11) es en general del 45 %, y un 25 % de agua; la cual contiene en solución nutrientes solubles (Tarbuck y Lutgens, 2005), entre ellos; minerales lixiviados de la misma porción mineral, los cuales quedan disponibles para la asimilación en el crecimiento de las plantas y microorganismos del suelo.

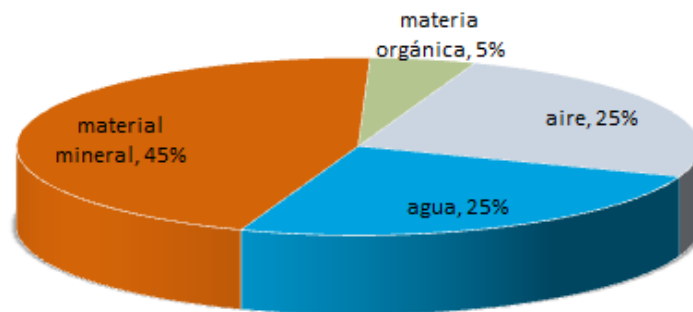


Figura 11.- Composición por volumen de un suelo en buen estado para el crecimiento vegetal (Modificado de Tarbuck y Lutgens, 2005).

De éstos compuestos lixiviados, deriva la importancia de reconocer que tipo de minerales conforman las muestras de suelo, ya que nos pueden dar pistas de la proveniencia y naturaleza de sus componentes tales como las sales.

2.4.3 Salinización de suelos

El término salinización se refiere al proceso de acumulación de sales en el suelo como ejemplo la qué ocurre cuando el agua que contiene sales disueltas, se evapora de la superficie del suelo, frecuentemente dejando una costra blanca superficial en el suelo (Hermosillo, 2014).

2.4.3.1 Causas

La principal causa de la salinidad es el ambiente árido y semiárido que junto a la alta tasa de evaporación, fomenta la acumulación de sales en la zona radicular (raíces de las plantas) de los cultivos. Además de que la precipitación anual es insuficiente para eliminarlas por arrastre o lavado (lixiviación). Esta acumulación de sales en las áreas de cultivo, se debe a que las cantidades de sales disueltas en el agua de riego son mayores a las que son removidas mediante el drenaje.

Es por esto que en las zonas áridas y semiáridas del país es muy común la concentración de sales o sodio intercambiable en los horizontes del suelo, debido a que los procesos naturales y antrópicos de acumulación, son dinámicos y están limitando la producción de alimentos y forrajes y pueden a mediano plazo provocar serios problemas socio-económicos. Es en este sentido, es importante conocer el origen y los factores que favorecen la salinización de suelos (Hermosillo, 2014).

Causas naturales

La presencia de sales en el suelo, también tiene que ver con los procesos naturales de su formación (mineralización o meteorización de rocas y minerales). En climas húmedos, las sales formadas generalmente pueden ser lavadas del suelo, mientras que en climas áridos o semiáridos generalmente no son removidas completamente de sus capas superficiales.

La cercanía a la costa y la altura sobre el nivel del mar son fuentes primarias de salinidad. Se conoce que la brisa marina puede influir de 50 a 150 km de la costa variando con la distancia las concentraciones de Cl^- y Na^+ . Mientras que el K^+ generalmente es de origen terrestre, la deposición de Mg^{++} es de origen oceánico. Se considera que el Ca^{++} y el SO_4^{-2} se incrementan con la distancia de la costa al interior del continente.

La intemperización de los minerales del suelo y la existencia de sales fósiles también son causas primarias de salinidad, que se agudizan en condiciones heterogéneas de micro-topografía y las propiedades fisicoquímicas del perfil del suelo, donde: la textura, estructura, porosidad, permeabilidad, capacidad de retención de humedad y de intercambio catiónico juegan un papel muy importante.

Estos procesos además se ven favorecidos en suelos con predominio de partículas finas (arcilla y limo), donde el movimiento descendente del agua y el lavado de sales, se ven disminuidos por la baja porosidad de éstos. La presencia de capas freáticas superficiales, contribuyen a los movimientos ascendentes de agua hacia la superficie del suelo por capilaridad, arrastrando las sales hacia su superficie (Hermosillo, 2014).

Causas antropogénicas

La salinidad del suelo también puede producirse como resultado de un manejo inadecuado por parte del hombre. La agricultura desde su comienzo ha provocado la salinización de los suelos, cuando las técnicas aplicadas no han sido correctas. En este sentido, la calidad del agua de riego agrícola y el manejo agronómico de los cultivos son dos factores de salinidad de los suelos, susceptibles de control para conservar y mejorar el potencial productivo de los suelos afectados por sales.

La actividad agraria y especialmente el riego, ha provocado desde tiempos remotos la salinización en suelos en diferente magnitud, algunos procesos que la provocan son:

1. Cuando se han empleado aguas conteniendo sales sin el debido control, acumulándose directamente en los suelos llegando a contaminar los mantos freáticos.
2. Cuando se ha producido un descenso del nivel freático regional, como consecuencia de la sobreexplotación del agua, lo que permite la intrusión salina-salobre, en zonas profundas.
3. La salinización en superficies de cotas bajas, cuando se realizan transformaciones de riego en zonas altas y no se ha previsto su influencia.
4. Directamente por la acción de las aguas de riego.
5. Por las movilizaciones de tierras que pueden provocar la aparición de rocas salinas en la superficie del terreno, que además de contaminar los suelos *in situ*, provocan acumulación en las depresiones cercanas por acción de las aguas de escorrentía.
6. El empleo de elevadas cantidades de fertilizantes, especialmente los más solubles, más allá de las necesidades de los cultivos, contaminando los acuíferos y afectando los suelos que reciben estas aguas.
7. La actividad industrial, en ocasiones, puede acarrear situaciones serias de acumulación de determinadas sales en los suelos situados bajo su zona de influencia, por medio de la contaminación atmosférica o mediante las aguas que discurren por su cuenca hidrográfica (Hermosillo, 2014).

2.4.3.2 Determinación

La salinidad puede ser estimada por la medición de la conductividad eléctrica (CE) de una solución extraída del suelo. (Hermosillo, 2014). La CE es una medida de la conductancia de la solución del suelo, la cual depende de la cantidad de iones disueltos en el agua extraída del suelo (Corwin y Rhoades, 1984).

La forma más común de determinar la CE es a partir de un método fisicoquímico a través de un conductímetro directamente en el extracto del suelo en unidades de mSiemens/cm o equivalentes.

Sin embargo, existen métodos geofísicos que determinan la CE aparente (CEa), directamente en el suelo de manera *in situ*. Donde ésta CEa es el resultado de la conductividad no únicamente del suelo, sino del conjunto de factores como la humedad, la materia orgánica, los minerales, etc.

El principio de este método se basa en la inducción electromagnética para medir la conductividad eléctrica aparente de una columna de suelo hasta una profundidad de observación específica (Sudduth et al., 2005). Para lo cual se requiere de un aparato que consta de una bobina emisora (E) que emite una corriente alterna, generando un campo magnético primario oscilante (H_p) en sus proximidades. El campo magnético primario oscilante genera una variación en el flujo del campo magnético del suelo (medio conductor) que favorece la aparición de corrientes secundarias inducidas. Las corrientes secundarias (CS) generan en el suelo un campo magnético secundario (H_s). Y una bobina receptora (R) capta ambos campos magnéticos H_p y H_s (Figura 12). El cociente entre el campo magnético secundario (H_s) y primario (H_p) es linealmente proporcional a la CEa del suelo (McNeill, 1980; Hendrickx y Kachanoski, 2002).

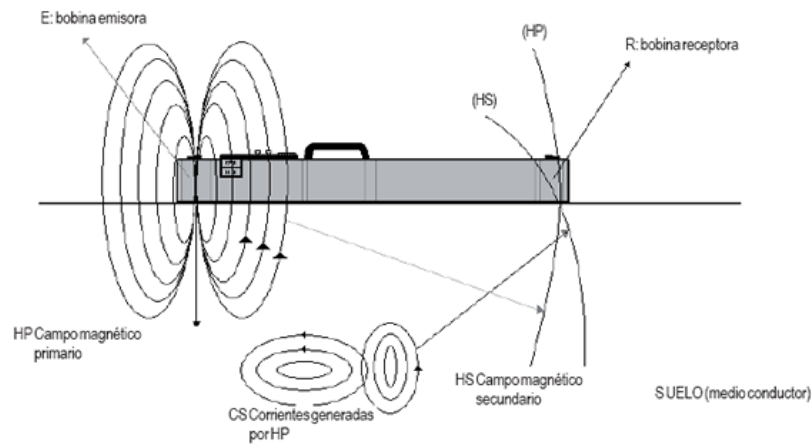


Figura 12.- Esquema de funcionamiento del EM38-mk2: en modo vertical (Adaptado de Lesch, Corwin y Robinson, 2005).

2.4.3.3 Clasificación

Se consideran como suelos salinos aquellos en los que se produce una acumulación de sales que interfieren en el crecimiento y desarrollo de los cultivos de plantas no halófitas. Los que contienen suficiente sodio intercambiable para que afecte adversamente la producción de los cultivos y la estructura en la mayoría de los suelos se denominan suelos sódicos. Aquellos que, además de ser salinos, cumplen con esta condición, se conocen como suelos salinos sódicos (Richards, 1954; Porta, Lopez y Roquero, 2003).

Para la identificación de los suelos sódicos y la determinación de la calidad del agua se utilizan parámetros como: la determinación del potencial hidrógeno medido en el extracto, el porcentaje de sodio intercambiable o la relación de absorción de sodio (RAS).

El RAS es el valor que expresa la actividad relativa del ion sodio contenido en las aguas o en los extractos del suelo en las reacciones de intercambio con éste. Se refiere a la velocidad de adsorción de sodio en relación a los iones calcio y magnesio.

La fórmula para su determinación es (U.S. Soil Salinity Laboratory Staff, 1954):

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

Tomando en cuenta algunos de estos parámetros, los suelos pueden clasificarse en tres grupos (Tabla 2).

Tabla 2.- Clasificación de los suelos afectados por salinidad en función de la conductividad eléctrica (CE) y el potencial hidrógeno (pH) (Richards, 1954; Soils Science Society of America, 1987).

	US Salinity Laboratory		Soil. Soc. Of America
Clasificación	CE (mS/cm) a 25 °C	pH	CE (mS/cm) a 25 °C
Normal	< 4	< 8.5	< 2
Salino	> 4	< 8.5	> 2
Salino-Sodico	> 4	variable	< 2

El pH es una de las mediciones más comunes e importantes en los análisis químicos rutinarios de suelo, ya que controla reacciones químicas y biológicas en el suelo. La determinación del pH es afectada por varios factores tales como: el tipo y cantidad de constituyentes orgánicos e inorgánicos que contribuyen a la acidez del suelo, la concentración de sales en la solución, la relación suelo-solución, la presión parcial de bióxido de carbono y el efecto de la suspensión asociado con el potencial de unión, etc.

El Eh es el potencial de oxidación y se mide en voltios, aunque como su valor es muy pequeño se expresa usualmente en milivoltios (mV). Este valor cuanto más alto es, mayor es la capacidad oxidante del sistema y mayor es la concentración de la forma reducida.

La medida del potencial de un sistema es siempre un valor relativo por lo que es necesario tomar una referencia. La medida del potencial se efectúa colocando un electrodo inerte, constituido por un hilo de platino, y otro de referencia en el que existe el par formado por el hidrógeno y su ion correspondiente en concentraciones iguales. Se toma como valor positivo cuando la corriente circula hacia el electrodo inerte, mientras que su valor se considera negativo cuando sucede al revés. De este modo todos los sistemas más oxidantes que el hidrógeno presentarán un Eh positivo, mientras que todos los que sean más reductores lo presentarán negativo (Edafología. Ciencias Ambientales, s.f).

Capítulo 3. Metodología

3.1 Claves de identificación

Para el desarrollo de los objetivos de este proyecto, las zonas de muestreo se organizaron con base a la jerarquía de organización urbana (municipio, región y localidad), en donde el orden descendente de las localidades muestreadas corresponde a su posición con respecto al norte geográfico de ambos municipios (Ensenada y Caborca) Tabla 3.

Tabla 3.- Tabla de claves de identificación de las localidades muestreadas.

MUNICIPIO	REGIÓN	LOCALIDAD	CLAVE	CLAVE EXT
ENSENADA	VALLE DE GUADALUPE (EVG)	Doña Lupe	DL	EVG-DL
		Césped	CE	EVG-CE
		Mogor	MG	EVG-MG
		R. Cortés	RC	EVG-RC
	VALLE DE OJOS NEGROS (EVO)	R. Teresita	RT	EVO-RT
		R. Buena Vista	RBV	EVO-RBV
		R. los pinos	RLP	EVO-RLP
	VALLE DE MANEADERO (EVM)	Parcela96	PA96	EVM-PA96
		Casa piedra	CP	EVM-CP
		R. Arroyo L. Animas	RALA	EVM-RALA
CABORCA (C)		Torrentera	TO	C-TO
		Sta. Elena	SE	C-SE
		Jedid	JE	C-JE
		Ma. Eugenia	ME	C-ME
		Don Emilio	DE	C-DE

La localidad es el nombre del cultivo o rancho donde se tuvo acceso al muestreo y la clave extendida tiene de izquierda a derecha: la 1^{er} letra es la inicial del municipio al que pertenece (ej. Ensenada = E), 2^{da} letra corresponde a las iniciales de la región a la que pertenece (ej. Valle de Guadalupe = VG) y separado por un guion la clave de esa localidad.

Para la identificación de las muestras de agua de riego del cultivo analizadas se utilizó la clave extendida.

En el caso de las muestras de suelo para cada punto de muestreo dentro del cultivo (Figura 13) se identificaron con la clave extendida seguida de numeración consecutiva (1, 2, 3...) y PC para el punto de control el cual se seleccionó tratando de encontrar una zona dentro de la misma localidad que no se mostrara alterada por el manejo antropogénico y con presencia de vegetación nativa de la zona.

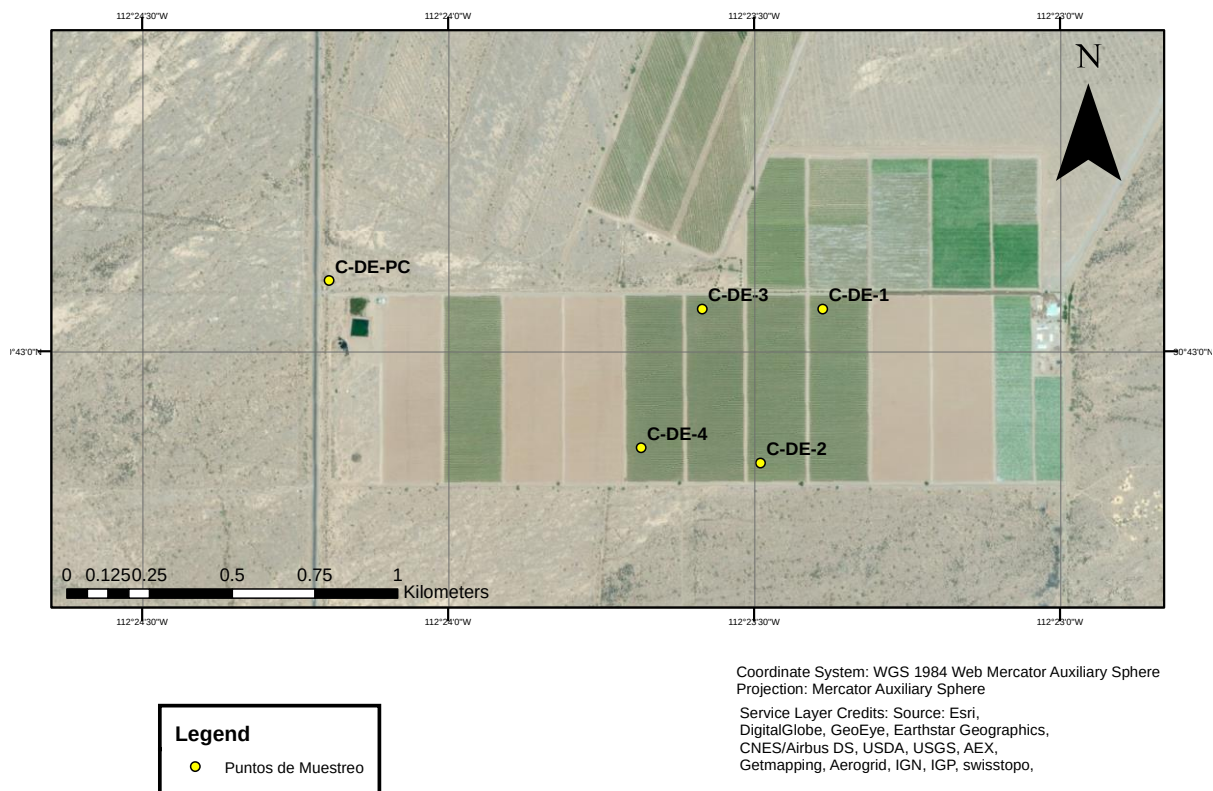


Figura 13.- Ejemplo de la geolocalización dentro del cultivo, de los puntos de muestreo de suelo, en este caso Don Emilio en Caborca Son. (C-DE). Mapa geoespacial generado con datos de GPS y software ArcMap 10.1.

3.2 Diseño del muestreo

El tipo de muestreo realizado fue por selección intencional de localidades conforme a los antecedentes de cada sitio de estudio, se revisaron los mapas de monitoreo de la concentración en agua de riego de sólidos disueltos totales.

Se revisaron los mapas generados por CONAGUA y COTAS (Comité Técnico de Aguas Subterráneas), los cuales en sus reportes geoquímicos, a partir de los datos de

calidad de agua en la red de monitoreo de pozos, crean mapas geoespaciales de diferentes parámetros analizados.

Los mapas de sólidos disueltos totales (SDT) ayudaron a determinar las zonas próximas a regiones con concentraciones altas de salinidad en el caso de las localidades del Municipio de Ensenada, y los mapas de evolución del nivel freático para el Municipio de Caborca; con base a ellos se escogieron los puntos de muestreo considerando un gradiente (pozos poco salinizados a muy salinizados) (Figuras 14-17).

Las campañas de muestreo se realizaron para el municipio de Caborca en el mes de Septiembre del 2013 y para las regiones del municipio de Ensenada en Febrero del 2014.

3.2.1 Valle de Guadalupe

En la Figura 14 la imagen de la derecha muestra el mapa de interpolación de SDT de agua de pozo reportado por COTAS 2013. De este mapa se eligieron 4 localidades de muestreo: al NE Doña Lupe con concentraciones <1000 mg/L, Césped >3000 mg/L, Rancho Cortés >2500 mg/L y Mogor >900 mg/L.

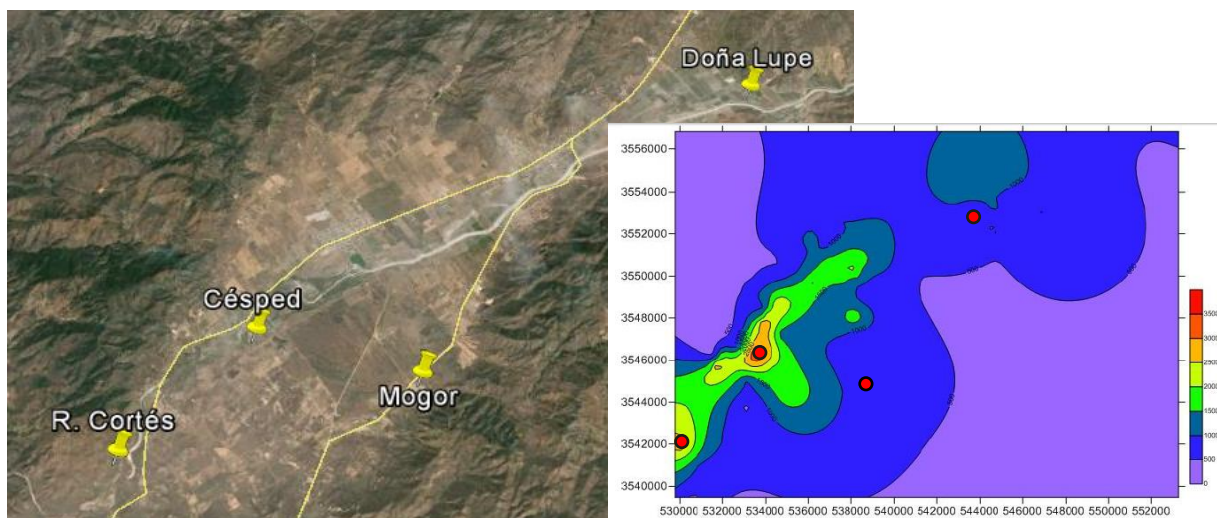


Figura 14.- Distribución de SDT presentes en las aguas de los pozos de Valle de Guadalupe, los puntos rojos (derecha) y los puntos amarillos (izquierda), representan las localidades elegidas para ser muestreadas. Imagen satelital tomada de Google Earth, versión 7.1.5.1557. (COTAS, 2013)

3.2.2 Ojos Negros

En la Figura 15 la imagen de la derecha muestra el mapa de interpolación de SDT de agua de pozo reportado por COTAS. De acuerdo a ésta distribución de SDT con un rango de 300 a 1 150 mg/L, se eligieron 3 puntos de muestreo esperando tener el gradiente de concentración: pozo P-029 (300 mg/L), pozo 11A (750 mg/L) y el pozo P-260 (1 150 mg/L).

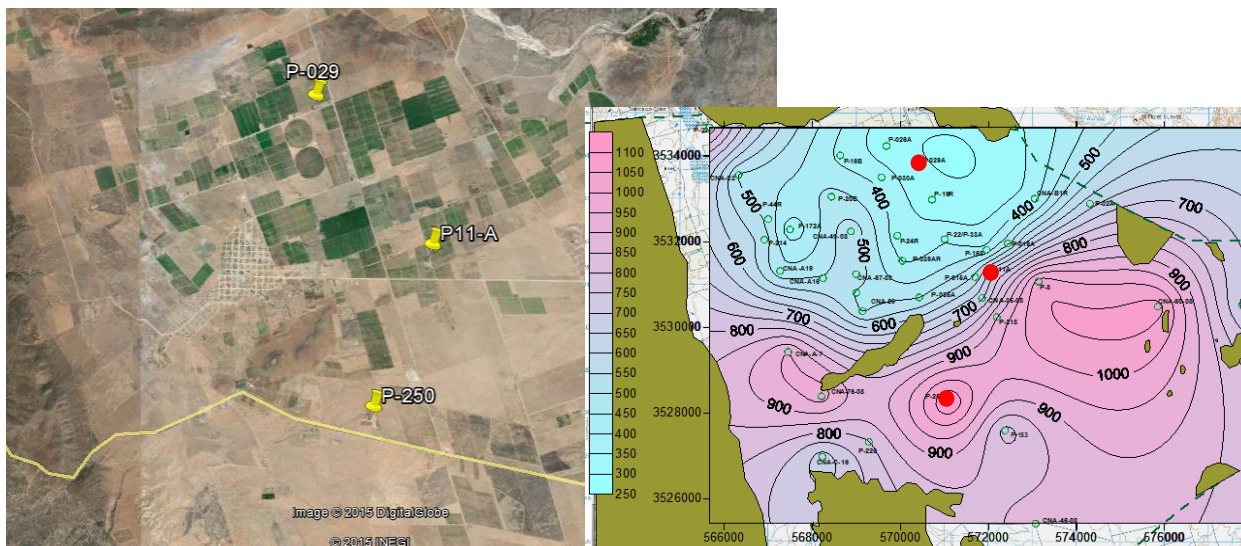


Figura 15.- Distribución de SDT presentes en las aguas de los pozos de Valle de Ojos Negros, los puntos rojos representan las localidades muestreadas (derecha). Localización geoespacial con puntos amarillos (izquierda). Imagen satelital tomada de Google Earth, versión 7.1.5.1557. (COTAS, s.f)

3.2.3 Maneadero

En la Figura 16 la imagen de la derecha muestra el mapa de interpolación de SDT de agua de pozo reportado por COTAS 2010. Basado en este mapa, se eligieron 3 localidades de muestreo, que se encuentran sobre las proximidades del cauce del Arroyo las Ánimas: aguas arriba del Rancho Arroyo las Ánimas y que de acuerdo al monitoreo, las concentraciones son menores a 500 mg/L. A una distancia intermedia aguas abajo del arroyo, el cultivo Casa de Piedra registra valores de SDT >3 000 mg/L, por lo que también se eligió como sitio de muestreo. Y finalmente, próximo a la costa y al estero de Punta Banda, se escogió el cultivo de la Parcela 96 por presentar concentraciones de SDT mayores a 8 000 mg/L.

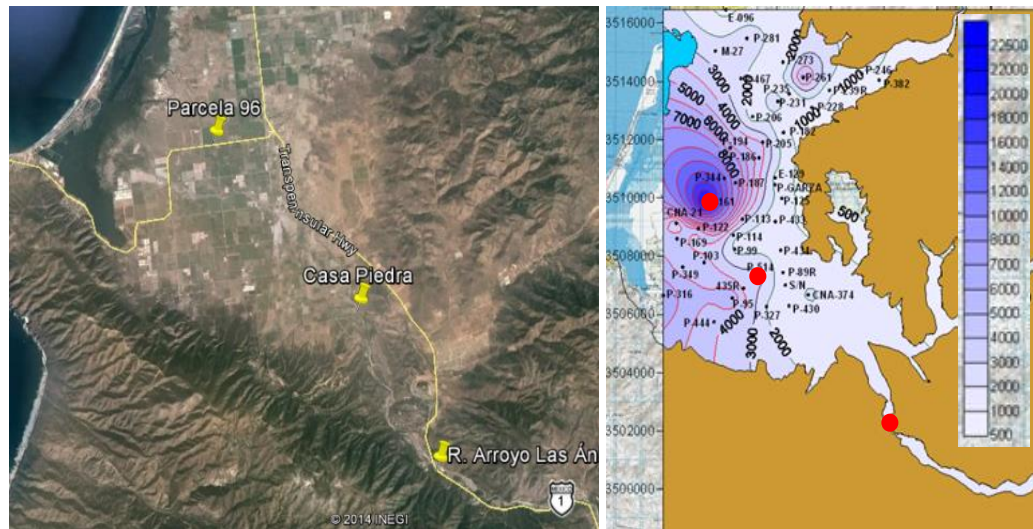


Figura 16.- Distribución de SDT presentes en las aguas de los pozos de Maneadero, los puntos rojos representan las localidades muestreadas (derecha). Localización geoespacial con puntos amarillos (izquierda). Imagen satelital tomada de Google Earth, versión 7.1.5.1557. (COTAS, 2010)

3.2.4 Caborca

En la Figura 17 la imagen de la derecha muestra el mapa de la evolución del nivel freático de los pozos de la zona agrícola de Caborca en el periodo 2004-2007 reportado por CONAGUA en el 2011. En él se pueden identificar las zonas costera y centro donde se registran los mayores abatimientos, ocasionados por la concentración del bombeo y/o la cercanía con el nivel medio del mar. En la zona costera se han detectado indicios de intrusión marina (CONAGUA, 2011).

En este sitio de estudio, se eligieron 5 localidades de muestreo, tomando como referencia las zonas de cambio del nivel freático y el consejo del personal del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) de Caborca. En la imagen de la izquierda de la Figura 17 y vistos de Este a Oeste, los sitios de muestreo fueron: María Eugenia, Don Emilio, Torrentera, Santa Elena y el Jedid, esperando tener un gradiente de menor a mayor en las concentraciones de SDT.

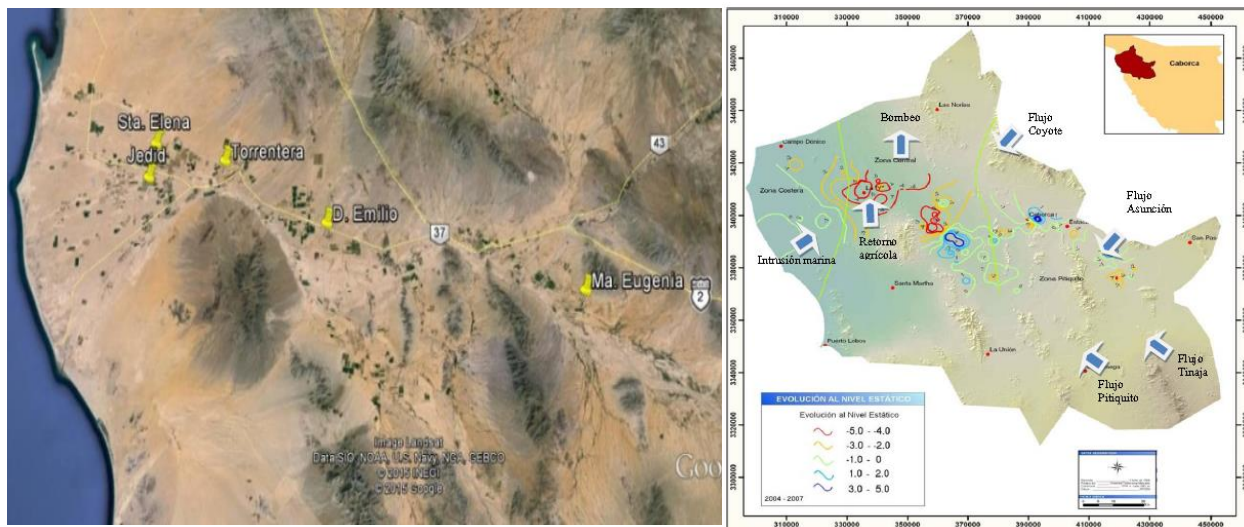


Figura 17.- Posición geoespacial de las localidades muestreadas en puntos amarillos (izquierda) y evolución del nivel freático de los pozos de Caborca en el periodo 2004-2007 (derecha). Imagen satelital tomada de Google Earth, versión 7.1.5.1557. (CONAGUA, 2011).

3.3. Muestras de agua de riego

Una vez que se eligieron las localidades para la toma de muestras, con la ayuda del personal de las dependencias de CONAGUA, INIFAP y COTAS, se facilitó la entrada a los predios de cultivos bajo el consentimiento de los dueños y/o encargados.

El procedimiento que se siguió para realizar el muestreo, está en la Norma Oficial Mexicana de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (NOM-021-SEMARNAT-2000), que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, muestreo y análisis.

Todos los datos y notas del muestreo fueron registrados en una bitácora, considerando información acerca del historial del cultivo con el encargado. De manera general se obtuvieron datos del tipo de cultivo, tipo de riego, tiempo de cosecha y ubicación geográfica con un GPS (Figura 18).

Los datos de los análisis de parámetros fisicoquímicos realizados *in situ*, y de los análisis en laboratorio también fueron registrados en dicha bitácora, conforme se realizaron cada una de las determinaciones.



Figura 18.- Imágenes del trabajo de campo, reconocimiento de la localidad muestreada y la determinación geoespacial de los puntos de muestreo con GPS.

3.3.1 Trabajo de campo

Se recolectaron muestras de agua de riego con la que son irrigados los cultivos de las localidades de este estudio (Figura 19), éstas provenían de un mismo pozo de extracción o bien de una mezcla de varios pozos, según la infraestructura de cada sitio.

Se dejó correr el flujo por lo menos 10-15 minutos con el fin de que la muestra de agua sea lo más cercana posible a las condiciones naturales del manto freático.



Figura 19.- Colecta para almacenamiento de la muestra de agua de riego y la determinación *in situ* de parámetros fisicoquímicos de una alícuota.

3.3.1.1 Parámetros fisicoquímicos

Los análisis *in situ* se determinaron inmediatamente después de tomar una alícuota de 200 mL de muestra de agua de riego y correspondieron a:

Temperatura (°C)

Medida con un termómetro de precisión ± 0.1 °C, marca Brannan.

Conductividad eléctrica CE (mS/cm)

Medida con un conductímetro marca y modelo Thermo scientific Orion Star A112 y su respectivo electrodo previamente calibrado con soluciones estándar.

Potencial óxido reducción (Eh) y de hidrógeno (pH)

Analizados con potenciómetro marca y modelo Thermo scientific Orion Star A121 y sus respectivos electrodos previamente calibrados con soluciones estándar especiales para cada tipo de análisis.

Alcalinidad total (mg/L)

Se cuantificó con la titulación potenciométrica (Figura 20), utilizando el potenciómetro de marca y modelo Thermo scientific Orion Star A121 y el electrodo para pH.



Figura 20.- Titulación potenciométrica *in situ* de alcalinidad de alícuota de agua de riego realizada en cada localidad. La bureta contiene HCl 0.1 N y el electrodo para pH conectado al potenciómetro dentro de la muestra.

Tomando en cuenta el diagrama del sistema de reacción de carbonatos (Figura 21) se observa que existen tres tipos de alcalinidad definidas como:

*Alcalinidad Cáustica: la cantidad de ácido fuerte (moles/L), necesaria para disminuir el pH de la muestra a un valor de 10.6 en donde el ion $\text{CO}_3^{=}$ será predominante.

*Alcalinidad de Carbonatos: Definida como la cantidad de ácido fuerte (moles/L), necesaria para disminuir el pH de la muestra a un valor de 8.3 donde el ion HCO_3^- será predominante en este tipo de agua.

*Alcalinidad Total: Definida como la cantidad de ácido fuerte (moles/L), necesaria para disminuir el pH de la muestra a un valor de 4.5 en donde el ion CO_2 será predominante.

El volumen total de ácido que se requiere para disminuir el valor de pH es proporcional a la concentración de carbonatos y bicarbonatos presentes en la alícuota de agua analizada.

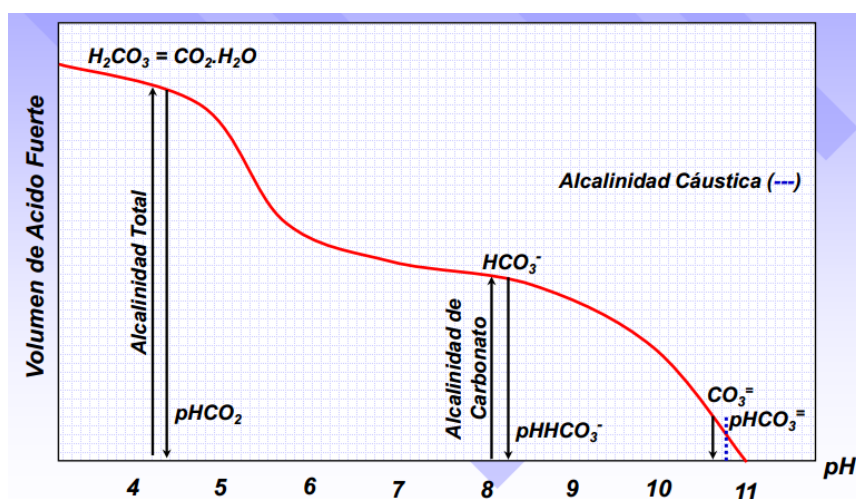


Figura 21.- Sistema de reacción de carbonatos que ocurre en una titulación potenciométrica por volumetría con un ácido fuerte (HCl 0.1 N) (Tomado de Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS), s.f).

Debido a que el agua potable, subterránea y superficial, poseen un valor de pH distintos, que varía entre 6.5 y 8 (Pulido, 1978). Las muestras que se tomaron en las localidades de estudio son aguas del tipo subterráneas; entonces el valor de pH se bajó hasta 4.5, con una solución valorada 0.1 N de ácido clorhídrico (HCl). Los valores de pH se monitorearon con un electrodo previamente calibrado y el volumen total de ácido empleado fue registrado.

Los cálculos de alcalinidad se realizaron de la siguiente manera:

$$\text{Alcalinidad total} = \frac{(\text{mL HCl utilizado})(N \text{ del HCl})(\text{eq CaCO}_3 = 50.044)(\text{mL a L (1000)})}{\text{mL de la alícuota}} = \text{CaCO}_3^- \text{ (mg/L)}$$

(Oregon Water Science Center (OWSC), s.f)

3.3.2 Trabajo de laboratorio

Se almacenó 1 L de muestra en botellas de plástico con su respectivo etiquetado, y se conservaron en una hielera con hielo a 4 °C inmediatamente después de su colecta, evitando con ello la degradación de la muestra. El posterior análisis químico se realizó en los laboratorios del CICESE; el cual consistió en la determinación de las concentraciones de los cationes y aniones disueltos en el agua.

3.3.2.1 Cationes

Se utilizó la técnica de plasma inducido acoplado a espectroscopía de emisión atómica por sus siglas en inglés (ICP-AES) modelo: VARIAN LIBERTY 2.10 para cuantificar los cationes mayores Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na) y Potasio (K). En cada uno de los análisis se realizó una curva de calibración y se corrió un estándar conocido cada 10 muestras, garantizando la estabilidad del equipo y la repetitividad de los resultados. Así mismo, el equipo realizó 3 repeticiones por muestra, reportando que todos los resultados estuvieron por debajo del 8 % de error en la desviación estándar, donde el máximo permitido es del 10 %.

3.3.2.2 Aniones

Para el análisis de los aniones: fluoruros (F⁻), cloruros (Cl⁻), nitritos (NO₂⁻), bromuros (Br⁻), nitratos (NO₃⁻) y sulfatos (SO₄²⁻) se utilizó la técnica de cromatografía de iones por sus siglas en inglés (IC).

El aparato utilizado es el Sistema de Cromatografía de Iones ICS, modelo 2000 (manufactura de Dionex). El cual realiza un análisis de iones presentes en una muestra, utilizando detección de conductividad suprimida y una columna de separación, en este

caso el sistema contó con la columna IonPac AS11, la cual sirve para determinar la concentración de hasta 34 aniones.

Antes de analizar una muestra, el sistema de cromatografía iónica se calibró usando una matriz de soluciones estándar de concentraciones conocidas de los analitos de interés. Paso seguido mediante la comparación de los datos obtenidos de una muestra y los que se obtuvieron de la matriz de estándares, se identificaron y cuantificaron los aniones presentes en cada muestra.

