

Tesis defendida por
Luis Alfonso Duarte Martínez

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Thomas Günter Kretzschmar
Director del Comité

Dra. Zayre Ivonne González Acevedo
Miembro del Comité

Dra. Rufina Hernández
Miembro del Comité

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

Dr. Jesús Favela Vara
Director de Estudios de Posgrado

Diciembre, 2014

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN
SUPERIOR DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**Disponibilidad del recurso hídrico y caracterización
hidrogeoquímica de la subcuenca del municipio de Caborca,
Sonora**

Tesis

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

Presenta:

Luis Alfonso Duarte Martínez

Ensenada, Baja California, México
2014

Resumen de la tesis que presenta Luis Alfonso Duarte Martínez, como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales.

Disponibilidad del recurso hídrico y caracterización hidrogeoquímica de la subcuenca del municipio de Caborca, Sonora.

Resumen elaborado por:

Luis Alfonso Duarte Martínez

El área de estudio de la presente tesis se encuentra delimitado por la subcuenca Caborca, ubicada en la zona agrícola del Distrito de Riego No. 037, en el municipio de Caborca, Sonora; donde se producen cultivos altamente rentables, cuyo destino son el mercado internacional, sin embargo, debido a la pobre disponibilidad de agua, las bajas precipitaciones, la alta evaporación y la demanda del bombeo destinado para el riego, han provocado que el acuífero se encuentre en estado de sobreexplotación y con problemas de intrusión salina, convirtiéndose en una de las principales limitantes de la actividad agrícola en esta zona. Por consiguiente, la importancia de realizar la caracterización integral y mantener un monitoreo del agua subterránea en la subcuenca Caborca.

El trabajo de investigación consistió en realizar un análisis hidrogeoquímico, el cual incluye balance de aniones, cationes mayores, potencial de hidrógeno (pH), Sólidos Disueltos Totales (SDT) para muestras de agua de pozo de los meses de abril y septiembre del 2013, con el fin de encontrar diferencias entre el periodo de sequía y de lluvias respectivamente. De igual manera, se determinó la proporción de isótopos estables Deuterio y Oxígeno 18 (D y ^{18}O) de aguas de pozo y lluvias del mes de septiembre del 2013. Y de esta manera hacer un acercamiento a la comprensión de la procedencia de la recarga y la dinámica del acuífero.

Inclusive, se realizó el balance hídrico para los años hidrológicos 2011 y 2012, utilizando las técnicas del infiltrómetro de doble anillo y la determinación de la evapotranspiración real (EVTR) por el método de Turck, ya que éstos son factores que influyen directamente en la recarga y descarga de los mantos acuíferos. Además, se incorporaron datos históricos de lluvias, flujo subterráneo y de extracción por bombeo, para obtener la recarga horizontal (RH) y la recarga inducida (Ri). Sin embargo al tratarse de una zona de clima muy seco y cálido, existen factores que tienen mayor influencia y puede llegar a jugar un papel muy importante al realizar el balance hídrico. Al integrar el resultado de los factores que influyen en la recarga y descarga se estimó una recarga de $\sim 135 \text{ Mm}^3$ para el 2011 y 2012, una descarga de $\sim 211 \text{ Mm}^3$ para el 2011 y de $\sim 196 \text{ Mm}^3$ para el 2012. Utilizando la fórmula de balance de masas, se obtuvo un déficit de $\sim 75 \text{ Mm}^3$ para el 2011 y $\sim 60 \text{ Mm}^3$ para el 2012.

Palabras clave: Balance hídrico, evapotranspiración real, balance iónico, isótopos estables, Caborca, Sonora, Distrito de Riego No. 037.

Abstract from the thesis presented by Luis Alfonso Duarte Martínez as a partial requirement to obtaining the master Science degree in Earth Science with orientation in Environmental Geosciences.

Availability of hydric resources and hydrochemical characterization from the subbasin Caborca, Sonora.

Abstract by:

Luis Alfonso Duarte Martínez

The present thesis of this area is limited for the sub-basin Caborca which is in the irrigation agricultural zone No. 037 at Caborca, Sonora; where highly profitable crops are produced whose destination in the international market, however because the poorly water, low rainfalls, high evaporation and the demand for the pumping intended for irrigation, these have caused that the aquifer to be in a state of overexploitation with saline intrusion problems, becoming one of the main limitations of farming in this area. Thence the importance of realizing the integral characterization and keep groundwater monitoring in the subbasin Caborca.

The labor of this investigation was an hydrogeochemical analysis, which includes an anions balance, major cations, hydrogen potential (pH), Total Dissolved Solids (TDS) for wells water samples from April to September 2013, in order to find differences between the period of drought and rain respectively, In the same way, it was determined the proportion of stable isotopes Deuterium and Oxygen 18 (D y ¹⁸ O) from wells water and rain of September 2013. And thus we can be closer to understanding the origin of the recharge and the dynamic of the aquifer.

Inclusive it was necessary to realize the hydric balance for the hydrological years 2011 and 2012, using techniques of the double ring infiltrometer and the determination of the real evapotranspiration (ETR) by the influence directly in the charge and discharge from the aquifer system. Moreover, there were historical rain data, underground flows and extraction by pumping to obtain the horizontal recharge (HR) and induced recharge (iR). However, since it is a very dry climate zone and warm, there are factors that have greater influence and they might play an important role in making the hydric balance. Integrating the result of the factors that influence the recharge and discharge it was estimated a recharge of ~135 Mm³ for 2011 and 2012, a discharge of ~211 Mm³ in 2011 and ~196 Mm³ for 2012. Using the formula mass balance a deficit was obtained ~75 Mm³ in 2011 and ~60 Mm³ in 2012.

Keywords: Hydric balance, real evapotranspiration, ionic balance, stable isotopes, Caborca, Sonora, Irrigation district No.037.

Dedicatoria

A mis padres, Martha Cecilia Martínez Osuna y Marco Antonio Duarte Anaya,

Juntos, me han apoyado e impulsado para salir adelante en mis estudios,

Forjaron en mí la fe para nunca rendirme ante cualquier adversidad.

A mis Hermanos Marco Antonio, Jesús Rodolfo y Martha Cecilia,

Siempre han sido inspiración debido a su pasión en todo lo que hacen.

Y a René Núñez Soto,

Por el apoyo incondicional desde el inicio de este reto, motivarme y tener fe en mí.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico proporcionado para llevar a cabo la maestría.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), por su apoyo económico y las facilidades proporcionadas.

Al Fondo Institucional del Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación (FORDECYT) por su apoyo económico durante la culminación de la tesis.

Al Dr. Thomas Kretzschmar gracias por su paciencia, apoyo y valioso tiempo proporcionado durante mi estancia en CICESE.

A los miembros de mi comité de tesis. A la Dra. Zayre Ivonne González Acevedo y a la Dra. Rufina Hernández, gracias por su tiempo, sus enseñanzas, su gran disponibilidad y consejos a lo largo de la maestría y sobre todo gracias por su amistad.

A la Universidad de Arizona en Tucson, principalmente a Chris Eastoe y Benjamin McElhaney encargados del laboratorio de hidrogeología, gracias por apoyarme con los análisis de isótopos estables.

A la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), por proporcionarme los datos de las estaciones meteorológicas y de los censos de bombes de las aguas subterráneas del distrito de riego No. 037.

A INIFAP (Caborca) principalmente a los Ingenieros Jesús Valenzuela y Fabián Robles por su orientación, capacitación y apoyo durante los muestreos realizados en Caborca, además de proporcionarme los datos meteorológicos de las estaciones.

Al Dr. Bodo Weber por su orientación en la interpretación de las muestras de isótopos estables.

A los técnicos de Ciencias de la Tierra, Mario Vega y Gabriel Rendón por su valiosa ayuda en el laboratorio de hidrogeoquímica y geología.

A Ivonne Pedrín y Martha Barrera por todo el apoyo administrativo, guía dentro de CICESE.

A Napoleón Gudiño, Karla Lara, Francisco Del Toro, Anabel Del Toro y René Núñez por su apreciable ayuda en las salidas de campo.

A mis compañeros y amigos, Anabel Del Toro, Carlos Aguirre, Brenda Anda, Diego Padilla, Leopoldo Gutiérrez, Francisco Limón, Claudia Vidales, Román Manjarrez, Ismael Yarbuh, Marco Bartens, Ekaterina Lomtatzide, Francisco Del Toro, Minerva Padilla, Napoleón Gudiño, Karla Lara, Amalia Monzón, Radha A, Abril Pérez, Alfredo Ríos, Uriel Mirabal, Victoria Ramos, Yamile Ornelas, Verónica Maldonado, Jazmín Rivera, Ulises Peralta, Félix Saldaña, María De Jesús Sánchez, Miriam Saldaña y René Núñez, por todo su apoyo, confianza y amistad muchas gracias siempre los tendré en mi corazón.

Contenido

Resumen	ii
Resumen en Inglés.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas.....	xi
Capítulo 1	
Introducción.....	1
1.1 Justificación.....	4
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo General.....	4
1.2.2 Objetivos Particulares.....	4
1.3 Área de Estudio.....	5
1.3.1 Clima.....	6
1.3.2 Hidrografía.....	6
1.3.3 Hidrogeología.....	7
1.3.4 Acuífero Caborca.....	8
1.4 Antecedentes.....	10
Capítulo 2	
Metodología.....	13
2.1 Parámetros hidrogeoquímicos.....	14
2.1.1 Medicion de parametros hidrogeoquimicos <i>in situ</i>	14
2.1.2 Laboratorio.....	15

Contenido (Continuación)

2.2	Procesos Hidrogeológicos	17
2.2.1	Infiltración	17
2.2.2	Textura.....	21
2.2.3	Precipitación.	23
2.3.4	Evapotranspiración real.....	23
2.2.5	Balance hídrico.....	24
2.2.5.1	Recargas.....	25
2.2.5.2	Descargas.....	27
Capítulo 3		
	Resultados.....	29
3.1	Parámetros hidrogeoquímicos.....	29
3.1.1	<i>In situ</i>	29
3.1.2	Laboratorio.....	30
3.1.2.1	Aniones y Cationes.....	30
3.1.2.2	Isotopos estables.....	34
3.2	Procesos Hidrogeológicos	37
3.2.1	Infiltración.....	37
3.2.2	Textura.....	38
3.2.3	Precipitación.	40
3.2.4	Evapotranspiración real.....	41
3.2.5	Balance hídrico.....	42
Capítulo 4		
	Discusión.....	43
4.1	Parámetros hidrogeoquímicos.....	43
4.1.1	<i>in situ</i>	43
4.1.2	Laboratorio.....	44
4.1.2.1	Aniones y Cationes.....	44
4.1.2.2	Isótopos estables.....	47

Contenido (Continuación)

4.2 Procesos Hidrogeológicos	48
4.2.1 Relación de la Infiltración y la Textura.	48
4.2.2 Precipitación y Evapotranspiración real.	49
4.2.3 Balance hídrico.....	50
Capítulo 5	
Conclusion	52
Lista de referencias.....	54
Anexos	
Anexo I.....	57
Anexo II.....	58
Anexo III.....	59

Lista de figuras

Figura		Página
1	Mapa de la localización y delimitación del Área de Estudio (INEGI, 2000).....	5
2	a) Mapa geológico del área de Caborca, donde se delimita con el polígono de color azul el área del acuífero Caborca, la línea negra representa un corte transversal visto en la figura 2b. b) Representación geológica en corte transversal (CONAGUA, 2011).....	9
3	Mapa de la localización y delimitación del Área de Estudio, la numeración de los puntos en la imagen corresponden a los datos de las Tablas 1 a la 6, (INEGI, 2000).....	15
4	Mapa de la localización geográfica de las pruebas de infiltración, la numeración de los puntos en la imagen corresponden a los datos de la Tabla 8, (INEGI, 2000).....	18
5	A) Esquema del funcionamiento del doble anillo. B) Fotografía del Infiltrómetro de doble anillo en campo.....	19
6	Mapa de la localización geográfica las muestras de suelo, la numeración de los puntos en la imagen, corresponden a los datos representados en la Tabla 9, (INEGI, 2000).....	22
7	Mapa de la localización geográfica de estaciones de lluvias de INIFAP y CONAGUA, representadas en color azul claro y oscuro respectivamente (INEGI, 2000).....	24
8	Diagrama Piper (la numeración corresponde al número de las muestras indicadas en las Tabla 3 a la 6 y la figura 3).....	34

Lista de figuras (Continuación)