El sistema de registro de resultados se realizó en la computadora del sistema del ICS, la cual ejecutó un software de cromatografía (CHROMELEON), el cual generó un cromatograma (Figura 22). En dicho cromatograma, se presenta una gráfica de la intensidad de señal registrada por el detector del equipo en unidades de conductividad eléctrica, en función del tiempo. El software de cromatografía convirtió cada pico del cromatograma en una concentración basada en la curva de calibración de los estándares y produjo un reporte de los resultados.

El reporte de la curva de calibración de la matriz de estándares permite un coeficiente de correlación mínimo del 98 %, lo que garantiza la veracidad de los resultados.

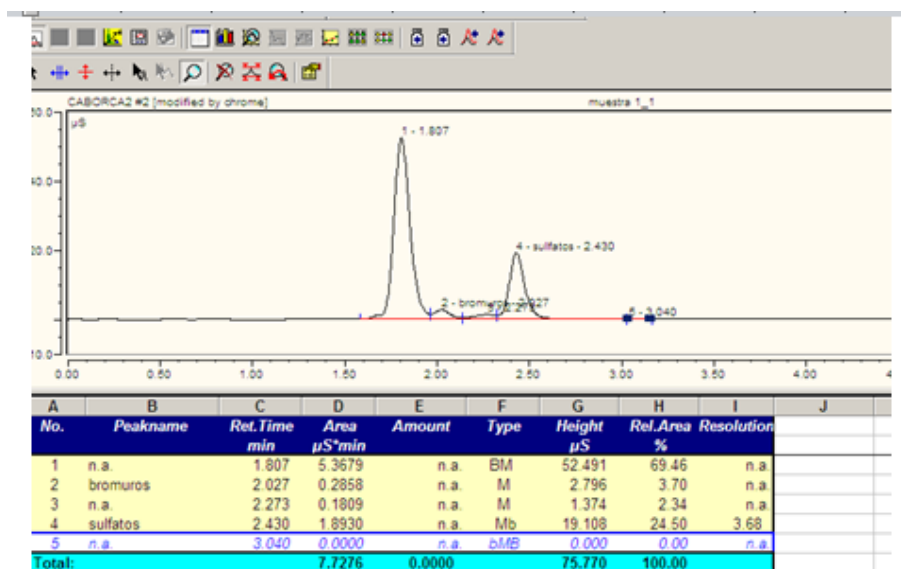


Figura 22.- Cromatograma generado por el software de cromatografía (CHROMELEON).

3.3.3 Balance iónico y diagramas de caracterización hidroquímica

Una vez que se obtuvieron los datos de concentración de cationes y aniones de las muestras de agua de riego, se realizó el balance iónico para obtener la caracterización hidroquímica de las aguas de riego. Para lo cual fue necesario convertir estas concentraciones a unidades de miliequivalentes (meq/L), posteriormente se sumaron todas las concentraciones de los cationes y de los aniones. Dónde el balance iónico es igual a $\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}$, también se calculó el % de error de balance de carga de acuerdo a la relación:

$$\% \text{ error} = \frac{\sum \text{aniones} - \sum \text{cationes}}{\sum \text{aniones} + \sum \text{cationes}} * 100$$

Diagramas de stiff

Este tipo de diagramas permiten visualizar claramente diferentes tipos de agua (cada una con una configuración particular) y, en forma simultánea, da idea del grado de mineralización (ancho de la gráfica). Así pues, para interpretar y discutir las concentraciones de los iones disueltos presentes en el agua de riego, se generaron este tipo de diagramas utilizando el programa gratuito, Diagrammes Versión 6.47 desarrollado por Roland Simler del Laboratrorio de Hidrogeología de Avignon.

Diagramas de piper

Se generaron diagramas de Piper con el software Diagrammes Versión 6.47 desarrollado por Roland Simler del Laboratrorio de Hidrogeología de Avignon. Este tipo de diagrama utilizó diagramas triangulares para representar la proporción de tres componentes en la composición de las muestrars de agua de riego de los cultivos en las zonas de estudio; con estas proporciones generó uno para cationes y otro para los aniones. Y en medio se generó un rombo el cual recogió la información de ambos triángulos (Figura 23). La posición de las muestras dentro del gráfico se visualizaron con símbolos y según ésta posición se caracteriza su naturaleza.

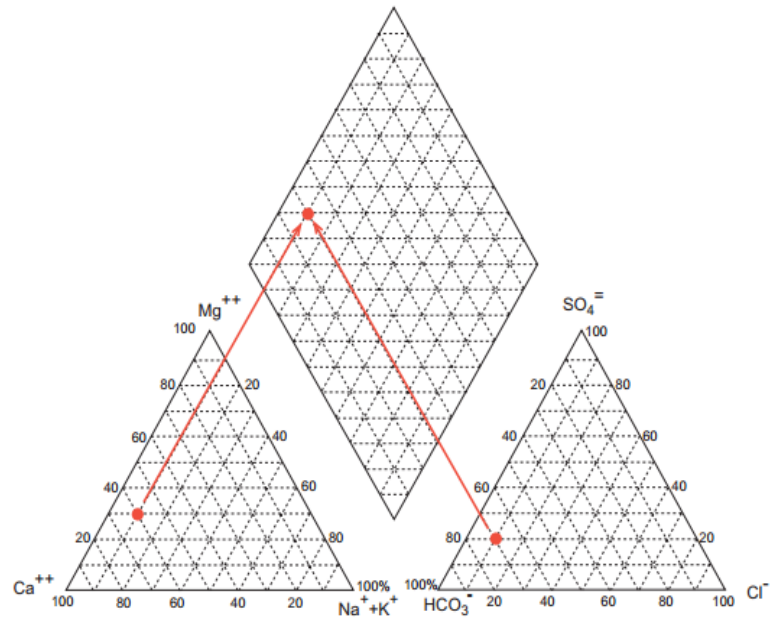


Figura 23.- Estructura de formación del diagrama de Piper (Sánchez San Román, Sin año)-b

Diagramas de la relación de adsorción del sodio (riverside)

Se realizaron bajo las Normas de Riverside el cual se grafican: la conductividad expresada en $\mu\text{mhos/cm}$ a 25°C y la relación de adsorción de sodio (RAS). El software utilizado es Diagrammes Versión 6.47 desarrollado por Roland Simler del Laboratorio de Hidrogeología de Avignon. Se graficaron las muestras de agua de riego de los cultivos de interés, según sus valores analizados, estas se ubicaron dentro de secciones del gráfico que determinan su peligro de sodicidad y/o de salinidad.

Diagramas de clasificación del agua de riego en función de la conductividad (wilcox)

Al igual que los de Riverside se utilizó para clasificar las muestras de agua de riego, en este caso se utilizaron los valores de % de sodio y su relación con la CER en $\mu\text{mhos/cm}$ a 25°C . Se graficaron los valores para las muestras de agua de riego, estas se ubicaron dentro de secciones del gráfico que determinan su peligro de sodicidad y/o de salinidad. El software utilizado es Diagrammes Versión 6.47 desarrollado por Roland Simler del Laboratorio de Hidrogeología de Avignon.

3.4 Mapas hidrológicos

Para entender los procesos de salinización que se llevan a cabo entre los suelos y las aguas de riego a nivel localidad, se interpretaron los resultados de los análisis de las muestras de agua y suelo, y también se generaron mapas geoespaciales para visualizar la hidrodinámica predominante en las localidades estudiadas. Para esto, se utilizó el software ArcMap versión 10.1, en donde se unifican imágenes satelitales, coordenadas de GPS de los puntos de muestreo (dentro de los cultivos) y los rasgos de la red hidrológica del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL), (herramienta en línea del INEGI).

En donde la División de Aguas Superficiales con fines administrativos, realizada por INEGI se compone de tres niveles de desagregación:

*REGIÓN HIDROGRÁFICA.- Área delimitada por una divisoria que agrupa por lo menos dos cuencas hidrográficas, cuyas aguas fluyen a un cauce principal. La cobertura nacional asciende a 37 divisiones las cuales se denotan por el prefijo “RH” y los números del “01” al “37”. Ejemplo: “RH12”

*CUENCA HIDROGRÁFICA.- Superficie delimitada por una divisoria cuyas aguas fluyen hacia una corriente principal o cuerpo de agua; constituye una subdivisión de la región hidrográfica. La clave se compone de los dos dígitos de la región hidrográfica y una letra mayúscula de la “A” a la “Z”. Ejemplo: “RH12K”

*SUBCUENCA HIDROGRÁFICA.- Área considerada como una subdivisión de la cuenca hidrográfica que presenta características particulares de escurrimiento y extensión. Su clave es el resultado de la concatenación de la clave de la región hidrográfica, más la clave de la cuenca y una letra minúscula de la “a” a la “z”. Ejemplo: “RH12Kf”

Cabe resaltar que para un mejor entendimiento del escurrimiento de aguas superficiales, se consideró como unidad de trabajo, la unidad más desagregada de la División Hidrológica de Aguas Superficiales. Esto corresponde a una escala de 1:250

000 Serie I y que representa la subcuenca, por lo que se prepararon los insumos de su formato original, a estas unidades que representan áreas físicas naturales (Figura 24).



Figura 24.- Mapa de las unidades de desagregación de la División Hidrológica de Aguas Superficiales escala 1:250 000 Serie I (INEGI, 2010).

Estos mapas ayudaron a la comprensión de la dinámica del escurrimiento de aguas (dirección de flujo, elevación del cultivo en metros sobre el nivel del mar (msnm), etc.), lo cual contribuye en la lixiviación de los minerales presentes en los tipos de rocas que conforman los rasgos orográficos de las zonas de estudio y que finalmente son componentes de los iones disueltos en el agua de riego.

3.5 Muestras de suelo

Se colectaron muestras superficiales de suelo de los primeros 30 cm de profundidad en 1 m² (alrededor de 1 Kg) homogenizada en campo (Figura 25). Cada muestra, se almacenó en bolsas de suficiente capacidad tipo ziploc para poder sellar y mantener la muestra en las condiciones originales y se rotularon con su respectiva clave (ver Tabla 3) para su identificación. Posteriormente, las muestras se almacenaron para los análisis de textura, granulometría, conductividad eléctrica y mineralogía, los cuales se hicieron en los laboratorios del CICESE.



Figura 25.- Toma de muestra de suelo.

3.5.1 Conductividad eléctrica aparente

Previo a la colecta de la muestra de suelo, se registraron los parámetros de conductividad eléctrica (CE) de cada uno de los puntos de muestreo, mediante el uso de técnicas de inductividad electromagnética. Esto solo fue posible para los suelos del municipio de Ensenada, B.C., debido que el aparato tiene un área de transporte restringida a la zona fronteriza.

El dispositivo usado es el EM-38 GROUND CONDUCTIVITY METER de GEONICS, el cual necesita ser previamente calibrado de acuerdo al procedimiento del manual de operación (McNeill, J. D. 1990) y esquematizado en la Figura 26.

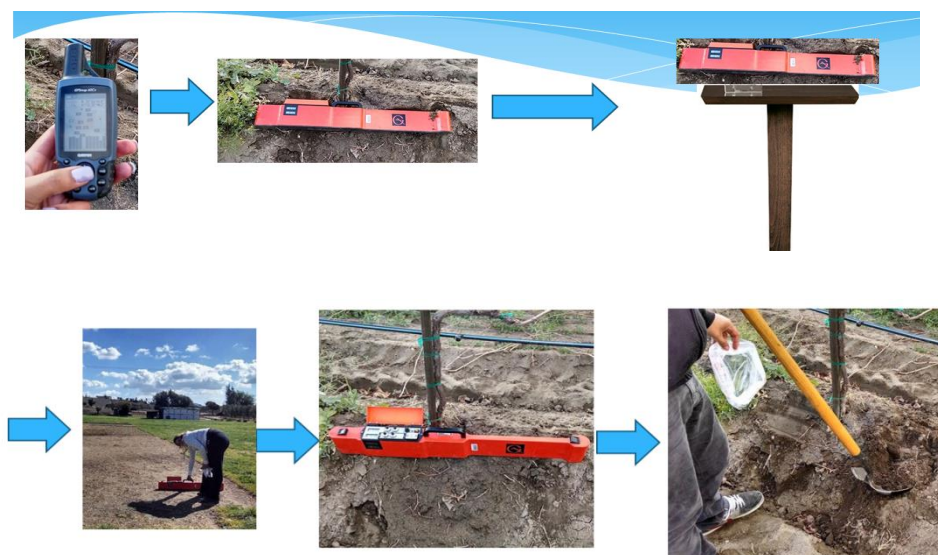


Figura 26.- Diagrama de flujo para la calibración y registro de la conductividad eléctrica aparente de los puntos de muestreo con EM-38 GROUND CONDUCTIVITY METER de GEONICS y la homogenización del suelo.

Después de calibrar el equipo, en los puntos de muestreo se obtuvieron 4 **lecturas**, donde vertical y horizontal se define por la **posición** en la que se colocó el aparato (parado (V) y acostado (H)). Se registraron en las unidades de $Q/P = \text{cuadratura} = \text{CEa} = \text{mS/m}$ y se multiplicaron por 0.01 para convertir a unidades de mS/cm , que son iguales a las que mide fisicoquímicamente el conductímetro. Las lecturas tomadas con el dipolo en vertical tuvieron una señal que penetra en **profundidad** (z) 0.8 m y en forma horizontal 0.6 m. Posteriormente se calculó el **área de influencia** que es igual a la (z) por la **separación entre dipolos** E y R respectivamente. El dato registrado es un promedio del área de influencia solo de la superficie del suelo hacia abajo en la z correspondiente, ya que la señal que pudiera registrarse en la parte superficial es eliminada en el procedimiento de calibración.

En la Tabla 4 se muestran los parámetros, que al hacer las determinaciones de campo con el aparato, se deben tomar en cuenta para obtener las lecturas que finalmente permitirán el cálculo de la CEa en la sección 3.5.2.4.

Tabla 4.- Parámetros considerados para la obtención de las lecturas de Cea.

Lecturas de CEa	Posición del aparato	Profundidad de la señal (m)	Separación entre dipolos (m)	Área de influencia (m²)
V _{0.5}	Vertical	0.8	0.5	0.4
V ₁	Vertical	0.8	1	0.8
H _{0.5}	Horizontal	0.6	0.5	0.3
H ₁	Horizontal	0.6	1	0.6

3.5.2 Trabajo de laboratorio

En esta sección, la descripción del método para cada uno de los análisis se realiza de forma detallada, únicamente cuando éste tiene modificaciones en alguno de sus pasos. Sin embargo, cuando el método se realizó igual a una metodología determinada, solo se hace referencia.

Las muestras de suelo previamente colectadas, etiquetadas y almacenadas, se prepararon y analizaron en los laboratorios de Hidrogeoquímica y Petrología Sedimentaria de la División de Ciencias de la Tierra del CICESE.

3.5.2.1 Textura

Se realizó por el método del hidrómetro de Bouyoucos descrito en la norma AS-09 en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que a su vez está tomada de la ASTM D-421 y 422 para suelos de cultivo.

En el presente análisis no se eliminaron: la agregación debida a materia orgánica (MO), la floculación debida a los cationes Ca y Mg, ni otros cementantes como carbonatos. Ya que estaban presentes en cantidades poco significativas; como ejemplo la MO se encontraba a menos del 3.5 %.

La formación de aglomerados de partículas se eliminó mediante acción mecánica y adición de hexametáfosfato de sodio (Na_3PO_3)₆ como solución dispersante.

El tiempo de lectura escogido fue de 40 segundos para la separación de partículas mayores de 0.05 mm (arena) y de 2 horas para partículas de diámetro mayores de 0.002 mm (limo y arena). Estos límites han sido establecidos por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos y se han usado para construir el triángulo de texturas.

Se pesaron de 50 a 60 g de suelo de textura arcillosa o de 100 a 120 g de suelo de textura arenosa, suelo previamente secado al aire y tamizado a 2 mm y se vertió en un vaso de precipitado de 250 mL. Se agregaron 125 mL de solución Calgon (50 g de (Na_3PO_3)₆ disueltos en agua destilada y aforados a 1 L).

Se pasaron las muestras de los vasos de precipitado a las copas de acero inoxidable del agitador mecánico, con la ayuda de una piseta. Se activaron los agitadores y se procedió a dispersar cinco minutos. Al finalizar el tiempo de agitación, se bajó la copa del dispersor y se pasó el contenido a una probeta de 1 L (Figura 27).



Figura 27.- Imágenes del procedimiento para el análisis textural (Bouyoucos).

Se agregó agua destilada hasta completar un litro con el hidrómetro dentro de la suspensión. Se sacó el hidrómetro y se suspendió el suelo manualmente por inversión de la probeta agitando durante un minuto. Se tomó las lecturas del hidrómetro a los 40 segundos y después de 2 horas de terminada la dispersión con el agitador de mano.

Para hacer una lectura, se colocó el hidrómetro dentro de la probeta 20 segundos antes del momento de la determinación, cuidando de alterar lo menos posible la suspensión. Después de hacer la lectura se secó el hidrómetro, se lavó, se secó nuevamente y se tomó la temperatura. Si por alguna razón al hacer la lectura se acumula espuma alrededor del hidrómetro, agregar unas gotas de alcohol etílico.

Una vez teniendo las lecturas, se corrigieron sumando 0.36 por cada grado centígrado arriba de 19.5 °C o restando la misma cantidad por cada grado abajo de dicha temperatura.

La lectura a los 40 segundos se multiplicó por 2, resultando el porcentaje de arcilla más limo de ahí se le restó el valor a 100, para obtener el porcentaje de arena.

La lectura a las 2 horas se multiplicó por 2 para tener el porcentaje de arcilla y por diferencia, el porcentaje de limo.

Cuando se usaron 100 g no se multiplicó por 2 ya que el hidrómetro está calibrado en porcentajes considerando 100 g de suelo.

Utilizando los porcentajes de limo, arena y arcilla se determinó la textura correspondiente con el triángulo de texturas de Shepard, que a su vez se realizó con el software Sysgrand versión 3.0.

3.5.2.2 Mineralogía

De las muestras restantes del análisis textural, se separaron las arenas por lavado y tamizado. Se dejaron secar y se analizaron en el microscopio estereoscópico marca LEICA M420, sobre una caja de Petri a manera de grano suelto tomando una porción homogénea representativa ~1 g. Se hizo la clasificación cualitativa de los minerales constituyentes de estas muestras (Figura 28).



Figura 28.- Imágenes del procedimiento para la determinación del contenido mineral de la fracción de arena de las muestras de suelo.

3.5.2.3 Parámetros fisicoquímicos

Se siguieron los procedimientos descritos en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000:

Se obtuvo una pasta de saturación de cada una de las muestras de suelo pesando de 200 a 600 g de suelo seco al aire, se agregó agua milli-Q al suelo poco a poco, mezclando lo mejor posible con ayuda de una espátula, hasta alcanzar el punto

aproximado de saturación y así hasta obtener una pasta de suelo-agua uniformemente saturada y que cumpla con los criterios del punto exacto de saturación.

Una vez que se obtuvo el punto exacto de saturación, se calculó el porcentaje de saturación (PS) del suelo de acuerdo al contenido de humedad inicial (PW), al peso de suelo seco a la estufa utilizada y a la cantidad de agua agregada al preparar la pasta de suelo conforme a la AS-17.

Obtención del extracto de saturación

Los extractos de saturación se obtuvieron de acuerdo a los procedimientos de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, siguiendo el método AS-16, por succión de vacío de la pasta de saturación (Figura 29).



Figura 29.- Imagen del mecanismo de extracción al vacío del extracto de la pasta de saturación.

Es importante mencionar el paso previo al filtrado con el filtro Whatman No. 42, ya que la muestra satura los poros del filtro rápidamente en los casos de texturas finas, el cual se realizó colocando un papel filtro de cafetera cortado a la medida del diámetro de un embudo Buchner.

El tiempo de extracción dependió de la textura de cada muestra, siendo mayor en las muestras con alto contenido de limos y arcillas. El extracto de saturación que se

obtuvo, se transfirió a un tubo de plástico tipo Falcon, para su almacenaje y se conservaron a 4 °C hasta su análisis. Al extracto de saturación se le agregó una gota de solución de $(\text{NaPO}_3)_6$ al 0.1 % (P/V) (0.1 g de $(\text{NaPO}_3)_6$ aforado a 100 mL en agua milli-Q) por cada 25 mL de extracto. Lo cual sirvió para evitar la precipitación de carbonato de calcio (CaCO_3) en el extracto durante el almacenamiento.

Determinación de la CE, pH y Eh en el extracto de suelo

La determinación de la **CE** del suelo, medido en el extracto de saturación previamente obtenido como se describió en la sección 3.5.2.4, se realizó con base al método AS-18 de la NOM-021-SEMARNAT-2000, con un conductímetro.

Se utilizó el conductímetro Thermo Scientific Orion Star A122 para la CE utilizando buffers de calibración de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y con corrección de temperatura a 25 °C. La constante de la celda de $(1\text{cm}^{-1}) \pm 10 \%$

La determinación del **pH y Eh** del suelo, medido en el extracto de saturación previamente obtenido como se describió en la sección 3.5.2.4, se realizó basado en el método AS-02 de la NOM-021-SEMARNAT-2000, con un potenciómetro Thermo Scientific Orion Star A122.

El pH se midió con el electrodo para **pH**, el cual se calibró con buffers de pH 4 y 7; se obtuvo una pendiente de curva de calibración de 99.1.

Para el **Eh** solo se cambió el electrodo por uno tipo (ORP/redox) que consta de un tubo epóxico y en su interior electrodos de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl) inmersos en un gel de cloruro de potasio (KCl) de concentración 3.5 M de la marca Atlas Scientific, el cual se calibró utilizando una solución buffer de conductividad conocida a 225 mV a 25 °C.

Cuantificación de la materia orgánica en el suelo

El procedimiento para la determinación de materia orgánica de cada muestra de suelo se realizó con el método AS-07 en la NOM-021-SEMARNAT-2000, descrito por Walkley y Black el cual se detalla en el apéndice D, se basa en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado. Después de un cierto tiempo de espera la mezcla se diluye, se adiciona ácido fosfórico para evitar interferencias de Fe^{3+} y el dicromato de potasio residual es valorado con sulfato ferroso. Con este procedimiento se detecta entre un 70 y 84 % del carbón orgánico total por lo que es necesario introducir un factor de corrección, el cual puede variar entre suelo y suelo. En los suelos de México se recomienda utilizar el factor 1.298 ($1/0.77$) (Figura 30).



Figura 30.- Imágenes del método Walkley & Black para determinación de materia orgánica de las muestras de suelo.

3.6 Modelo de salinidad del suelo

Con los datos obtenidos en las mediciones con el EM-38 como conductividad aparente (CEa) y los resultados de las mediciones de la conductividad eléctrica “real” en el extracto de suelo de la pasta saturada de las muestras individuales (CEr), se formaron 37 pares de datos (el total de muestras de suelo muestreadas en las 10 localidades del municipio de Ensenada = 37), esto para cada una de las 4 lecturas de CEa ($V_{0.5}$, V_1 , $H_{0.5}$ y H_1) (variables dependientes) a las que les correspondió un dato de CEr (variable independiente), que por ende se repitió en cada lectura.

Las unidades equivalentes utilizadas de CEa y CEr fueron mS/cm. Finalmente se obtuvieron 4 regresiones lineales, correspondientes a cada una de las lecturas con todos los datos del municipio de Ensenada.

Para graficar ambos resultados, se utilizó el software Excel versión 14, donde se obtuvo una dispersión de puntos y se aplicó una regresión lineal, obteniendo los coeficientes de correlación y la ecuación de la recta descrita a continuación:

$$y = mx + b$$

Donde:

$y = \text{CEa (mS/cm)}$

$m = \text{pendiente}$

$x = \text{CEr (mS/cm)}$

$b = \text{ordenada en el origen}$

De estas regresiones se eligió la lectura que presentó el valor más alto de coeficiente de correlación.

Al despejar la x de la ecuación $y = mx + b$, se obtuvo el algoritmo de la relación entre el valor de la CEa y la CEr, debido a la correlación que existe entre ellos.

3.7 Tipos de suelo

Con el fin de comparar e identificar los tipos de suelos que representan las zonas de muestreo, se consultaron los mapas edafológicos utilizando la base de datos del INEGI. Dicha base de datos, consta de polígonos que constituyen los tipos de suelo en todo el país, donde es posible determinar a qué suelo corresponde cada uno. Esto fue posible mediante la incorporación de las coordenadas puntuales de GPS de cada una de las localidades muestreadas. Así entonces, se generaron los mapas correspondientes a cada localidad utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG) y el software ArcMap versión 10.1.

Capítulo 4 Resultados y discusiones

4.1 Muestreo

De acuerdo a la metodología, se obtuvieron las muestras planeadas en el diseño del muestreo (Tabla 5),

Tabla 5.- Relación de muestras de agua de riego y suelo en las localidades de estudio.

Municipio	Ensenada										Caborca				
Región	EVG				EVO			EVM			C				
Localidad	DL	CE	RC	MG	RBV	RT	RLP	PA96	CP	RALA	ME	DE	TO	SE	JE
Agua de Riego	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Suelo	4	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	4
Total	10 muestras de agua y 37 de suelo										5 de agua y 21 de suelo				

Excepto para el Valle de Ojos Negros (Figura 31), en donde el muestreo se reubicó, ya que se tuvo acceso a 3 localidades de muestreo de las cuales 2 son muy cercanas a las elegidas en el diseño, se encuentran posicionadas en un radio de 3 Km aproximadamente, al norte el Rancho Buena Vista con concentraciones < 400 mg/L, al este Rancho los Pinos > 600 mg/l, Rancho Cortés y al oeste el Rancho Teresita > 500 mg/L.

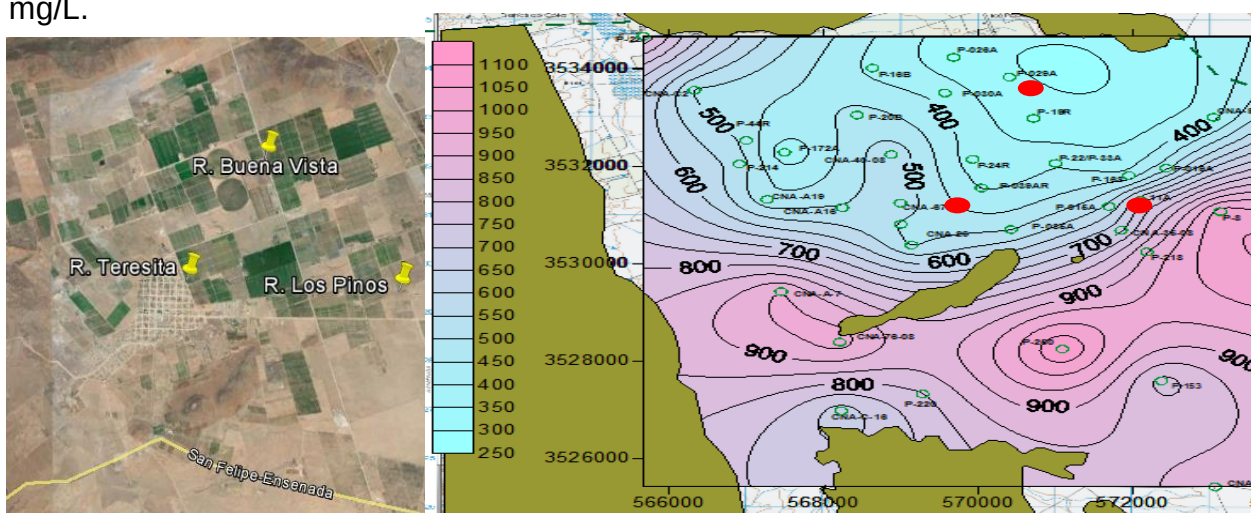


Figura 31.- Distribución de SDT presentes en las aguas de los pozos de Valle de Ojos Negros, los puntos rojos representan las localidades muestreadas (derecha). Localización geoespacial con puntos amarillos (izquierda). (Imagen satelital tomada de Google Earth, versión 7.1.5.1557) (CONAGUA-COTAS)

4.3 Aguas de riego

4.3.1 Parámetros fisicoquímicos

En la Tabla 6 se muestran los valores de los parámetros fisicoquímicos detectados en cada una de las muestras de agua de riego de las localidades muestreadas.

En cuanto a la temperatura (°C) se observa que los valores máximos se detectaron en el municipio de Caborca (29-33 °C). CONAGUA en 2007 reporta para Caborca, temperaturas en la porción costera más altas, con un valor de 35.5 °C, en la zona central presenta temperaturas promedio de 27.7 °C; y la zona de Pitiquito es la que registra las temperaturas más bajas, de 22 a 25.0°C, debido a la profundidad más somera de los aprovechamientos.

En el municipio de Ensenada, la localidad con menor temperatura registrada fue EVG-DL (14.7 °C).

El valor máximo de pH en las muestras analizadas fue para la localidad Casa de Piedra en Maneadero (8.12) y el menor fue del rancho Cortés en el Valle de Guadalupe (6.9) que son similares entre los estudios realizados por COTAS en el 2010 para EVM con mínimo de 6.9 y máximo de 7.84; y en 2013 para EVG con mínimo de 6.5 y máximo de 7.71. El resto de las muestras tienen un pH neutro, estos valores son de esperarse, ya que las aguas subterráneas tienen una variación normal de pH de 6.5 a 8 (Pulido, 1978).

El potencial redox de las muestras de agua indica que todas conforman un ambiente oxidante, ya que todos los valores son positivos.

En el municipio de Ensenada, las CE cuantificadas en las localidades de EVG y de EVM fueron las más altas registradas con una mínima de 0.99 y una máxima de 8.53 mS/cm. En el caso de la región EVO, se presentó la CE más baja del municipio (0.58-1.32 mS/cm). La CE de las localidades del municipio de Caborca es muy similar a la de EVO en Ensenada, con valores que van desde 0.58 y hasta 1.46 mS/cm.

Reportes de COTAS 2013, señalan para el EVG un máximo de CE= 6.79 mS/cm y con un máximo de SDT de 3489; y para la zona de Caborca CONAGUA 2007 reporta valores de 0.860 a 5.030 mS/cm para la CE y de 700 a 4100 mg/l de SDT y define que las mayores concentraciones de SDT se registran en la zona costera y las menores en la zona de Pitiquito, ubicada al este del acuífero, lo cual demuestra la trayectoria preferencial del flujo subterráneo hacia el oeste, en dirección del mar.

Recordando que la concentración de los sólidos disueltos totales SDT se calcula multiplicando el factor de conversión de 490 por la CE ($CE \times 490$), por lo tanto los resultados de CE y SDT son proporcionales, en la Tabla 6 éstos fueron comparados con los parámetros de determinación de calidad de agua, presentados en la Tabla 1 de este trabajo. Esta comparación se realizó a fin de previsualizar el riesgo de salinización de los suelos, debido a la calidad del agua de riego y está con base a la CE y SDT, que es empleada en las localidades estudiadas.

Tabla 6.- Valores de los parámetros fisicoquímicos registrados en campo para las muestras de agua de riego en las localidades muestreadas, se resaltan en negritas las localidades con riesgo: Muy alto de salinidad de suelos debida a su contenido de SDT.

LOCALIDAD	T (°C)	Eh (mV)	pH	Conductividad CE (mS/cm)	SDT (ppm)	Riesgo de salinidad de suelos
EVG-DL	14.70	195.10	7.36	1.10	540.96	Bajo
EVG-CE	19.00	177.30	7.34	4.10	2009	Muy alto
EVG-RC	16.70	175.10	6.92	5.38	2636.2	Muy alto
EVG-MG	17.00	260.10	7.76	0.99	484.61	Nulo
EVO-RBV	17.80	185.30	7.27	0.58	282.73	Nulo
EVO-RT	21.20	169.60	7.81	0.80	393.96	Nulo
EVO-RLP	21.30	167.60	7.36	1.32	648.27	Bajo
EVM-PA96	21.00	273.70	7.05	8.73	4277.7	Muy alto
EVM-CP	21.90	207.50	8.12	2.60	1274	Alto
EVM-RALA	20.40	202.20	7.20	2.65	1298.5	Alto
C-ME	30.10	249.60	7.15	1.46	714.42	Bajo
C-DE	30.90	245.70	8.00	0.58	282.24	Nulo
C-TO	33.00	253.40	7.37	0.98	477.75	Nulo
C-SE	29.50	250.70	7.27	1.34	658.56	Bajo
C-JE	29.00	241.00	7.17	0.95	465.01	Nulo

Los parámetros fisicoquímicos evaluados en el agua de riego permiten concluir que en el municipio de Ensenada B.C., en EVG, las localidades CE y RC son las que muestran un muy alto riesgo de salinidad del suelo, que pueden estar asociadas a procesos en niveles someros del acuífero ya que una vez que el equilibrio hidrológico natural se altera debido a la explotación del agua subterránea, el proceso de salinización comienza. Generando rápidas tasas de salinización del agua subterránea al entrar en contacto con las salmueras confinadas en las capas del perfil del suelo. (Moctar, Ibrahima, Seyni, Diakher, and Serigne, 2015).

DL tiene un bajo riesgo y MG exhibe riesgo nulo de salinización. Para la localidad de EVO, el único sitio que indica un bajo riesgo de salinización de los suelos es RLP, el resto se muestra con riesgo nulo. En la región de EVM; la localidad PA96 representa un muy alto riesgo de salinización del suelo, mientras que CP y RALA tienen alto riesgo.

En el municipio de Caborca, Son., las localidades ME y SE se clasifican con bajo riesgo de salinización del suelo a causa de la calidad del agua y el resto como nulo.

Además de estos resultados, es necesario saber que elementos están disueltos en el agua de riego y cuáles son las características del suelo, para poder comprender los procesos de salinización del suelo y la influencia que tiene la calidad del agua en los cultivos que se tienen lugar en los sitios de estudio.

4.3.2 Aniones y cationes

En la Tabla 7 se presentan los resultados de las concentraciones de aniones y cationes determinados en las aguas de riego con ICS e ICP-AES respectivamente. En esta tabla se observa que en general los aniones Cloruros y Sulfatos son los más abundantes, con ausencia de nitritos y el catión Na es el más concentrado.

Los promedios de las localidades muestran en orden de abundancia (- a +) las siguientes relaciones para cada región muestreada: Fluoruros (C < EVG < EVO < EVM), Cloruros (C < EVO < EVG < EVM), Nitritos (No Aplica), Bromuros (EVM < EVG < C < EVO), Nitratos (EVG < EVM), Sulfatos (C < EVO < EVM < EVG), Bicarbonatos (C <

EVO < EVG < EVM), Ca (EVO < C < EVG < EVM), Mg (C < EVO < EVG < EVM), Na (EVO < C < EVG < EVM) y K (EVO < C < EVG < EVM).

En resumen, se puede observar que el valle de Maneadero presenta las mayores concentraciones de aniones y cationes, excepto para el caso del bromuro, en donde la localidad de Rancho los Pinos en Ojos Negros (EVO-RLP) tiene la concentración más alta. Esto puede deberse a que al momento del muestreo, el suelo de cultivo tenía 2 meses que se acababa de quemar y se ha comprobado que se forman compuestos de bromuro en los acuíferos, debido a la quema de biomasa en los campos agrícolas (Andreae et al.,1996) y que en el caso de Caborca se presentaron con valores mínimo de 6.33 y máximo de 63.36 ppm lo que se coteja con los datos del 2007 por CONAGUA donde se detectaron altas concentraciones de Bromuro en cinco aprovechamientos cercanos a la ciudad de Caborca con valores de (67-74, 69-27, 82-11, 82-15 y 83-18 ppm), posiblemente debido a la utilización de insecticidas agrícolas a base de bromuro de metilo.

Sí estos valores se comparan con la normatividad mexicana vigente, en el caso de los fluoruros, en las 3 delegaciones de Ensenada existen por lo menos 2 localidades que rebasan la norma, en contraste con Caborca, que ninguna la rebasa.

Para los cloruros, todas las localidades de Maneadero rebasan la norma, en C y EVO, sólo una localidad rebasa la norma y en EVG, 2 localidades tienen valores por encima de lo recomendado por la norma.

En el caso de nitratos, 2 localidades de Maneadero rebasan los límites de la normatividad.

Ninguna de las localidades de Caborca rebasa los límites permisibles para sulfatos, no así para el municipio de Ensenada, donde: EVM-PA96 y 2 localidades de EVG (CE y RC) rebasan la norma, siendo los de EVG los más elevados (1068 y 975 ppm) respectivamente.

En cuanto a los límites permisibles de la norma para el catión Na (< 200 ppm), las localidades de Caborca se mantienen por debajo de esta concentración, siendo Don Emilio (C-DE) el de menor concentración con 92 ppm; para el caso del municipio de Ensenada, todas las localidades del EVM la rebasan, alcanzando los 840 ppm para el caso de la localidad EVM-PA96 y para Guadalupe EVG-CE y EVG-RC también la rebasan; esto en contraste con las localidades de Ojos Negros donde ninguna la rebasan con un valor mínimo de 42 ppm en la localidad de EVO-RBV.

Para los cationes restantes presentados en la Tabla 7, no existen recomendaciones de valores límites permisibles, por lo que se consideraron los valores propuestos por Pulido (1978) en donde se consideran rangos de concentración a los cuales normalmente se encuentran las aguas subterráneas naturales. De acuerdo a los resultados el Ca se encuentra por encima del límite máximo esperado para aguas subterráneas naturales para EVM, y las localidades CE, RC y ME. La región EVM y las localidades CE y RC presentan valores de Mg elevados. Así mismo el Na presenta un comportamiento igual al Mg cuando se toma en cuenta la norma, pero al considerar los rangos de Na para aguas naturales subterráneas, entonces las localidades de EVO-RLP, C-SE y C-TO están elevadas. Finalmente para el K, las localidades que exceden el valor del rango de las aguas subterráneas, son: todas las de EVM, EVG-CE y RC; EVO-RLP y C-ME y SE.

De todo lo anterior se puede hacer notar que en las localidades de Maneadero existe un enriquecimiento de todos los cationes y de los aniones F^- y Cl^- . En el caso de Guadalupe las localidades CE y RC se encuentran enriquecidas en todos los cationes y en los aniones SO_4^{2-} y Cl^- .

Tabla 7.- Concentración (mg/L = ppm) de aniones (F⁻, Cl⁻, NO₂⁻, Br⁻, NO₃⁻, SO₄⁻² y HCO₃⁻) y cationes (Ca, Mg, Na y K) presentes en aguas de riego en las localidades muestreadas. Y concentraciones (mg/L = ppm) máximas permitidas por la NOM-127-SSA1-1994 (subrayado) y valores normales en aguas subterráneas (negritas) (Pulido J. L., 1978)

LOCALIDAD	Concentración de ANIONES (mg/L = ppm)							Concentración de CATIONES (mg/L = ppm)			
	Fluoruros	Cloruros	Nitritos	Bromuros	Nitratos	Sulfatos	HCO ₃ ⁻ ALC. TOT. (mg /L CaCO ₃)	Ca	Mg	Na	K
EVG-DL	1.01	167.54	0.00	0.71	0.56	135.61	187.67	76.38	30.56	98.14	3.92
EVG-CE	5.01	1035.39	0.00	56.49	0.00	1068.04	350.31	255.21	129.40	680.25	5.37
EVG-RC	1.35	1201.27	0.00	3.97	3.80	975.79	327.79	286.32	141.80	799.20	9.50
EVG-MG	2.06	174.66	0.00	0.74	0.60	58.52	182.66	63.90	26.68	94.19	3.08
Promedio EVG	2.36	644.72	0.00	15.48	1.24	559.49	262.11	170.45	82.11	417.95	5.47
EVO-RBV	<u>3.52</u>	58.21	0.00	6.63	0.00	96.72	162.64	43.43	14.96	42.14	2.90
EVO-RT	<u>3.87</u>	138.22	0.00	33.71	0.00	74.79	157.64	64.82	15.26	81.69	3.47
EVO-RLP	<u>3.31</u>	268.27	0.00	107.09	0.00	119.30	195.17	99.37	30.15	105.90	6.29
Promedio EVO	3.57	154.90	0.00	49.14	0.00	96.94	171.82	69.21	20.12	76.58	4.22
EVM-PA96	<u>2.55</u>	3268.65	0.00	17.73	8.81	489.97	222.70	751.10	372.40	840.10	16.64
EVM-CP	<u>4.66</u>	592.19	0.00	0.43	<u>16.74</u>	234.05	312.78	168.22	89.16	297.20	6.32
EVM-RALA	<u>4.50</u>	737.07	0.00	16.84	<u>14.70</u>	342.33	332.79	180.30	85.03	306.20	7.21
Promedio EVM	3.90	1532.64	0.00	11.67	13.42	355.45	289.42	366.54	182.20	481.17	10.06
C-ME	0.45	141.68	0.00	48.68	0.00	194.32	120.94	141.80	26.64	99.49	6.08
C-DE	0.63	45.82	0.00	6.33	0.00	20.61	87.33	19.37	2.12	68.70	3.10
C-TO	0.58	100.17	0.00	17.56	0.00	75.99	131.37	50.57	14.38	124.50	4.31
C-SE	1.13	273.61	0.00	60.13	0.00	73.38	114.85	74.25	23.32	130.30	5.42
C-JE	0.37	133.50	0.00	63.36	0.00	56.13	136.87	67.80	13.53	92.37	3.87
Promedio C	0.632	138.956	0	39.212	0	84.086	118.272	70.758	15.998	103.072	4.556
[] máx. permisibles NOM-127	<u>1.5</u>	<u>250</u>	0.05	NA	<u>10</u>	<u>400</u>	500	NA	NA	<u><200</u>	NA
[] normales agua subterránea	10 - 100	<100	NA	NA	0.1 - 30	<100	50 – 400	10 -100	1 - 40	0.1 - 100	1 - 5

4.3.3 Balance iónico y diagramas de caracterización hidroquímica

Con los valores antes presentados convertidos a unidades de miliequivalentes por litro (meq/L), se muestra el balance iónico de los iones medidos en las muestras de agua de riego de todas las localidades muestreadas (Tabla 8). Con ello se garantiza que la cuantificación de dichos iones sea correcta, ya que por principio el agua siempre es neutra, es decir, debe tener la misma concentración de iones positivos que de negativos.

Los valores absolutos del porcentaje de error ($|\%e|$) en los balances calculados, van desde 0.19 hasta 15.21 %, valores más grandes del 5 % sugieren una significancia de error (e) suficiente para excluir el análisis de ciertas aplicaciones interpretativas. En general, el valor de “%e” debe ser menor del 2 % (Matthes, 1982). Sin embargo, Hem (1985) estableció que errores que exceden el 5 % son inevitables algunas veces, cuando el total de cationes y aniones es menor de 5 meq/L, este es el caso de las muestras de las localidades de EVO-RBV y RLP en Ojos Negros, EVM-RALA en Maneadero y en Caborca C-TO, ME y DE.

Estos datos sugieren que el análisis químico puede estar incompleto, ser impreciso, o que las muestras han experimentado cambios químicos durante el tiempo de transporte desde el campo al laboratorio (Nordstrom, Kirk, Blaine y Ball, 2008). Posiblemente en este caso se puede deber al tiempo de almacenaje hasta su análisis, ya que las muestras de Caborca estuvieron 11 meses almacenadas y las de Ensenada 6 meses.

Tabla 8.- Balance iónico entre las concentraciones (meq/L) de cationes (Ca, Mg, Na y K) y de aniones (F^- , Cl^- , NO_2^- , Br^- , NO_3^- , SO_4^{2-} y HCO_3^-) presentes en aguas de riego en las localidades muestreadas y su porcentaje de error asociado.

LOCALIDAD	Aniones							Cationes				BALANCE	
	Fluoruros (meq/L)	Cloruros (meq/L)	Nitritos (meq/L)	Bromuros (meq/L)	Nitratos (meq/L)	Sulfatos (meq/L)	HCO_3^- (Alc. Total) (meq/L)	Ca (meq/L)	Mg (meq/L)	Na (meq/L)	K (meq/L)	(meq/L)	$ \%e $
EVG-DL	0.05	4.72	0.00	0.01	0.01	2.83	3.08	3.82	2.55	4.27	0.10	-0.04	0.19
EVG-CE	0.26	29.17	0.00	0.71	0.00	22.25	5.74	13.76	10.78	29.58	0.14	3.87	4.37
EVG-RC	0.07	33.84	0.00	0.05	0.06	20.33	5.37	14.32	11.82	34.75	0.24	-1.40	1.16
EVG-MG	0.11	4.92	0.00	0.01	0.01	1.22	2.99	3.20	2.22	4.10	0.08	-0.33	1.76
EVO-RBV	0.19	0.35	0.00	0.08	0.00	2.01	2.67	2.17	1.25	1.83	0.07	1.26	10.61
EVO-RT	0.20	3.89	0.00	0.42	0.00	1.56	2.58	3.24	1.27	3.55	0.09	0.51	3.02
EVO-RLP	0.17	7.56	0.00	1.34	0.00	2.49	3.20	4.97	2.51	4.60	0.16	2.51	9.29
EVM-PA96	0.13	92.07	0.00	0.22	0.14	10.21	3.65	37.56	31.03	36.53	0.43	0.89	0.42
EVM-CP	0.25	16.68	0.00	0.01	0.27	4.88	5.13	8.41	7.43	12.92	0.16	-1.72	3.06
EVM-RALA	0.24	20.76	0.00	0.21	0.24	7.13	5.46	9.02	7.09	13.31	0.18	4.44	6.97
C-ME	0.02	3.99	0.00	0.61	0.00	4.05	1.98	7.09	2.22	4.33	0.16	-3.14	12.83
C-DE	0.03	1.29	0.00	0.08	0.00	0.43	1.43	0.97	0.18	2.99	0.08	-0.95	12.67
C-TO	0.03	2.82	0.00	0.22	0.00	1.58	2.15	2.53	1.20	5.41	0.11	-2.44	15.21
C-SE	0.06	7.71	0.00	0.75	0.00	1.53	1.88	3.71	1.94	5.67	0.14	0.47	2.01
C-JE	0.02	3.76	0.00	0.79	0.00	1.17	2.24	3.39	1.13	4.02	0.10	-0.65	3.89

Estos resultados se interpretaron en diferentes diagramas con el fin de caracterizar el tipo de agua de riego en cada una de las localidades estudiadas, estos diagramas de caracterización hidroquímica, proporcionan información sobre el origen y procesos fisicoquímicos que afectan la calidad del agua de una región; con ello se puede hacer una mejor gestión a futuro de los recursos hídricos (Galindo, 2006; Lillo, 2009).

Diagramas de stiff

Se presentan los resultados de los diagramas de Stiff de cada una de las localidades muestreadas y su geoposicionamiento en mapas por regiones en Ensenada y por municipio en Caborca.

Existen diagramas típicos para cada tipo de agua, que se presentan en la Figura 32 y que permiten la identificación y discusión de los tipos de agua analizados en este trabajo.

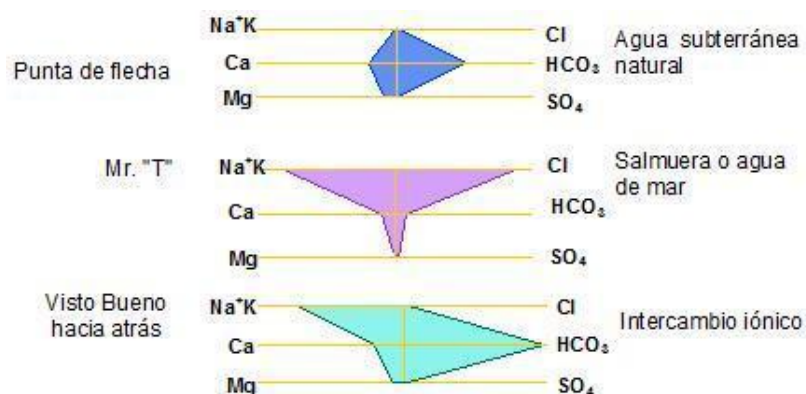


Figura 32.- Diagramas de Stiff típicos.

VALLE DE GUADALUPE

En la Figura 33, se muestran los diagramas de Stiff para EVG, en donde se aprecia que para el sitio DL y MG, los valores son menores que para los sitios CE y RC. En cuanto a la forma de los diagramas las de CE y RC son muy parecidas entre sí, pero no tienen formas típicas. En todos los casos, los minerales predominantes son de Na+K y Cl, sugiriendo que la geología influye en la composición de estas aguas. Finalmente la presencia de $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3$ es importante solo para los sitios DL y MG.

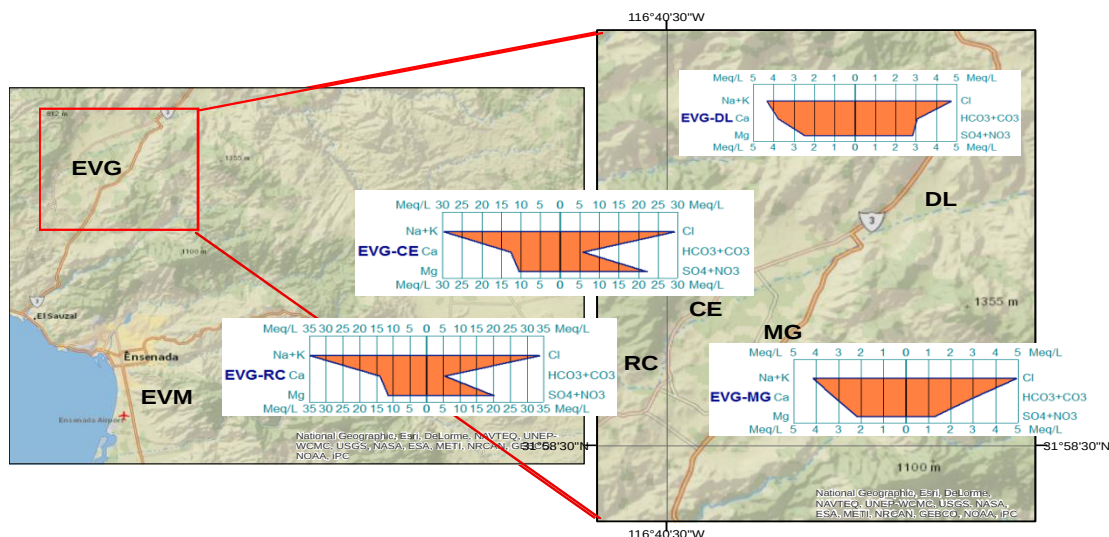


Figura 33.- Diagramas de Stiff para iones presentes en muestras de agua de riego de cultivos, en el Valle de Guadalupe, Ensenada, B.C.

VALLE DE OJOS NEGROS

En la Figura 34, se muestran los diagramas de Stiff en donde se observa que para el sitio RBV hay un pico de HCO_3+CO_3 y que su forma se parece a la típica de aguas subterráneas naturales, siendo bicarbonatadas cálcicas. En todos los casos, los minerales predominantes son de Na+K y Cl, sugiriendo al igual que en la localidad anterior, que la geología influye en la composición de estas aguas. La presencia de HCO_3+CO_3 y de SO_4+NO_3 es baja en comparación a los otros sitios, para el RLP.

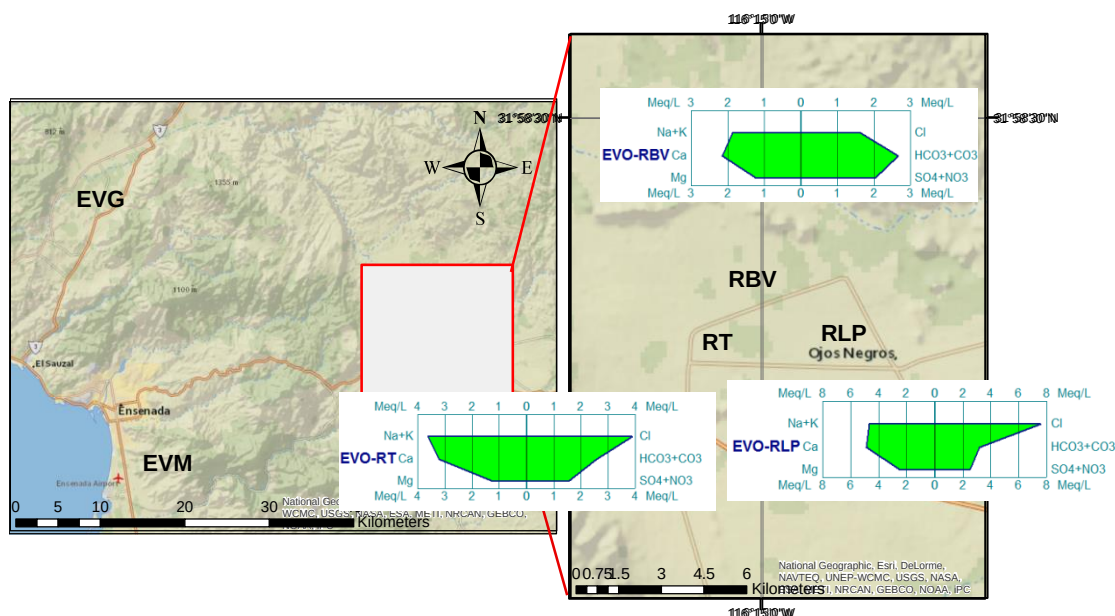


Figura 34.- Diagramas de Stiff para iones presentes en muestras de agua de riego de cultivos, en el Valle de Ojos Negros, Ensenada, B.C.

VALLE DE MANEADERO

En la Figura 35, se muestran los diagramas de Stiff para la región de Maneadero, en donde las localidades CP y RALA, se parecen a los diagramas de CE y RC de EVG, pero con una disminución en las concentraciones de SO_4+NO_3 . Cabe señalar que el sitio RALA recibe el aporte del cauce principal con aguas naturales que fluyen hacia el sitio CP, el cual a su vez se mezcla con otro aporte de agua de una cañada independiente, esto explicaría porque CP presenta una disminución de las concentraciones, en relación. El sitio PA96 es más cercano a la costa y en su diagrama lo refleja con un aumento en las concentraciones de Na+K y Cl.

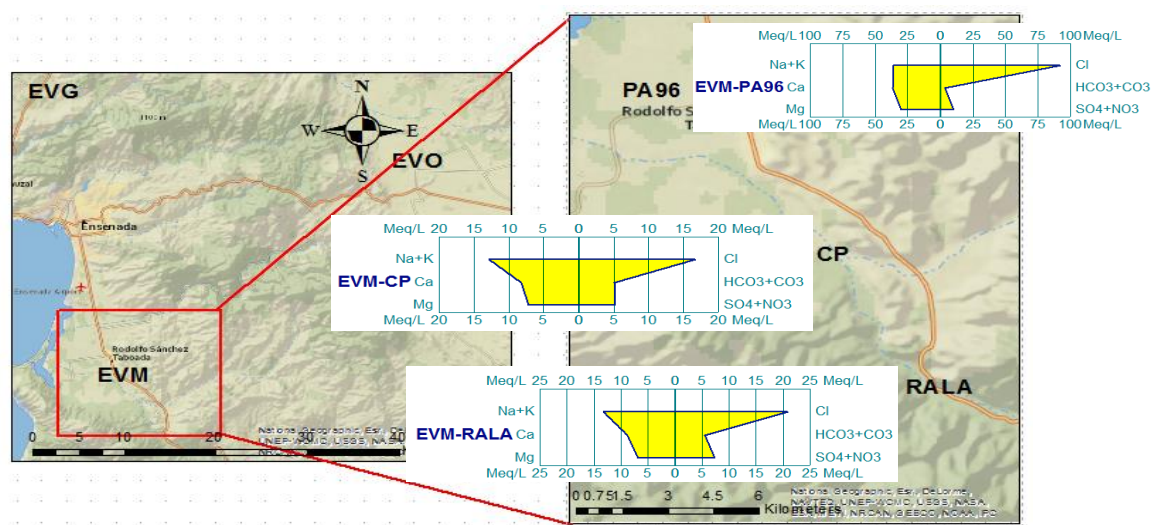


Figura 35.- Diagramas de Stiff para iones presentes en muestras de agua de riego de cultivos, en el Valle de Maneadero, Ensenada, B.C.

CABORCA

En la Figura 36, se muestran los diagramas de Stiff en donde ME presenta una forma de flecha, lo que indica que es agua de reciente infiltración, teniendo más Ca que HCO_3+CO_3 . La DE y la TO son similares, aunque la DE contiene más HCO_3+CO_3 como se observó para el EVG-MG. La localidad de SE presenta las concentraciones más altas de los iones Na+K y Cl y que a pesar de estar a la misma distancia de la costa que la JE, tiene el doble de concentración del ion cloruro. La JE posee la misma forma y rango de concentraciones que las localidades RT de Ojos Negros y MG en el

Valle de Guadalupe. Finalmente la SE es similar en forma a la de RALA y CP de Maneadero aunque contiene menor concentración de iones.

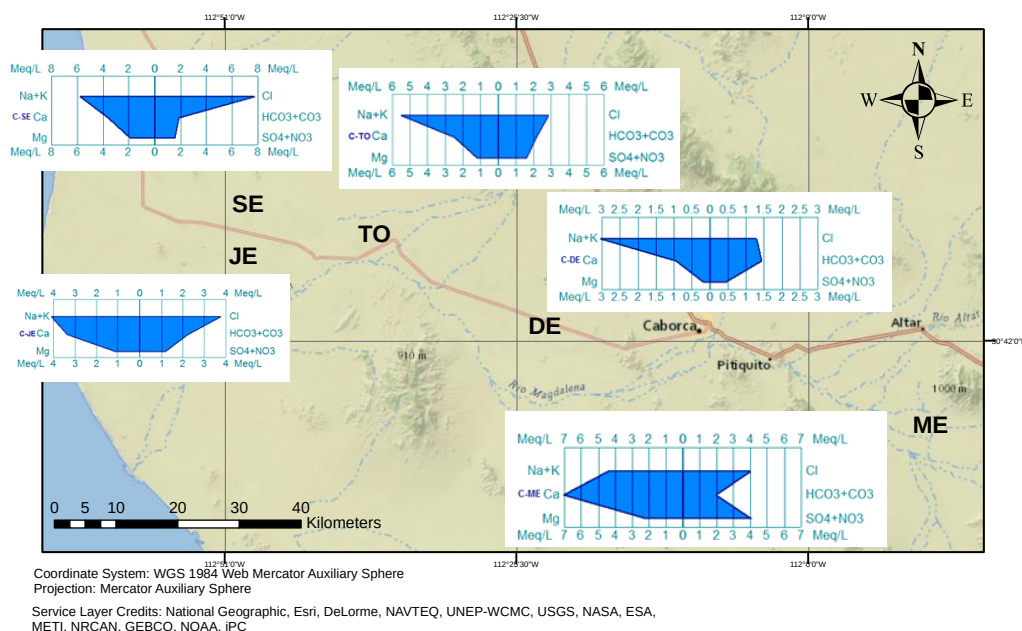


Figura 36.- Diagramas de Stiff para iones presentes en muestras de agua de riego de cultivos, en las localidades del municipio de Caborca Son.

Diagramas de piper

Se presentan los resultados de los diagramas de Piper de todas las localidades muestreadas en las delegaciones de Ensenada y el municipio de Caborca.

Para interpretar los resultados, se utilizó el diagrama general de clasificación de las aguas Figura 37.

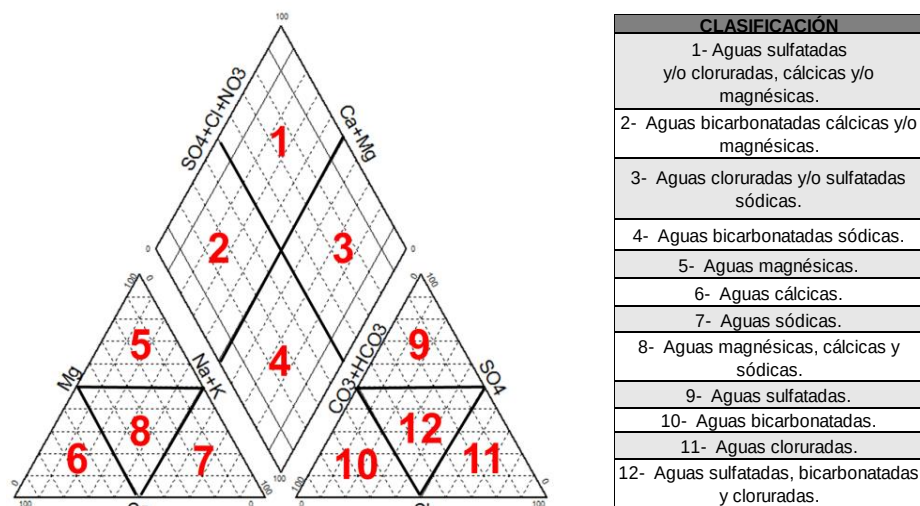


Figura 37.- Esquema general del diagrama de Piper y las clasificaciones de los tipos de agua con base a las relaciones de los iones que presentan.

En la Figura 38, se observan los resultados de todas las localidades muestreadas en donde las aguas del Valle de Guadalupe, 2 son cloruradas sódicas y 2 cloruradas cálcicas. Las del Valle de Ojos Negros y Maneadero son cloruradas cálcicas. Y las de Caborca dos de ellas son cloruradas cálcicas y 3 son cloruradas sódicas. Es de importancia resaltar que las muestras JE y SE que son las que geográficamente se encuentran más cercanas entre sí y a la costa, son las que en el diagrama de Piper están en el límite de ambos tipos de agua, siendo la JE la que cae dentro de las cloruradas cálcicas y la SE dentro de las cloruradas sódicas. Para ver más detalles de los diagramas de Piper, ver el apéndice A.

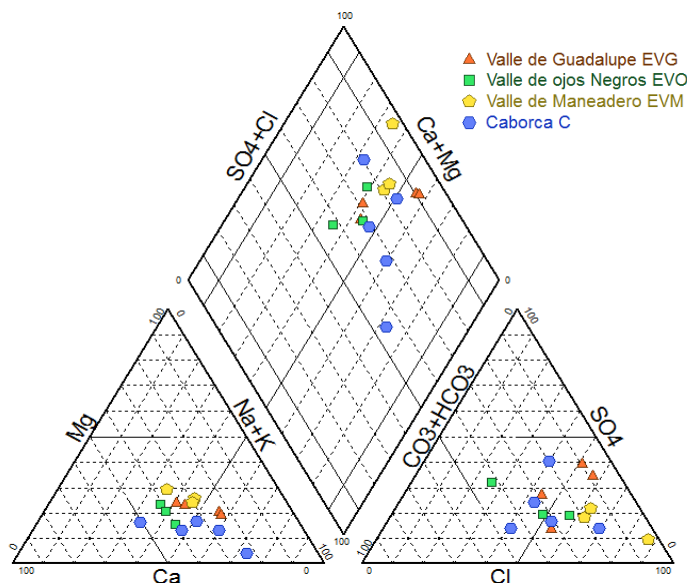


Figura 38.- Diagrama de Piper de las muestras de agua de riego de las localidades muestreadas.

Diagramas de la relación de adsorción del sodio (RAS)

Se presentan los resultados de los diagramas RAS de todas las localidades muestreadas en las regiones de Ensenada y el municipio de Caborca.

Para interpretar los resultados, se utilizó el diagrama general de la relación de adsorción del sodio basado en las normas de Riverside (Figura 39).

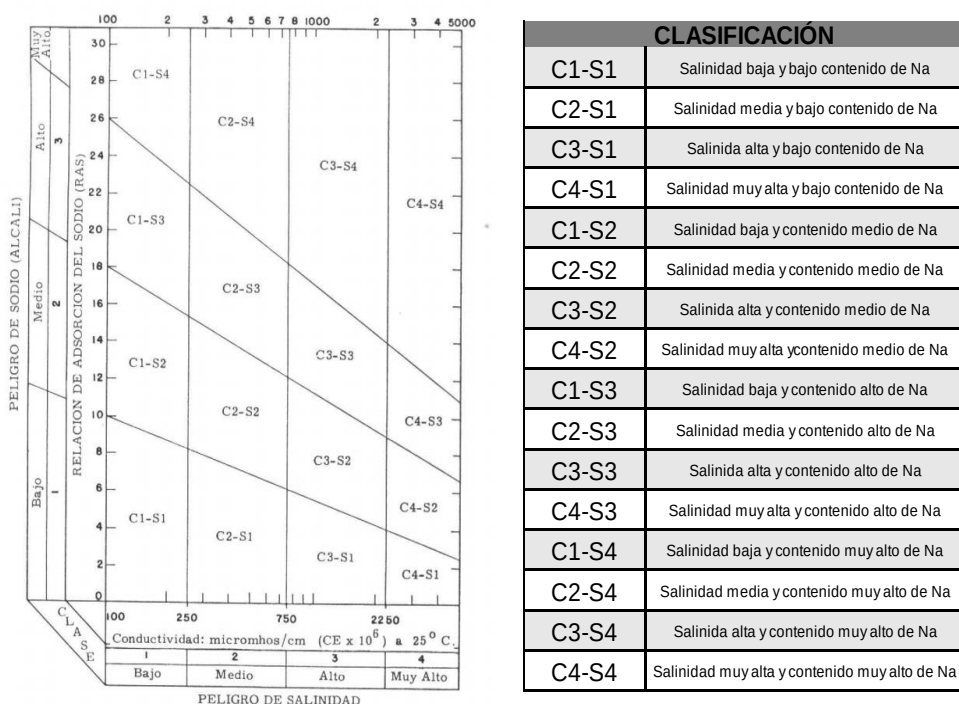


Figura 39. Diagrama de la relación de adsorción de sodio (RAS) (Modificado de: U.S. Soil Salinity Laboratory Staff, 1954):

Enseguida se presenta el diagrama RAS para todas las muestras (Figura 40), en donde se puede apreciar la clasificación del agua de riego para las localidades:

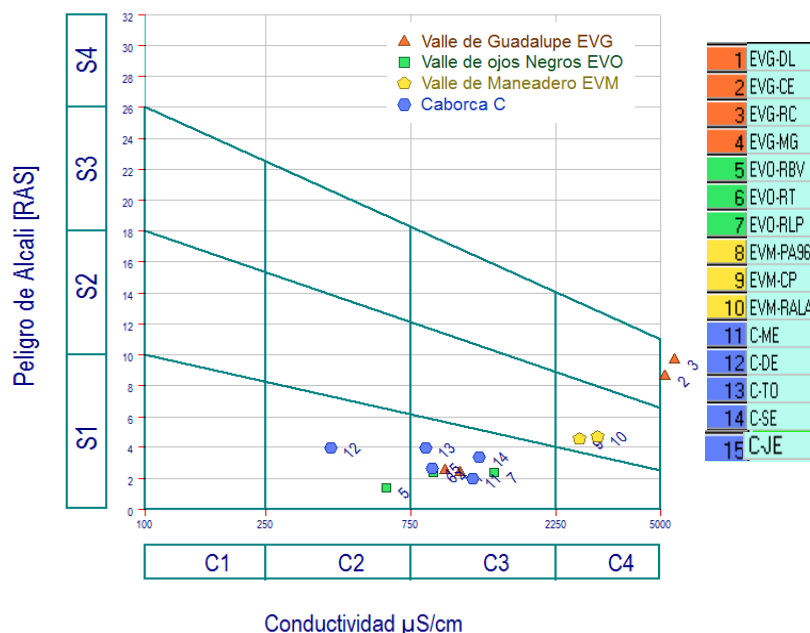


Figura 40. Diagrama de clasificación (Riverside) de las muestras de agua de riego de cultivos en las zonas de estudio, en función de la relación de la adsorción de sodio (RAS).

VALLE DE GUADALUPE

Las localidades DL y MG se clasifican como **C3-S1**, donde el tipo **C3** es agua de salinidad alta. No puede usarse en suelos con drenaje deficiente. Aún con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas especiales para el control de la salinidad, debiéndose seleccionar plantas muy tolerantes a las sales. La conductividad está comprendida entre 750 y 2250 mmhos/cm a 25 °C. Clase **S1** tiene bajo contenido en sodio. Los valores de RAS están comprendidos entre 0 y 10, pueden usarse para el riego en la mayoría de los suelos con pocas posibilidades de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable.

Las localidades CE y RC en la gráfica de la Figura 39, están fuera de los límites propuestos por el diagrama, proyectándose cerca de la clasificación **C4-S3**. Aquí el tipo **C4**, es agua de salinidad muy alta. No es apropiada para el riego en las condiciones ordinarias, pero puede emplearse a veces en circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables, el drenaje adecuado y debe usarse siempre un exceso de agua para lograr un buen lavado. Se deben seleccionar cultivos altamente tolerantes a las sales. La conductividad es superior a 2250 mmhos/cm a 25 °C. Clase **S3** es de

alto contenido en sodio. El RAS está comprendido entre 18 y 26. Pueden producir niveles tóxicos de sodio intercambiable en la mayor parte de los suelos, por lo que se necesitarán prácticas especiales de manejo. En los suelos yesíferos puede que no se alcancen estos niveles de sodio. A veces se emplean mejoradores químicos para suelo capaces de sustituir el sodio intercambiable, aunque esto no siempre es posible.

VALLE DE OJOS NEGROS

La localidad RBV se clasifica como **C2-S1**, en la cual, el tipo **C2**, es un agua de salinidad media. Puede usarse normalmente siempre que exista un grado moderado de lavado. Se puede utilizar para cultivos moderadamente tolerantes a las sales sin que exista peligro de salinización. La conductividad está comprendida entre 250 y 750 mmhos/cm a 25 °C. Clase **S1** como se describió para DL y MG.

Las localidades RLP y RT son del tipo **C3-S1**, igual que las primeras localidades discutidas del Valle de Guadalupe (DL y MG).

VALLE DE MANEADERO

Las localidades RALA y CP se clasifican como **C4-S2**. Aquí el tipo **C4** descrita para CE y RC. La clase **S2** tiene contenido medio en sodio. El RAS está comprendido entre 10 y 18. En suelos de textura fina con elevada capacidad para el intercambio iónico, el sodio representa un peligro apreciable. Estas aguas pueden ser empleadas en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos con buena permeabilidad.

La localidad de PA96 está fuera de los límites y cercano a la clase **C4-S3** (ver detalle en apéndice B). Descrito para las localidades de Guadalupe CE y RC

CABORCA

Cuatro localidades de 5 (ME, TO, JE Y SE) están en la clasificación **C3-S1** igual que las primeras localidades discutidas del Valle de Guadalupe (DL y MG) y las de Ojos Negros (RLP y RT). La localidad DE está clasificada como **C2-S1** que es igual que la localidad RBV de Ojos Negros.

Diagramas de clasificación del agua de riego en función de la conductividad (Wilcox)

Se presentan los resultados de la clasificación de las aguas, según la CEr de todas las localidades muestreadas en las delegaciones de Ensenada y el municipio de Caborca. Para interpretar los resultados, se utilizó la clasificación de la Figura 41.

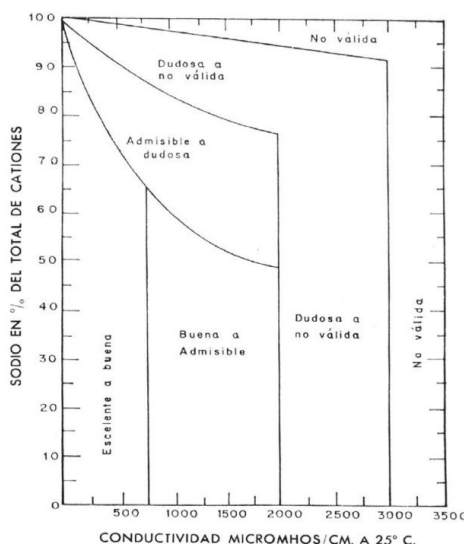


Figura 41. Diagrama de clasificación (Wilcox) del agua de riego en función de la conductividad (Martínez Alfaro, P. E., Martínez Santos, P. y Castaño Castaño S., 2006).

A continuación se presenta el gráfico para todas las muestras (Figura 42), en donde se puede apreciar que la clasificación del agua de riego según su conductividad en el Valle de Guadalupe 2 sitios (DL y MG) tienen agua de buena calidad y admisible para el riego, mientras que los otros dos (CE y RC) no es admisible para el riego, sin embargo, debido a la escases de agua en la región, se sigue usando en los cultivos, presentando un riesgo potencial de salinización del suelo y por ende, pérdida de fertilidad. En el Valle de Ojos Negros el agua es de excelente a buena para el riego. En el Valle de Maneadero la calidad del agua es de dudosa a no válida, por lo que tampoco se debería usar para el riego de cultivos debido a la potencial salinización de los suelos. Finalmente en Caborca, va de buena a admisible en JE, ME y SE a admisible dudosa en TO y DE, que éstas últimas según el diagrama de Piper son cloruradas sódicas.

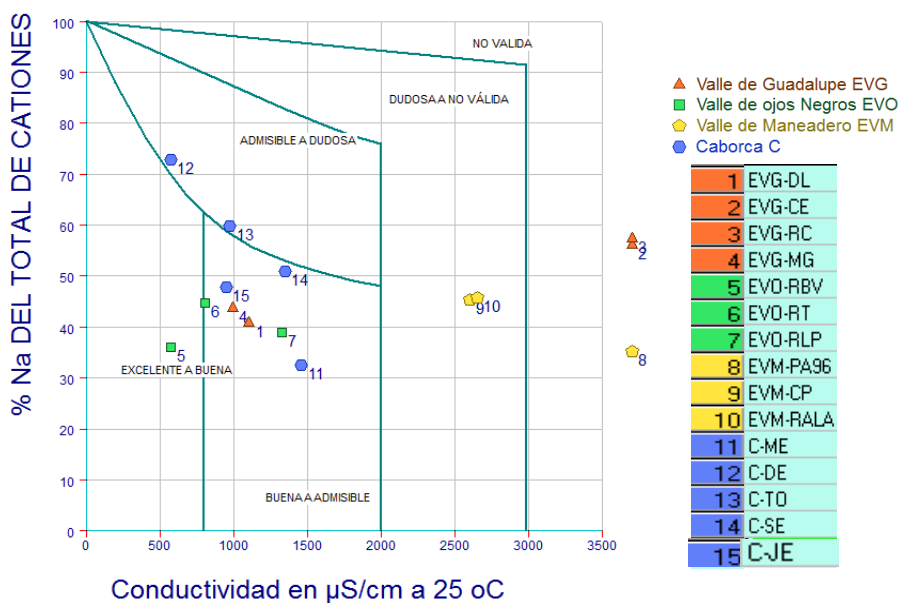


Figura 42. Diagrama de clasificación (Wilcox) del agua de riego de los cultivos, en función de la conductividad para las muestras analizadas.

4.4 Mapas hidrológicos

Los resultados y discusiones de ésta sección se organizaron de la siguiente forma: Por municipio: ubicación de las localidades dentro de las subcuencas hidrológicas. Y por cada localidad: rasgos hidrológicos y fisiográficos. Estos mapas se encuentran en el apéndice C y su descripción se presenta después de los datos de las subcuencas por municipio.

4.4.1 Ensenada

La figura 43 corresponde al mapa de localización de las subcuencas hidrológicas administrativas regionales a las que pertenecen las localidades muestreadas en el municipio de Ensenada, B.C.