Figura		Página
9	Diagrama de las muestras de isótopos estables.....	36
10	Diagrama de isótopos estables en el que se ejemplifican los diferentes procesos que cambian la composición isotópica del agua, modificada de (Domenico y Schwartz, 1998) y en combinación con las muestras del estudio.....	37
11	Diagrama de textura donde los datos obtenidos se representan con los círculos color amarillo (USDA, <i>et al</i> , 2012).....	39
12	Lluvias totales anuales, datos de las estaciones del INIFAP presentes dentro de la subcuenca.....	41
13	Lluvias totales promedio anuales, datos de las estaciones INIFAP dentro de la subcuenca Caborca.....	41

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Parámetros hidrogeoquímicos determinados <i>in situ</i> . Durante el muestreo de abril del 2013 (s.d.= sin dato).....	29
2	Parámetros hidrogeoquímicos determinados <i>in situ</i> , durante el muestreo de septiembre del 2013, (s.d.= Sin dato).....	30
3	Concentración de aniones en mg/L determinados en laboratorio de hidrogeoquímica de CICESE. Durante el muestreo de abril del 2013.....	31
4	Concentración de cationes en mg/L determinados en laboratorio de hidrogeoquímica de CICESE. Durante el muestreo de abril del 2013.....	31
5	Concentración de aniones en mg/L determinados en laboratorio de hidrogeoquímica de CICESE. Durante el muestreo de septiembre del 2001.....	32
6	Concentración de cationes en mg/L determinados en laboratorio de hidrogeoquímica de CICESE. Durante el muestreo de septiembre del 2013.....	33
7	Datos isotópicos de Oxígeno 18 y Deuterio.....	35
8	Capacidad de infiltración final de las pruebas de infiltración.....	38
9	Textura de Suelo.....	40
10	Clasificación del agua con base en el contenido de SDT (Fetter, 2001).	43
11	Concentración de aniones en diferentes tipos de agua; las unidades mg/L. Datos de Langmuir (1997), Hem (1985), S.S.A. (2000) y WHO (2004). s.d.= sin dato.....	45
12	Concentración de los cationes principales en diferentes tipos de agua; en mg/L. Datos de Langmuir (1997), Hem (1985), S.S.A. (2000) y Hitchon, et al. (1999). s.d. = sin dato.....	46

Capítulo 1

Introducción

El agua es un recurso indispensable en los procesos químicos, biológicos y geológicos, debido a sus características de carga dipolo y puentes de hidrógeno, es considerado el solvente universal. Al igual que la energía, no se crea ni se destruye, sólo se transforma, y continuamente permanece en circulación y movimiento, cambiando de un estado a otro, a través del ciclo hidrológico, que consiste en tres fases principales: la precipitación, la evaporación y el flujo, tanto superficial como subterráneo. Cada una de estas fases involucra transporte, almacenamiento temporal y cambio de estado del agua (sólido, líquido y gaseoso), dependiendo de varios factores, como son la temperatura, la latitud geográfica y la época del año. Además de ser la base fundamental del desarrollo económico y social del ser humano en la Tierra, ya que en gran medida es utilizada en los servicios sanitarios, en las industrias, en el sector ganadero y en la agricultura. Por lo que, el suministro adecuado del recurso, es primordial.

Al igual que en muchas otras partes del mundo, en México, no se han considerado los límites potenciales de los recursos hídricos, tanto de fuentes superficiales como subterráneas, y el uso de estos recursos se ha hecho sin tomar en cuenta un manejo eficiente. 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 y Quintero, 2009). De la cantidad de agua superficial y subterránea aprovechable en México, el 76.8% se usa en actividades agrícolas, el 14.0% en abastecimiento público, el 4.1% en la industria autoabastecida y el 5.1% en termoeléctricas (CONAGUA, 2011).

México está dividido en 37 regiones hidrológicas que contienen cuencas cuyas aguas drenan hacia las vertientes occidental, oriental e interior. Para facilitar la integración de información socioeconómica, éstas regiones han sido agrupadas por la Comisión Nacional del Agua en 13 regiones hidrológico-administrativas, formadas por agrupaciones de cuencas que respetan los límites municipales (CONAGUA, 2011).

El estado de Sonora, en México, se ubica 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 y evaporación y bajos de precipitación, escurrimiento e infiltración, con una precipitación promedio anual de 336 mm de agua (Vega, *et al.*, 2011). Se encuentra dividido en cinco regiones hidrológicas: RH-7, 8, 9, 10 y 34, siendo las cuatro primeras, cuencas exorreicas de la vertiente occidental que drenan sus aguas hacia el Golfo de California, y la última es una pequeña parte de una cuenca endorreica de la vertiente interior, que drena hacia el estado de Chihuahua (Vega, *et al.*, 2011).

Los acuíferos más importantes del Estado de Sonora en cuanto a extensión y disponibilidad de agua, son el de Caborca (Figura 1), Costa de Hermosillo, Valle de Guaymas y San José de Guaymas. Sin embargo, debido a la extracción desmedida a la que han sido sometidos, se encuentran sobreexplotados y con intrusión salina (Vega, *et al.*, 2011).

El desarrollo de la actividad agrícola, principalmente 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, que se ve reflejada en el decremento de las utilidades que generan los cultivos en la región.

Los altos costos del bombeo (al tenerse que extraer el agua a niveles de profundidad mayores) 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 vitivinícola.

La gran importancia de realizar estudios en la zona agrícola ubicada dentro del Distrito de Riego 037, en la Región Noroeste del Estado de Sonora en el Municipio de Caborca, es debido a que produce cultivos altamente rentables, cuyo destino principalmente son el mercado internacional (Reyes y Quintero, 2009).

Por lo que se realizó un análisis hidrogeoquímico, el cual consistió en el balance de aniones, cationes mayores, potencial hidrógeno (pH), Solidos Disueltos Totales (SDT) para muestras de agua de pozo de los meses de abril y septiembre del 2013. Se determinó la proporción de isotopos estables Deuterio y Oxígeno 18 (D y ^{18}O) de aguas de pozo y lluvias del mes de septiembre del 2013. Por último, se realizó el balance hídrico para los años hidrológicos del 2011 y 2012, utilizando diversas técnicas como el infiltrómetro de doble anillo y la determinación de la evapotranspiración real (EVTR), así como la incorporación de datos históricos de lluvias y datos bibliográficos como el flujo subterráneo y del bombeo para obtener la recarga horizontal (RH) y la recarga inducida (Ri) y de esta manera calcular por medio de la fórmula de balance de masas el estado del acuífero de la subcuenca Caborca.

Así, este proyecto sugiere que para que los recursos hídricos en la región puedan ser usados sosteniblemente se requiere de la modelación y estudios hidrogeológicos e hidrogeoquímicos, la estimación de los impactos de actividades industriales en los recursos hídricos, la caracterización de fuentes alternativas para el uso de agua en los valles y la optimización de uso del agua disponible.

1.1 Justificación.

El presente estudio busca las respuestas a preguntas de vital importancia para la agricultura del municipio de Caborca tales como: ¿Cuánto del valioso recurso hídrico queda aún disponible en el acuífero Caborca?, con respecto a carga y la recarga ¿Cómo se comporta el acuífero en la actualidad?, ¿Cómo lo hará en los próximos años? Y tomando en cuenta que se quiere llegar a un manejo sostenible y a la recuperación del acuífero ¿Qué cantidad del recurso se debe extraer para mantener un balance? Esto se logrará con una caracterización integral de la cuenca Río Altar y el acuífero Caborca. Para finalmente con los resultados motivar a la elaboración de un plan de manejo integral y sostenible del recurso en beneficio de la viticultura, que impacta directamente la economía del Estado de Sonora.

1.2 Objetivos.

1.2.1 Objetivo general.

Realizar una caracterización hidrogeoquímica y balance hídrico del agua subterránea en la subcuenca del Municipio de Caborca, Sonora.

1.2.2 Objetivos particulares.

- Definir la recarga y descarga de la subcuenca Caborca.
- Estimar el déficit hídrico del acuífero delimitado por la subcuenca.
- Caracterizar el agua de los pozos y lluvias por medio de aniones, cationes e isótopos estables.
- Definir la principal fuente de recarga del acuífero dentro de la subcuenca Caborca.

1.3 Área de estudio.

La cuenca Asunción se encuentra en la porción noroccidental del estado de Sonora (Figura 1), tiene una superficie total de 30,140Km² y pertenece a la Región Hidrológica No. 8 “Sonora Norte” (INEGI, 2000), abarcando gran parte del Desierto de Altar. La precipitación media en la cuenca es de 303.2 mm, con un escurrimiento de 186.4 millones de m³ anuales (CONAGUA, 2011).

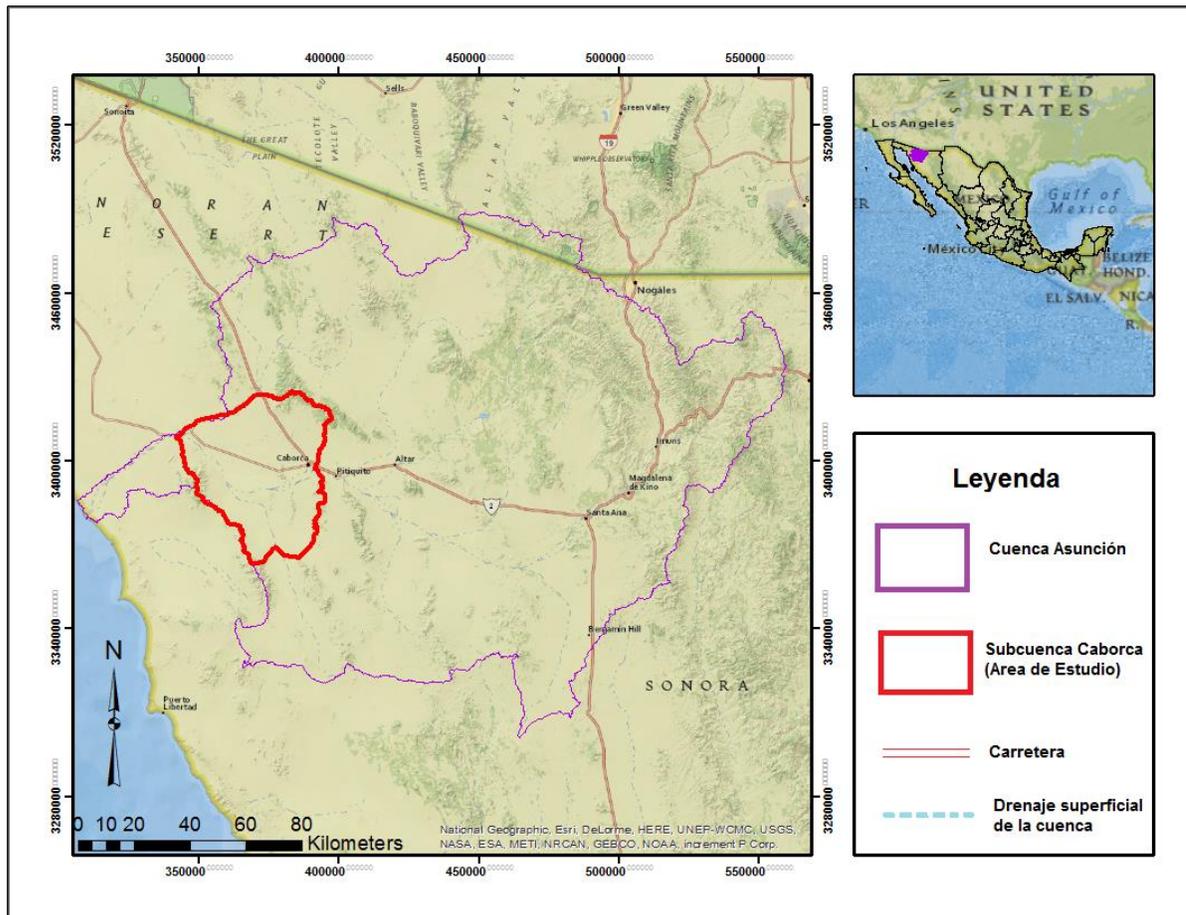


Figura 1.- Mapa en el que se representa la localización y delimitación del área de estudio, (INEGI, 2000).

1.3.1 Clima.

El 96 % de la cuenca está representado por climas muy secos semi-cálidos. En los alrededores de la cabecera municipal se aprecia un clima muy seco cálido y hacia la porción sur en una pequeña zona se presenta un clima seco; su régimen de lluvias es de verano, pero con un porcentaje de lluvia invernal de 22% respecto a la media anual, la temperatura media anual para la cuenca de Caborca es de 21.2°C. (INEGI, 2000).