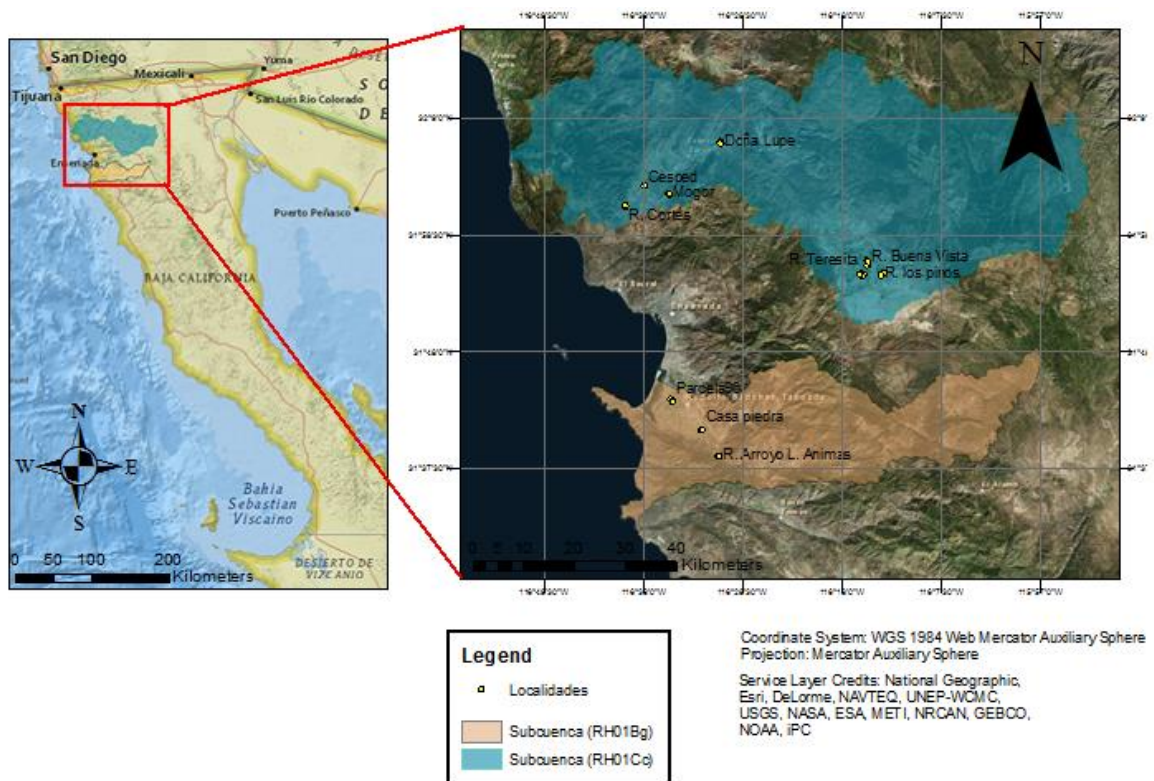


Figura 43.- Geolocalización de las subcuencas (RH01Bg y RH01Cc) a las que pertenecen las localidades muestreadas de Ensenada, B.C.

La subcuenca RH01Cc al norte del municipio, contiene las localidades de las regiones EVG y aguas arriba las de EVO, y es aproximadamente el doble del tamaño que la subcuenca RH01Bg ubicada al sur del municipio, ésta comprende las localidades de la región EVM (Tabla 9).

Tabla 9.- Localidades de muestreo del municipio de Ensenada B.C. y clave de la subcuenca a la que pertenece.

ENSENADA		
Subcuenca	RH01Bg	RH01Cc
Localidades		EVG-DL
		EVG-CE
	EVM-PA96	EVG-MG
	EVM-CP	EVG-RC
	EVM-RALA	EVO-RT
		EVO-RBV
		EVO-RLP

En la figura 44 se delimitan los acuíferos del Valle de Guadalupe (EVG) y de Ojos Negros (EVO) de acuerdo a lo que administrativamente considera la CONAGUA y que se localizan entre las latitudes norte 32° y 31.80° y las longitudes oeste 116.33° y

116.08°. Sin embargo, naturalmente no están separados ya que están intercomunicados entre sí por los arroyos que corren en la misma cuenca.

Los arroyos que la constituyen bajan de la Sierra Juárez desde elevaciones de 2000 msnm, teniendo como escorrentía superficial principal el arroyo Guadalupe. Siendo una corriente efímera de 115 km de longitud con dirección de este a oeste, en donde se une el arroyo el Barbón (Salgado, 2010) y que nace en la vecindad de la Laguna Hanson en la Sierra Juárez a 1820 msnm y que recorre 38 km a través de los valles de EVO y Real del Castillo (Ponce, Pandey y Kumar, 1999) (Figura 43).

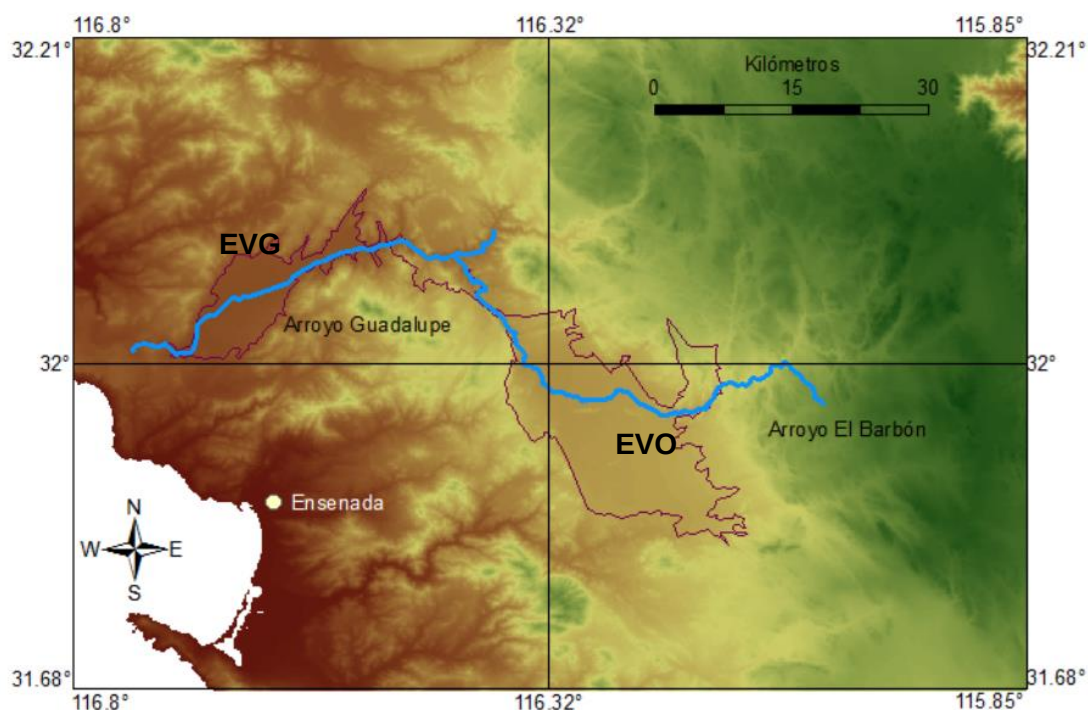


Figura 44.- Principales corrientes que atraviesan los valles de EVO y EVG (Méndez, 2012).

La cuenca de Maneadero (Figura 45) cubre una superficie de 1,795 Km² y está limitada geográficamente entre los paralelos 31° 32' y 31° 58' de latitud norte y los meridianos 115° 54' y 116° 40' de longitud oeste. Limita al norte con la cuenca de EVO, al oriente la Sierra Juárez y al occidente con el Estero de Punta Banda; en la costa hacia el Océano Pacífico (COTAS, 2010).

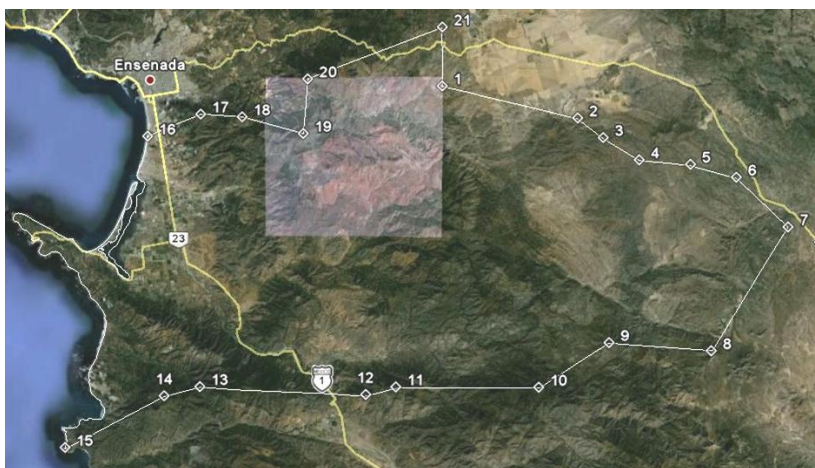


Figura 45.- Límites del acuífero de Maneadero (COTAS, 2010).

VALLE DE GUADALUPE

El acuífero del EVG está completamente contenido dentro del drenaje del Arroyo Guadalupe. Este acuífero se encuentra localizado en un valle inter montano, que cuenta con una topografía superficial de elevaciones medias de 300 a 400 msnm, con un drenaje superficial predominante del tipo dendrítico con dirección principalmente suroeste y está rodeado por un sistema montañoso que se eleva hasta los 500 y 700 msnm conocido como Sierra Blanca (Beltrán y Quintanilla, 2001).

Localidad EVG-DL (Figura C1).- se localiza aproximadamente a 350 metros sobre el nivel del mar (msnm), se encuentra al pie de un cerro donde aguas arriba afloran aguas termales del cañón Agua Caliente. El cultivo de vid en donde se tomaron 3 muestras de suelo y una de control, se rodea de arroyos intermitentes que desembocan a un cauce principal, el cual es tributario al Arroyo Guadalupe. En general el flujo de agua va de norte a suroeste y en el punto de control se encontraron matorrales propios de la flora natural de la región. La muestra de agua se recolectó directamente del sistema de riego del cultivo, ya que al momento del muestreo, estaban regando.

Localidad EVG-CE (Figura C2).- se encuentra aproximadamente a 300 msnm aquí se tomó una muestra representativa del cultivo y una de control. En este sitio se siembra pasto ornamental y se encuentra al costado de un arroyo intermitente tributario

al cauce principal Arroyo Guadalupe, aguas arriba se encuentra un cuerpo de agua intermitente alimentado por la misma escorrentía. La dirección del flujo es de sureste hacía noroeste alcanzando el sitio de muestreo y de ahí sigue su curso en dirección suroeste. Esta localidad cuenta con su propio pozo, de donde se tomó la muestra de agua.

Localidad EVG-MG (Figura C3).- ubicada aproximadamente a 350 msnm se encuentra al final de una cañada (Cañada el Mogor), la cual conforma una subcuenca de flujo intermitente y se une al cauce principal Arroyo Guadalupe aguas abajo. El flujo de agua corre del este al noroeste con 3 pozos, uno al inicio de la cañada, otro a la mitad del cauce, donde se abastece al ganado y el tercero dentro de los cultivos de vid y hortalizas orgánicas. En esta localidad se tomaron 3 muestras de suelo y un punto de control, además de una muestra de agua directamente del sistema de riego de vid, en donde se indicó que esta agua era la mezcla de los 3 pozos de la localidad.

Localidad EVG-RC (Figura C4).- situada a 300 msnm aproximadamente. Se encuentra al pie de un cerro el cual genera 2 pequeñas escorrentías intermitentes que atraviesan el cultivo y desembocan por el margen izquierdo del cauce principal Arroyo Guadalupe. En esta localidad el flujo de agua viaja de noroeste a sureste. Cabe resaltar que al pie del cerro, cercano a la corriente de agua que pasa por los sitios de muestreo, hay una granja de ganado ovino y caprino del cual se lixivian sus desechos en el suelo cercano y que cuando hay escorrentía se pueden transportar hacía donde va el flujo de la corriente, de aquí se tomó el punto de control debido a que hay vegetación nativa. En esta localidad se tomaron 2 muestras en cultivo de vid y una de control. La muestra de agua se tomó directamente del sistema de riego por goteo.

VALLE DE OJOS NEGROS

El Valle de EVO corresponde a la parte este de la cuenca hidrológica que nace en la Sierra de Juárez y drena hacia el océano Pacífico. Se encuentra separado del Real del Castillo ubicado al norte, por el cerro del Talco de 5 Km de largo, ubicándose EVO al sur. El relieve topográfico del valle es prácticamente plano, con 650 msnm el

punto más bajo, 800 msnm el máximo al suroeste al pie de monte de la sierra y 700 msnm en promedio (Méndez, 2012).

Localidad EVO-RBV (Figura C5).- se localiza aproximadamente a 650 msnm, en un terreno de baja pendiente. Al costado, se encuentran dos escorrentías intermitentes tributarias al Arroyo el Barbón. El flujo corre de sureste a noroeste, el cultivo de donde se muestrearon 3 puntos era de avena, aunque en otras temporadas, siembran hortalizas variadas. El punto de control está ubicado en una zona cercana en donde no se siembra y había vegetación natural. La muestra de agua se tomó directamente del sistema de aspersión que usan para el riego.

Localidad EVO-RT (Figura C6).- se encuentra aproximadamente a 710 msnm, en un terreno de baja pendiente, rodeado al suroeste de la zona habitacional de Ojos Negros y lo atraviesa una escorrentía intermitente tributaria al arroyo el Barbón. El flujo de agua fluye de este a oeste. Se tomaron 3 muestras de suelo de cultivo de avena, tomatillo y calabaza, con una muestra de control tomada en la orilla del camino en donde no estaba sembrado. El sistema de riego en esta localidad es por goteo y rotacional por parcela cultivada, el pozo se encuentra en el centro y se va distribuyendo a cada parcela, una por día.

Localidad EVO-RLP (Figura C7).- situada aproximadamente a 720 msnm, en un terreno de baja pendiente, al costado de una escorrentía intermitente la cual nace al oeste en terrenos elevados a 3 Km de distancia aproximadamente y que es tributaria al arroyo el Barbón. El flujo va de las zonas más altas al este donde al pie del cerro existe una pequeña zona habitacional y corre hacia el oeste. Aquí se tomaron 3 muestras de suelo en donde el punto 1 (EVO-RLP1) había sido quemado 2 meses atrás. El tipo de cultivo es avena, tomatillo y otras hortalizas y el riego es por goteo. El encargado comentó que había parcelas que se dejan descansar por año y medio, para permitir la recuperación de la fertilidad del suelo. La muestra de agua se tomó directamente del pozo que abastece los cultivos.

VALLE DE MANEADERO

Hidrográficamente, la cuenca de Maneadero la constituyen una serie de arroyos que nacen en el flanco occidental de la Sierra de Juárez, formando una red de drenaje sencilla, en la que destacan los arroyos de Santa Clara, San Salvador, San Carlos, Las Ánimas y San Francisquito

El Arroyo Las Ánimas es el cauce principal de escorrentía superficial de la cuenca RH01Bg, el cual se origina en la porción Suroccidental de la Sierra de Juárez a 14 Km del cerro El Viento; inicia su recorrido con el nombre de Arroyo “Salsipuedes” (Figura C8) con dirección Suroeste, a su paso se le unen arroyos tributarios de diferentes cañadas como: Cañón La Grulla, Arroyos Las Cañadas, Mina de Esperanza, Sierra Linda, El Borrego, Alberto y El Álamo, también desde este último punto el escurrimiento toma el nombre de “Arroyo Las Ánimas” o “Arroyo el Zorrillo” y siguiendo con dirección Noroeste y a una distancia de 10.5 Km se le incorpora el Arroyo San Francisquito propiamente ya en la planicie del Valle de Maneadero, cruzándolo diagonalmente hasta el Estero Punta Banda lugar donde desemboca, recorriendo desde su nacimiento una distancia de 85 Km, drenando un área de 856 Km² (COTAS, 2010).

Localidad EVM-PA96 (Figura C9).- ubicada aproximadamente a 10 msnm en un terreno de muy baja pendiente, muy cerca 1.5 Km al oeste se encuentran las planicies de inundación de mareas del Estero de Punta Banda, y a 1.3 Km de la zona urbana de Maneadero. Las escorrentías intermitentes con dirección sureste a noroeste y se posiciona perpendicularmente hacia el sur a una distancia de 1.5 Km del cauce principal Arroyo el Zorrillo. Se colectaron muestras de suelo en 3 puntos dentro del cultivo de espárrago, el cual tiene la particularidad de ser muy tolerante a la salinidad. El encargado informó que el cultivo lleva 10 años de producción. La muestra de agua se tomó directamente del pozo de extracción.

Localidad EVM-CP (Figura C10).- localizada aproximadamente a 60 msnm, en un terreno de baja pendiente, sobre el cauce principal Arroyo el Zorrillo donde se unen 2 escorrentías tributarias y se irriga por varios flujos superficiales intermitentes que

escurren de sur a norte juntándose con el cauce principal que fluye con dirección noroeste. Se tomaron 3 muestras de suelo en el cultivo de cebolla y un punto de control, se observa que los puntos 1 y 2 se encuentran sobre una de las escorrentías; sin embargo, al momento de muestrear no había agua superficial. La muestra de agua se tomó al momento del llenado de la pileta de almacén de agua con la que riegan por goteo.

Localidad EVM-RALA (Figura C11).- se ubica aproximadamente a 110 msnm, al sur del cauce principal Arroyo el Zorrillo que aguas arriba lo llaman Las Ánimas. Este arroyo escurre entre varios cerros ubicados al sureste de la localidad y pueden elevarse hasta 1 Km y al norte hasta 750 m, entre ellos se generan escorrentías que bajan por el sistema de cañadas y se unen al cauce principal. Se tomaron 3 muestras de suelo de cultivo de hortalizas y leguminosas. La muestra de control se colectó a u costado de la carretera en un área con vegetación nativa. La muestra de agua se obtuvo directamente de las líneas del sistema de riego por goteo.

4.4.2 Caborca

La Figura 46 corresponde al mapa de localización de las subcuencas hidrológicas administrativas regionales a las que pertenecen las localidades muestreadas en el municipio de Caborca, Son.; las localidades Santa Elena, El Jedid y Torrentera están contenidas dentro de RH08Cd, mientras que Don Emilio y Ma. Eugenia se encuentran en otras dos subcuencas contiguas hacia el este, RH08Ba y RH08Bc respectivamente (Tabla 10).

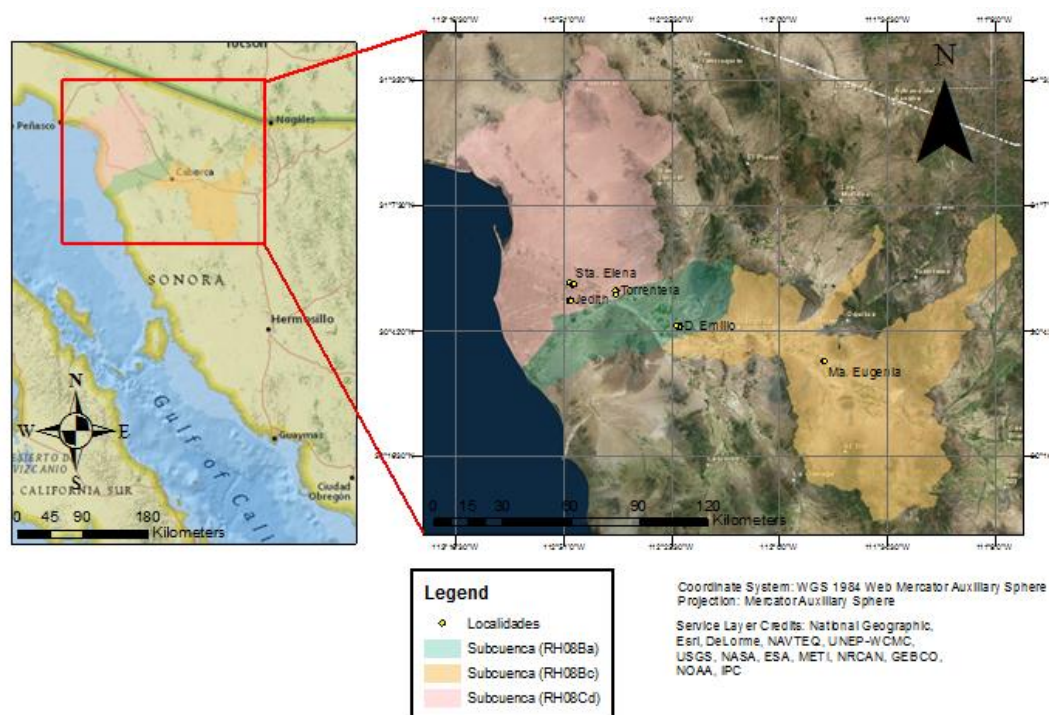


Figura 46.- Geolocalización de las subcuencas (RH08Ba, RH08Bc y RH08Cd) a las que pertenecen las localidades muestreadas de Caborca, Son.

Tabla 10.- Localidades de muestreo del municipio de Caborca, Son. y clave de la subcuenca a la que pertenece.

CABORCA			
Subcuenca	RH08Ba	RH08Bc	RH08Cd
Localidades	C-DE	C-ME	C-TO
			C-SE
			C-JE

Sonora se ubica en la Región II Noroeste, que comprende cinco regiones hidrológicas: RH-7, 8, 9, 10 y 34 (Figura 47), siendo las cuatro primeras cuencas exorreicas de la vertiente occidental que drenan sus aguas hacia el Golfo de California. El acuífero de Caborca (C) donde se desarrolla el Distrito de Riego 037 Altar-Pitiquito-Caborca, se localiza al noroeste del estado de Sonora en la cuenca del Río Concepción, en la RH-8 Sonora Norte y tiene un área de 1 932 km² (Vega, et al., 2011).

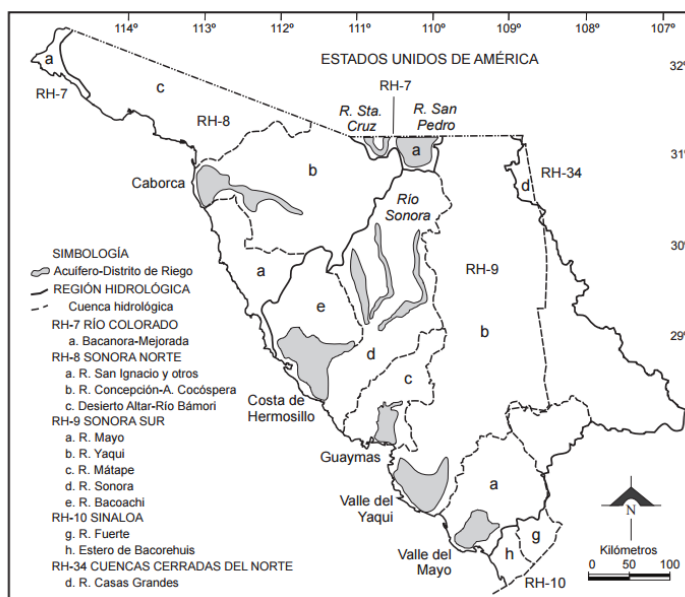


Figura 47.- Regiones hidrológicas y acuíferos de Sonora (Vega et al., 2011).

CABORCA

Caborca forma parte de la provincia de la planicie costera del pacífico donde las elevaciones topográficas van desde el nivel del mar hasta los 1 190 msnm en la Sierra del Pinacate, en la porción noroeste del Estado, tiene forma alargada y contiene planicies costeras de baja pendiente asociadas a deltas cercanos a litorales (Vega, et al., 2011) donde se desarrolla la agricultura. La disponibilidad del agua superficial es muy reducida y se limita al escurrimiento del Río Asunción, el cual fluye con dirección Noroeste – Oeste, infiltrándose y recargando el acuífero cuando las condiciones pluviométricas son óptimas (Ojeda, 1994).

Localidad C-TO (Figura C12).- elevada a 120 msnm aprox., en un terreno de muy baja pendiente, a 1.7 Km al sur del arroyo Victoria y sobre la escorrentía intermitente de un cauce de menor orden que nace aguas arriba a 15 Km al NE. Aproximadamente a 2 Km al sur se observa la separación de la localidad con la subcuenca RH08Ba. El flujo preferencial va de noreste a suroeste. Se colectaron 3 muestras de suelos de cultivo de uva de mesa con parra joven, y un punto de control cercano al cultivo en donde no se observó actividad agrícola. Al momento del muestreo el suelo se encontraba con alta humedad debida al riego. La muestra de agua se tomó directamente del pozo de abastecimiento.

Localidad C-SE (Figura C13).- se encuentra aproximadamente a 65 msnm, en un terreno de muy baja pendiente, adyacente a escasos metros al sur del arroyo Victoria y al cauce intermitente de menor orden al norte. El flujo de las escorrentías va de este a oeste. Se colectaron 3 muestras de suelo de cultivo de uva de mesa y un control al costado del acceso de terracería, con vegetación xerófila nativa. La muestra de agua se colectó directamente del pozo de extracción.

Localidad C-JE (Figura C14).- con una elevación de 65 msnm aproximadamente, en un terreno de muy baja pendiente, y contigua a otros cultivos. Se ubica de 3 a 4 Km al sur del cauce intermitente y de influencia en las localidades C-TO y C-SE, cerca de 4 Km al sur nace un nuevo cauce intermitente paralelo al límite de la cuenca RH08BA. La dirección de flujo preferente es de este a oeste. Se recolectaron 3 muestras de suelo de cultivo de uva de mesa y una de control sin actividad de siembra.

Localidad C-DE (Figura C15).- ubicada aproximadamente a 195 msnm, en un terreno de baja pendiente, a 1 Km al sur del cauce principal del río Asunción que en este segmento muestra una canalización artificial. Cerca de los sitios de muestreo nacen 2 escorrentías tributarias que fluyen hacia el suroeste y cambian su curso al norte para unirse al cauce principal del río Asunción. Se muestrearon 4 puntos de suelos de cultivo de uva de mesa y uno de control sobre suelo no cultivado. La muestra de agua se colectó del pozo de irrigación.

Localidad C-ME (Figura C16).- situada aproximadamente a 380 msnm, en un terreno de baja pendiente, a 6 Km al sur del cerro el Carnero. En ella convergen 2 de los cauces intermitentes tributarios aguas abajo hacia el oeste del río Asunción, el 1ero de menor orden ubicado al norte y el 2do al sur conocido como el arroyo el Barranco. El flujo preferente va de este a oeste. Se tomaron 3 muestras de suelo de cultivo de uva de mesa y una de control bajo el mismo criterio que las anteriores. La muestra de agua al igual que todas las de este municipio se tomó directamente del pozo de riego.

Cabe resaltar que en todas las localidades de este municipio, se apreció que el suelo presentaba poca compactación y debido a que los muestreos fueron en las horas

de mayor radiación solar, se percibieron altas temperaturas en el suelo superficial, lo que indica una alta tasa de evaporación.

4.5 Suelos

4.5.1 Conductividad eléctrica aparente

Como se detalló en la sección 3.5.1 (Medición *in situ* de la CEa del suelo), se obtuvieron los resultados de las 4 lecturas tomadas con el EM-38 (V_1 , $V_{0.5}$, H_1 y $H_{0.5}$) se muestran en la Tabla 11 los resultados individuales para cada lectura.

Tabla 11.- Lecturas del EM-38 CEa (mS/cm) de cada punto de muestreo (/ = muestra nula).

		V_1 (mS/cm)				$V_{0.5}$ (mS/cm)			
		1	2	3	PC	1	2	3	PC
LOCALIDADES	EVG-DL	0.08	0	0	0	0.03	0	0	0.06
	EVG-CE	0.42	/	/	0.36	0.5	/	/	0.18
	EVG-MG	0.26	0.28	0.09	0.04	0.24	0.25	0.11	0.08
	EVG-RC	0.43	0.39	/	0.49	0.66	0.77	/	0.3
	EVO-RT	0.37	0.5	0.42	0.34	0.29	0.49	0.35	0.3
	EVO-RBV	0.18	0.08	0.05	0.03	0.21	0.09	0.07	0.05
	EVO-RLP	0.17	0.11	0.15	0.1	0.12	0.09	0.15	0.08
	EVM-PA96	0.53	0.84	0.98	0.9	0.48	0.83	0.84	1.45
	EVM-RALA	0.39	0.37	0.26	0.15	0.5	0.73	0.5	0.23
	EVM-CP	0.15	0.1	0.16	0.07	0.19	0.15	0.26	0.06
		H_1 (mS/cm)				$H_{0.5}$ (mS/cm)			
		1	2	3	PC	1	2	3	PC
LOCALIDADES	EVG-DL	0.06	0	0	0	0.17	0	0	0.05
	EVG-CE	0.43	/	/	0.37	0.45	/	/	0.18
	EVG-MG	0.22	0.26	0.09	0.03	0.26	0.29	0.16	0.14
	EVG-RC	0.64	0.59	/	0.2	0.92	0.8	/	0.27
	EVO-RT	0.27	0.27	0.27	0.21	0.21	0.26	0.22	0.56
	EVO-RBV	0.14	0.02	0.03	0.02	0.17	0.07	0.07	0.05
	EVO-RLP	0.1	0.09	0.1	0.06	0.08	0.09	0.1	0.03
	EVM-PA96	0.78	1.04	0.84	1.21	0.81	0.95	0.74	1.72
	EVM-CP	0.13	0.09	0.09	0	0.12	0.18	0.23	0.14
	EVM-RALA	0.33	0.32	0.33	0.03	0.53	0.59	0.79	0.33

Se observa que los valores máximos de CEa en las cuatro lecturas se registraron en la localidad de PA96 (1.72 a 0.98 mS/cm) (resaltados en negritas) y las lecturas más bajas en la localidad DL y RBV con valores mínimos de hasta 0 mS/cm (resaltados en azul).

4.5.2 Textura

Como resultado del análisis de tamaño de partículas por el método del hidrómetro de Bouyoucos, se obtuvo la distribución porcentual de las fracciones de arena, limo y arcilla de las muestras de suelo de cada punto de muestreo y en la tabla12 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 12.- Distribución porcentual de las fracciones de arena, limo y arcilla que constituyen la muestra total (100 %) de suelo de cada sitio de estudio.

REGIÓN	ENSENADA				CABORCA			
	Muestra	(%) Arena	(%) Limo	(%) Arcilla	Muestra	(%) Arena	(%) Limo	(%) Arcilla
EVG	DL-1	87	13	0	ME-1	62	25	12
	DL-2	80	18	2	ME-2	65	24	11
	DL-3	83	16	1	ME-3	63	24	12
	DL-PC	90	10	0	ME-PC	73	23	4
	CE-1	73	23	4	DE-1	79	14	7
	CE-PC	74	23	3	DE-2	75	17	8
	RC-1	52	38	9	DE-3	81	13	6
	RC-2	52	38	9	DE-4	77	14	9
	RC-PC	84	15	1	DE-PC	67	24	9
	MG-1	75	22	3	TO-1	72	22	6
	MG-2	73	22	4	TO-2	67	25	7
	MG-3	64	22	14	TO-3	74	20	6
	MG-PC	68	25	7	TO-PC	76	17	6
EVO	RBV-1	79	17	4	SE-1	52	26	22
	RBV-2	79	18	3	SE-2	57	25	18
	RBV-3	85	12	3	SE-3	87	11	2
	RBV-PC	88	10	2	SE-PC	87	11	2
	RT-1	78	17	5	JE-1	82	13	5
	RT-2	79	17	3	JE-2	83	12	5
	RT-3	76	19	5	JE-3	81	13	5
	RT-PC	78	15	7	JE-PC	72	23	5
	RLP-1	77	17	6				
	RLP-2	75	17	7				
	RLP-3	85	12	3				
	RLP-PC	88	9	3				
EVM	PA96-1	32	56	12				
	PA92-2	31	57	12				
	PA96-3	22	63	15				
	PA96-PC	35	54	11				
	CP-1	81	16	3				
	CP-2	83	15	2				
	CP-3	73	21	6				
	CP-PC	88	12	0				
	RALA-1	60	31	9				
	RALA-2	76	20	4				
	RALA-3	75	20	4				
	RALA-PC	86	14	0				

Las delegaciones de Ensenada presentaron texturas promedio de arenas-limos y arcillas del: 74 % - 22 % y 4 % para EVG, 81 % - 15 % - 4 % en EVO y en EVM 62 % - 31.5 % - 6.5 % y en cuanto a las localidades de Caborca fue de 78 % - 19 % - 8 %.

Es importante resaltar que las muestras de la localidad EVM-PA96 muestran las texturas con mayor contenido en limos>arenas>limos, en comparación a las demás.

Con estos datos, se identificaron las clases texturales (Tabla 13) para cada una de las muestras de suelo, utilizando la distribución porcentual correspondiente y graficándolos dentro de los diagramas ternarios de Shepard. Cada diagrama corresponde al conjunto de muestras por regiones (EVG, EVO, EVM) y el municipio de Caborca, (Figuras 48-51).

En general se tienen arenas y arenas limosas, la única localidad en la que se observó una distribución de grano diferente fue en EM-PA96 donde 3 muestras son limo-arenosas y una limo-arcillosa.

VALLE DE GUADALUPE

Once de las 13 muestras de las localidades del EVG, muestran una tendencia textural hacia las arenas, y solo 2 como arenas limosas (Figura 48). Kurczyn et al. (2007) reportaron para EVG en su análisis textural usando los procedimientos establecidos por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (US-EPA) (Mason, 1992), para 59 muestras superficiales de suelo (a 5 cm de profundidad) y con diferentes características entre sus muestras (pendiente, vegetación, geología, etc.), y encontraron una tendencia general hacia las arenas. Estos resultados están de acuerdo a lo encontrado en este trabajo a excepción de dos sitios que presentan arenas limosas.

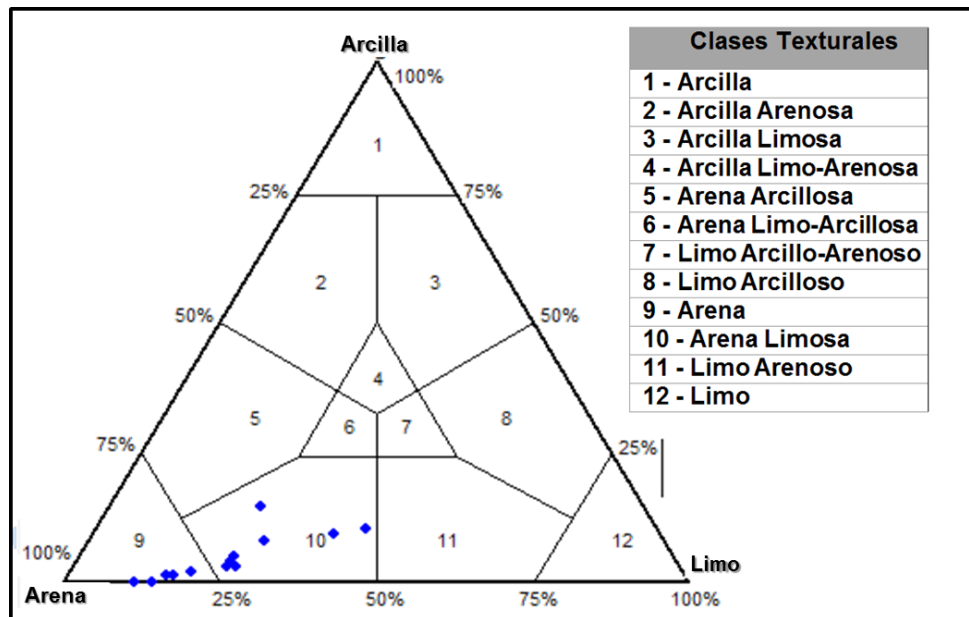


Figura 48.- Diagrama de Shepard para las localidades de EVG.

VALLE DE OJOS NEGROS

De acuerdo al diagrama de la Figura 49, 9 de los 12 suelos muestreados en EVO exhiben texturas arenosas y 3 como arenas-limosas muy cerca de los límites del grupo arenosas.

Cardoso, et al (2005), encontraron en un estudio de texturas con el método del hidrómetro de Bouyoucos, para perfiles de suelo en EVO, que éstos presentan texturas que van desde muy arcillosas, hasta perfiles con incipiente desarrollo pedogenético, texturas gruesas, en una matriz con gran cantidad de cantos rodados, mal clasificados, arcillas heredadas, hierro amorfo y poco profundo.

También describen que en la actualidad, el extremo suroeste del bloque de fallamiento que origina el valle (zona de localidades muestreadas), está parcialmente cubierto por arenas con procesos eólicos, mezcladas con minerales primarios producto del intemperismo *in situ* de los diques.

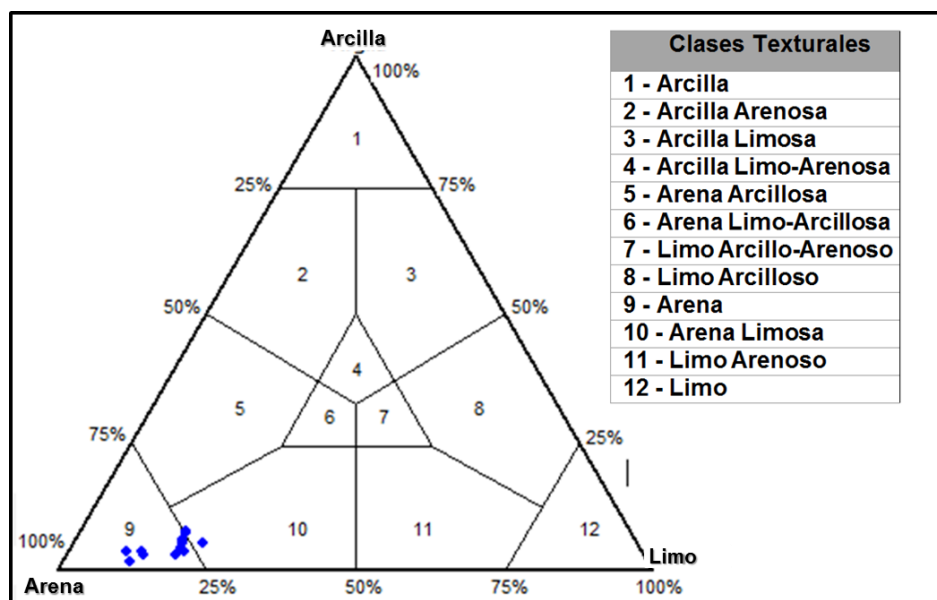


Figura 49.- Diagrama de Shepard para las localidades del valle de EVO, Ensenada, B.C.

VALLE DE MANEADERO

Del total de 12 suelos muestreados en EVM, 2 poseen texturas arenosas de RALA y CP, 2 arenosas-limosas de CP y de RALA y las 4 muestras restantes pertenecen a la localidad PA96 encerradas en un óvalo rojo (Figura 50), las cuales se sesgan hacia contenidos altos de limo (54 a 63 %), arenas (22 35 %) y arcillas (11 a 15 %), lo cual las clasifica como limo-arenosas y limo arcillosas.

En el reporte de geoquímica de COTAS para EVM, se describe que los suelos en el acuífero de Maneadero son profundos con horizontes de textura areno francosa, franco arenosa, areno franco arcillo arenosa y franco limosa; predominando las dos primeras en los horizontes superiores y en algunos casos se encontró combinado con gravilla, grava, guijarros y rocas, (COTAS M., 2010). No se aclara con que metodología fueron analizadas. Estando de acuerdo con este estudio ya que predomina el suelo arenoso, independientemente de su otra fracción.

Esta localidad está situada sobre la planicie costera contigua a la laguna costera de Punta Banda donde se crean planicies arenosas y lodosas con marisma, de acuerdo al ritmo de las mareas, estas son identificadas como sedimentos de ambiente lagunar o estuarino a diferencia de las localidades CP y RALA las cuales se clasificarían como

sedimentos de ambiente de planicie deltáica (fluvial), esto como referencia del estudio de “Proyecto, C. E. A., y Técnico I.” (2003) donde separan estas dos unidades hidroestatigráficas para el cálculo de parámetros relacionados a la conductividad hidráulica del acuífero.

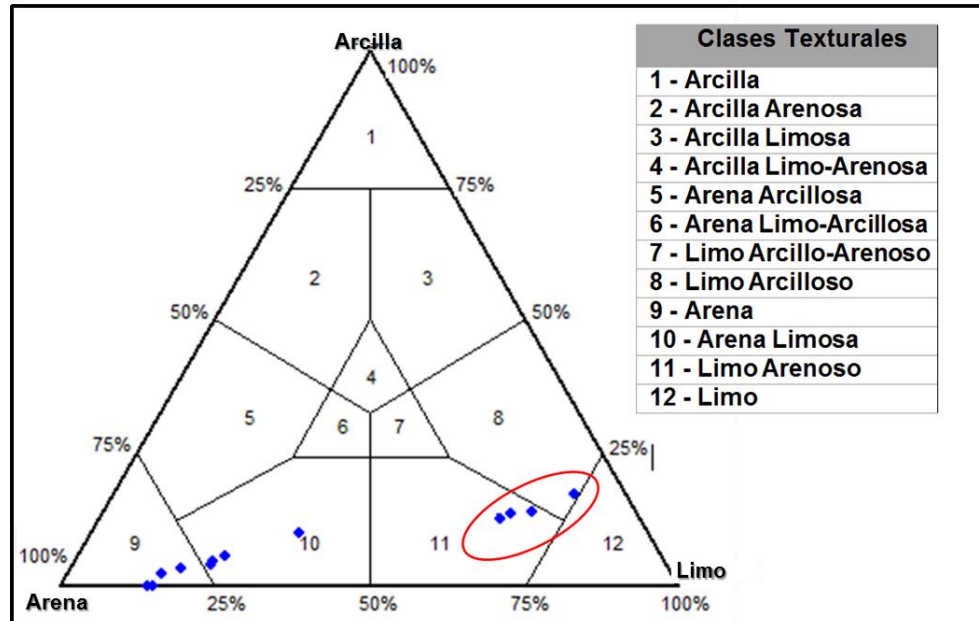


Figura 50.- Diagrama de Shepard para las localidades de EVM, Ensenada, B.C., los puntos encerrados en el óvalo, corresponden a las muestras de la localidad EVM-PA96.

CABORCA

Del total de 21 muestras de suelos pertenecientes al municipio de C, 6 se clasifican como arenas y las 15 restantes como arenas limosas (Figura 51), esto indica que la zona de estudio podría presentar homogeneidad de condiciones y procesos físicos de formación del suelo y/o de ambientes de deposición de sedimentos.

En los estudios realizados por (Vega et al., 2011; Ojeda De la Cruz, A. 1994) se plantea que las planicies costeras de Caborca están formadas por sedimentos arenosos que se depositaron en los periodos de erosión, rellenando las depresiones que se introducen al continente. Los sedimentos provienen de los ríos que escurren bajando hacia el Golfo de California. Estos suelos aluviales los forman depósitos no consolidados de gravas, arenas, limos y arcillas, que varían en composición y granulometría. Predominantemente presentan una variación lateral de facies existiendo

depósitos limo-arcillosos con poca grava y que lateralmente cambian a arenas, gravas y materiales limosos.

En general, la estructura física de los cauces fluviales dependen de la pendiente la cual disminuye con el gradiente fluvial; estos cauces se presentan normalmente en la cabecera (origen de los escurrimientos), pendientes mayores con tramos erosivos rectilíneos y cascadas y aguas abajo, al disminuir la pendiente de valle; se reduce la capacidad de arrastre de sedimentos, por lo que éstos se depositan y así el valle pasa a tener lechos arenosos o limosos (Elosegui, A., 2009).

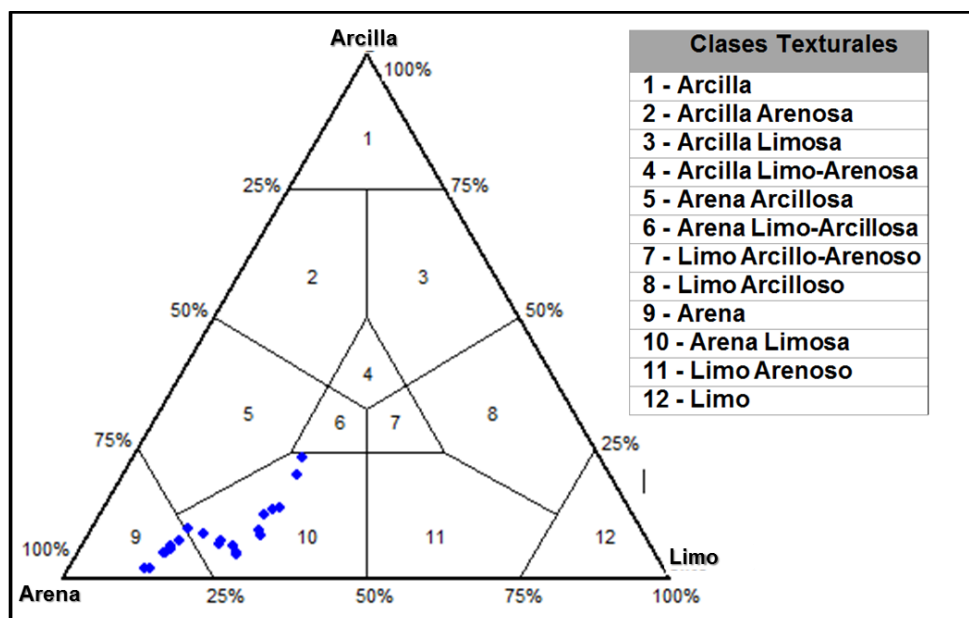


Figura 51.- Diagrama de Shepard para las localidades del municipio de Caborca Son.

Debido a que al etiquetar en los diagramas de Shepard cada uno de los puntos correspondientes a las muestras de suelo individuales, las claves se empalman y es difícil distinguirse, por esto fue necesaria la identificación por localidades y se resumen en la Tabla 13.

Tabla 13.- Resumen de las clasificaciones texturales obtenidas por el método de Bouyoucos, para cada una de las localidades muestreadas y su clasificación con el diagrama de Shepard.

LOCALIDAD	CLASIFICACIÓN TEXTURAL
EVG-DL	Arena
EVG-CE	Arena Limosa
EVG-MG	Arena Limosa
EVG-RC	Arena Limosa
EVO-RT	Arena Limosa
EVO-RBV	Arena
EVO-RLP	Arena
EVM-PA96	Limo Arcilloso y Limo Arenoso
EVM-CP	Arena y Arena Limosa
EVM-RALA	Arena y Arena Limosa
C-TO	Arena Limosa
C-SE	Arena y Arena Limosa
C-JE	Arena y Arena Limosa
C-ME	Arena Limosa
C-DE	Arena y Arena Limosa

4.5.3 Mineralogía

En la Figura 52 se muestran las fotografías representativas a cada localidad muestreada, tomadas en el microscopio estereoscópico. Para observar a detalle las fotografías de todas las muestras, ver el apéndice E, donde se muestran las fotografías en mayor tamaño de todas las muestras de suelo.

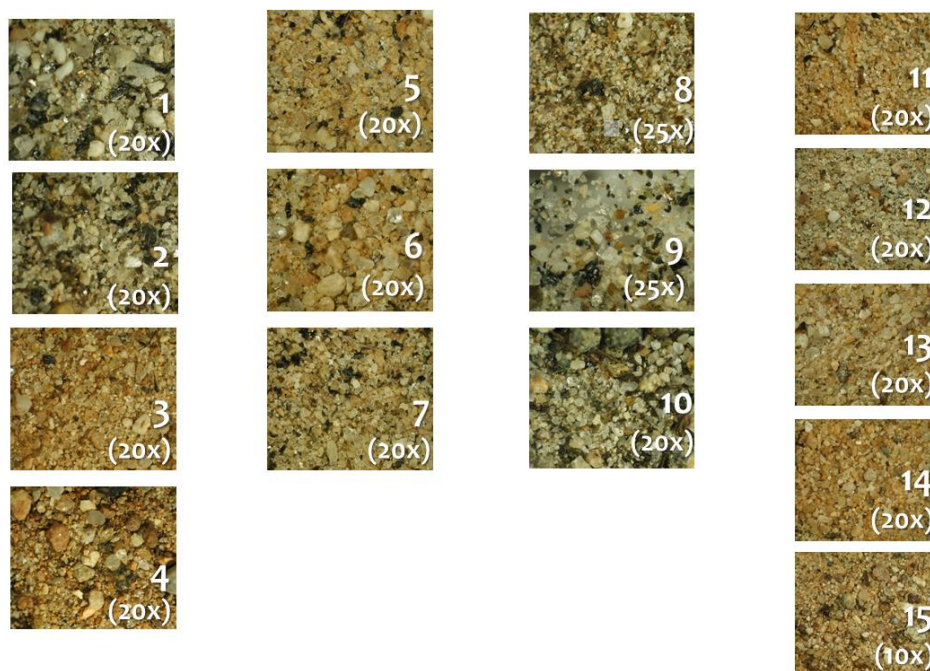


Figura 52.- Fotografías en aumento 10x, 20x y 25x de las muestras de arenas representativas de cada localidad muestreada (columna # FOTO de la Tabla 14).

De acuerdo a la descripción proporcionada para cada fracción arenosa de las muestras de suelo, se obtuvieron las denominaciones cualitativas del tipo de muestra, y se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14.- Mineralogía cualitativa de la fracción arenosa de las muestras de suelo.

LOCALIDAD	DENOMINACIÓN CUALITATIVA	# FOTO
EVG-DL	Arena cuarzo feldespática abundante en micas	1
EVG-CE	Arena cuarzo feldespática abundante en micas	2
EVG-MG	Arena cuarzo feldespática rojiza	3
EVG-RC	Arena cuarzo feldespática rojiza	4
EVO-RT	Arena cuarzo feldespática ligeramente rojiza	5
EVO-RBV	Arena cuarzo feldespática blanco-amarillo	6
EVO-RLP	Arena cuarzo feldespática blanco-amarillo	7
EVM-PA96	Arena cuarzo feldespática abundante en micas	8
EVM-CP	Arena cuarzo feldespática abundantes minerales densos	9
EVM-RALA	Arena cuarzo feldespática abundante en líticos	10
C-TO	Arena cuarzo feldespática beige	11
C-SE	Arena cuarzo feldespática beige	12
C-JE	Arena cuarzo feldespática beige	13
C-ME	Arena cuarzo feldespática	14
C-DE	Arena cuarzo feldespática abundante en líticos	15

Los resultados indican que las muestras pertenecen a la desintegración de rocas ígneas en su mayoría graníticas, por su alto contenido de cuarzo y feldespato y menor cantidad de biotita y hornblenda.

Las rocas graníticas son compuestas fundamentalmente por 70 % de silicatos de colores claros: cuarzo y feldespatos, y un 10 % de silicatos oscuros: biotita (micas) y anfíboles. La meteorización química de los silicatos produce a menudo: (1) productos solubles que contienen iones sodio, calcio, potasio y magnesio, y sílice en solución (2) óxidos de hierro insolubles y (3) minerales de arcilla (Tarbuck y Lutgens, 2005).

De lo anterior se deduce la posibilidad de que el origen de las sales presentes en el agua de riego y muestras de suelo de ambos municipios, sean resultado de la meteorización de estos silicatos que componen la roca madre subyacente de los suelos.

4.5.4 Parámetros fisicoquímicos

Los resultados de los análisis realizados se organizaron como base de datos en tablas de Excel para su posterior visualización en gráficas. En la Tabla 15, se presentan los valores de porcentaje de materia orgánica del suelo (M.O.) por el método de Walkley & Black y CEr (mS/cm), SDT (ppm), pH y Eh (mV) de los extractos de suelo. Se muestran los valores máximos y mínimos por región para Ensenada (EVG, EVO Y EVM) y para Caborca, en los cuales para fines de cálculo, no se consideraron los valores de los puntos de control, debido a que sus valores no representan las mismas condiciones que las muestras de los suelos de cultivo.

Tabla 15.- Valores de los análisis fisicoquímicos de las muestras de suelo.

MUESTRA	% MO W&B	EXTRACTO DE SUELO				Clasificación	
		CEr (mS/cm)	SDT (ppm)	pH	Eh (mV)	US Salinity Lab.	Soil Sc. Soc. Am.
EVG-DL-1	1.4	3	1455	7.2	182	normal	salino
EVG-DL-2	2.1	10	4922	7	188	salino	salino
EVG-DL-3	1.5	2.6	1275	7.4	184	normal	salino
EVG-DL-PC	0.9	0.4	216	6.9	186	normal	normal
EVG-CE-1	2.7	7.5	3677	7.6	189	salino	salino
EVG-CE-PC	1.7	1.5	754	7.6	171	normal	normal
EVG-RC-1	1.7	18.1	8865	7.6	156	salino	salino
EVG-RC-2	2.1	24.4	11973	7.2	190	salino	salino
EVG-RC-PC	3.3	2	1004	7.8	143	normal	normal
EVG-MG-1	2.3	4.8	2374	6.4	191	salino	salino
EVG-MG-2	2.6	9.9	4820	7.1	172	salino	salino
EVG-MG-3	1.6	4.7	2291	7.3	157	salino	salino
EVG-MG-PC	2.4	1.6	779	6.5	188	normal	normal
Máximo	2.7	24.4	11973	7.6	191		
Mínimo	1.4	2.6	1275	6.4	156		
EVO-RBV-1	0.9	2.7	1346	6.8	189	normal	salino
EVO-RBV-2	0.8	1.7	844	7.4	173	normal	normal
EVO-RBV-3	0.7	1.7	828	7.6	167	normal	normal
EVO-RBV-PC	0.9	0.7	356	7.3	177	normal	Normal
EVO-RT-1	0.8	3.8	1856	7.6	155	normal	Salino
EVO-RT-2	1.1	3.8	1884	7.4	167	normal	Salino
EVO-RT-3	1	8.7	4249	7.1	162	salino	Salino
EVO-RT-PC	1.8	2.3	1127	6.9	179	normal	Salino
EVO-RLP-1	1.1	1.5	726	7.8	169	normal	Normal

EVO-RLP-2	1.2	1.1	519	7.9	165	normal	Normal
EVO-RLP-3	0.6	3.1	1497	7.4	168	normal	salino
EVO-RLP-PC	1.2	2.4	1157	7.4	187	normal	salino
Máximo	1.2	8.7	4249	7.9	189		
Mínimo	0.6	1.1	519	6.8	155		
EVM-PA96-1	0.8	29.9	14674	7.4	180	salino	salino
EVM-PA96-2	2.9	31	15181	7.4	184	salino	salino
EVM-PA96-3	4.6	17.4	8542	7.6	185	salino	salino
EVM-PA96-PC	1.4	32.7	16015	7.4	182	salino	salino
EVM-CP-1	0.9	5.4	2649	7.5	168	salino	salino
EVM-CP-2	0.6	4.6	2260	7.1	171	salino	salino
EVM-CP-3	0.7	5.2	2570	7.1	173	salino	salino
EVM-CP-PC	1	1.1	521	6.9	180	normal	normal
EVM-RALA-1	2.2	9.2	4485	7.8	156	salino	salino
EVM-RALA-2	4.2	12.2	5968	7.4	155	salino	salino
EVM-RALA-3	1.3	17.2	8425	7.5	157	salino	salino
EVM-RALA-PC	0.3	0.8	381	7.8	153	normal	normal
Máximo	4.6	31	15181	7.8	185		
Mínimo	0.6	4.6	2260	7.1	155		
C-ME-1	0.9	1.8	890	8.3	162	normal	salino
C-ME-2	1	2.5	1205	7.6	169	normal	salino
C-ME-3	0.7	2.6	1266	7.8	167	normal	salino
C-ME-PC	0.3	0.4	179	7.5	185	normal	normal
C-DE-1	0.8	9.4	4597	7.5	196	salino	salino
C-DE-2	1.6	9.2	4523	7.5	169	salino	salino
C-DE-3	2	1.7	857	7.6	175	normal	salino
C-DE-4	1.7	1.6	807	7.3	219	normal	salino
C-DE-PC	1.1	3.3	1616	7.7	187	normal	salino
C-TO-1	2.6	6	2920	7.4	179	salino	salino
C-TO-2	1.2	3.4	1685	7.7	166	normal	salino
C-TO-3	1	5.5	2709	7.4	174	salino	salino
C-TO-PC	1.1	1.6	777	7.5	174	normal	normal
C-SE-1	1.4	27.1	13290	7.4	192	salino	salino
C-SE-2	1.2	5.5	2687	8.1	171	salino	salino
C-SE-3	0.6	6.2	3016	7.5	179	salino	salino
C-SE-PC	0	11.6	5681	7.4	203	salino	salino
C-JE-1	0.7	1	503	8.6	161	normal	normal
C-JE-2	0.9	1.6	784	7.7	176	normal	normal
C-JE-3	0.6	7.7	3770	7.3	186	salino	salino
C-JE-PC	0.3	3	1458	7.9	194	normal	salino
Máximo	2.6	27.1	13290	8.6	219		
Mínimo	0.6	1	503	7.3	161		

Contenido de materia orgánica del suelo (M.O.)

Para el contenido de M.O. se observan valores en porcentaje máximo y mínimo por región: (1.4 a 2.7 %) en EVG, (0.6 a 1.2 %) en EVO, (0.6 a 4.6 %) en EVM y para las localidades del municipio de Caborca (0.6 a 2.6 %)

En general se observan contenidos promedio de M.O. no mayores al 2.7 % y mínimo de 0.3 % en casi todas las localidades, lo cual confirma los valores esperados menores al 3.5 % de contenido de M.O. para los suelos de la región noroeste y similares a los reportados por la SAGARPA en el 2012 para los suelos de Sonora con un contenido de materia orgánica promedio de 1 % y alcanza valores medios de 2.7 %.

Y en contraste la muestra en EM-PA96-3 con un 4.6 % de M.O., lo cual puede ser debido a que los suelos que contienen cantidades considerables de Cl^- resulta aparentemente con mayores cantidades de M.O., esto es frecuente en suelos de litoral (Sistema de Información Agrícola Nacional (SIAN), s.f), lo cual es el caso de esta localidad.

Debido a que la mineralogía de las muestras de suelo, demostró que no son de origen volcánico extrusivo, se utilizó la clasificación de suelos no volcánicos de la Tabla 16.

Con base a su contenido de materia orgánica, las muestras se catalogan en las clases muy bajo a medio y solo para el caso de PA96-3 como alto.

Tabla 16.- Clasificación de suelos según la presencia del % de materia orgánica.

Clase	Materia orgánica (%)	
	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
Muy bajo	< 4.0	< 0.5
Bajo	4.1 - 6.0	0.6 - 1.5
Medio	6.1 - 10.9	1.6 - 3.5
Alto	11.0 - 16.0	3.6 - 6.0
Muy Alto	> 16.1	> 6.0

Salinidad en base a la conductividad eléctrica (mS/cm) del extracto de suelo (CEr)

Con base a los valores propuestos por la Soils Science Society of America (1987) presentados en la Tabla 2 de la sección 2.4.3.3, donde < 2 mS/cm representa suelos no salinos y >2 mS/cm corresponden a suelos salinos, clasificamos los resultados de la CEr de los extractos de suelo de la tabla 15:

Los suelos de cultivo en EVG y EVM se clasifican como salinos y sus puntos de control (PC) como no salinos, excepto para la localidad de EVM-PA96 donde el PC también resultó salinizado. En el caso de los suelos de EVO, tenemos que la localidad RBV presenta suelos no salinos excepto el punto RBV-1, en RT todos los puntos de muestreo incluyendo el PC son salinos y para la localidad RLP las muestras 1 y 2 son no salinas, la 3 y el PC son salinas.

En Caborca los suelos de cultivo de las localidades de ME y TO son salinos y sus puntos de control (PC) no salinos, mientras que todos las de SE y DE son salinos incluyendo los PC, para JE los puntos 1 y 2 son no salinos, la muestra 3 y PC son salinas.

Conductividad eléctrica del agua y su relación con la CEr del suelo

En la Figura 53 se muestran los valores de las CE (mS/cm) para las muestras de agua de riego y las del extracto del suelo. En esta gráfica se nota un comportamiento similar en donde a mayor conductividad en el agua, mayor conductividad en el suelo para todas las localidades del municipio de Ensenada, en cuanto a las localidades de Caborca no se aprecia dicha relación, ya que los sitios C-DE y C-SE tienen una conductividad alta en el suelo (en comparación a las otras muestras del municipio), pero en el agua no se aprecia este aumento.

En esta (Figura 53) también se puede observar que Ojos Negros es la región con menor conductividad tanto en el agua como en el suelo, en contraste, Maneadero es la región con más alta conductividad en el agua y el suelo y con un comportamiento muy

similar (a mayor CE en el agua, mayor CE en el suelo). En el caso del Valle de Guadalupe también se ve una relación entre la CE del agua y la CE del suelo.

Cabe destacar que la mayoría de las muestras tomadas en los puntos de control presentaron CE más baja que las muestras dentro de los cultivos, excepto la EM-PA96 y la C-SE; que son muestras que se localizan cerca de la costa y que podrían estar influenciadas por el agua del mar.

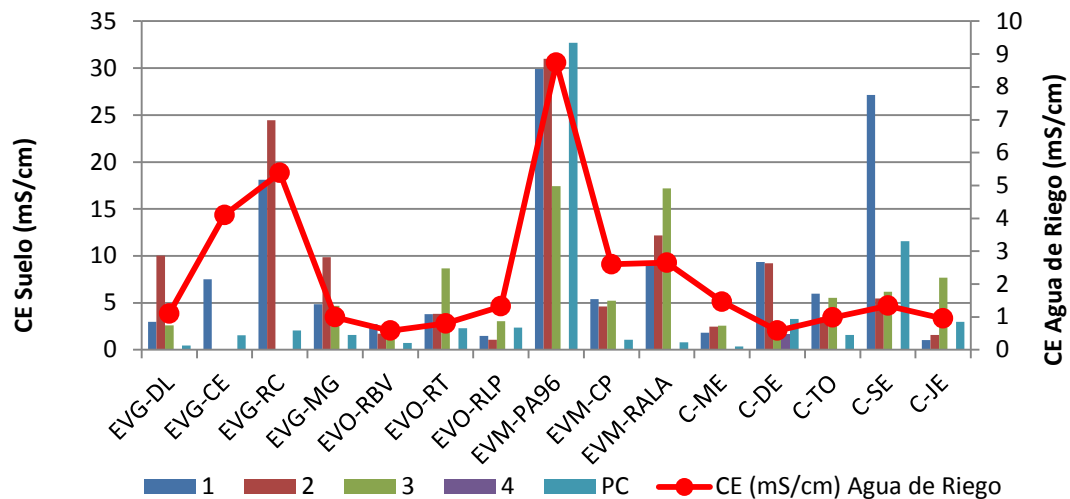


Figura 53.- Relación entre la CE (mS/cm) del extracto de suelo de muestras de cada localidad (1, 2, 3, 4 y PC representadas por las barras de colores) y la CE (mS/cm) del agua de riego de las localidades muestreadas (representadas por la línea roja).

Relación de la textura y la conductividad eléctrica (mS/cm)

En la Figura 54, se muestra la relación entre la CE del suelo medida en el extracto y el cociente que relaciona las proporciones del material más fino (limos y arcillas), con las del material más grueso (arenas). Se observa que a medida que la textura del suelo se vuelve más fina, la CE del suelo aumenta, y viceversa, este comportamiento puede explicarse debido a que los suelos gruesos permiten una mayor lixiviación de las sales y una baja acumulación (Aragües et al., 2011).

En esta gráfica (Figura 54) también se puede observar que las localidades con mayor cantidad de finos en el suelo son EVM-PA 96 < C-SE < EVG-RC, que corresponden a las que tienen mayor CE. Excepto EVM-RALA, que presenta CE alta

con baja cantidad de limos y arcillas. Las localidades de Ojos Negros tienen mayor cantidad de arenas con textura gruesa y la CE es más baja para esta zona.

Recordando que EVG y EVO pertenecen a la misma cuenca hidrológica, donde EVO está localizada a una elevación mayor que EVG, por lo que el agua meteórica que se capta en EVO, se infiltra y corre hasta llegar a EVG. Y a lo largo de esta discusión, los resultados han mostrado que la calidad del agua de EVO es mejor que la de EVG, así como también la salinidad de los suelos es menor que la de EVG. En esta gráfica los suelos de EVO son más arenosos, lo que permite la lixiviación de las sales y en EVG, existen zonas en donde la cantidad de limos y arcillas aumenta, permitiendo la acumulación de sales. Así entonces, este es uno de los factores que podría estar ocasionando el aumento de la salinidad en EVG y a su vez, la baja salinidad de EVO.

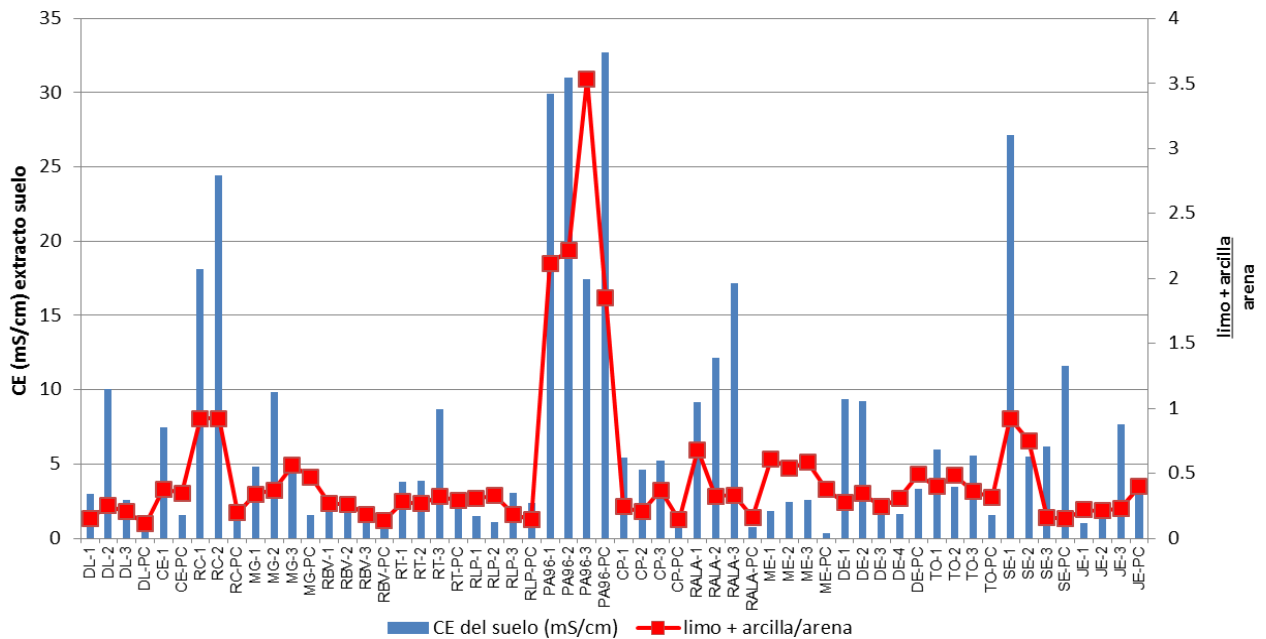


Figura 54.- Relación entre la CE (mS/cm) del extracto de suelo de cada muestra (representado por las barras azules, y su textura (representada por la línea roja).

4.6 Modelo de salinidad del suelo

A continuación se presentan los resultados del análisis de correlación mediante la regresión lineal para cada una de las 4 lecturas tomadas con el EM-38 (V_1 , $V_{0.5}$, H_1 y $H_{0.5}$), se muestran en la Tabla 17 los resultados individuales del análisis de correlación lineal para cada lectura.

Tabla 17.- Coeficientes de determinación (r^2) y de correlación del análisis de regresión lineal para las lecturas (V_1 , $V_{0.5}$, H_1 y $H_{0.5}$) de diferente área de influencia del EM-38.

LECTURA	ÁREA INFLUENCIA (m^2)	COEF. DE DETERMINACIÓN (r^2)	COEF. DE CORRELACIÓN (r)
V_1	0.8	0.5383	0.7336
$V_{0.5}$	0.4	0.6964	0.8345
H_1	0.6	0.8504	0.9221
$H_{0.5}$	0.3	0.7748	0.8802

Se determinó que las lecturas del dipolo en horizontal con separación entre bobinas de 1 m y área de influencia de $0.6 m^2$ (H_1), tuvo el valor más alto para el coeficiente de correlación $r = 0.9221$ entre los 37 pares de datos de la CEr y la CEa (Tabla 18) del análisis de correlación lineal de la (H_1) (Figura 55).

Este coeficiente de correlación de Pearson (r), informa del grado de relación entre dos variables. Si la relación es lineal r será 1 o -1. El coeficiente r será positivo si la relación es positiva (al aumentar x aumenta y), y r será negativo en el caso contrario (si al aumentar x, disminuye y). En general, valores (absolutos) de $r > 0.80$ se consideran altos, aunque esto depende del número de parejas de datos con las que se realice el cálculo y del nivel de certeza que se requiera (Sánchez, s.f.)-a.

Tabla 18.- Lecturas del dipolo H_1 = CEa de cada punto de muestreo y su equivalente CEr medida en el extracto de la pasta saturada. (/ = muestra nula).

Localidad	CEr (mS/cm)				CEa de H_1 (mS/cm)			
	1	2	3	PC	1	2	3	PC
EVG-DL	2.969	10.04	2.609	0.44	0.06	0	0	0
EVG-CE	7.5	/	/	1.538	0.43	/	/	0.37
EVG-MG	4.84	9.86	4.67	1.589	0.22	0.26	0.09	0.03
EVG-RC	18.12	24.44	/	2.048	0.64	0.59	/	0.2
EVO-RT	3.79	3.84	8.67	2.299	0.27	0.27	0.27	0.21
EVO-RBV	2.747	1.722	1.689	0.727	0.14	0.02	0.03	0.02
EVO-RLP	1.482	1.058	3.05	2.367	0.1	0.09	0.1	0.06
EVM-PA96	29.9	31	17.43	32.7	0.78	1.04	0.84	1.21
EVM-CP	5.41	4.61	5.24	1.064	0.13	0.09	0.09	0
EVM-RALA	9.15	12.17	17.18	0.78	0.33	0.32	0.33	0.03

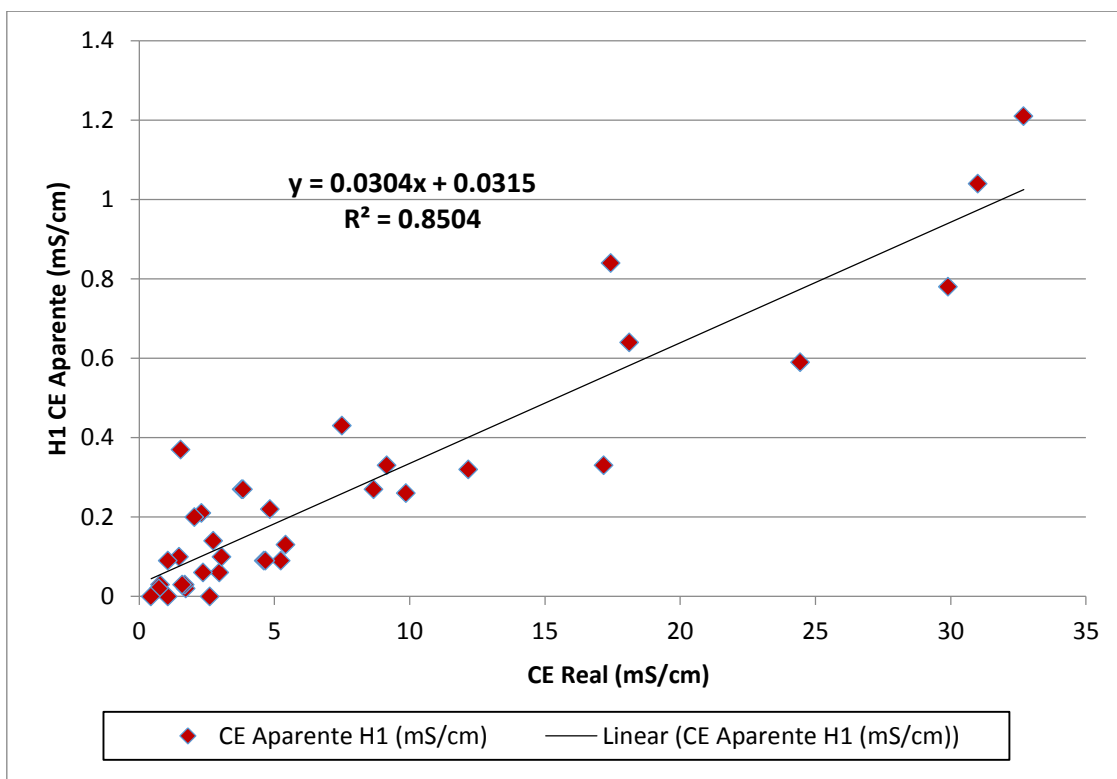


Figura 55.- Gráfica del análisis de regresión lineal para las mediciones de CE aparente del H₁ Vs la CE real del extracto de la pasta saturada.

De los pares de datos analizados (CEa y CEr), la ecuación que describe la recta de la gráfica es: $y = 0.0304x + 0.0315$

Por lo tanto, al despejar x de la ecuación, se puede calcular el valor de la CEr del punto muestreado, sin la necesidad de tomar la muestra de suelo y realizar el laborioso y costoso análisis de laboratorio, resultando: $x = (y - 0.0315) / 0.0304$

Aquí solo faltaría realizar la ecuación desarrollada para hacer la conversión de las unidades (mS/m) registradas por el EM-38 a unidades de mS/cm como lo mide el conductímetro; adaptar el aparato a una estructura que de la facilidad de transportar y registrar al mismo tiempo los valores de la CEa, pudiendo cubrir grandes áreas de cultivo, ya que está diseñado para tomar lecturas constantes. También se podría adaptar un GPS para ir registrando en tiempo real el geoposicionamiento de cada punto de lectura y obtener los datos para su mapeo. Empresas como Argongora en España, vende este servicio para el monitoreo de la salinidad en cultivos de la vid, el cual le permite al vitivinicultor la toma de decisión inmediata para la mitigación del proceso de

salinización de suelos. Es importante mencionar que este método debe considerar variables edáficas que generan variaciones en la conductividad; como puede ser la humedad ya que zonas secas y húmedas tienen diferencias texturales significativas.

Así mismo, la capacidad de intercambio catiónico: relacionado con porcentaje de arcilla y materia orgánica ya que se ha visto que con mayores porcentajes de arcilla y materia orgánica, la conductividad aumenta. Finalmente la profundidad del suelo, en caso de que la salinidad no esté en la superficie y el equipo no tenga el alcance de determinarla, puede generar errores de medición.

4.7 Tipos de suelo

Se identificaron las unidades de suelo a los que corresponden las localidades muestreadas (Figuras 56-59).

En la Figura 56 se observa que los suelos presentes en la región de EVG, están representados por REGOSOLS, y se encuentra rodeado por secciones de LITOSOLS y hacia la costa encontramos suelos tipo FEOZEM.