1.3.2 Hidrografía.

El río Asunción es la corriente más importante; drena una superficie de 25,757 Km² de los cuales 310 corresponden a territorio de Estados Unidos de Norteamérica. Limita al oriente con la cuenca del río Sonora; al sur con la del río San Ignacio; al norte con la cuenca del río Sonoyta y las de los ríos San Pedro y Santa Cruz; al noroeste con las cuencas de las corrientes poco definidas que descargan directamente en el Golfo de California (CONAGUA, 2011).

El río Concepción nace con el nombre de río Casa de Piedra en el cerro Vereda, a 9 Km al sureste de Santa Cruz, en el parteaguas con el río Santa Cruz. Su cauce sigue un rumbo suroeste, recibe por su margen derecha al arroyo San Antonio a una altitud de 1,100 m y cambia su nombre al de arroyo Cocóspera; en su margen izquierdo confluye el río Babasac a una altitud de 930 m. El arroyo Cocóspera recibe las aportaciones de su primer afluente importante, el arroyo Los Alisos, inmediatamente aguas abajo de Ímuris, por su margen derecha, y toma el nombre de río Los Alisos hasta las inmediaciones de Magdalena, donde el colector general fluye por zonas de topografía más suave y se inicia el aprovechamiento de sus escurrimientos.

A partir de Magdalena, el colector general toma el nombre de esta población y continúa con curso hacia el suroeste; pasa por la población Santa Ana donde cruza la carretera Hermosillo-Nogales y aguas abajo, a la altura del ejido la Tinaja, recibe por su margen derecha el arroyo El Coyotillo (CONAGUA, 2011).

Desde la confluencia anterior hasta Caborca, el río Magdalena sigue un curso ponientenorponiente, penetra a zonas de topografía suave donde su cauce se hace divagante y sus escurrimientos se aprovechan parcialmente por derivación. En este tramo los principales aportadores provienen de la margen derecha, como son el arroyo Busani y los ríos Altar y Seco (CONAGUA, 2011). A partir de la confluencia del río Altar, el Magdalena cambia su nombre por el de Asunción y a él confluye el río Seco, a una altitud de 300 m, ligeramente aguas arriba de la estación hidrométrica Pitiquito. Aguas abajo de Caborca, el río Asunción sigue con rumbo oriente hasta llegar a la sierra El Álamo, bordeándola por el norte para después tomar un curso surponiente y finalmente descargar sus aguas en el Golfo de California. En este tramo el arroyo Tesota confluye al río Asunción por el margen izquierdo al oriente de la sierra El Álamo, a una altitud de 180 m. Aguas abajo recibe al arroyo Coyote por el margen derecho, al norte de la misma sierra, a una altitud de 130 m (CONAGUA, 2011).

1.3.3 Hidrogeología.

La topografía de la cuenca se caracteriza por grandes extensiones de terrenos planos en las zonas media y baja; tiene una altitud media de 700 msnm aproximadamente y una máxima de 2,530 msnm al norte de Cananea, Sonora. La formación montañosa más importante de la cuenca se extiende desde Magdalena, hasta los orígenes del colector general, abarcando además las cuencas de los ríos Babasac, Los Alisos, Coyotillo, Busani y Altar, afluentes del río Concepción (CONAGUA, 2011).

Las rocas que afloran en la cuenca varían en edad del Mesozóico al Cenozóico. Las rocas mesozóicas tienen una amplia distribución y consisten en rocas ígneas (granodiorita, granito, diorita, monzonita y volcánicas), sedimentarias (conglomerado, arenisca y brecha) y metamórficas (Figura 2). Las rocas cenozóicas son ígneas extrusivas de composición ácida y básica, que varían del Paleógeno-Neógeno al Cuaternario (derrames basálticos, depósitos aluviales, fluviales y suelos residuales (Vega, *et al.*, 2011).

Las sierras que rodean al acuífero, están formadas por rocas ígneas intrusivas y sedimentarias impermeables del Mesozóico. Al pie de las sierras, se encuentran depósitos de talud formados por clásticos gruesos (arena cuarzosa procedente de rocas intrusivas) que favorecen la infiltración del agua de lluvia hacia la planicie aluvial o valle (Vega, *et al.*, 2011).

El aluvión cuaternario constituye el acuífero granular de tipo libre, cuyas fronteras impermeables son las sierras formadas por rocas ígneas y metamórficas. Este aluvión tiene el espesor mayor en el centro del área y el menor en el norte y sur de la cuenca donde, además, contiene un gran porcentaje de arcilla derivada de sedimentos tobáceos que disminuyen su permeabilidad (Ojeda, 1994).

1.3.4 Acuífero Caborca.

El acuífero de Caborca (Figura 2), definido con la clave 2605 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción noroccidental del estado de Sonora, entre las coordenadas geográficas 29°54' y 31°22' de latitud norte y 111°29' y 113°08' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 13,242 Km².

Limita al norte con los acuíferos Arroyo Sahuaro y Los Chirriones; al este y noreste con Arroyo Seco, Río Altar, Busani, Río Magdalena y La Tinaja; al sur con Puerto Libertad y Arivaipa; y al Oeste el Golfo de California. Geopolíticamente el acuífero comprende parcialmente los municipios de Caborca, Pitiquito, Trincheras, Altar y Oquitoa.

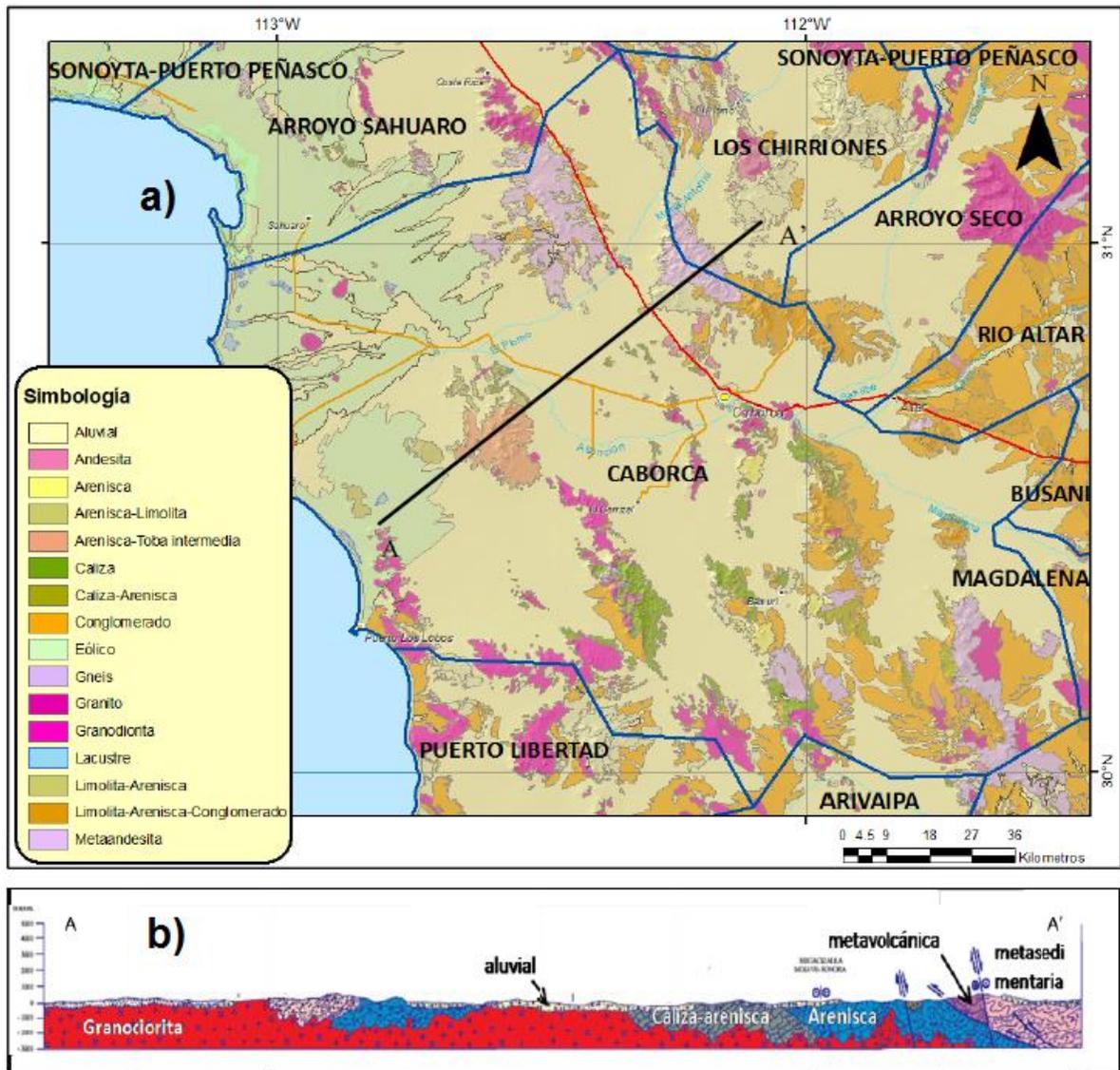


Figura 2.- a) Mapa geológico del área de Caborca, donde se delimita con el polígono de color azul el área del acuífero Caborca, la línea negra representa un corte transversal visto en la figura 2b. b) Representación geológica en corte transversal (CONAGUA, 2011).

1.4 Antecedentes.

En la zona se han realizado varios estudios hidrogeológicos, entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

“Interpretación de datos y determinación potencial actual del acuífero en la costa de Caborca, Sonora”. Realizado en 1975 para la Secretaria de Recursos Hidráulicos por la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A. De este estudio se obtuvo información de 24 sondeos eléctricos verticales de resistividad, así como pruebas de bombeo (SRH, 1975 *in* CONAGUA, 2011).

“Modelo matemático para simular el avance de intrusión salina de la costa de Caborca, Sonora”. Realizado en 1977 para la Secretaria de Recursos Hidráulicos por la empresa Ingenieros Civiles, Geólogos y Asociados, S.A. Consultores. Sus objetivos principales fueron determinar el espesor y resistividad de las capas del subsuelo en sitios de interés para correlacionarlas con las unidades acuíferas identificadas; identificar la distribución de las formaciones cortadas por los pozos exploratorios y de explotación; definir la zona de intrusión salina en la porción norte y centro del valle, reubicar los sitios de perforación y áreas de explotación en la porción norte del valle. Este estudio aporta información valiosa de pruebas de bombeo. (SRH, 1977 *en* CONAGUA, 2011).

“Atlas de aguas subterráneas y red de monitoreo piezométrico del Estado de Sonora”, realizado por la Universidad de Sonora, para la Comisión Nacional del Agua, en el 2005. El estudio consistió en establecer una red de monitoreo piezométrico para cada acuífero que se encuentra bajo la administración del Organismo de Cuenca Noroeste, que incluye la totalidad del Estado de Sonora y parte del Estado de Chihuahua. Además de planos temáticos (clima, precipitación, temperatura, geomorfología, vegetación, etc.), se incluyen planos de profundidad y elevación (mostrando las direcciones de flujo subterráneo). Este estudio es de consulta general de los acuíferos. (CONAGUA, 2005 *en* CONAGUA, 2011).

“Estudio de caracterización fisicoquímica y piezometría de los acuíferos costeros de la región Noroeste”, realizado por la Universidad de Sonora, para la Comisión Nacional del Agua, en el 2006. Contiene información de la calidad del agua subterránea relacionada con las concentraciones de los iones mayores y de parámetros físicos (conductividad eléctrica, pH y temperatura), con sus respectivos planos de isodistribuciones. (CONAGUA, 2006 en CONAGUA, 2011).

“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 para la Comisión Nacional del Agua, en el 2007. En este estudio se planteó el balance hidrometeorológico y con los resultados de las actividades de campo fue posible hacer el balance de aguas subterráneas para determinar la recarga media anual que recibe el acuífero. Con esta información y la hidrogeoquímica, se definió el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero. Finalmente se determina la disponibilidad de aguas subterráneas. (CONAGUA, 2007 en CONAGUA, 2011).

Otros datos importantes en esta integración de información son los obtenidos por Moreno y Vázquez (2000), quienes encuentran diversos valores de recarga estimados para este acuífero: 370 Mm³/a, 490 Mm³/a (INEGI, 2000) y de 379 Mm³/a, cuya procedencia es 87 Mm³ de flujo horizontal, 31 Mm³ de flujo vertical y 261 Mm³ de aguas de retorno agrícola (Herrera, *et al.*, 2002).

La profundidad promedio de los niveles estáticos ha variado de 43 m en 1970 a 67 m en 2001. Sin embargo, en el año 2001 se registraron profundidades estáticas mayores que 120 m y dinámicas mayores que 140 m (Herrera, *et al.*, 2002).