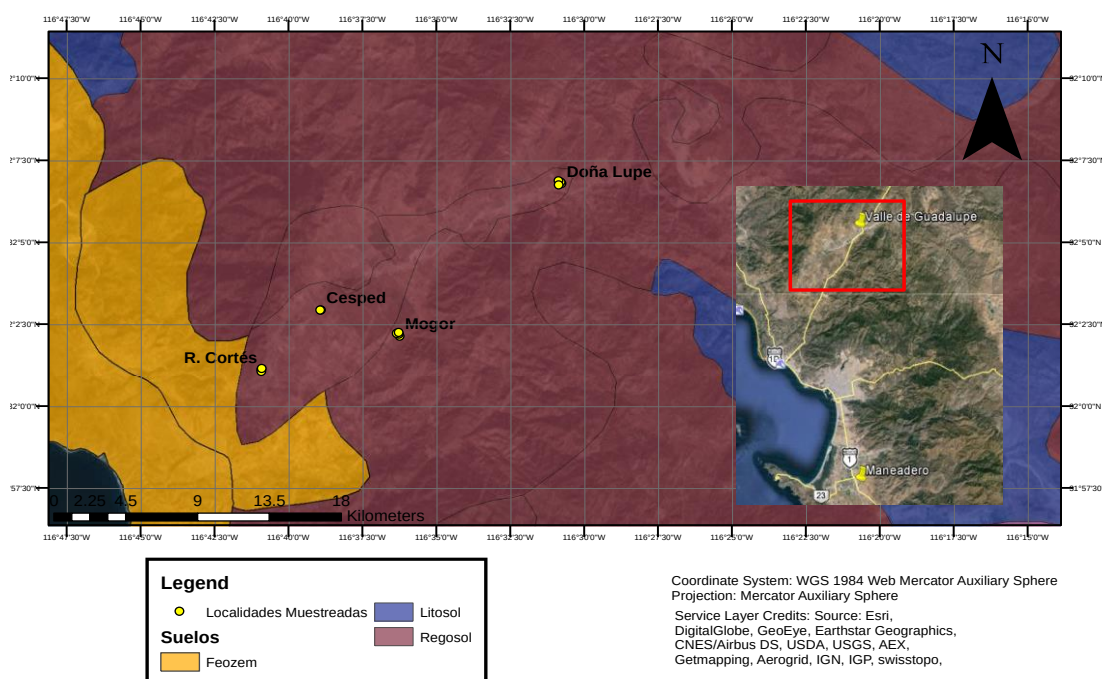


Figura 56.- Tipos de suelos en Guadalupe (EVG), localidades muestreadas representadas por puntos amarillos.

La Figura 57 muestra el mapa de suelos de la región de EVO, en él podemos ver que el suelo presente en las localidades de muestreo corresponde a XEROSOLES, y a su vez se encuentra rodeado de manera casi concéntrica de LITOSOLES y hacia afuera por REGOSOLES.

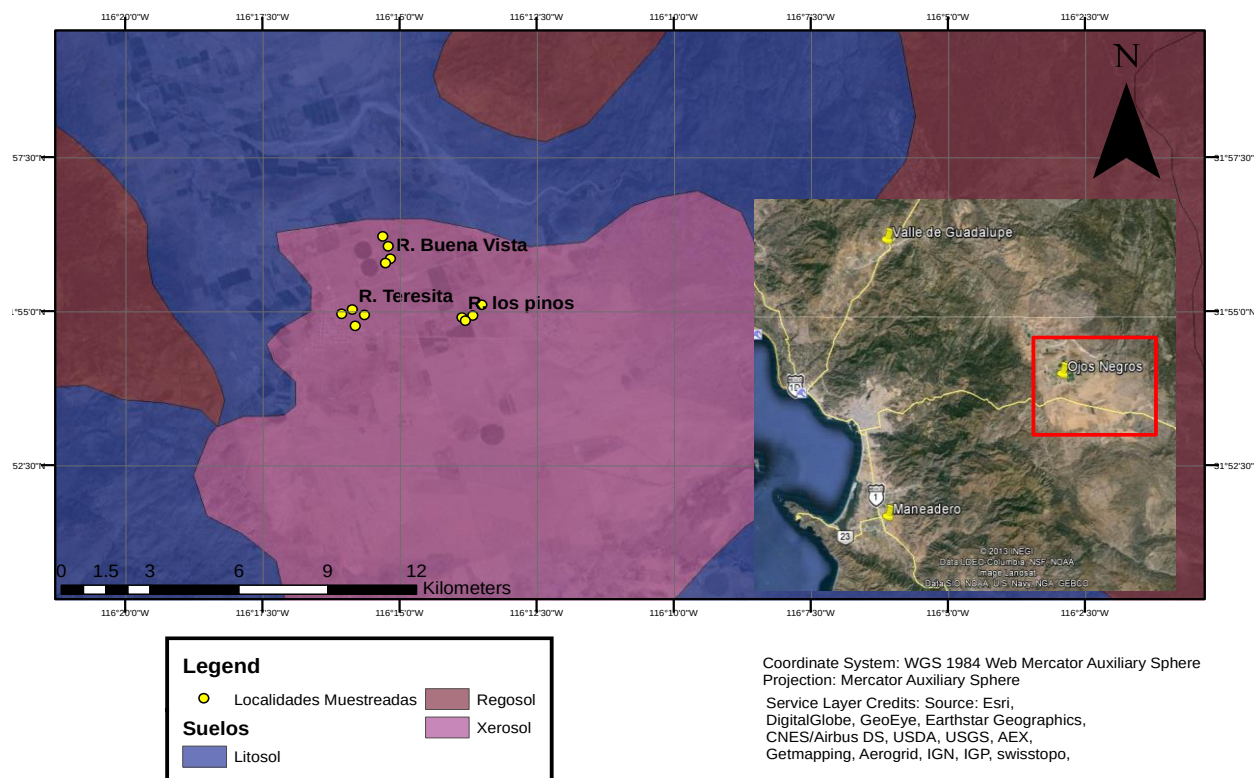


Figura 57.- Tipos de suelos presentes en Ojos Negros (EVO), localidades muestreadas representadas por puntos amarillos.

En la Figura 58 se presenta el mapa de suelos correspondientes a la región EVM cuyas localidades están representadas por REGOSOLES, en la escala a la que se muestra no se reconocen otros tipos de suelo cercanos.

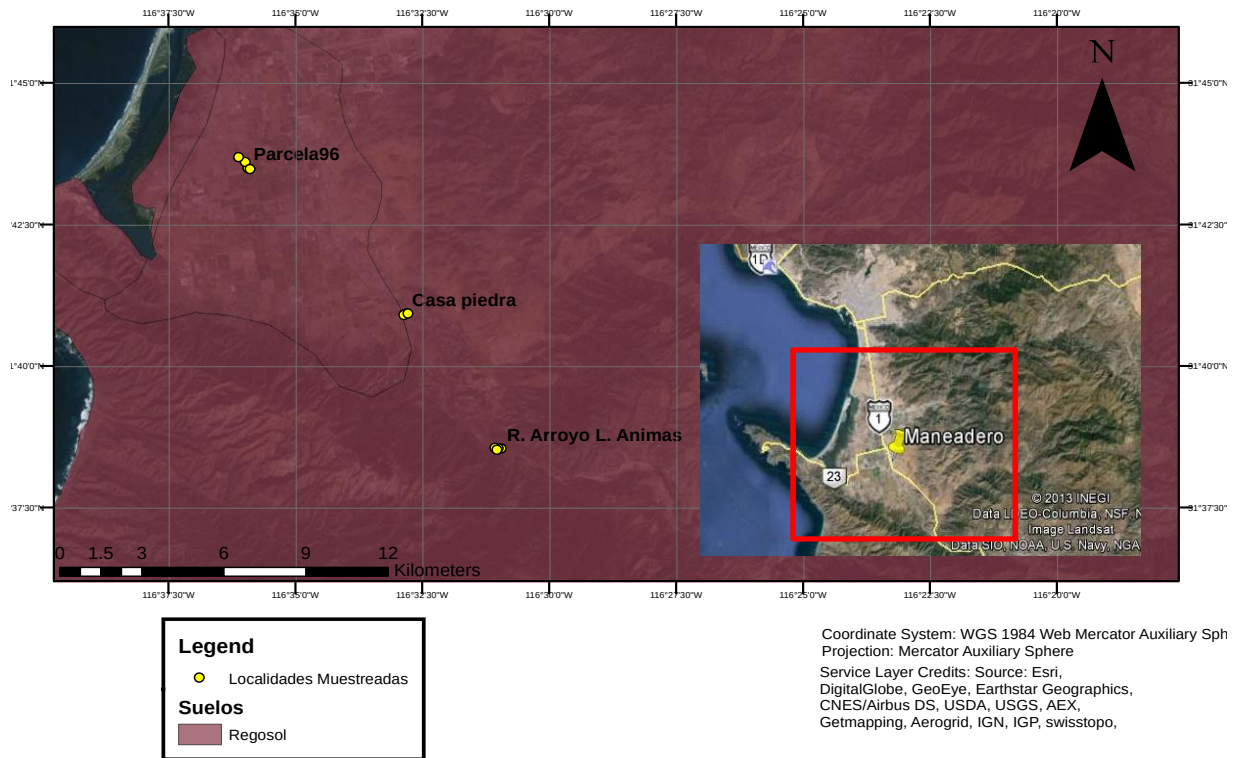


Figura 58.- Tipos de suelos presentes en Maneadero (EVM), localidades muestreadas representadas por puntos amarillos.

Los tipos de suelo para el municipio de Caborca, se visualizan en la Figura 59, la localidad de DE presenta suelo del tipo REGOSOL, mientras que las demás localidades se ubican dentro de suelos tipo YERMOSOL. Dentro del área cubierta por el mapa y a los alrededores de las localidades, podemos observar polígonos dispersos de FLUVISOLES, LITOSOLES Y XEROSOLES.

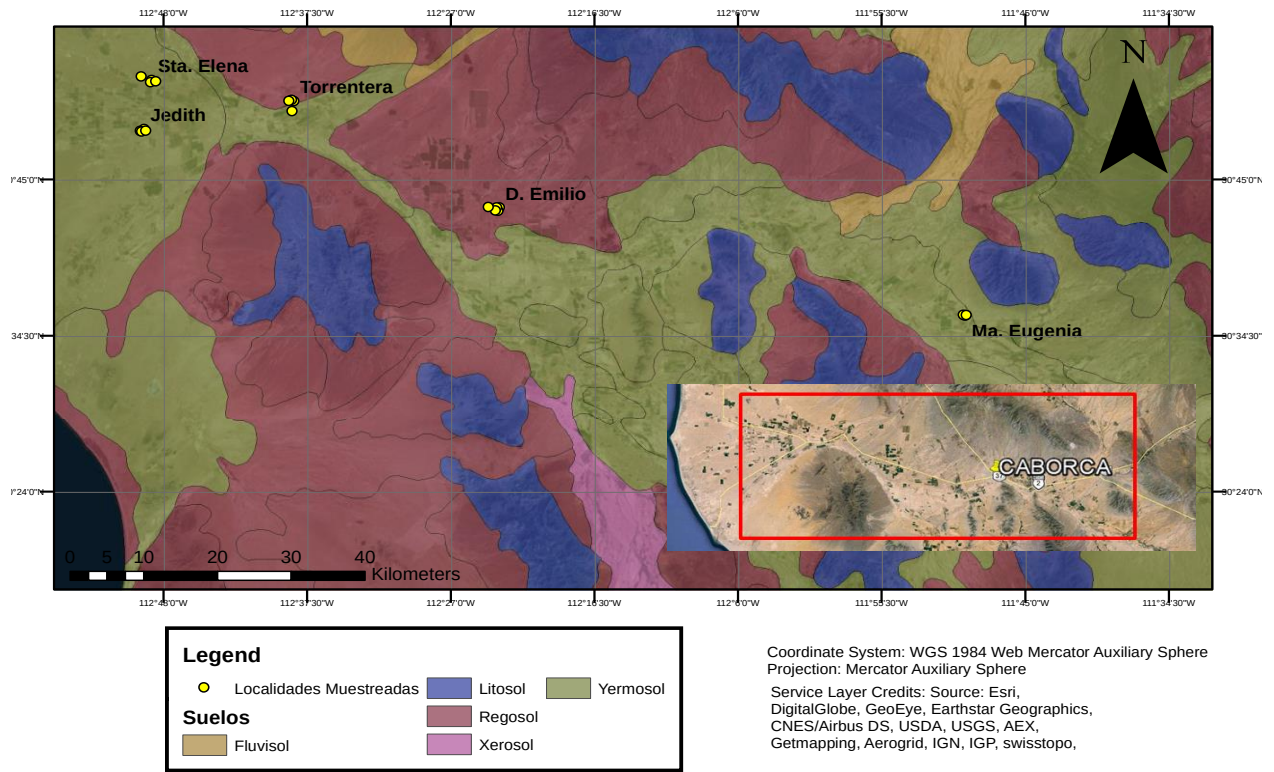


Figura 59.- Tipos de suelos presentes en Caborca (C), localidades muestreadas representadas por puntos amarillos.

La Tabla 19 presenta el resumen de tipos de suelo de cada localidad de interés.

Tabla 19.- Resumen de las unidades de suelo que presenta cada localidad de interés.

Localidad	Tipo de suelo
EVG-DL	REGOSOL
EVG-CE	REGOSOL
EVG-MG	REGOSOL
EVG-RC	REGOSOL
EVO-RT	XEROSOL
EVO-RBV	XEROSOL
EVO-RLP	XEROSOL
EVM-PA96	REGOSOL
EVM-CP	REGOSOL
EVM-RALA	REGOSOL
C-TO	YERMOSOL
C-SE	YERMOSOL
C-JE	YERMOSOL
C-ME	YERMOSOL
C-DE	REGOSOL

Las regiones del EVG, EVM y la localidad C-DE presentan regosoles, los cuales son suelos ubicados en muy diversos tipos de clima, vegetación y relieve. Tienen poco desarrollo y por ello no presentan capas muy diferenciadas entre sí. En general son claros o pobres en materia orgánica, se parecen bastante a la roca que les da origen. En México constituyen el segundo tipo de suelo más importante por su extensión (19.2%). Muchas veces están asociados con Litosoles y con afloramientos de roca o tepetate. Frecuentemente son someros, su fertilidad es variable y su productividad está condicionada a la profundidad y pedregosidad (INEGI. 2004).

Las localidades de EVO presentan suelos tipo xerosoles que se localizan en las zonas áridas y semiáridas del centro y norte de México. Su vegetación natural es de matorral y pastizal y son el tercer tipo de suelo más importante por su extensión en el país (9.5 %). Tienen por lo general una capa superficial de color claro por el bajo contenido de materia orgánica.

Debajo de esta capa puede haber un subsuelo rico en arcillas, o bien, muy semejante a la capa superficial; lo cual podría explicarse por la geomorfología de la zona donde la caída del bloque originó una fosa tectónica que se niveló debido a los intensos periodos de erosión y transporte de detritos derivados principalmente de rocas graníticas, y se encuentran empacados en una matriz de limos y arcillas heredadas.

Muchas veces presentan a cierta profundidad manchas, aglomeraciones de cal, cristales de yeso o caliche con algún grado de dureza. Su rendimiento agrícola está en función a la disponibilidad de agua para riego (INEGI, 2004; Cardoso et al, 2005).

En el municipio de C todas las localidades excepto C-DE presentan suelos del tipo yermosoles y se localizan en las zonas más áridas del norte del país como las llanuras Sonorenses. Ocupan el 3% del territorio nacional y su vegetación típica es el matorral o pastizal. En ocasiones presentan capas de cal, yeso y sales en la superficie o en alguna parte del subsuelo. La capa superficial de los Yermosoles es aún más pobre en humus y generalmente más clara que los Xerosoles. Su uso agrícola está restringido a las zonas donde se puede contar con agua de riego. Cuando existe este

recurso y buena tecnología los rendimientos esperados normalmente son muy altos (INEGI. 2004).

4.8 Resumen regional de los resultados y discusiones

ENSENADA

VALLE DE GUADALUPE

En el municipio de Ensenada, de acuerdo a la calidad del agua de riego en la región del **Valle de Guadalupe (EVG)** las localidades CE y RC son las que muestran un muy alto riesgo de salinidad del suelo, rebasando además los límites para cloruros, sulfatos, Ca, Mg, Na y K, establecidos por la NOM-127-SSA1-1994. Los diagramas de Stiff y de Piper revelan que las aguas de estas localidades son cloruradas sódicas. Con respecto a la relación de adsorción del sodio, son las de peor calidad al estar fuera de los límites del diagrama y no pueden clasificarse. De acuerdo a la clasificación de Wilcox, al estar fuera de los límites del diagrama, no pueden clasificarse. La textura de los suelos de estas localidades es areno-limosa. Mineralógicamente CE es arena cuarzo feldespática abundante en micas y RC es arena cuarzo feldespática rojiza. Según la clasificación de la Sociedad de Ciencias del Suelo de los EUA, los suelos de estas dos localidades son salinos, que coincide con todo lo que indicó el análisis de las aguas de riego. Las localidades DL y MG tienen un bajo riesgo o no exhiben ningún riesgo de salinización, respectivamente. La localidad MG, rebasa los límites permisibles de fluoruros indicados en la NOM-127-SSA1-1994, mientras que DL no rebasa ningún parámetro. Los diagramas de Stiff y de Piper revelan que las aguas de estas localidades son cloruradas cálcicas. Ambas tienen una la relación de adsorción del sodio del tipo C3-S1 altas en salinidad y bajas en sodio. De acuerdo a la clasificación de Wilcox, tienen calidades buenas a admisibles para el riego. La textura de los suelos de la localidad DL es arenosa y de MG es areno-limosa. Mineralógicamente DL es arena cuarzo feldespática abundante en micas y MG es arena cuarzo feldespática rojiza. Según la clasificación de la Sociedad de Ciencias del Suelo de los EUA, los suelos de estas dos localidades son salinos aunque el agua presente buena calidad y bajo riesgo de salinización.

VALLE DE OJOS NEGROS

En el municipio de Ensenada, de acuerdo a la calidad del agua de riego en la región de **Ojos Negros (EVO)** el único sitio que indica un bajo riesgo de salinización de los suelos es RLP, el resto se muestra sin ningún riesgo. Ningún ion rebasó los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-1994, aunque en RLP las concentraciones de bromuro fueron significativas, atribuido a la quema del cultivo 2 meses antes. El diagrama de Stiff clasifica las aguas como cloruradas sódicas y en la localidad RLP como carbonatada cálcica. Con el diagrama de Piper se identifican como cloruradas cálcicas. Con respecto a la relación de adsorción del sodio, la localidad RVB es del tipo C2-S1 que son aguas de salinidad media y bajas en sodio. Las localidades RLP y RT son del tipo C3-S1 altas en salinidad y bajas en sodio. Acorde a la clasificación de Wilcox, el agua es excelente a buena calidad para el riego. La textura de los suelos es arenosa para RBV y RLP con mineralogía arena cuarzo feldespática blanco-amarillo y para RT es areno-limosa y de arena cuarzo feldespática ligeramente rojiza. Según la clasificación de la Sociedad de Ciencias del Suelo de los EUA, los suelos de RVB y RLP son generalmente normales y los de RT son salinos. La salinidad del suelo de la localidad RT se atribuye principalmente al tipo de suelo que es areno-limoso lo cual promueve un bajo drenaje en el suelo y por ende, la acumulación de las sales. Ya que las aguas son de buena calidad y bajas en sodio y además de ser la única variable que es diferente a las demás.

VALLE DE MANEADERO

En el municipio de Ensenada, de acuerdo a la calidad del agua de riego en la región de **Maneadero (EVM)** las localidades de CP y RALA muestran un alto riesgo de salinidad y para PA96 existe un muy alto riesgo de salinización del suelo. Las tres localidades muestreadas, rebasaron los límites establecidos para fluoruros, cloruros, Ca, Mg, Na y K por la NOM-127-SSA1-1994. La localidad PA96 además de los anteriores, también rebasa los límites establecidos para sulfatos. El diagrama de Stiff clasifica las aguas de RALA y CP como cloruradas sódicas y de PA96 como cloruradas altas en Na, Ca y Mg, atribuido a su cercanía con la costa. Con el diagrama de Piper todas se identifican como cloruradas cálcicas y magnésicas. Con respecto a la relación de adsorción del sodio, las localidades RALA y CP son del tipo C4-S2 que son aguas

de salinidad muy alta y contenido medio de sodio. Y la localidad PA96 cae fuera de los límites del diagrama y no puede clasificarse. Conforme a la clasificación de Wilcox, el agua para RALA y CP es dudosa a no válida para riego, mientras que para PA96 está fuera de los límites del diagrama y no puede clasificarse. La textura de los suelos es arenosa y arena-limosa para RALA y CP con mineralogía: arena cuarzo feldespática abundante en líticos y minerales densos. Para PA96 la textura es limo-arenosas y arcillosa de mineralogía: arena cuarzo feldespática abundante en micas. Según la clasificación de la Sociedad de Ciencias del Suelo de los EUA, todos los suelos de cultivo de la región EVM son salinos, mientras el suelo de los puntos de control de RALA y CP son normales en contraste al del PA96 que es salino.

La salinidad del suelo de cultivo de éstas localidades se atribuye a la suma de dos factores: Las aguas de riego que son de baja calidad y la clasificación textural del suelo que es areno-limoso en RALA y CP y limo-arcilloso para PA96 y su PC limo-arenoso, lo cual causa un drenaje deficiente en el suelo y por ende, la acumulación de las sales.

CABORCA

En el municipio de **Caborca (C)** de acuerdo a la calidad del agua de riego solo las localidades de ME y SE presentan un bajo riesgo de salinidad y el resto no tienen riesgo de salinización. En cuanto a los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-1994, solo la localidad SE reveló valores por encima del límite para el anión cloruro, mientras que los demás iones evaluados se mantuvieron en los valores permisibles. El diagrama de Stiff clasifica las aguas de ME cloruro-sulfatada sódico-cálcica, DE bicarbonatada-sódica, SE, TO y JE cloruro sódicas. Con el diagrama de Piper las localidades DE, TO y SE son cloruradas sódicas y para ME y JE aguas cloruradas cálcicas. Con respecto a la relación de adsorción del sodio, las localidades ME, TO, JE Y SE, están en la clasificación **C3-S1** que son altas en salinidad y bajo contenido de sodio; mientras que la localidad DE presenta del tipo C2-S1 de salinidad media y baja en sodio. Para la clasificación de Wilcox, el agua de las localidades ME, JE y SE tienen calidades buenas a admisibles en cuanto a DE y TO presentan calidad admisible a dudosa.

La textura de los suelos es arenosa y arena-limosa para SE, JE y DE con mineralogía: arena cuarzo feldespática color beige y DE con abundancia en líticos,

mientras que las localidades TO y ME presentan solo textura areno-limosa y de mineralogía: arena cuarzo feldespática. Según la clasificación de la Sociedad de Ciencias del Suelo de los EUA, los suelos de cultivo de las localidades ME, DE, TO y SE son salinos, mientras que JE generalmente son normales.

Las localidades JE y SE se encuentran a la misma distancia de la costa, se esperaba que las condiciones fueran similares; sin embargo, los resultados muestran diferencias en cuanto a la CE del suelo teniendo que SE es salino y JE es normal, esto puede deberse a las prácticas de cultivo ya que con las variables analizadas en este estudio no se ve una correlación directa entre la calidad del agua de riego y la salinización del suelo.

El contenido de materia orgánica en los suelos de cultivo del municipio de Ensenada oscila entre 0.6 y 4.6 % y para Caborca entre 0.6 y 2.6 %.

La mayoría de las muestras tomadas en los puntos de control presentaron CE más baja que las muestras dentro de los cultivos, excepto la EVM-PA96 y la C-SE; que son muestras que se localizan cerca de la costa y que podrían estar influenciadas por el agua del mar.

Las regiones EVG, EVM y la localidad C-DE son suelos de tipo regosol, que normalmente se ubican en diversos tipos de climas, vegetación y relieve. La región de EVO presenta suelos tipo xerosol, que se localizan en las zonas áridas y semiáridas del centro y norte de México. En el municipio de C todas las localidades excepto C-DE presentan suelos del tipo yermosol, que regularmente pertenecen a zonas más áridas del norte del país como las llanuras Sonorenses.

Capítulo 5 Conclusiones

El monitoreo exclusivo de la calidad del agua no es el único factor a tomar en consideración como indicador de riesgo de salinización del suelo. Ya que la salinización es un proceso complejo, que debe ser evaluado de forma periódica con métodos económicos y prácticos para toda el área de cultivo, con el objeto de proponer medidas de mitigación y de un adecuado manejo del recurso hídrico.

La localidad que reúne más factores que son causa de salinización de suelos es la parcela 96 del Valle de Maneadero, Ensenada, como son: cercanía con la costa, terreno relicto de planicies de marea, sobreexplotación de acuífero, suelos con textura fina, agua de riego con alto riesgo de salinización y sodicidad.

La localidad del Mogor en el Valle de Guadalupe, Ensenada, tiene una calidad de agua de riego muy buena, sin embargo, el suelo se cataloga como salino de acuerdo a la conductividad eléctrica, esto se debe principalmente a la falta de drenaje del suelo debido a su textura.

La mayoría de las muestras de suelo tienen texturas arenosas y areno limosas de clasificación mineralógica cuarzo-feldespática, lo que permite una mayor lixiviación de las sales y su baja acumulación. Existe una relación directamente proporcional entre la textura de suelo y la conductividad eléctrica del extracto de suelo. Mientras más fina es la textura del suelo, mayor la conductividad eléctrica y viceversa.

Las aguas de riego de las localidades Césped y Rancho Cortés del Valle de Guadalupe, Ensenada y todas las del Valle de Maneadero, Ensenada; exceden los límites máximos de concentración de iones permisibles de la NOM-127-SSA-1994. Asociado al proceso de salinización en niveles someros del acuífero.

De acuerdo a la calidad del agua de riego, todas las localidades estudiadas en este trabajo, presentan un potencial riesgo de salinización del suelo, excepto las del Valle de Ojos Negros, Ensenada, B.C. y las de Caborca, Sonora, debido a que son aguas de reciente infiltración.

En general las muestras de suelo en los puntos de control, presentaron conductividades eléctricas más bajas que los suelos de cultivo, indicando un impacto antropogénico en estos últimos.

La ecuación que resulta del algoritmo que relaciona la conductividad eléctrica real con la aparente de las regiones de Ensenada es: $y = 0.0304x + 0.0315$ con el valor más alto para el coeficiente de correlación $r = 0.9221$ de la lectura del dipolo en horizontal con separación entre bobinas de 1 m y área de influencia de 0.6 m^2 (H_1). Subsecuentemente, la aplicación del algoritmo para obtener valores de conductividad real, promoverán un monitoreo *in situ* y en tiempo real de las condiciones de salinidad de los suelos de cultivo. Siendo esta metodología más económica y práctica.

Los tipos de suelos de las zonas de estudio son característicos de las zonas áridas y semiáridas del territorio nacional: las delegaciones de Valle de Guadalupe, Valle de Maneadero y la localidad Caborca – Don Emilio son regosoles, El Valle de Ojos Negros presenta xerosoles y en el municipio de Caborca todas las localidades restantes son yermosoles. Lo que indica que el proceso de evaporación puede ser un factor importante a considerar dentro del proceso de salinización de suelos de estas regiones.

Capítulo 6 Recomendaciones

Para ampliar los resultados en el perfil de suelo a diferentes profundidades, se recomienda un muestreo de suelo con nucleador, el cual permitirá analizar no solo a nivel superficial las condiciones de salinidad, sino también se podría evaluar otros parámetros para la estimación de la salinidad como: la capilaridad, llegar a diferentes profundidades donde las raíces de las plantas de los cultivos se desarrollan, determinar si existen capas impermeables formadas por arcillas, entre otros.

Para tener mejores aproximaciones en la determinación de la CEr, utilizando los valores de la CEa registrada por el aparato de inducción electromagnética EM-38, se recomienda considerar:

- *Variables edáficas que generan variaciones en la conductividad; como puede ser la humedad ya que zonas secas y húmedas tienen diferencias texturales significativas.

- *Capacidad de intercambio catiónico: relacionado con porcentaje de arcilla y materia orgánica, ya que se ha visto que con mayores porcentajes de arcilla, la conductividad aumenta.

- *Profundidad del suelo, en caso de que la salinidad no esté en la superficie y el equipo no tenga el alcance de determinarla, puede generar errores de medición.

- *Y éstas a su vez se pueden incluir en el modelo de determinación de la salinidad en valores de SDT multiplicando el resultado de la ecuación de CE (mS/cm) por un valor normalizador que regularmente es de 490.

Se recomienda hacer un análisis iónico de los extractos de suelo para poder interpretar los datos según los parámetros de PSI (porcentaje de sodio intercambiable) y la CIC (capacidad de intercambio catiónico), debido a que con éstos se podrían diferenciar los suelos salinos de los sódicos, y con ello proponer el adecuado manejo de los suelos de cultivo.

Para conocer la fuente que da origen a las arenas de los sitios investigados, se recomienda hacer un estudio más detallado en secciones delgadas en el que se realiza un conteo modal de 300 puntos y su representación gráfica en diagramas ternarios. En cuanto a la fuente que da origen a las arcillas se recomienda hacer un análisis de difracción de rayos X, para conocer con precisión el tipo de arcilla.

Cultivos alternativos de plantas halotolerantes, como salicornia y espárrago.

Desarrollar estrategias de evaluación de riesgos que incluyan dinámica actual de mecanismos y factores de salinización de suelos y acuíferos.

Lista de referencias bibliográficas

- Andreae, M.O., E. Atlas, G.W. Harris, G. Helas, A. de Kock, R. Koppmann, W. Maenhaut, S. Manr, W.H. Pollock, J. Rudolph, D. Scharffe, G. Schebeske, and M. Welling. (1996). Methyl halide emissions from savanna fires in southern Africa. *Journal of Geophysical Research* 101(D19), 23603–23613.
- Aragüés, R., Urdanoz, V., Çetin, M., Kirda, C., Daghari, H., Ltifi, W. (2011). *Soil salinity related to physical soil characteristics and irrigation management in four mediterranean irrigation districts*. *Agricultural Water Management*, 98(6):959-966.
- Arreguín Cortés, F. I. (2013). Programa Nacional Contra la sequía (PRONACOSE). Recuperado en Julio del 2013, de <http://slideplayer.es/slide/1031594/>
- ASOCAE (Asociación Española para la Cultura, el Arte y la Educación). (Sin fecha). *La ciencia ecológica: El suelo: formación*. Recuperado el 6 de enero del 2015 de http://www.natureduca.com/cienc_gen_sueloformac.php
- Abrol, I. P., Yadav, J. S. P. and Massoud, F. I. (1988). Salt affected soils and their management. *FAO, Soils Bulletin* 39, 131 p.
- Bayuelo-Jiménez, J. S., Craig, R., and Lynch, J. P. (2002). Salinity tolerance of species during germination and early seedling growth. *Crop Science*, 42(5), 1584-1594.
- Beltrán-Abaunza, J. M., and Quintanilla-Montoya, A. L. (2001). Calculated heat flow for the Ensenada region, Baja California, Mexico. *Ciencias Marinas*, 27(4), 619-634. Recuperado en agosto del 2014 de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48027408>
- Beltrán, L. (2001). Balance geohidrológico del acuífero BC-07 Valle de Guadalupe, municipio de Ensenada, B.C. Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional en la Península de Baja California, Subgerencia Regional Técnica, 19 p.
- Cardoso, V., Raúl, F., y López García, J. (2005). Estudio de algunos procesos pedogenéticos en el valle de Ojos Negros, Baja California, México. *Investigaciones geográficas*, (57), 53-67.
- Carter, M. R. (2002). Organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agron. J.* 94: 38-47.
- CONAGUA. (2003). *Plan de manejo integrado del agua para el acuífero de Maneadero, B.C.* (Reporte técnico inédito). CONAGUA. Estado de Baja california.
- CONAGUA. (2006). Estudio de caracterización fisicoquímica y piezometría de los acuíferos costeros de la región noroeste. Realizado en convenio por Universidad de Sonora. (Estudio técnico inédito). CONAGUA. Estado de Sonora.

- CONAGUA. (2007). Estudio técnico para determinar la factibilidad de extracción de agua subterránea salobre para su desalación, en los acuíferos de Caborca, Puerto Libertad, Arivaipa y Fuerte – Mayo, Sonora. Realizado por la Universidad de Sonora. (Estudio técnico inédito). CONAGUA. Estado de Sonora.
- CONAGUA. (2011). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero 2605 Caborca, Estado de Sonora, Recuperado en agosto del 2013 en <http://www.conagua.gob.mx/OCNO07/Noticias/2605%20Caborca.pdf>
- Corwin, D. L., and Rhoades J. D. (1984). Measurement of inverted electrical conductivity profiles using electromagnetic induction. Soil Science Society of America Journal, 48 (2) 288-291
- COTAS. (Sin fecha). *Estudio de geoquímica en el acuífero de Ojos Negros, municipio de Ensenada B.C.* (Reporte técnico inédito). COTAS. Ojos Negros, municipio de Ensenada B.C.
- COTAS. (2010). *Estudio de geoquímica en el acuífero de Maneadero, municipio de Ensenada B.C.* (Reporte técnico inédito). COTAS. Maneadero, municipio de Ensenada B.C.
- COTAS. (2013). *Actualización de la concentración de SDT en el acuífero del Valle de Guadalupe, Junio del 2013.* (Reporte técnico inédito). COTAS. Guadalupe, municipio de Ensenada B.C.
- Del Toro-Guerrero, F. J. (2012). *Cuantificación del aporte hidrogeológico de la Subcuenca el Mogor a la recarga del Acuífero del Valle de Guadalupe, B.C.* Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 118p.
- Delgado Cedeño, D. A., Mendieta Morrillo, E. E., y Ormaza Rodriguez, M. A. R. I. A. (2015). Análisis comparativo de las fuentes de agua para riego del campus de la ESPAM MFL. Recuperado el 1 de junio del 2015, de <http://repositorio.esпам.edu.ec/handle/123456789/789>
- Doran, J. W. (1996). Methods for assessing soil quality. En: J.W. Doran and Alice J. Jones (Ed.). SSSA Special Publ. 49. Soil Science Society of America Inc. Madison, WI.
- Edafología. Ciencias ambientales. (Sin fecha). *Lección 5 Propiedades del Suelo. Propiedades Físicoquímicas. Potencial de oxidación.* Recuperado en diciembre del 2014 en <http://www.eweb.unex.es/eweb/edafo/ECAP/ECAL5PFQPotRedox.htm>.

- Elosegui, A. (Ed.). (2009). Conceptos y técnicas en ecología fluvial. Fundación BBVA. Recuperado en febrero del 2015 de <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=OfOUggC20 UC&oi=fnd&pg=PA11&dq=conceptos+y+tecnicas+de+ecologia+fluvial&ots=9hHdNVueAB&sig=Z4qxMw8WVh39KfJ-ITK3TvsXXMo#v=onepage&q=conceptos%20y%20tecnicas%20de%20ecologia%20fluvial&f=false>
- FAO. (1988). FAO-UNESCO soil map of the world. World Soil Resources Report 60. FAO. Rome, Italy. 119 P. 657
- FAO. (2009). La FAO en México. Más de 60 años de colaboración. Recuperado en septiembre del 2014 en http://www.fao.org.mx/documentos/Libro_FAO.pdf
- FAO-SAGARPA. (2014). Reimpresión para fines de consulta. Resumen ejecutivo. Diagnóstico del sector rural y pesquero en México 2012. Recuperado en marzo del 2015, de <http://www.sagarpa.gob.mx/programas2/evaluacionesExternas/Lists/Otros%20Estudios/Attachments/47/1%20Diagn%C3%B3stico%20del%20sector%20rural%20y%20pesquero.pdf>
- Galindo, E. M. (2006). Caracterización geoquímica del agua subterránea en la zona este de Gran Canaria. Instituto Geológico y Minero de España, 9 p. Recuperado de <http://www.ingenierosdeminas.org/documentos/08-Hidrogeoquimica-5.pdf>
- Gastil, R. G., Phillips, R. P. and Allison, E. C. (1975). Reconnaissance geology of the state of Baja California. The Geological Society of America, Inc., Memoir 140. Boulder Colorado, USA. 170 pp
- González García, S. (1960). Análisis mineralógico de arcillas de suelos andaluces. I. Tierras rojas. In Anales de Edafología y Agrobiología (Vol. 60, pp. 191-212). Recuperado el 11 de noviembre del 2014, de <http://digital.csic.es/bitstream/10261/55022/1/An%C3%A1lisis%20mineral%C3%B3gico%20de%20arcillas%20de%20suelos%20andaluces.%20I.%20Tierras%20rojas.pdf>
- Hem, J. D. (1985). Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. U. S. Geological Survey Water – Supply Paper 2254, 263 pp.
- Hendrickx, J. M. H. and Kachanoski R. G. (2002). Indirect measurement of solute concentration: Nonintrusive electromagnetic induction. In: Dane, JH and GC Topp (ed.). Methods of soil Analysis. Part 4. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI. pp. 1297-1306.
- Hermosillo, T. (2014). *Condiciones del marco físico, productivo y socioeconómico en el Distrito de Riego 014 Río Colorado, B.C. y Sonora*. Tesis de Maestría en Ciencias, especialista en Hidrociencias. Colegio de Postgraduados del Estado de México.

- Iannetta, M. y Colonna N. (Sin fecha). Salinización. LUCINDA (Land Care In Desertification Affected Areas). Colección de folletos: B. Número: 3. Recuperado en julio del 2013 de http://geografia.fcsn.unl.pt/lucinda/Leaflets/B3_Leaflet_ES.pdf
- Ibáñez, J. J. (2007, Diciembre, 27). *Salinidad de los suelos, estrés hídrico y producción vegetal*. Recuperado el 20 de marzo del 2015, de <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/12/27/81385#comments>
- INEGI (2004). Guía para la interpretación de cartografía. Edafología. Recuperado en Enero del 2014 de: <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/INTERNET/EdafIII.pdf>
- INEGI (2010). Documento técnico descriptivo de la red hidrográfica escala 1: 50 000. Edición 2.0. Recuperado en octubre del 2014 de: http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro
- INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático), (Sin fecha). El Cambio Climático en México. Recuperado en julio del 2013 de http://www2.ine.gob.mx/cclimatico/edo_sector/estados/futuro_bc.html
- Kurczyn Robledo J. A., Kretschmar T. e Hinojosa-Corona A. (2007). Evaluación del escurrimiento superficial en el noroeste del Valle de Guadalupe, B.C., México, usando el método de curvas numeradas y datos de satélite. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24 (001), 1-14.
- Lammers G. (2010). Ojos Negros, El Nuevo Valle Bajacaliforniano que Comienza a Atraer Miradas, Entrevista Historias del Vino. Recuperado en junio del 2015, de <http://vinisfera.com/r/archivo/3291>
- Lara Valenzuela, K. M. (2011). *Evaluación de intrusión marina utilizando isótopos de estroncio como trazador: un ejemplo de Ensenada, B.C., México*. Tesis de maestría en ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 113p.
- Larousse de los vinos. (2008). Larousse de los vinos. Los secretos del vino. Países y regiones. España: Larousse Editorial.
- Lesch, S. M., Corwin, D. L. and Robinson, D. A. (2005). Apparent soil electrical conductivity mapping as an agricultural management tool in arid zone soils. *Computers and Electronics in Agriculture* 46(1), 351-378
- Lillo, J. (2009). *Técnicas Hidrogeoquímicas*. Tesis de maestría. Universidad Rey Juan Carlos. Madrid, España, 140 p.
- Lobell, D. B., Field, C. B., Cahill, K. N., and Bonfils, C. (2006). Impacts of future climate change on California perennial crop yields: Model projections with climate and crop uncertainties. *Agricultural and Forest Meteorology*, 141(2), 208-218.