Durante el año 1999, para el acuífero de Caborca, el volumen de extracción se realizaba a través de 887 pozos, siendo éste de 660.10 Mm³/a, del cual, 648.70 Mm³ se empleaban para uso agrícola, 9.80 Mm³ para uso público, 1.50 Mm³ para uso doméstico y 0.10 Mm³ para uso industrial (Reyes y Quintero, 2009).

De acuerdo con Herrera y colaboradores (2002), un volumen anual promedio de extracción de 500 Mm³ fue usado para regar superficies agrícolas de 65,000 ha (1970) a 30,000 ha (2001), con 832 pozos. Debido a que las extracciones han sido mayores que los volúmenes de recarga, la condición del acuífero es de sobreexplotación.

La Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL, 1994) analizó metales pesados (Fe, Cu, Cd, Mn, Pb, Cr, Zn y As) en dos pozos de la cuenca del río Concepción, encontrando en la estación Caborca agua subterránea de calidad aceptable para consumo humano, excepto para los valores de plomo que exceden la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

Moreno (1995) menciona que, en 1989, Caborca descargaba un volumen de 3.5 Mm³ anuales de aguas negras. Estas aguas son vertidas a las tierras agrícolas sin ningún tratamiento, aunque en Caborca existen lagunas de oxidación, pero que no operan de manera eficiente o total (SEDESOL, 1994).

Las aguas residuales producidas por la agricultura del Distrito Caborca no alcanzan a llegar al mar, por lo que se infiltran al subsuelo con su carga de plaguicidas, afectando los acuíferos. La contaminación por agroquímicos (compuestos organofosforados y piretroides en menor escala) fue de 15,218 Kg/a en el distrito de riego de Caborca, aunque no se conoce qué cantidad escurre o se filtra en la cuenca. Otra fuente potencial de aguas residuales es la industria porcícola, produciéndose el 92% de la contaminación del Estado en Hermosillo, Cajeme, Navojoa, Huatabampo, Etchojoa, Bácum y Caborca (Moreno, 1995). En la operación del rastro municipal de Caborca, se descargan aguas residuales de manera directa a la cuenca del río Asunción (SEDESOL, 1994).

Debido a esto, es necesario realizar una caracterización integral de la disponibilidad de agua en la zona y generar información actualizada que permita optimizar el uso del agua disponible.

Capítulo 2

Metodología

Para el cumplimiento de los objetivos de este trabajo de investigación se realizó una recopilación de bases de datos, trabajo técnico y muestreo en campo, análisis de muestras e interpretación de resultados de laboratorio, además del trabajo de gabinete.

Durante abril de 2013 y septiembre de 2013 correspondientes a las temporadas de sequías y de lluvias respectivamente, se visitó la zona de estudio para llevar a cabo una campaña de muestreo de 11 pozos dentro del acuífero y de esta manera observar las diferencias entre los parámetros hidrogeoquímico (*in situ*) entre dichas temporadas, realizando mediciones de pH, CE y alcalinidad. Al mismo tiempo se colectaron muestras de suelo para obtener la granulometría y se realizaron pruebas de infiltración con un infiltrometro de doble anillo. .

Se recopiló información meteorológica de las estaciones de INIFAP en los alrededores de la subcuenca para analizar los datos pluviométricos y por medio del IFAI se recopilaron datos de CONAGUA correspondientes a la extracción por bombeo de pozos y riego para complementar la información necesaria para la elaboración del balance hídrico de la subcuenca. Además se adquirieron modelos de elevación digitalizados y mapas temáticos de INEGI para la incorporación de dicha información y poder generar mapas temáticos.

2.1 Parámetros hidrogeoquímicos.

2.1.1 Medición de parámetros Hidrogeoquímicos *in situ*.

La mayor precisión en la información sobre la calidad hidrogeoquímica y características físicas de cualquier acuífero se logra al obtener estos datos *in situ*. Los parámetros de campo que se midieron en este trabajo incluyen la temperatura, la conductividad eléctrica (CE), un estimado del contenido de sólidos disueltos totales (SDT), el potencial de hidrógeno (pH) y la alcalinidad de las muestras. Para medir estos parámetros se utilizaron vasos de precipitado de 250 ml y el potenciómetro Thermo Electron Corporation.

La CE y los SDT se obtuvieron con el conductímetro portátil modelo Orion 135A. Estos parámetros están estrechamente relacionados, ya que la CE en el agua está controlada por el contenido de SDT, los que se definen como la cantidad de sólidos que permanecen al secar una muestra de agua. La concentración de éstos sólidos disueltos, permite una clasificación del agua propuesta por Fetter (2001) y se puede apreciar en la Tabla 10.

La temperatura y el pH fueron medidos con el potenciómetro portátil modelo Orion 290A+. El pH (potencial hidrógeno) es uno de los parámetros químicos más importantes, ya que rige los principales procesos químicos que ocurren en las aguas naturales, como las reacciones ácido-base, de creación de complejos químicos, de disolución y precipitación química, de oxidación-reducción y de adsorción (Pankow, 1991). El pH se define por el logaritmo base 10 del inverso de la actividad del hidrógeno (Drever, 1997).

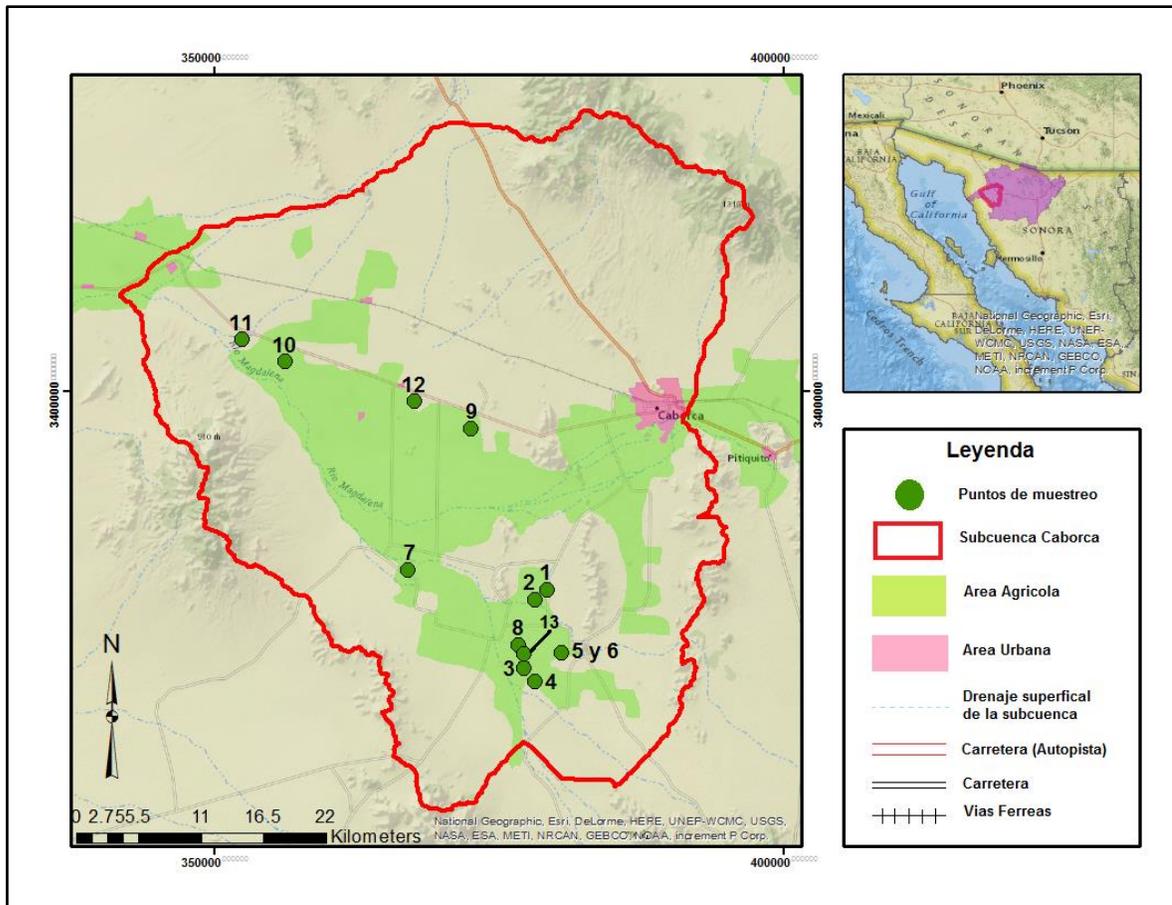


Figura 3. Mapa de la localización y delimitación del Área de Estudio, la numeración de los puntos en la imagen corresponden a los datos de las Tablas 1 a la 6, (INEGI, 2000).

2.1.2 Laboratorio

De cada sitio (Figura 3) se tomaron 13 muestras por duplicado, fueron filtradas en laboratorio en menos de 48 horas desde su recolección, con una bomba de vacío y filtros de membrana de celulosa de 0.45 μm . Una de las muestras fue fijada a un pH menor a 2 mediante la adición de ácido nítrico concentrado con el objetivo de conservar la dureza del agua y la concentración de otros componentes disueltos (EPA, 1991; Weight y Sonderegger, 2001). Posteriormente la muestra fue analizada para obtener las concentraciones de aniones, cationes e isótopos estables pesados.

Los aniones y los cationes principales se midieron en el laboratorio de hidrogeoquímica del CICESE. Se utilizó el sistema de cromatografía de iones (ICS-2000), para obtener la concentración de aniones (Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-}) y con

espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado por inducción (ICP-AES), se midió concentración de cationes (Na, Ca, Mg, K), por último, la calidad del agua, se definió mediante los parámetros físico-químicos analizados en función de los límites máximos permisibles (LMP) establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 y datos de la Comunidad Europea (Hitchon, *et al.*, 1999) y datos de la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2004), para los cationes (Tabla 11) y para los aniones (Tabla 12).

El Bicarbonato se obtuvo de la diferencia obtenida con la fórmula de Electro neutralidad (E.N.) y se puede calcular con la ecuación 1.

Ecuación:

$$E.N. (\%) = \frac{\sum (Z \times Cc) - \sum (Z \times Ca)}{\sum (Z \times Cc) + \sum (Z \times Ca)} \quad (1)$$

Donde:

Z = carga del ion

Cc = concentración del catión (en meq/L)

Ca = concentración del anión (en meq/L)

Debido a que la formula se fundamenta en el hecho de que en todos los análisis químicos debe existir un equilibrio en el contenido de aniones y cationes, al no incluir el valor de los bicarbonatos, el valor de la E.N. nos dará un valor igual a la cantidad de bicarbonatos presentes en el agua con un error menor del 5%. Estos cálculos se hicieron tomando en cuenta la información de aniones y cationes de cada una de las muestras.

Posteriormente los datos se graficaron en un diagrama Piper realizado en el programa Diagrammes para facilitar la clasificación del agua subterránea.

Para el análisis por isótopos estables, Deuterio y Oxígeno 18 (^2H y ^{18}O), se colectaron 13 muestras de agua de pozo, 6 muestras de agua de lluvia y una muestra del arroyo Asunción (Figura 3). Cabe mencionar que tanto las muestras de lluvias como las del arroyo, fueron tomadas de la única lluvia presente durante el muestreo de septiembre y en la zona urbana. Posteriormente fueron enviadas al laboratorio de hidrogeoquímica de la Universidad de Arizona en Tucson, Arizona, USA; donde fueron analizadas con un espectrómetro de masas. Los datos resultantes se graficaron y se compararon con la Línea Meteórica Global (SMOW) y con la Línea Meteórica de Sonora (LMS). Con los datos de lluvias se obtuvo una aproximación a la Línea meteórica local (LML).

2.2 Procesos Hidrogeológicos

2.2.1 Infiltración

Infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia capas inferiores del suelo (Fangmeier, *et al.*, 2006). La tasa de infiltración es gobernada por varios factores, como la topografía del terreno, la cobertura vegetal, las características del suelo (porosidad y conductividad hidráulica) y el contenido de humedad (Chow, *et al.*, 1994).

Para calcular la capacidad de infiltración del terreno se realizaron un total de 6 pruebas en diferentes sitios dentro del área de estudio (Figura 4), utilizando el método del cilindro infiltrómetro de doble anillo (Brouwer, *et al.*, 1988).

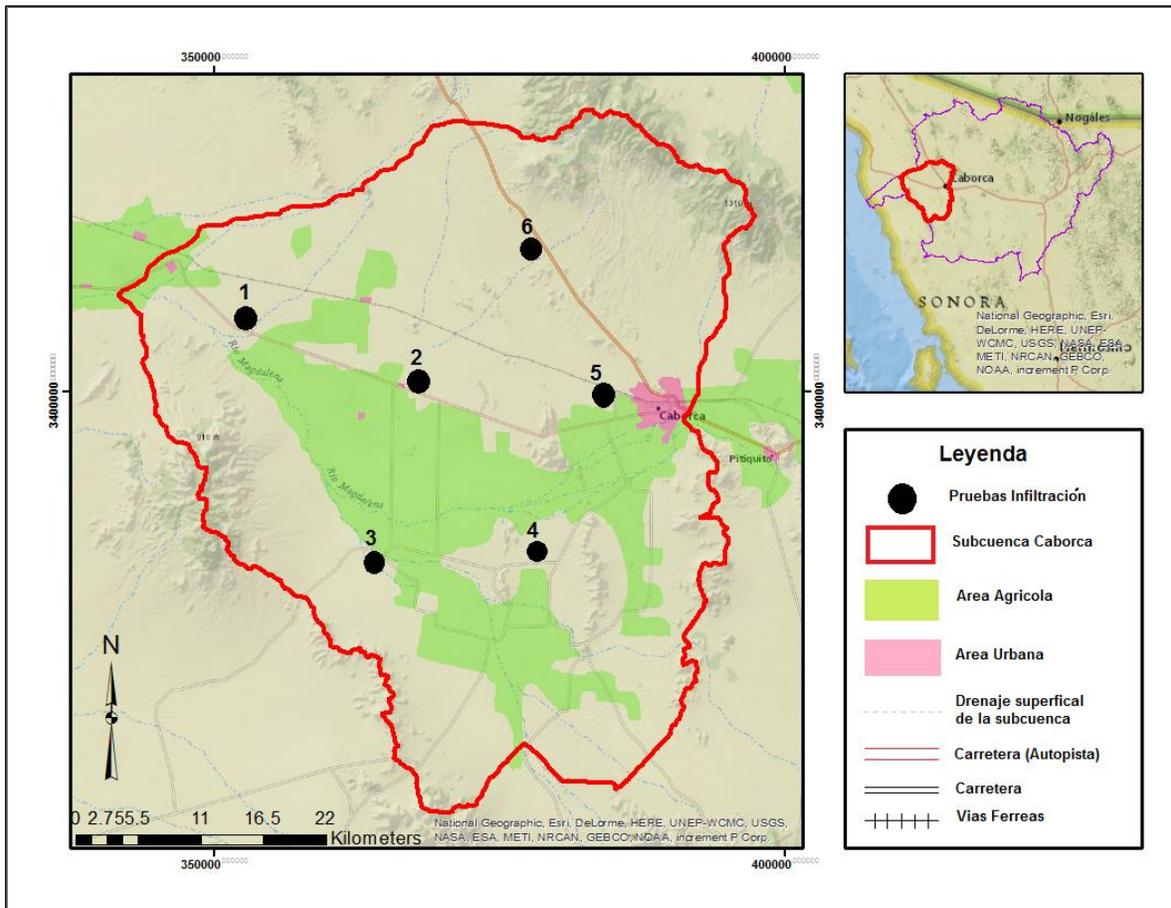


Figura 4. Mapa de la localización geográfica de las pruebas de infiltración, la numeración de los puntos en la imagen corresponden a los datos de la Tabla 8, (INEGI, 2000).

Estas pruebas se efectuaron con un par de cilindros de hierro, uno de 16 cm y otro de 5 cm de diámetro por 20 cm de altura. El cilindro de menor diámetro se coloca dentro del de mayor diámetro (Figura 5). Se registró la tasa de disminución de agua dentro del cilindro de menor diámetro por períodos de tiempo variables, dependiendo de la velocidad a la que se infiltró el agua. La prueba finaliza cuando no se observa un cambio en el nivel de agua entre pruebas y se llega a la tasa de infiltración final (Ver pruebas de infiltración en Anexos IX).

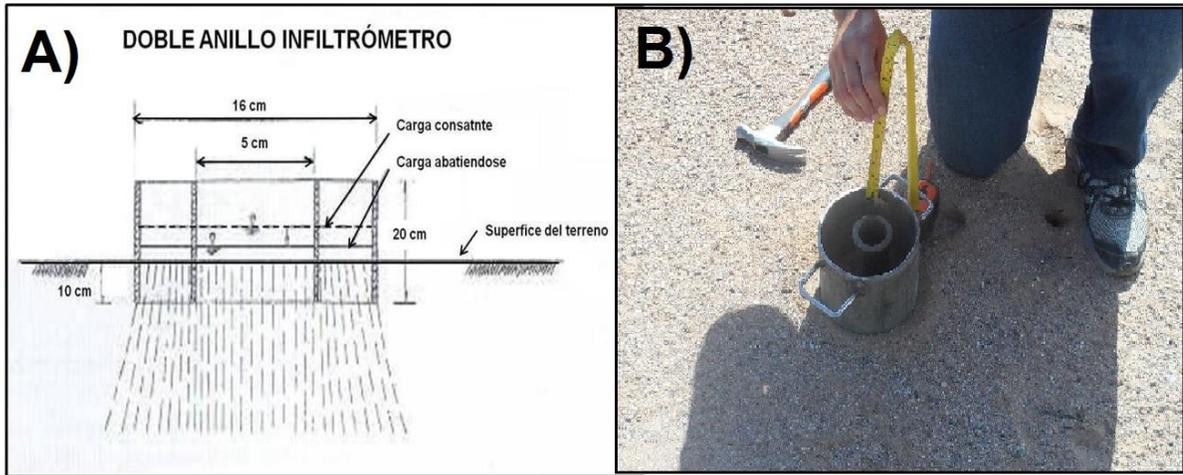


Figura 5.- A) Esquema del funcionamiento del doble anillo. B) fotografía del Infiltrómetro de doble anillo en campo.

El procedimiento del método del infiltrómetro de doble anillo se utiliza comúnmente en campo para determinar la tasa de infiltración de agua en el suelo y depende del tamaño de las partículas del suelo y de su estructura (Brouwer, *et al.*, 1988), así como la topografía del terreno, la cobertura vegetal, las características del suelo (porosidad y conductividad hidráulica) y el contenido de humedad. El método se describe a continuación:

- Estas pruebas se realizaron en las zonas con mayor potencial de infiltración, las cuales fueron elegidas a través del modelo digital de elevación considerando una pendiente baja en el terreno.
- Los anillos de metal fueron clavados en el suelo desnudo a una profundidad aproximada de 10 cm utilizando un martillo.
- Posteriormente se midió con la cinta métrica la altura del cilindro de menor diámetro donde se realizó la medición y se vertió el agua en ambos cilindros tratando de alterar lo menos posible el sustrato para que la infiltración ocurriera de manera natural.
- El nivel de agua debe ser igual en ambos cilindros antes de empezar la medición, finalmente se hicieron mediciones con una cinta métrica, anotando los

centímetros conforme el espejo de agua disminuía su nivel a través de determinado tiempo y se repitió la operación de llenado hasta que el tiempo y la lámina infiltrada entre mediciones fueron constantes.

Existen diversos factores que influyen sobre el proceso de infiltración, como la intensidad de la lluvia, el tipo de suelo, la pendiente del terreno y la cobertura del suelo. Las condiciones de la superficie del suelo gobiernan la capacidad o la velocidad a la que el agua pasa hacia el subsuelo, mientras que su estructura interna rige la velocidad a la cual se desplaza el agua. Horton (1940) demostró que cuando la lluvia supera la tasa de infiltración, la tasa de infiltración decrece con el tiempo conforme la ecuación 2.

Ecuación:

$$f(t) = fc + (fo - fc) e^{-kt} \quad (2)$$

Dónde:

$f(t)$ = Capacidad de infiltración en el tiempo en (mm/hr).

fc = Tasa de infiltración final en (mm/hr).

fo = Tasa de infiltración inicial en (mm/hr).

e = Base de los logaritmos naturales.

k = Constante de decaimiento de la infiltración.

t = Tiempo que duró la prueba en min.

La constante de decaimiento “k” es un parámetro que controla el decrecimiento de la capacidad de infiltración y se estima empíricamente con la tasa de infiltración final calculado con los datos obtenidos de las mediciones con el doble anillo infiltrómetro y las ecuaciones 4 (Campos, 1992).

Ecuación:

$$-1/\log e^{*k} = -t \quad (3)$$

Por lo tanto:

$$k=1t* 0.4343 \quad (4)$$

Dónde:

k = Constante de decaimiento (adimensional).

t = Tiempo en que se llega a la tasa de infiltración final (adimensional).

2.2.2 Textura.

Para definir la clase textural se tomaron 13 muestras (Figura 6) (~500gr), de los primeros 30 cm de suelo colectadas con una pala. Las muestras se colocaron dentro de bolsas herméticas de plástico (USDA, *et al.*, 2012) y se llevaron al Laboratorio de Petrología de CICESE para su análisis.

En laboratorio se siguieron las indicaciones descritas en El Manual de Técnicas Petrográficas para el Estudio de Rocas y Sedimentos del Laboratorio de Petrología de CICESE. Las muestras fueron puestas a secar durante 24 horas a una temperatura de 50°C (Rendón, 2009). Ya sin humedad, cada muestra de suelo fue cuarteada y se separaron, 150 g de material y se tamizó, con un tamaño de malla de 0-4.5 Φ . Para agitar los tamices se utilizó un mortero.

Cada muestra se agitó durante 10 minutos y se separó por los distintos tamaños de malla. Al terminar el proceso de separación por movimiento se sustrajo el contenido de material de cada tamiz, se pesó y se adquirió la fracción de muestra contenida en gramos por tamiz, este análisis separó las fracciones de arena y limo-arcilla para cuantificarlas.

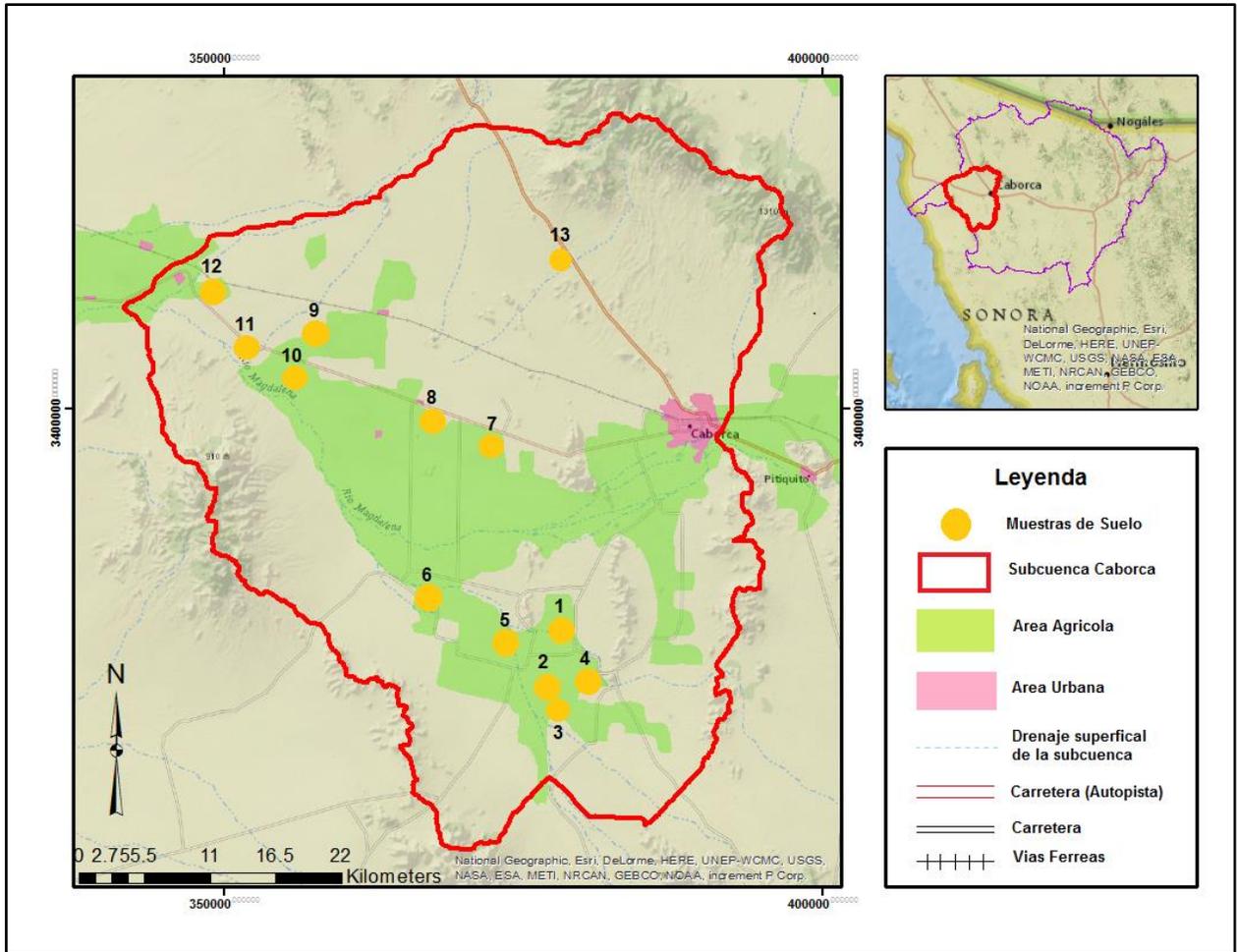


Figura 6.- Mapa de la localización geográfica las muestras de suelo, la numeración de los puntos en la imagen, corresponden a los datos representados en la Tabla 9, (INEGI, 2000).