- Martinez Alfaro, P. E., Martinez Santos, P. y Castaño Castaño S. (2006). Fundamentos de Hidrogeología. Mundi-Prensa Libros. 284p.
- Mason, B.J. (1992). Preparation of soil sampling protocols: sampling techniques and strategies. United States Environmental Protection Agency, EPA/600/R-92/128, 151 pp.
- Matthes, G. (1982). The properties of Groundwater. John Wiley and Sons Inc., New York, 406 pp
- McNeill, J. D. (1980). Electrical conductivity of soils and rocks. Technical Note TN-5, Geonics, Ontario, Canada. 21 p.
- McNeill, J. D. (1990). Geonics EM38 ground conductivity meter: EM38 operating manual. Geonics Ltd., Mississauga, ON, Canada.
- Mena, J. A. M. (2002). Los valles agrícolas de Baja California: espacios de agricultura para la exportación. *Migración, poder y procesos rurales*, 65p.
- Méndez Cervantes, P. (2012). *Modelación hidrogeológica de acuíferos de la cuenca de Guadalupe, Baja California*. Tesis de maestría en Ciencias. Universidad Autónoma de Querétaro. 98 p.
- Meraz Ruiz, L. (2009). *Diseño de una estrategia de mercadotecnia para una pequeña empresa vitivinícola en Ensenada, Baja California*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C.
- Meraz Ruiz, L., Valderrama Martínez, J. A., y Maldonado Radillo, S. E. (Sin fecha). Recuperado en julio del 2013, de <http://www.alasru.org/wp-content/uploads/2012/07/110-Meraz-Valderrama-y-Maldonado.pdf>
- Moctar, D. I. A. W., Ibrahima, M. A. L. L., Seyni, S. A. N. E., Diakher, M. H., and Serigne, F. A. Y. E. (2015). Assessing of the Suitability for Irrigation Water and Their Repercussions on Land Degradation Process in Delta and Lower Senegal River Valley. *American Journal of Water Resources*, 3(2), 32-43.
- NOM. (1994). 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: Norma Oficial Mexicana.
- NOM. (2002). NOM-021-SEMARNAT-2000. Norma Oficial Mexicana, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis, Diario Oficial De la Federación, 31.
- Nordstrom D. Kirk, R. Blaine McCleskey, Ball W.J. (2008). Sulfur geochemistry of hydrothermal waters in Yellowstone National Park: IV Acid-Sulfate waters. *US Geological Survey* 24, 2: 191-207. Shaver, R. B. (1993), Field vs. Lab Alkalinity and pH: Effects on Ion Balance and Calcite Saturation Index. *Groundwater Monitoring and Remediation*, 13: 104-112

- Ojeda De la Cruz, A. (1994), *Explotación futura del acuífero del Valle de Caborca, Sonora*: Monterrey, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, tesis de maestría, 111 p. (inédita)
- Oregon Water Science Center (OWSC). (Sin fecha). Alkalinity calculation methods. Recuperado en Noviembre del 2014 en: <http://or.water.usgs.gov/alk/methods.html>.
- Ortiz, O. M. (1992). Distribución y extensión de los suelos afectados por sales en México y el mundo. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Osorio, A. R. y Uvalle, B. J. (Sin fecha). *Memorias Del Curso De Análisis De Agua, Suelo Y Planta, Su interpretación Y Utilidad Agrícola*. Capítulo: Salinidad de los Suelos Agrícolas. Recuperado (13 Mayo del 2015), de <http://www.funprover.org/formatos/manualTomate/Salinidad%20de%20los%20suelos%20agricolas.pdf>
- Ponce, C. V. M., Pandey, R. P. and Kumar, S. (1999). "Groundwater recharge by channel infiltration in el Barbon basin, Baja California, Mexico", *Journal of Hydrology*, 214, pp. 1-7
- Ponce, C. V. M., Zúñiga, C. W. R., Venegas, C. F. R., Gaona, A. T., García, C. R. O., Sepúlveda, B, J. I. y Arámburo, V. G. (2000). "Valle de Ojos Negros: Resumen Interdisciplinario. Parte a; Parte b", San Diego State University, Universidad Autónoma de Baja California, e Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Forestales y Pecuarias, 42 p.
- Porta, J., Lopez, M., y Roquero, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa, 929 p.
- Proyecto, C. E. A., y Técnico, I. (2003). Estudios relacionados con la instalación de una planta desaladora de agua para la ciudad de Ensenada, BC. *Estudios*. Recuperado el 10 de julio del 2014. De http://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:351_orQwFg4J:scholar.google.com/+Estudios+relacionados+con+la+instalaci%C3%B3n+de+una+planta+desaladora+de+agua+para+la+ciudad+de+Ensenada,+B.C.&hl=es&as_sdt=0,5
- Pulido M. L. (1994). Estudio general de salinidad analizada. Anexo Técnico. Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje. Subcoordinación de Uso Eficiente del Agua. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
- Pulido, J. L. (1978). Hidrogeología práctica. In *Hidrogeología práctica*. URMO.
- Quintanilla-Montoya, A.L. y Suárez-Vidal, F. (1992). Origin of a sedimentary sequence on the north island of Todos Santos, B.C. Mexico. *Ciencias Marinas* 18(1): 1–18pp.

- Ramos-Velázquez, E., Calmus, T., Valencia, V., Iriondo, A., Valencia-Moreno, M., Y Bellon, H. (2008). Geocronología U-Pb y $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ del batolito costero de Sonora: nuevas aportaciones al magmatismo laramídico de arco continental. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 25(2), 314-333.
- Redly, M. (1986). Métodos para la determinación de la concentración total y la composición iónica de las sales solubles de los suelos. *Ciencias de la Agricultura*, 26:114-131.
- Reyes M. A. y Quintero S. M. L. (2009). Problemática del agua en los distritos de riego por bombeo del estado de Sonora, *Revista Digital Universitaria*, DGSCA-UNAM, Vol. 10 Núm. 8.
- Rhoades, J. D. (1990). Overview: Diagnosis of salinity problem and selection of central practices. pp. 18-41. In: Tanji, K.K. (ed.). *Agricultural Salinity Assessment and Management*. Manual 71. American Society of Civil Engineering. New York.
- Richards, L. A. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. United States Department of Agriculture, *Agriculture handbook* 60:172 p.
- SAGARPA. (2007), Programa Sectorial de desarrollo Agropecuario y Pesquero 2007-2012.
- SAGARPA. (2012). *Generación de Información y Análisis Integral de la Red Nacional de Observatorios Agro tecnológicos y elaboración de bases de datos estratégicas para apoyar la toma de decisiones en el sector agrícola del País*. Línea de Acción: Integración de una Base de Datos Edafológica a realizarse en 15 OAT's que comprenden una extensión cercana a 1.5 millones de hectáreas. Recuperado en junio del 2014 en <http://2006-2012.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/potencialproductivo/especificos/recomendacionesgenerales.pdf>
- Salgado Tránsito, J. A. (2010). *El uso de tecnologías de la información en el desarrollo de un plan de manejo sustentable del acuífero del Valle de Guadalupe, B.C.*, Tesis doctoral, 209 p.
- Salgado-Tránsito, J. A., Palacios-Vélez, O., Galvis-Spínola, A., Gavi-Reyes, F., y Mejía-Sáenz, E. (2012). Efecto de la calidad de agua del acuífero Valle de Guadalupe en la salinidad de suelos agrícolas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* Vol.3 Núm.1 1 de enero - 29 de febrero, 2012 p. 79-95.
- Sánchez San Román, F. J. (Sin fecha)-a. *Correlación lineal y regresión*. Dpto. Geología Univ. Salamanca España Recuperado en diciembre del 2014, de http://hidrologia.usal.es/practicas/correlacion/Correlacion_explicacion.pdf
- Sánchez San Román, F. J. (Sin fecha)-b. *Diagramas de Piper*. Dpto. Geología Univ. Salamanca España. Recuperado en febrero del 2015 en http://hidrologia.usal.es/Complementos/Representar_Piper_y_Stiff.pdf

- SIAN. (Sin fecha). Manuales para suelos: Análisis suelos fertilidad: determinación de materia orgánica. Recuperado en octubre del 2014 de http://www.sian.inia.gob.ve/repositorio/manuales_suelos/analisis_suelos_fertiidad/3.1.pdf
- SIAP. (2013). SIAP Informa. Una Mirada al Panorama Agroalimentario de México y el Mundo. Boletín semanal del SIAP de la SAGARPA. Recuperado en septiembre del 2014 en <http://www.campomexicano.gob.mx/boletinsiap/013-e.html>
- Smart Fertilizer Management. (2014). Desarrollo de software y consultoría agrícola. Artículos: La Calidad del Agua de Riego. Recuperado en septiembre del 2014 en <http://www.smart-fertilizer.com/es/articles/irrigation-water-quality>.
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). (2015). Monitor de sequía en México (MSM). Recuperado en marzo del 2015, de http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=20&Itemid=74
- Soil Science Society of America. (1987) Salt affected soils, recuperado en julio 2015 de <http://14.139.94.101/fertimeter/RSRCRP62.aspx>
- Soto Mora, C. (2003). La agricultura comercial de los distritos de riego en México y su impacto en el desarrollo agrícola. Investigaciones geográficas, (50), 173-195.
- Sudduth, K. A.; Kitchen, N. R.; Wiebold, W. J.; Batchelor, W. D.; Bollero, G. A.; Bullock D. G.; Clay, D. E.; Palm, H. L.; Pierce, F. and Thelen, K. D. (2005). Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. Computers and Electronics in Agriculture 46: 263-283.
- SUNASS. (Sin fecha). Análisis de agua parte 2: Alcalinidad. Recuperado en diciembre del 2014 de: <http://bvs.per.paho.org/texcom/cd048437/sunassal.pdf>
- Tarbut, E. J., y Lutgens, F. K. (2005) *Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física*. España. 686p.
- Torres Carrillo, X. G., Delgado Argote, L. A., Espinosa Cardeña, J. M., y Romo Jones, J. M. (2011). Análisis geológico y aeromagnético de las concentraciones anómalas de Fe en el Plutón San Jerónimo en el Cinturón Batolítico Peninsular, Baja California, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 63(3), 487-501.
- US Soil Salinity Laboratory Staff. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. US Dept. Agr. Handbook 60. Washington DC., USA. 160 p.
- Valencia-Moreno, M., Ruiz, J., Roldán-Quintana, J. (1999). Geochemistry of Laramide granitic rocks across the southern margin of the Paleozoic North American Continent, central Sonora, México: International Geology Review, 41(9) 845-857.

- Venegas, D. (2012, 23 de marzo). Estudian disponibilidad de agua en regiones vinícolas. TODO@CICESE. Recuperado en julio del 2013 de http://todos.cicese.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=343&Itemid=80&showall=1
- Vega-Granillo E. L., Cirett-Galán, S., De la Parra-Velasco M. L., y Zavala-Juárez R. (2011). Hidrogeología de Sonora, México, in Calmus, Thierry, ed., Panorama de la geología de Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118, 299-331
- Vidal, F. V., Welhan, J. and Vidal, V. M. (1982). Stable isotopes of helium, nitrogen and carbon in a coastal submarine hydrothermal system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 12(1), 101-110.
- Zamudio-González, B., López-Pérez, L., Alcántar-González, G., González-Eguiarte, D. R., Ruiz-Corral, J. A., and Castellanos, J. Z. (2004). Delimitación de áreas salinas en el Distrito de Riego de Caborca, Sonora, México. *Terra Latinoamericana*, 22(1), 91-97.

Apéndice A Diagramas de Piper

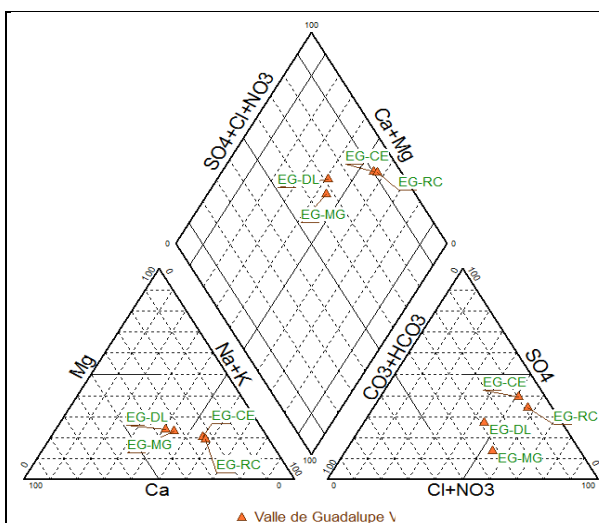


Diagrama de Piper para la región EVG

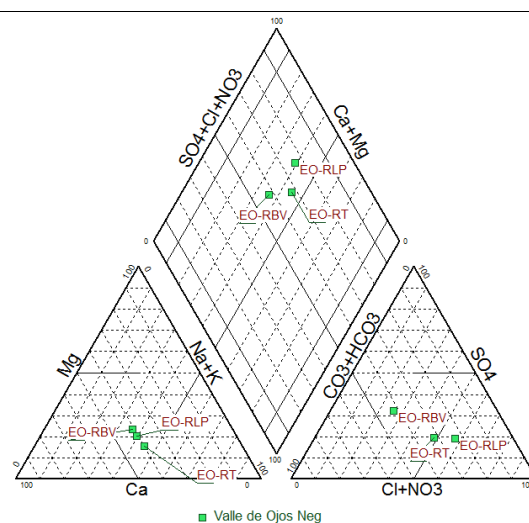


Diagrama de Piper para la región EVO

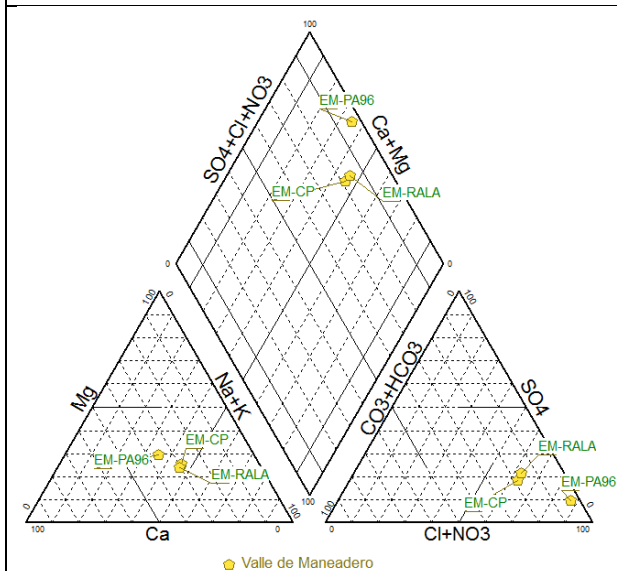


Diagrama de Piper para la región EVM

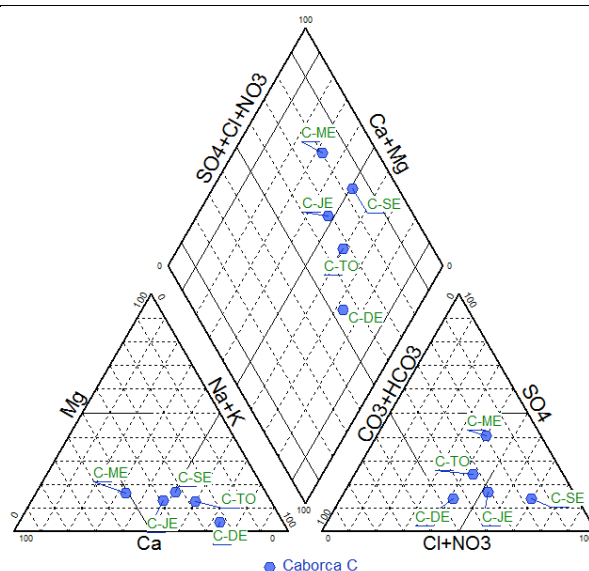
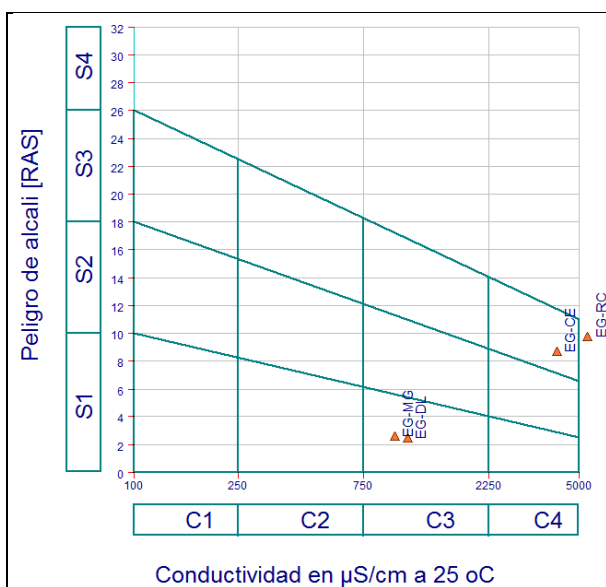
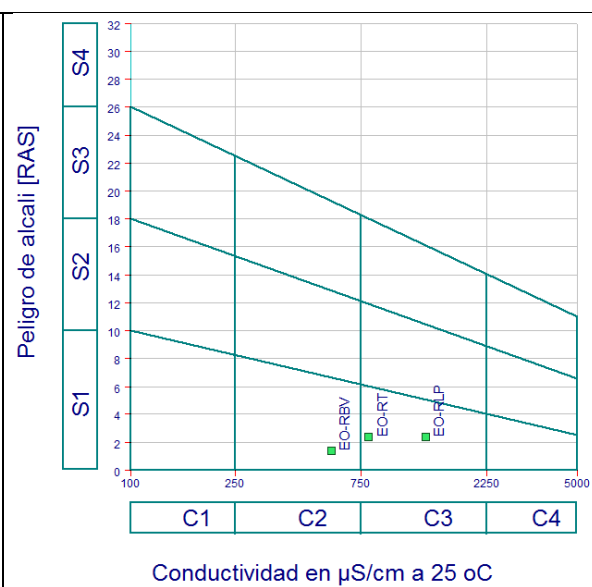


Diagrama de Piper para el municipio de Caborca

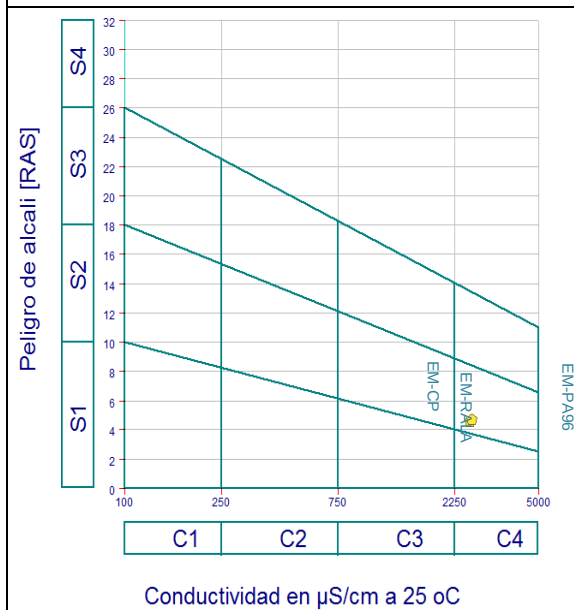
Apéndice B Diagramas de la relación de adsorción del sodio (RAS) (Normas de Riverside)



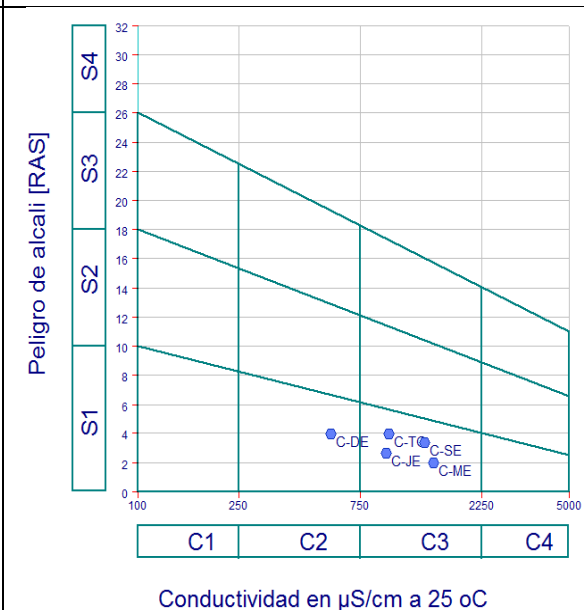
Muestras de agua de riego de las localidades de Guadalupe (EVG).



Muestras de agua de riego de las localidades de Ojos Negros (EVO).



Muestras de agua de riego de las localidades de Maneadero (EVM).



Muestras de agua de riego de las localidades de Caborca (C).

Apéndice C Mapas de rasgos hidrológicos y fisiográficos

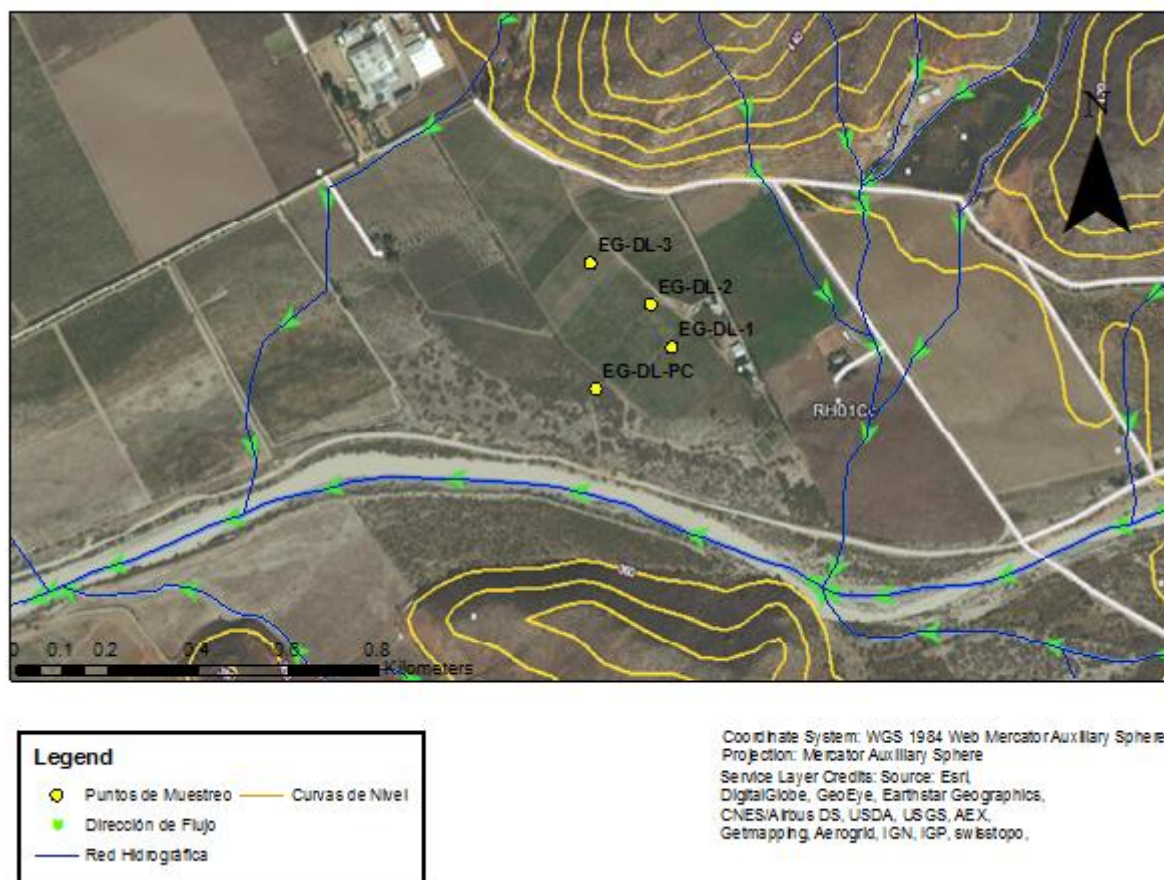


Figura C1.- Mapa geoespacial de rasgos hidrológicos de la localidad EVG-DL.

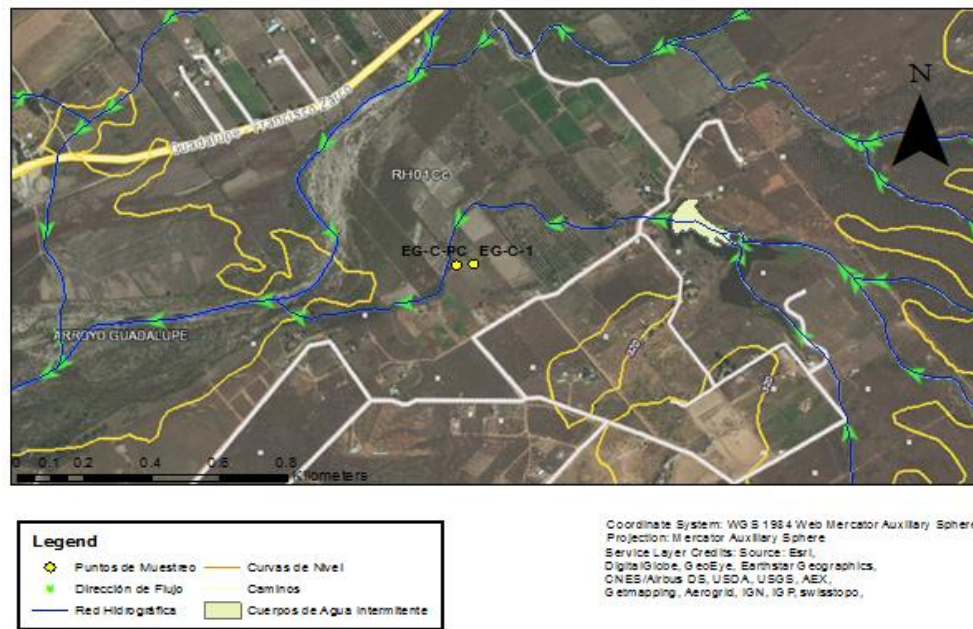


Figura C2.- Mapa geoespacial de rasgos hidrológicos de la localidad EVG-CE.

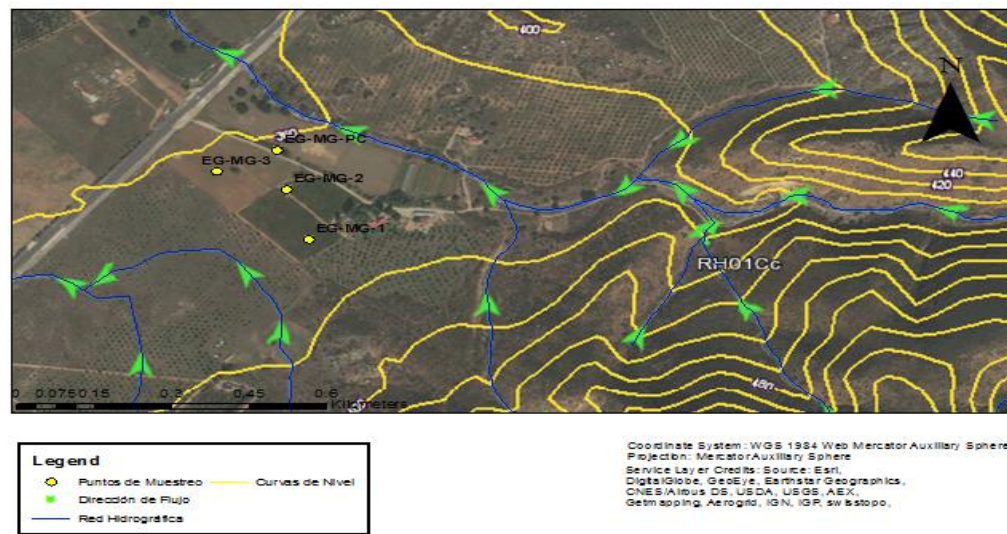


Figura C3.- Mapa geoespacial de rasgos hidrológicos de la localidad EVG-MG.

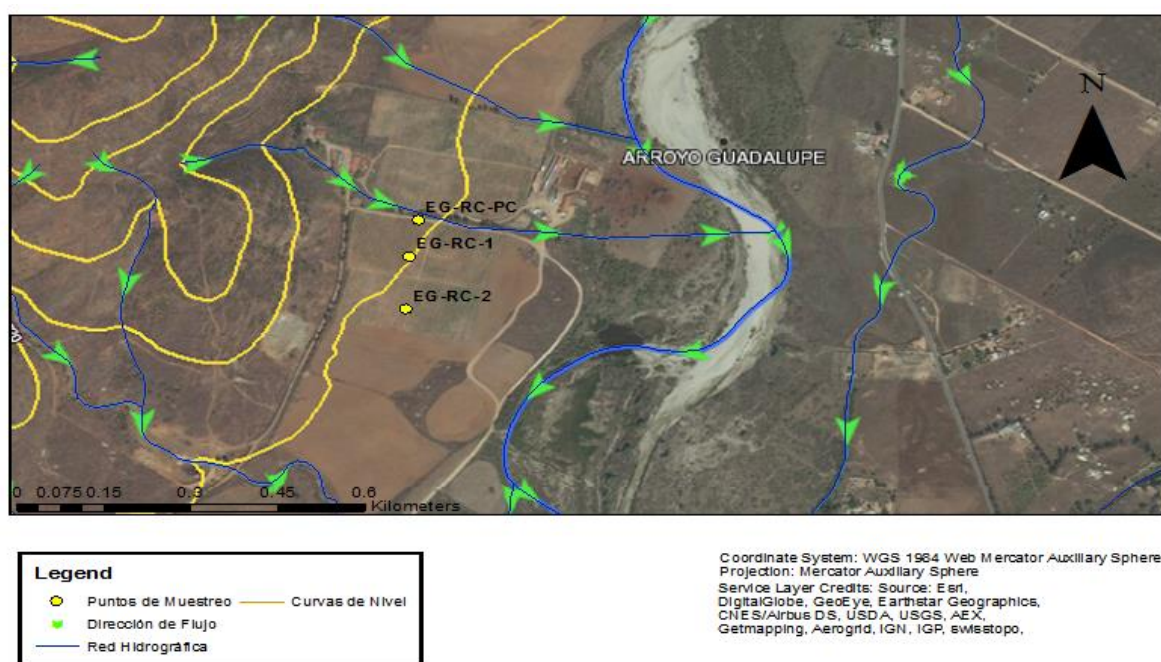


Figura C4.- Mapa geoespacial de rasgos hidrológicos de la localidad EVG-RC.

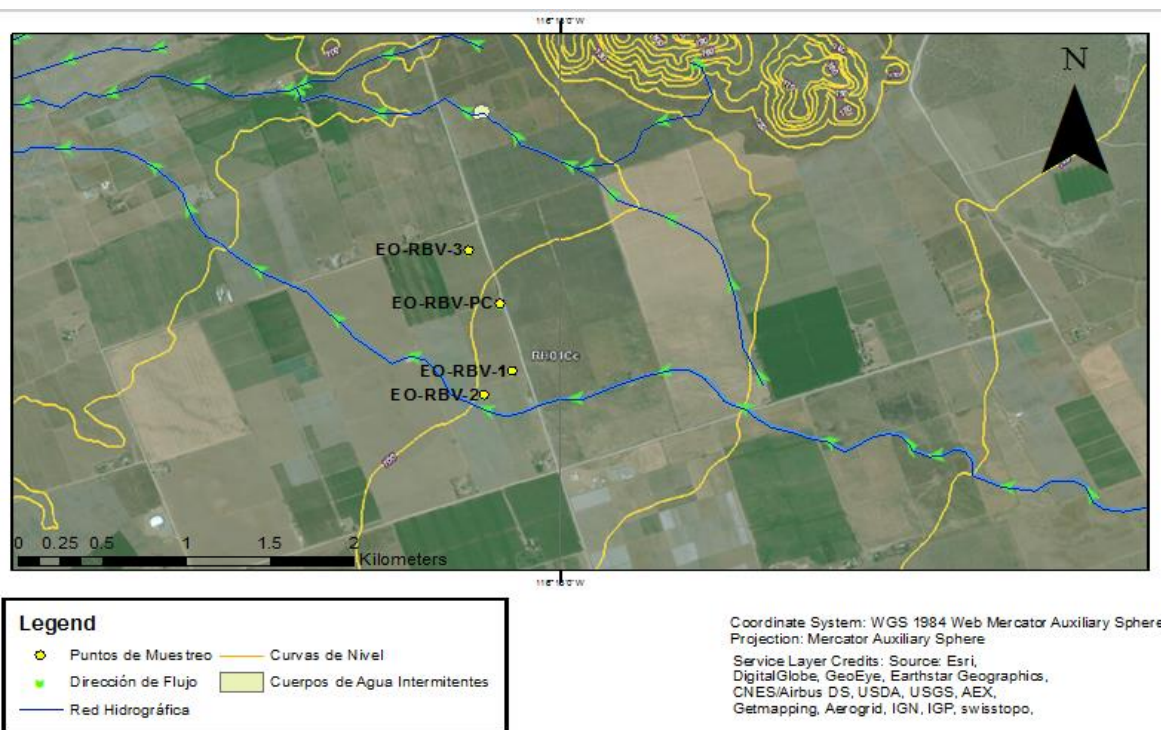


Figura C5.- Mapa geoespacial de rasgos hidrológicos de la localidad EVO-RBV.

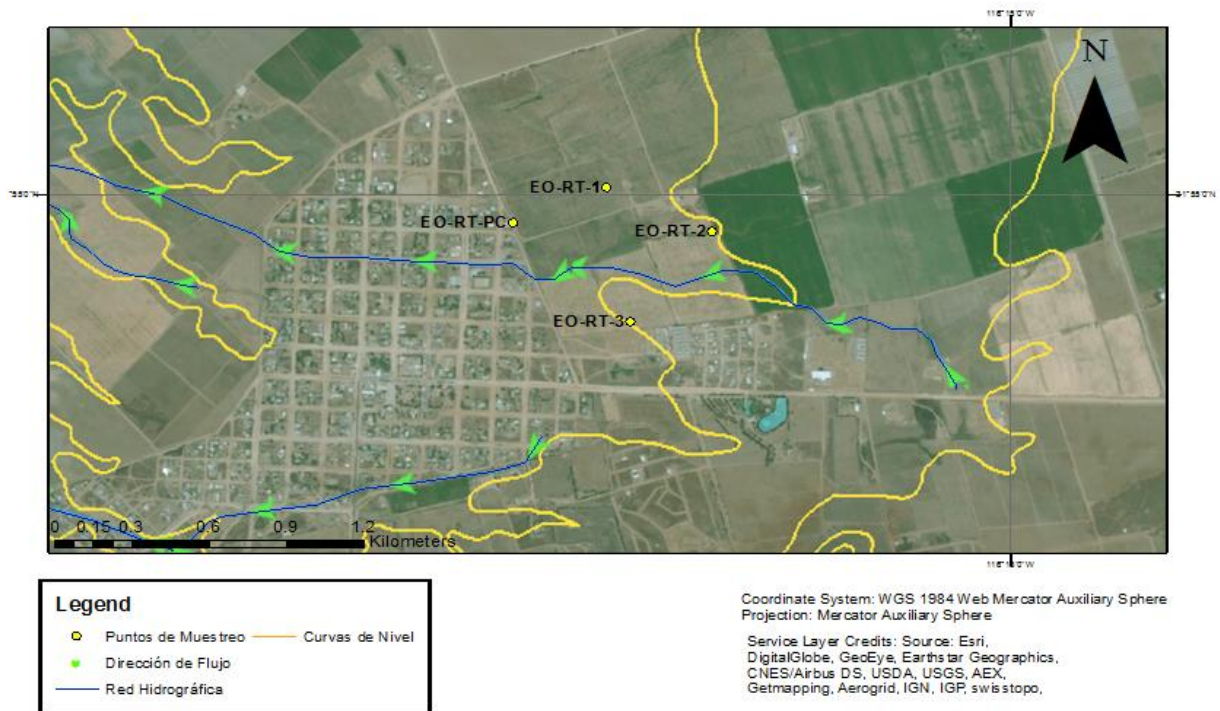


Figura C6.- Mapa geoespacial de rasgos hidrológicos de la localidad EVO-RT.