Debido a que por el método de tamizado no es posible separar los limos y arcillas, fue necesario utilizar el método de Bouyoucos para obtener la proporción de limos y arcillas presentes en las muestras (Hernández, 2007). Por ultimo para una mejor observación se graficó utilizando el diagrama de triangulo de la USDA y colaboradores (2012).

2.2.3 Precipitación.

La precipitación es una parte importante del ciclo hidrológico, responsable de los depósitos de agua subterránea en el planeta. Debido a esto, es muy importante estimar la precipitación que recibió la subcuenca durante el período del estudio. Los datos que se utilizaron fueron los de las estaciones climatológicas del INIFAP y los proporcionados por CONAGUA (Figura 7). Estos datos son de vital importancia para el cálculo de la recarga vertical por infiltración y la salida por evapotranspiración real. En los cuales se utilizarán las lluvias totales anuales.

2.2.4 Evapotranspiración real.

La evapotranspiración es de suma importancia no sólo para estimar las demandas de riego de un cultivo, sino también es un factor que impacta directamente la recarga de los mantos acuíferos.

Para cumplir con los objetivos de este proyecto, se implementó la ecuación (5) que M. Turc propuso, basada en estudios estadísticos de 254 cuencas alrededor del mundo, la cual relaciona evapotranspiración, precipitación y temperatura, dicho método esta conceptualizado en evapotranspiración real (Campos, 1992).

Ecuación:

$$ET_{\text{real}} = \frac{P}{\left[0.9 + \left(\frac{P}{I_T}\right)^2\right]^{1/2}} \quad (5)$$

Dónde:

ET_{real} = evapotranspiración real anual (mm)

P = precipitación anual (mm)

$I_T = 300 + 25 T + 0.05 T^3$

T = temperatura media del aire (°C)

Los datos de precipitación anual y temperatura media del aire fueron proporcionados por las estaciones climatológicas del INIFAP antes mencionadas y ubicadas en la Figura 7.

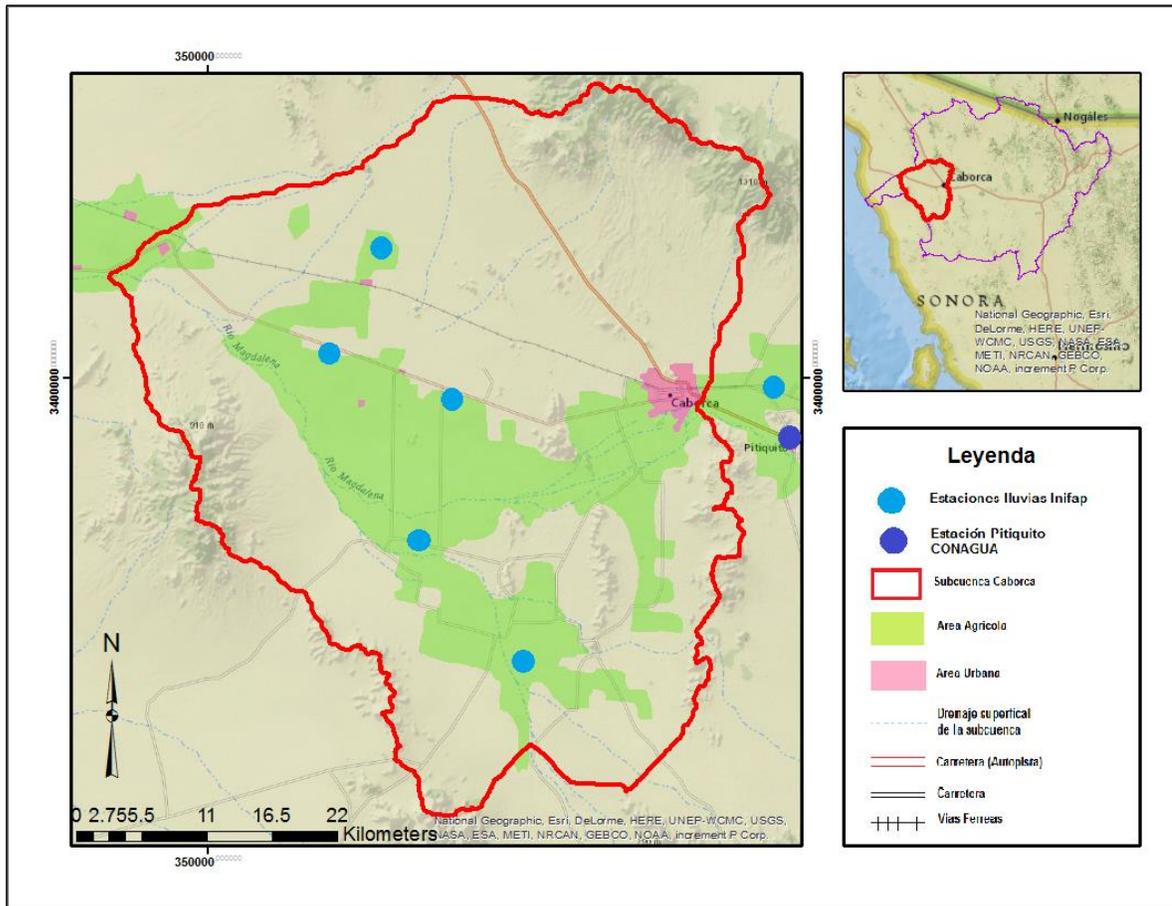


Figura 7.- Mapa de la localización geográfica de las estaciones de lluvias de INIFAP y Conagua, representadas en color azul claro y oscuro respectivamente, (INEGI, 2000).

2.2.5 Balance hídrico.

El balance hídrico tiene por objeto cuantificar los recursos y volúmenes de agua del ciclo hidrológico de acuerdo con el axioma de Lavoisier: "*nada se crea ni se destruye, sólo se transforma*". Este axioma en dinámica de fluidos se conoce como la Ecuación de Continuidad. También permite establecer relaciones entre las distintas variables hidrológicas.

El establecimiento del balance hídrico en una cuenca o en una región determinada permite obtener información sobre:

- El volumen anual de escurrimiento o excedentes.
- El período en el que se produce el excedente y por tanto la infiltración o recarga del acuífero.
- El período en el que se produce un déficit de agua o sequía y el cálculo de demanda de agua para riego en ese período.

La ecuación general de balance (6), de acuerdo a la ley de conservación de masa.

Ecuación:

$$\text{Recargas (R) - Descargas (D) = Cambio de almacenamiento} \quad (6)$$

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido. El balance se definió para el periodo 2010-2011 y se hizo una estimación para el 2011-2012 contemplando el área de la subcuenca (2,000 km²).

2.2.5.1 Recargas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero (R_t) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración a lo largo de los escurrimientos de los arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (R_v), y por flujo subterráneo (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en la redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (R_i).

Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes y casi la totalidad de la extracción se destina al uso agrícola, sólo se considera la recarga por retornos agrícolas.

Recarga vertical (RV):

La recarga vertical se obtuvo utilizando la ecuación propuesta por la CONAGUA (2008) que define a la infiltración por lluvia con la ecuación 7

Ecuación

$$I = PAC \quad (7)$$

Dónde:

P = Precipitación media anual (m).

A = Área de captación vertical (m^2).

C = Coeficiente de proporcionalidad que incluye todos los parámetros que intervienen en el proceso de infiltración de la precipitación.

Una fracción del volumen de lluvias se precipita en las zonas topográficas más altas del área, se infiltra por fracturas propias de las rocas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar el acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

El dato de la entrada por flujo horizontal se tomó del cálculo realizado por CONAGUA (2010), basados en la ley de Darcy; ellos utilizaron los cálculo de las entradas y salidas subterráneas de los resultados promedio de las pruebas de bombeo

realizadas por las empresas TMI, S.A (1975) y ICG, S.A. Consultores (1977) así como CONAGUA (2007) y adaptados al espesor saturado del acuífero en las celdas de flujo ya definidas.

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de las propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. A esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación.

Para este caso, se consideró el valor de bombeo por uso agrícola del último censo hecho por CONAGUA, del cual únicamente un 15 % de este volumen retorna al acuífero en forma de recarga inducida, tomando en cuenta una profundidad media al nivel del agua subterránea de 80 m en la zona agrícola y la presencia de estratos de baja permeabilidad en el subsuelo (Conagua, 2011).

2.2.5.2 Descargas

Se trata de los volúmenes de agua, ya sean naturales o extraídos, que pierde el sistema acuífero. En los cuales se consideran el bombeo de los pozos de abastecimiento dentro de la cuenca y los pozos del límite de la subcuenca definida pero únicamente los que se encuentran aguas arriba de la subcuenca, es importante también considerar la evapotranspiración real para la porción de la subcuenca, sin embargo no existe la posibilidad de considerar las salidas tanto de flujo subterráneo, ya que estudios previos mencionan la existencia de intrusión salina cuyo flujo es hacia el continente, por lo tanto no existe flujo subterráneo de salida. Por otra parte el flujo superficial de salida no es considerado ya que al tener bajas precipitaciones, altas temperaturas y por consiguiente alta evaporación, dicho flujo es nulo. (CONAGUA, 2010)

El dato de extracción por bombeo para el 2011 fue proporcionado por CONAGUA, institución encargada de hacer los censos y dar las concesiones de bombeos. Es importante mencionar que para determinar adecuadamente el valor de la extracción por bombeo, es necesario contemplar la porción de agua extraída por los pozos que se encuentran dentro de la subcuenca Caborca, al igual que los pozos de extracción por bombeo que se encuentran aguas arriba de la subcuenca (Anexo I).

Capítulo 3

Resultados.

En este capítulo se presenta una síntesis descriptiva de los resultados obtenidos en campo y laboratorio y su interpretación se presenta en el capítulo 4

3.1 Parámetros hidrogeoquímicos.

3.1.1 *In situ*.

Los resultados de los análisis fisicoquímicos expresados en la Tabla 1 y 2 presentan valores de SDT que oscilaron de 475 a 1363 mg/L, para el mes de abril del 2013 y para el mes de septiembre del 2013 de 368 a 921 mg/L.

Con respecto a la temperatura, para el muestreo de abril se determinaron temperaturas entre 27.2 a 32.3°C y para el mes de septiembre la temperatura varió de 29.7 °C. a 33.9 °C. Los valores de pH variaron de 7 a 8.05 y 7.31 a 8.13 respectivamente.

Tabla 1.- Parámetros hidrogeoquímicos determinados *in situ*, durante el muestreo de abril del 2013 (s.d. = sin dato).

No.	POZOS	T (°C)	pH	SDT (mg/L)
1	Jawey 1	32.3	8.05	476
2	Jawey 2	27.8	7.00	1363
3	Don Manuel	30.6	7.46	781
4	Sta. Patricia	29.0	7.85	589
5	Campo nuevo 1	30.6	7.50	691
6	Campo nuevo 2	31.0	7.80	634
7	Campo norte	28.6	7.65	890
8	San Daniel	29.7	7.50	1331
9	La Yaqui	28.1	7.30	641
10	El caderazo	s.d	s.d.	s.d.
11	Sta. Minerva	27.2	7.40	624
12	Don Emilio	s.d.	s.d.	s.d.
13	La Canderlaria	s.d.	s.d.	s.d.

Tabla 2.- Parámetros hidrogeoquímicos determinados *in situ*, durante el muestreo de septiembre del 2013, (s.d.= Sin dato).

No.	POZOS	T (°C)	pH	SDT (mg/L)
1	Jawey 1	31.7	7.67	547
2	Jawey 2	33.9	7.95	688
3	Don Manuel	32.0	7.72	835
4	Sta. Patricia	31.2	7.48	707
5	Campo nuevo 1	32.4	7.99	678
6	Campo nuevo 2	32.5	7.74	628
7	Campo norte	30.6	7.84	921
8	San Daniel	s.d.	s.d.	s.d.
9	La Yaqui	30.3	7.67	644
10	El caderazo	s.d.	s.d.	s.d.
11	Sta. Minerva	29.7	7.31	707
12	Don Emilio	30.9	8.13	368
13	La Candelaria	33.5	7.84	725

3.1.2 Laboratorio

3.1.2.1 Aniones y Cationes.

Los resultados de los análisis de los aniones del mes de abril presentaron valores de cloruros que variaron de 82.7 a 326.4 mg/L, los nitratos entre los 8.6 a 26.5 mg/L y los sulfatos entre los 36.1 y 85.6 mg/L, Los bicarbonatos que fueron determinados por medio del balance iónico, variaron entre 150.3 y 695.5 mg/L, para el mes de abril del 2013 (Tabla 3).

Los datos de los resultados de cationes se encuentran en la Tabla 4 donde el ion sodio (Na^+) es el dominante con concentraciones de 85.01 hasta 225.5 mg/L en el pozo La Yaqui y San Daniel respectivamente. El siguiente ion dominante es el calcio (Ca^{2+}) de 19.39 a 194.4 mg/L y por último los iones magnesio y potasio con concentraciones de 8.43 a 68.17 y 1.282 a 16.25 respectivamente.

Tabla 3.- Concentración de aniones en mg/L, determinados en laboratorio de hidrogeoquímica de CICESE, muestreo de abril del 2013.

No.	POZO	Cloruros (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Bicarbonatos (mg/L)
1	Jawey 1	87.8	8.6	42.6	267.0
2	Jawey 2	284.8	26.3	85.2	535.0
3	Don Manuel	326.4	18.4	83.6	72.2
4	Sta. Patricia	190.9	17.9	84.6	150.3
5	Campo nuevo 1	146.9	14.2	36.1	289.2
6	Campo nuevo 2	82.7	15.7	62.7	352.1
7	Campo norte	105.0	7.6	46.6	550.0
8	San Daniel	239.1	26.5	85.6	695.5
9	La Yaqui	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
10	El caderazo	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
11	Sta. Minerva	179.8	21.0	48.7	204.7
12	Don Emilio	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
13	La Candelaria	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.

Tabla 4.- Datos de las concentraciones de cationes en mg/L, determinados en laboratorio de hidrogeoquímica de CICESE, muestreo de abril del 2013.

No.	POZOS	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)
1	Jawey 1	19.39	8.43	138.5	6.218
2	Jawey 2	194.4	47.24	120.4	2.437
3	Don Manuel	53.26	35.57	154.6	1.282
4	Sta. Patricia	33.74	22.14	141.4	6.809
5	Campo nuevo 1	41.29	25.36	128.9	2.469
6	Campo nuevo 2	39.46	24.22	122.6	12.2
7	Campo norte	40.2	36.86	173.5	16.25
8	San Daniel	92.06	68.17	224.5	10.6
9	La Yaqui	90.77	19.56	85.01	2.86
10	El caderazo	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
11	Sta. Minerva	55.89	11.38	135.1	5.337
12	Don Emilio	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
13	La Candelaria	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.

Para el caso del mes de septiembre del 2013 los cloruros variaron de 21 a 144 mg/L, los nitratos entre los 1 y 183 mg/L, los sulfatos entre los 7 a 663 mg/L y los bicarbonatos, entre 15.4 y 304.3 mg/L, lo que indica que todas las muestras se encontraron dentro de los límites permisibles de la NOM (1994) de 500 mg/L (Tabla 5).

Los datos de los resultados de cationes para septiembre se encuentran en la Tabla 6, al igual que en los datos del mes de Abril, el ion dominante es el sodio (Na^+) en este caso las concentraciones van de 71.1 hasta 178.5 mg/L en el pozo Don Emilio y Campo norte respectivamente. El siguiente ion dominante es el calcio (Ca^+) de 21.26 a 71.92 mg/L y por último los iones magnesio y potasio con concentraciones de 2.32 a 33.81 y 3.708 a 8.54 mg/L respectivamente.

Tabla 5.- Concentración de aniones en mg/L determinados en laboratorio de hidrogeoquímica de CICESE, muestreo de septiembre del 2013.

No.	POZOS	Cloruros (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Bicarbonatos (mg/L)
1	Jawey 1	53.8	3.3	22.3	75.3
2	Jawey 2	92.3	6.5	33.4	17.5
3	Don Manuel	105.0	8.0	38.0	304.2
4	Santa Patricia	59.0	7.0	34.0	72.0
5	Campo Nuevo 1	103.0	4.0	38.0	67.0
6	Campo Nuevo 2	72.0	6.0	50.0	81.5
7	Campo Norte	144.0	18.0	42.0	102.0
8	San Daniel	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
9	La Yaqui	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
10	El Caderazo	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
11	Santa Minerva	56.0	14.0	41.0	88.5
12	Don Emilio	21.0	2.0	10.0	104.0
13	La Candelaria	22.0	1.0	7.0	15.4

Tabla 6.- Datos de las concentraciones de cationes en mg/L, determinados en laboratorio de hidrogeoquímica de CICESE, muestreo de septiembre del 2013.

No.	POZOS	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)
1	Jawey 1	35.93	10.47	74.67	8.54
2	Jawey 2	39.99	12.72	160	6.979
3	Don Manuel	41.35	29.84	139.4	7.068
4	Sta. Patricia	29.34	20.3	134.4	6.344
5	Campo nuevo 1	38.61	23.17	135.5	6.089
6	Campo nuevo 2	39.66	23.86	127.3	7.384
7	Campo norte	39.02	33.81	178.5	7.807
8	San Daniel	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
9	La Yaqui	71.92	16.59	85.19	4.73
10	El caderazo	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
11	Sta. Minerva	53.49	10.68	131.2	3.708
12	Don Emilio	21.26	2.324	71.2	5.97
13	La Candelaria	40.65	28.98	152.1	7.689

En la Figura 8, se presenta el diagrama Piper, que ayuda a visualizar los aniones y cationes que se encuentran predominando en las muestras de aguas de pozo y de esta manera clasificar adecuadamente el tipo de agua presente en el acuífero. Se observa claramente que las muestras se agrupan hacia el dominio de los iones Na+K, CO_3+HCO_3 y $\text{Cl}+\text{NO}_3$, si recordamos los datos de las tablas anteriores, los que presentan concentraciones mayores son el ion Sodio, el Cloruro y el bicarbonato.

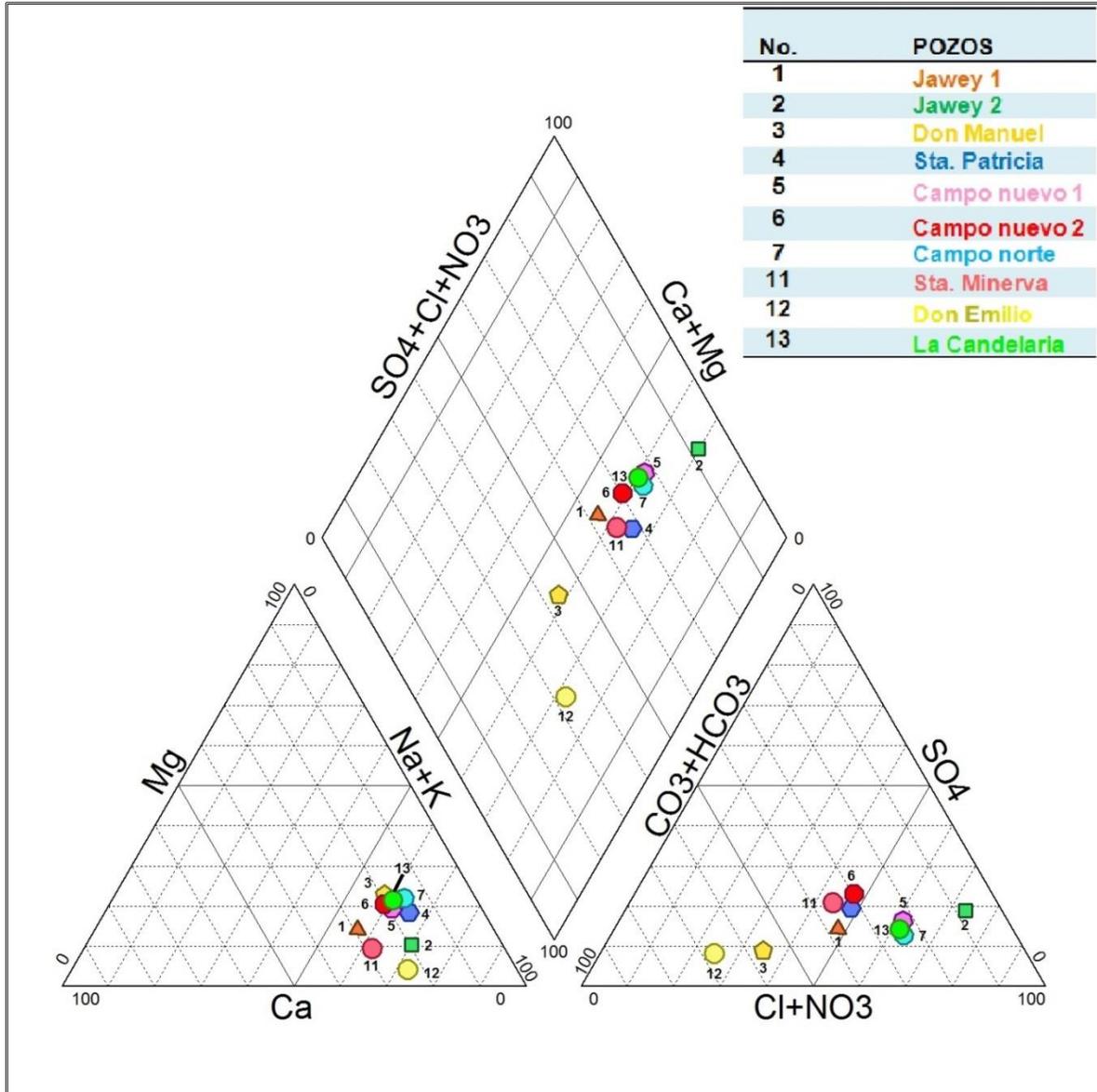


Figura 8.- Diagrama Piper (la numeración corresponde al número de las muestras indicadas en las Tablas 3 a la 6 y la Figura 3).

3.1.2.2 Isótopos estables

En la Tabla 7 se presentan los datos de las muestras a las que se les determinó la proporción de Isótopos estables antes mencionados, los rangos oscilaron entre 6.2 a 7.3 de $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ (oxígeno 18) y de 48 a 53 de $\delta\text{D}\text{‰}$ (deuterio).

Tabla 7.- Datos isotópicos de oxígeno 18 y deuterio

No.	POZOS	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	$\delta\text{D}\text{‰}$
1	Jawey 1	-6.9	-50
2	Jawey 2	-6.2	-48
3	Don Manuel	-6.8	-50
4	Sta. Patricia	-6.8	-49
5	Campo nuevo 1	-6.8	-50
6	Campo nuevo 2	-6.7	-48
7	Campo norte	-6.8	-50
8	San Daniel	-6.6	-50
9	La Yaqui	-6.9	-51
10	El caderazo	-7.0	-50
11	Sta. Minerva	-7.3	-53
12	Don Emilio	-6.8	-49
13	La Candelaria	-6.8	-49

En la Figura 9 se presenta el gráfico de las muestras de pozo, lluvias y del río Asunción en temporada de lluvias de los datos de la Tabla 7, para poder identificar fácilmente las diferencias que existen entre éstas y la Línea Meteorológica Global (LMG) y la Línea Meteorológica de Sonora (LMS) y poder evidenciar la posible procedencia del agua subterránea y otros procesos tales como la evaporación (Figura 10).

Por medio de los datos graficados, se obtuvo la ecuación de la recta utilizando las muestras de lluvias (Educación 9), para llegar a una aproximación a la Línea Meteorológica Local (LML) de la subcuenca Caborca con una R^2 de 0.9157, lo que indica un buen ajuste a la pendiente de la recta. Con las muestras de agua de pozo se obtuvo la Ecuación 8, que representa el ajuste a la recta las cuales presentaron un pobre ajuste a la recta con una R^2 de 0.5119.