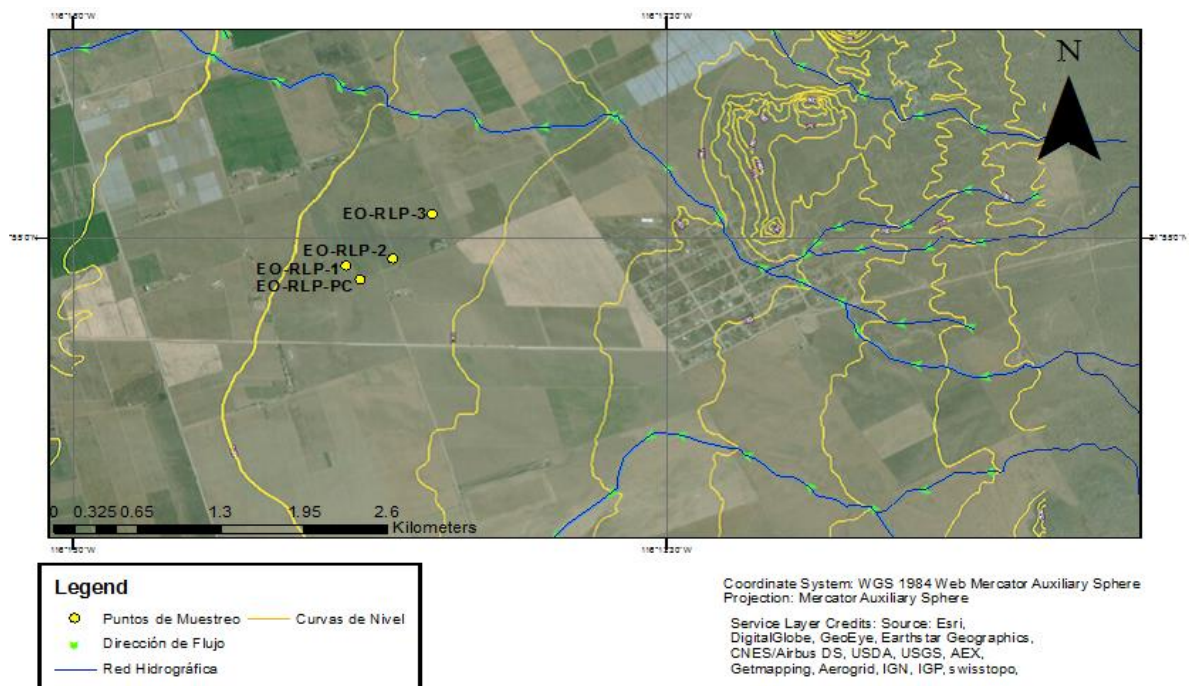


Figura C7.- Mapa geoespacial de rasgos hidrológicos de la localidad EVO-RLP.

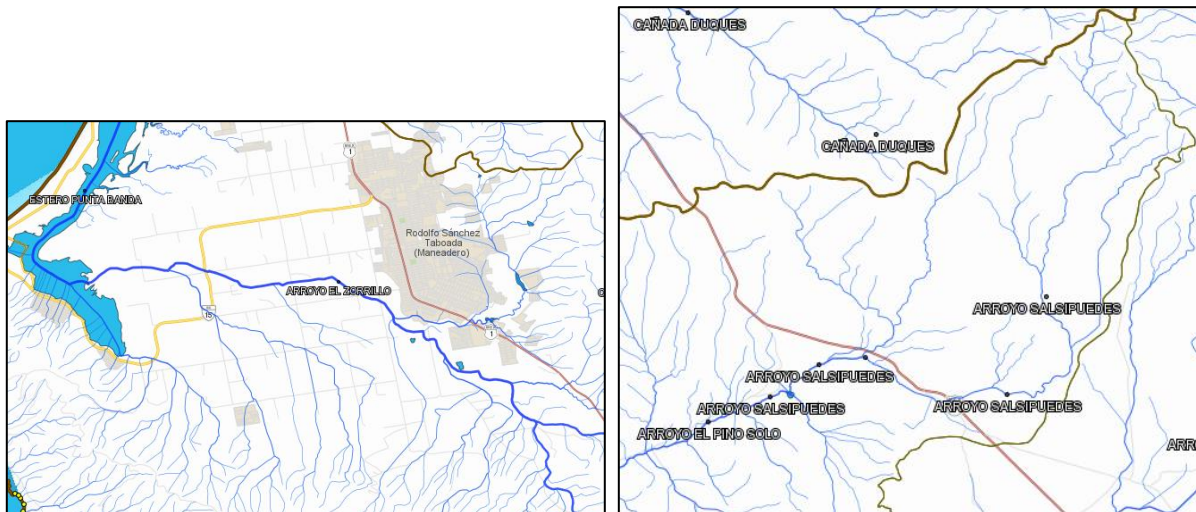


Figura C8.- Desemboque como Arroyo el Zorrillo (izquierda) y origen como Salsipuedes (derecha) de la escorrentía del cauce principal de la subcuenca RH01Bg (Generado en SIATL herramienta en línea de INEGI, 2014).

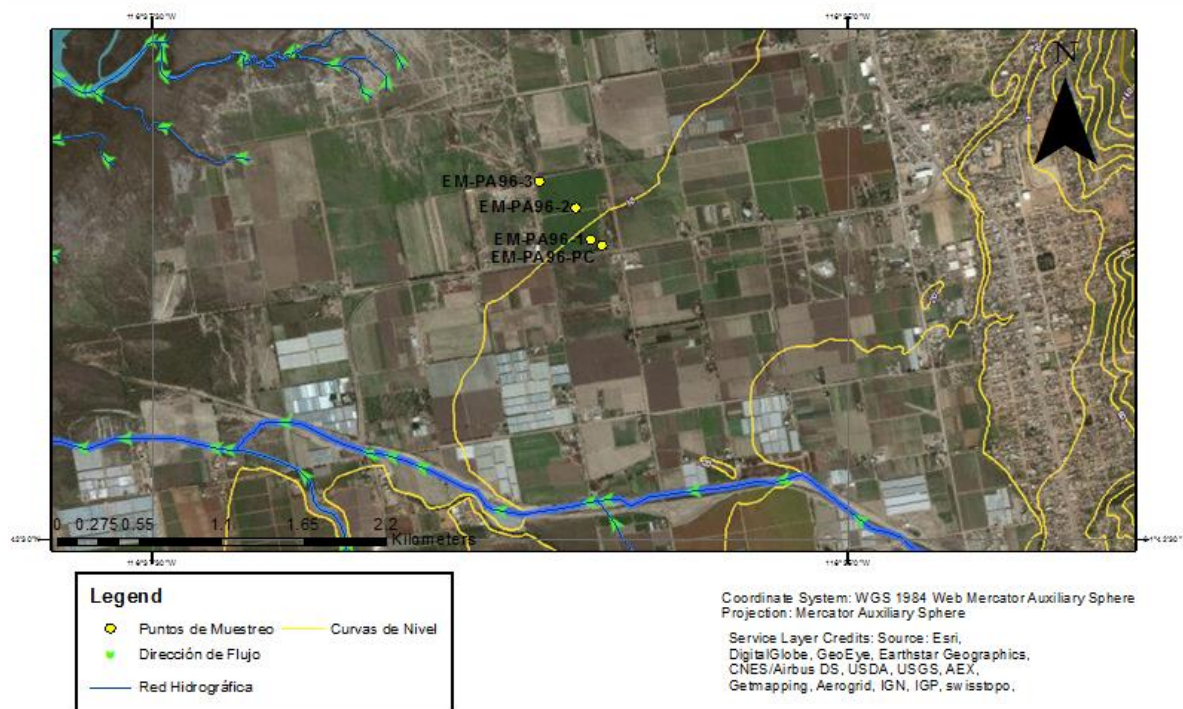


Figura C9.- Mapa geoespacial de rasgos hidrológicos de la localidad EVM-PA96.

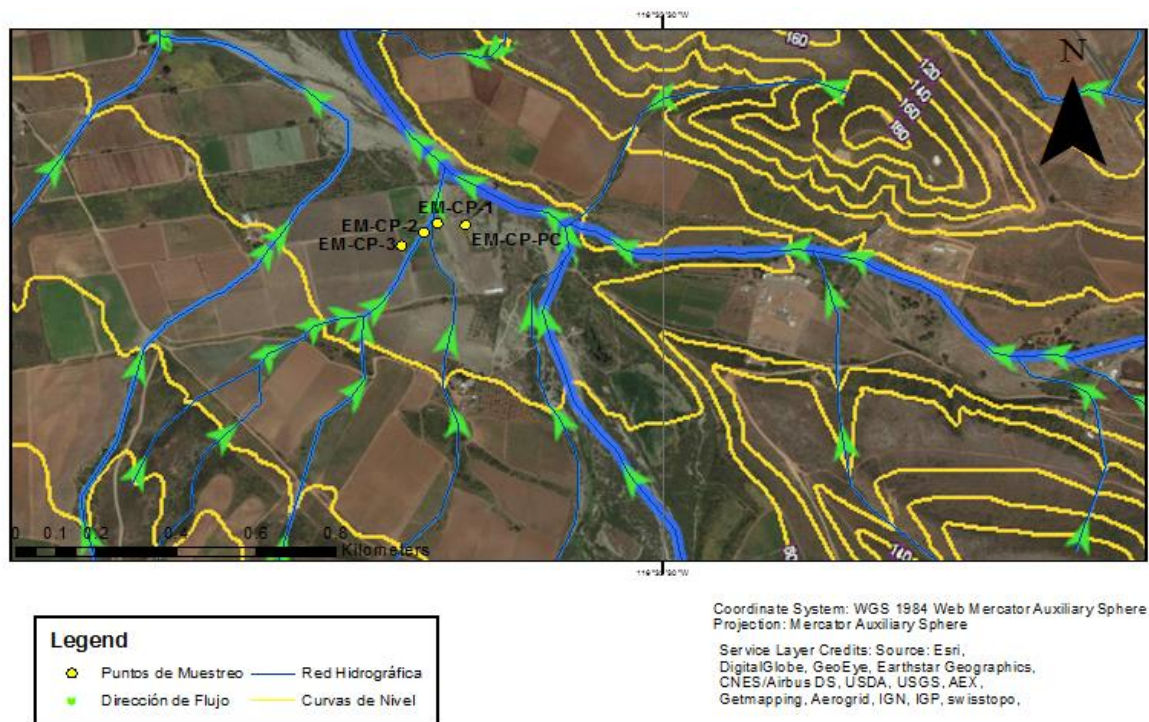


Figura C10.- Mapa geoespacial de rasgos hidrológicos de la localidad EVM-CP.

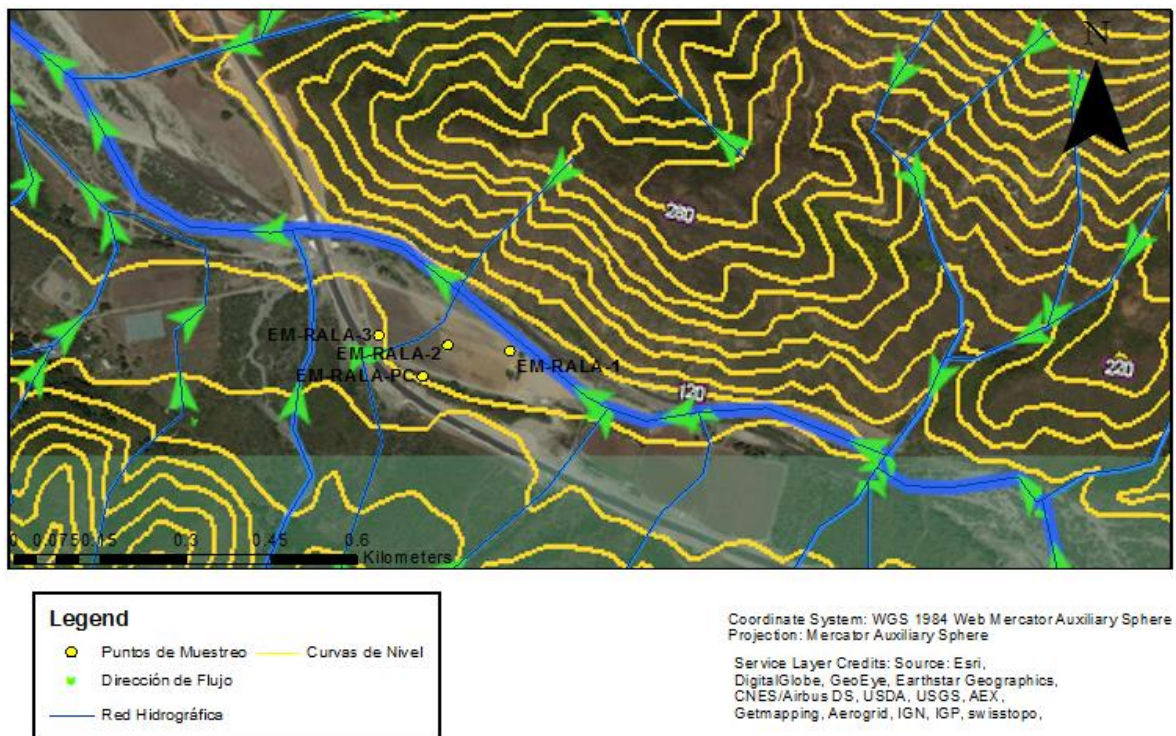


Figura C11.- Mapa geoespacial de rasgos hidrológicos de la localidad EVM-RALA.

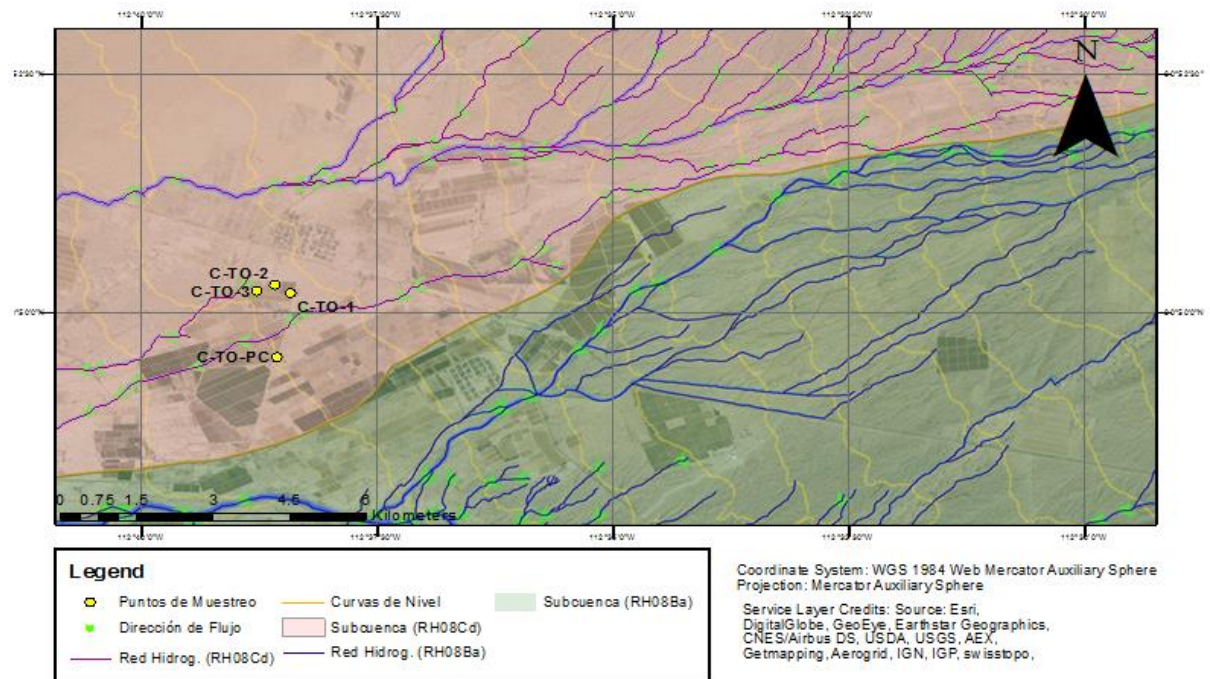


Figura C12.- Mapa geoespacial de rasgos hidrológicos de la localidad C-TO.

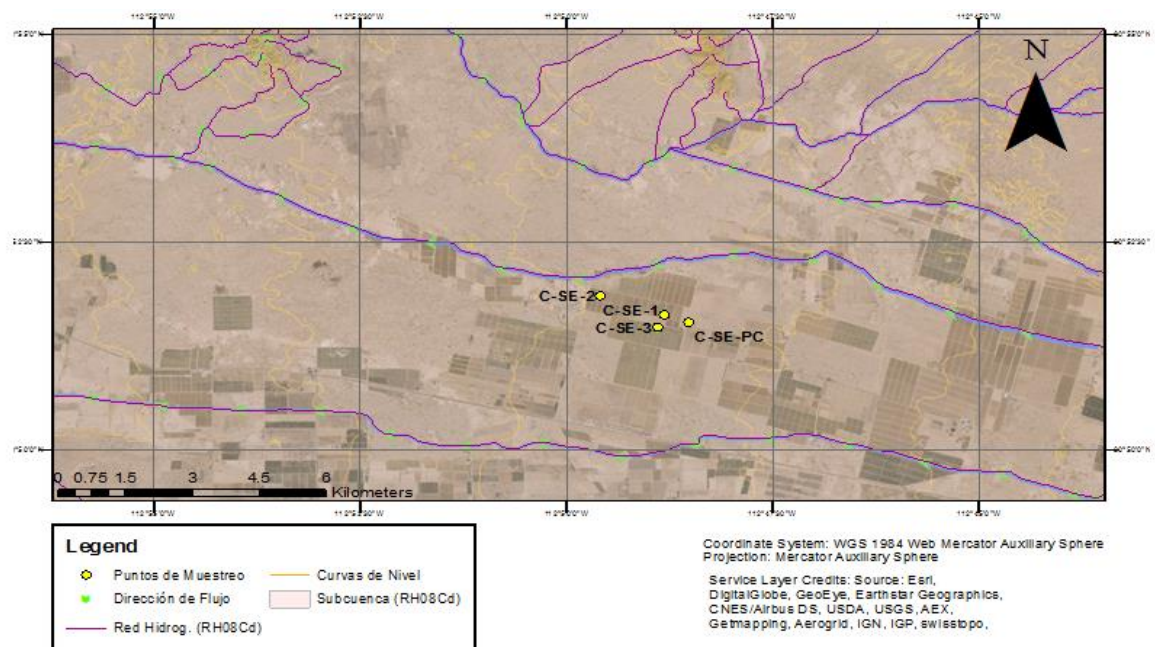


Figura C13.- Mapa geoespacial de rasgos hidrológicos de la localidad C-SE.

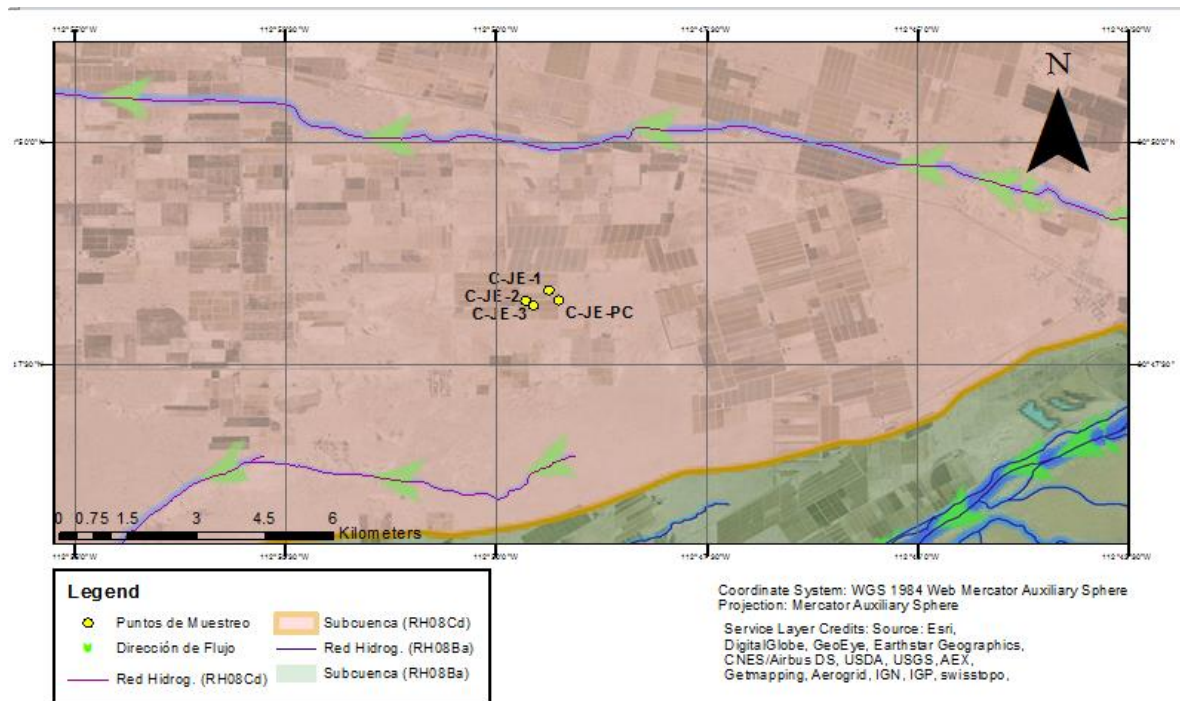


Figura C14.- Mapa geoespacial de rasgos hidrológicos de la localidad C-JE.

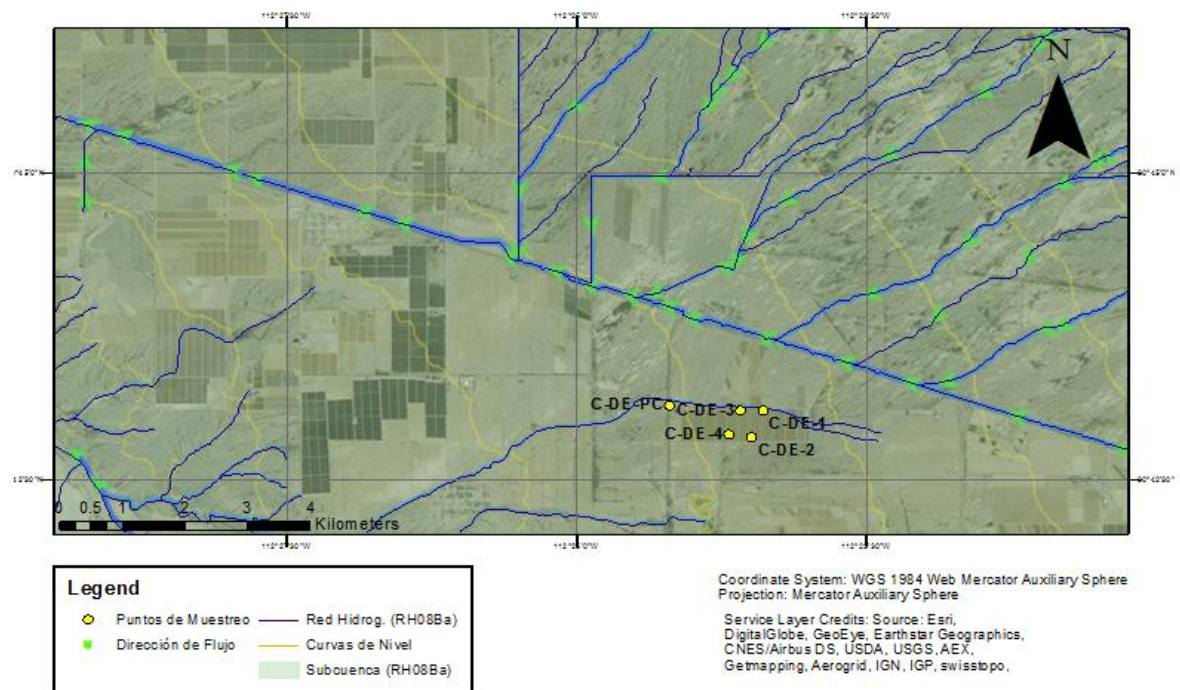


Figura C15.- Mapa geoespacial de rasgos hidrológicos de la localidad C-DE.

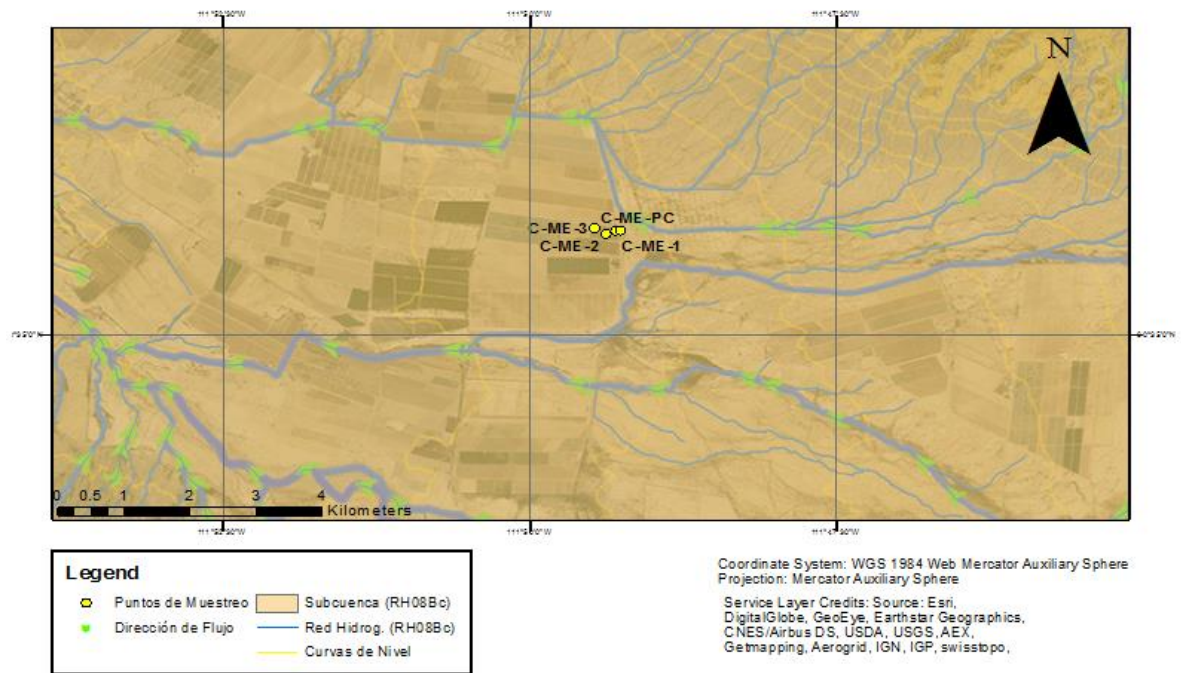


Figura C16.- Mapa geoespacial de rasgos hidrológicos de la localidad C-ME.

Apéndice D Método de Walkley & Black

Se pesó 0.5 g de suelo seco, pasado por un tamiz de 0.5 mm, se colocó en un matraz Erlenmeyer de 500 mL. Se procesó un blanco de reactivos por triplicado.

Se adicionaron exactamente 10 mL de dicromato de potasio a 1 N, girando el matraz cuidadosamente para que entrara en contacto con todo el suelo.

Se agregaron 20 mL de H_2SO_4 concentrado cuidadosamente con una bureta a la suspensión, se giró y agitó nuevamente el matraz durante un minuto.

Se dejó reposar durante 30 minutos sobre la mesa de trabajo.

Se añadieron 200 mL de agua milli-Q, 5 mL de ácido fosfórico (H_3PO_4) concentrado y de 5 a 10 gotas del indicador de difenilamina hasta que se tornó café oscuro.

Paso seguido, se tituló con la disolución de sulfato ferroso amoniacal ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 0.5 N, gota a gota hasta que la solución viró a verde.

Los cálculos se realizaron de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\% \text{ C Orgánico} = (B - T / g) (N) (0.39) \text{ mcf}$$

Donde:

B = Volumen de sulfato ferroso amoniacal gastado para valorar el blanco de reactivos (mL).

T = Volumen de sulfato ferroso amoniacal gastado para valorar la muestra (mL).

N = Normalidad exacta del sulfato ferroso (valorar por separado al momento de analizar las muestras).

g = Peso de la muestra empleada (g).

mcf = factor de corrección de humedad.

% Materia orgánica = (% C Orgánico) (1.724)

Los factores utilizados en los cálculos se basan en lo siguiente:

El factor 0.39 resulta de multiplicar: $12 / 4000 \times 1 / 0.77 \times 100 = 39$.

Dónde: $12 / 4000$ es el peso miliequivalente del C, $1 / 0.77$ es un factor de corrección debido a que se supone que el método sólo oxida 77 % del C, y 100 es la conversión a porcentaje.

El factor de Van Benmelen de 1.724 para estimar la M.O. a partir de C orgánico, resulta de la suposición de que la M.O. contiene un 58 % de C, $1 / 0.58 = 1.724$

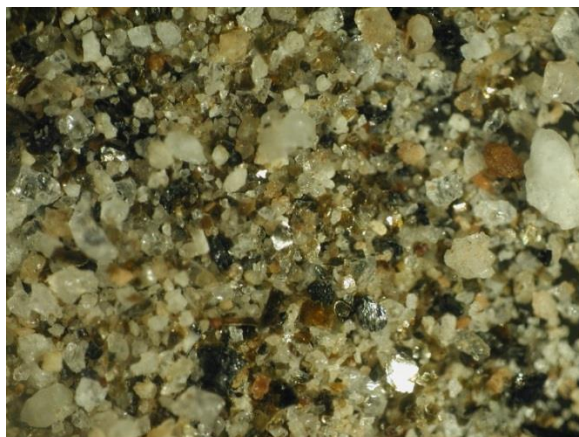
Apéndice E Fotografías de las muestras de la fracción de arenas del suelo

Fotos tomadas con microscopio estereoscópico Leica M420, los aumentos utilizados que se indican en cada uno tiene los siguientes campos de foto (ancho): 25X = 6 mm, 20X = 8 mm y 10X = 15 mm

GUADALUPE (EVG)



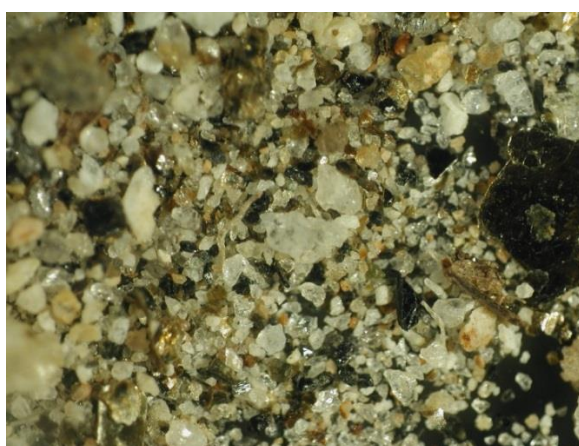
DL-1 (20X)



DL-3 (20X)



DL-2 (20X)



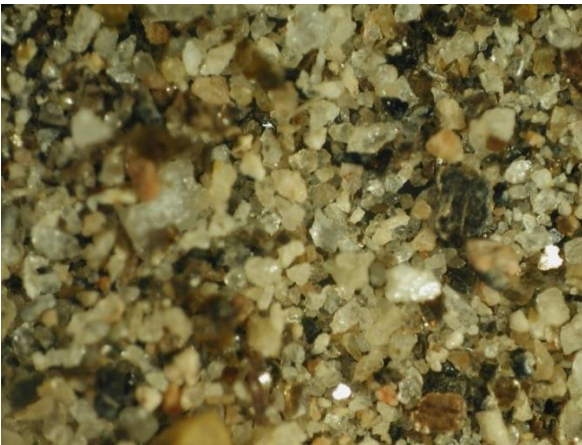
DL-PC (20X)



CE-1 (20X)



RC-2 (20X)



CE-PC (20X)



RC-PC (20X)



RC-1 (20X)



MG-1 (20X)



MG-2 (20X)



MG-PC (20X)



MG-3 (20X)

OJOS NEGROS (EVO)

RBV-1 (20X)



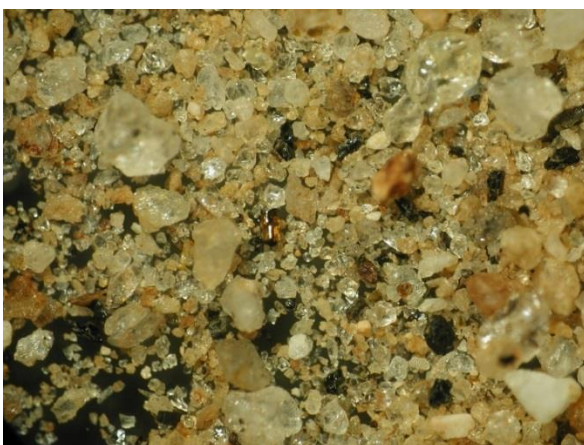
RBV-PC (20X)



RBV-2 (20X)



RT-1 (10X)



RBV-3 (20X)



RT-2 (20X)



RT-3 (20X)



RLP-2 (10X)



RT-PC (20X)



RLP-3 (10X)



RLP-1 (20X)



RLP-PC (20X)

MANEADERO (EVM)



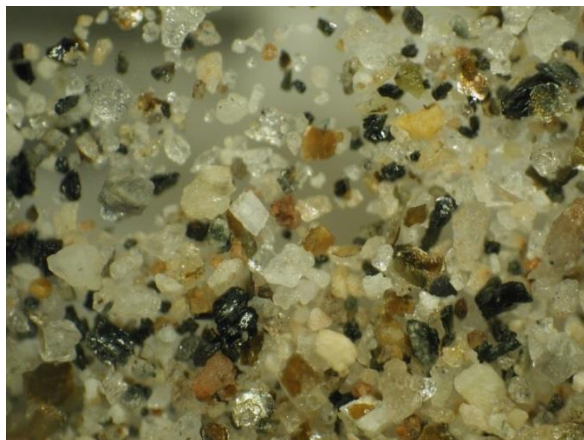
PA96-1 (25X)



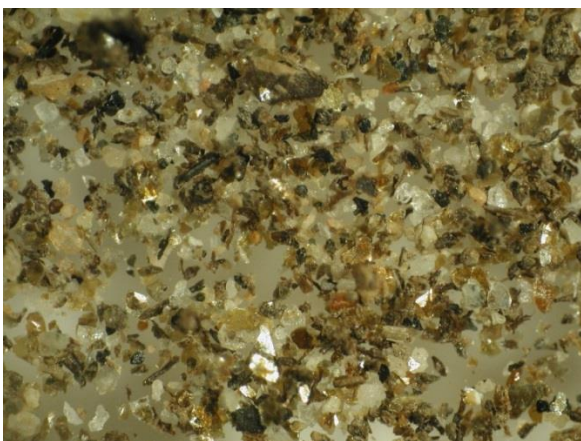
PA96-PC (25X)



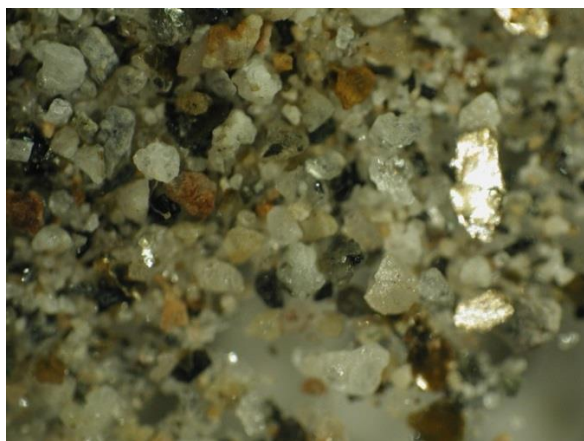
PA96-2 (25X)



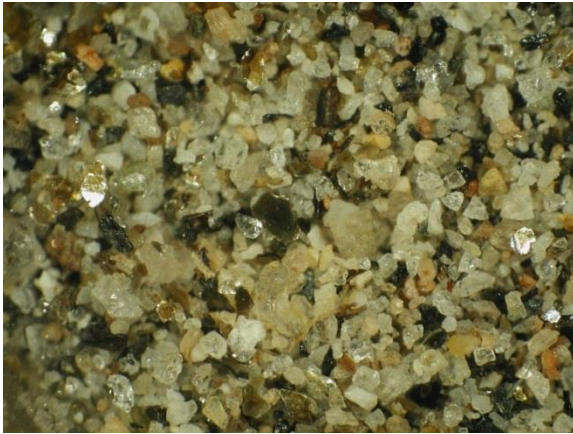
CP-1 (25X)



PA96-3 (25X)



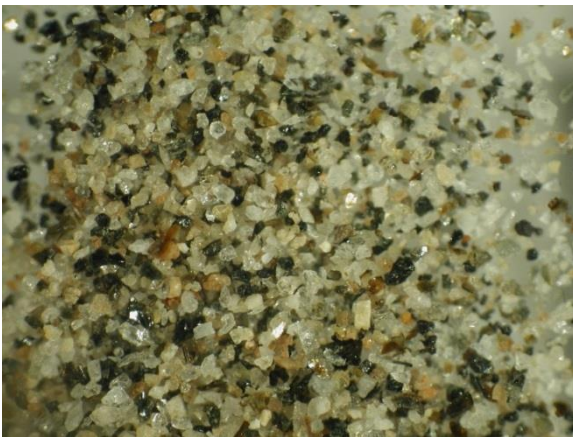
CP-2 (20X)



CP-3 (25X)



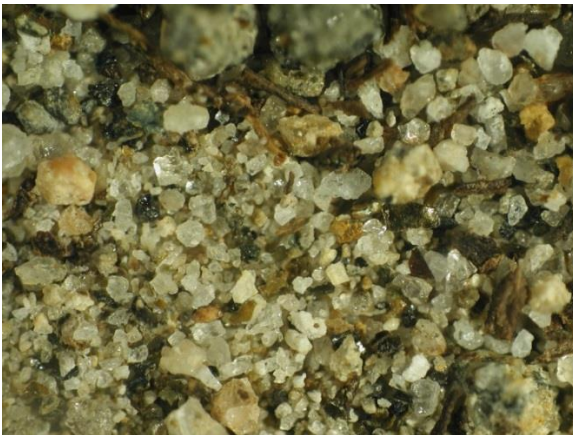
RALA-2 (20X)



CP-PC (25X)



RALA-3 (20X)



RALA-1 (20X)



RALA-PC (20X)

CABORCA (C)



ME-1 (20X)



ME-PC (20X)



ME-2 (20X)



DE-1 (10X)



ME-3 (20X)



DE-2 (10X)



DE-3 (10X)



TO-1 (20X)



DE-4 (10X)



TO-2 (20X)



DE-PC (10X)



TO-3 (20X)



TO-PC (20X)



SE-3 (20X)



SE-1 (20X)



SE-PC (20X)



SE-2 (20X)



JE-1 (20X)



JE-2 (20X)



JE-PC (20X)



JE-3 (20X)