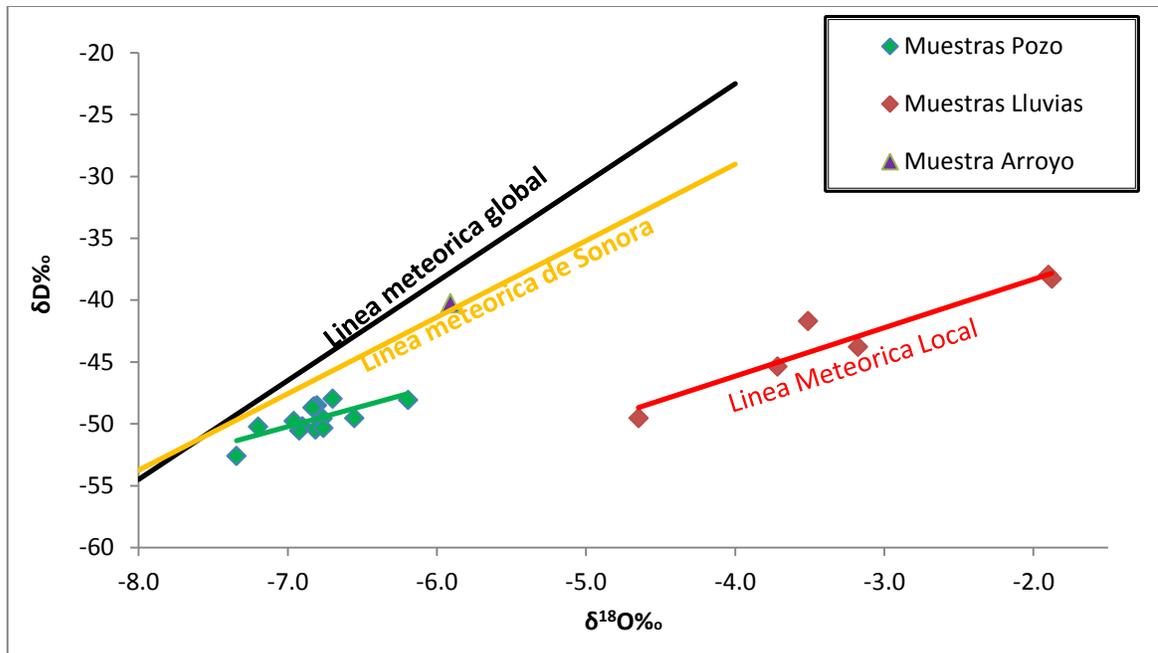


Figura 9.- Diagrama de muestras de isótopos estables.

Ecuaciones:

- Para las muestras de pozo.

$$\delta D\text{‰} = 3.3045\delta^{18}O\text{‰} - 27.098 \quad (8)$$

R^2 de 0.5119

- Muestras de Lluvias. (Línea Meteorica Local)

$$\delta D\text{‰} = 3.9109\delta^{18}O\text{‰} - 30.497 \quad (9)$$

R^2 de 0.9157

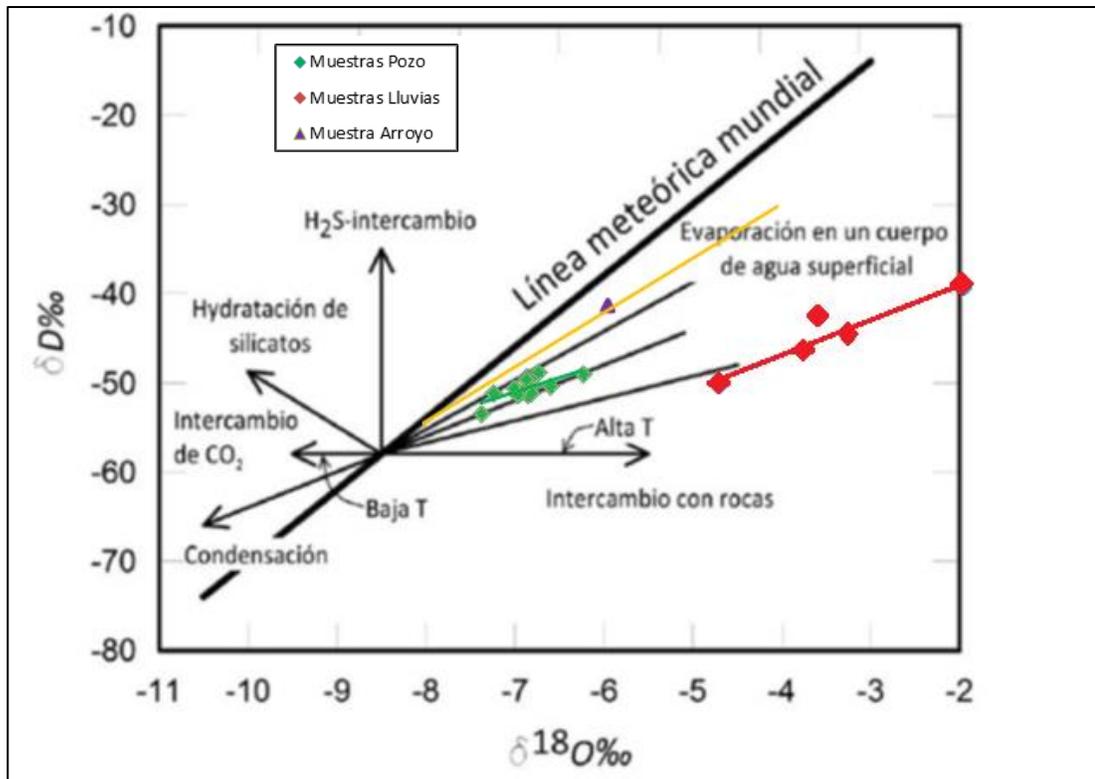


Figura 10.- Diagrama de isótopos estables en el que se ejemplifican los diferentes procesos que cambian la composición isotópica del agua, en combinación con las muestras del estudio. Modificada de Domenico y Schwartz (1998).

Al observar la Figura 10, podemos apreciar que el principal proceso que rige la composición isotópica es la evaporación, tanto en las aguas de lluvias y las de pozo. Inclusive si observamos las pendientes de las ecuaciones de las rectas son similares pero existe una diferencia considerable con respecto a la proporción principalmente de $\delta^{18}\text{O}$.

3.2 Procesos Hidrogeológicos

3.2.1 Infiltración

La capacidad de infiltración final se estimó utilizando la ecuación de Horton (Ecuación 2) con base en los datos obtenidos de la tasa de infiltración inicial y final derivados de las pruebas de infiltración con el infiltrómetro de doble anillo y la estimación del coeficiente de decaimiento "k". Se obtuvieron los valores que se muestran en la Tabla 8 en la que se pueden apreciar rangos de velocidades de

infiltración de 0.57 mm/hr a 5.14 mm/hr con un promedio de 2.63 mm/hr. Las gráficas de las pruebas de infiltración se encuentran en Anexos III.

Tabla 8.- Capacidad de infiltración final de las pruebas de infiltración.

Pruebas	mm/hr
1	2.57
2	2.09
3	5.14
4	4.89
5	0.51
6	0.57
Promedio	2.63

3.2.2 Textura.

Todas las muestras de suelo fueron determinadas con un alto contenido de arenas, entre un 79 a 85%, un contenido de arcillas entre 9 y 13.5% y por último los limos 4.9 y 7.4% (Tabla 9). Esto ubica a las muestras dentro del diagrama ternario de textura de suelo (USDA, *et al.*, 2012), en el límite superior de arena francosa y el límite inferior de franco arenosa (Figura 11), También clasificado como planicie Aluvial (CONAGUA, 2011) apreciable en el mapa de la geología regional del área de estudio (Figura 2).

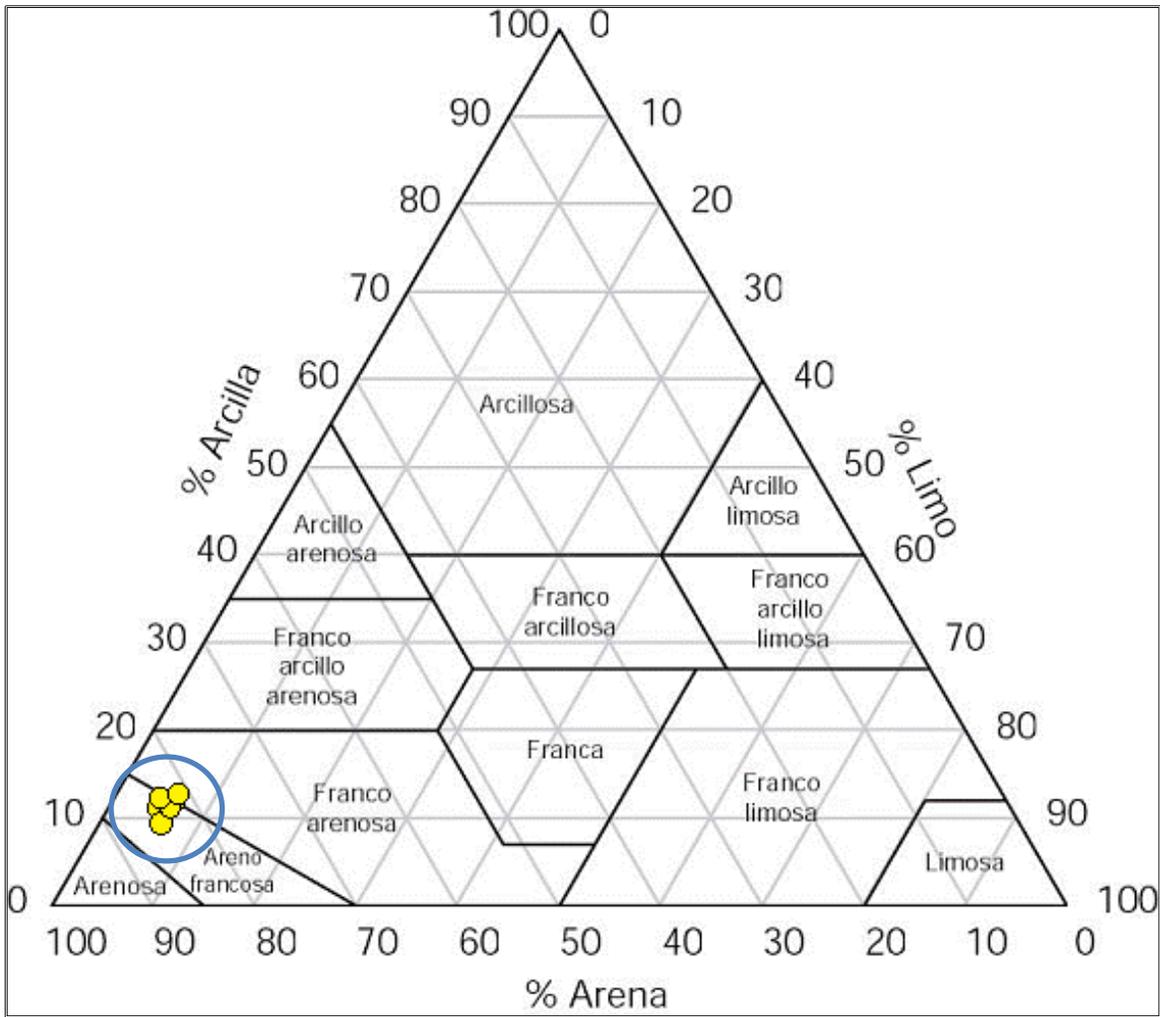


Figura 11.- Diagrama de textura donde los datos obtenidos se representan con los círculos color amarillo (USDA, et al., 2012).

Tabla 9.- Textura de Suelo.

No.	POZOS	Arena %	Limo %	Arcilla %	Tipo Suelo
1	Jawey	81.1	12.7	6.2	franco arenosa
2	Don Manuel	82.1	10.9	7	areno francosa
3	Sta. Patricia	85.5	9.4	5.1	areno francosa
4	Campo nuevo 1	81	11.6	7.4	areno francosa
5	El deseo	81.8	13.5	4.7	franco arenos
6	Campo norte	82.7	12.2	5.1	areno francosa
7	La Yaqui	82.2	11.5	6.3	areno francosa
8	Don Emilio	82.3	10.9	6.8	areno francosa
9	La floridita	82.4	12.2	5.4	areno francosa
10	El caderazo	85.4	9.7	4.9	areno francosa
11	Sta. Minerva	79.5	13.4	7.1	franco arenosa
12	El norteño	81.8	12.6	5.6	franco arenosa
13	P.I.	85.5	9.2	5.3	areno francosa

3.2.3 Precipitación.

Las lluvias en el área de estudio se presentan principalmente durante el verano (INEGI, 2000), en las figura 12 se puede apreciar que efectivamente, las lluvias se presentan en dicho periodo, sin embargo en la figura 13 se observa que para el 2012 las lluvias fueron escasas (3 mm anuales) en comparación de otros años y en la figura del Anexo II la cual incluye una gráfica de los datos de lluvias desde el año 1952 hasta el 2012, se logra apreciar que el periodo prolongado de sequías se viene presentado desde el año 2000. Dichos periodos de sequias perjudican directamente la infiltración que se pudiera presentar dentro de la subcuenca.

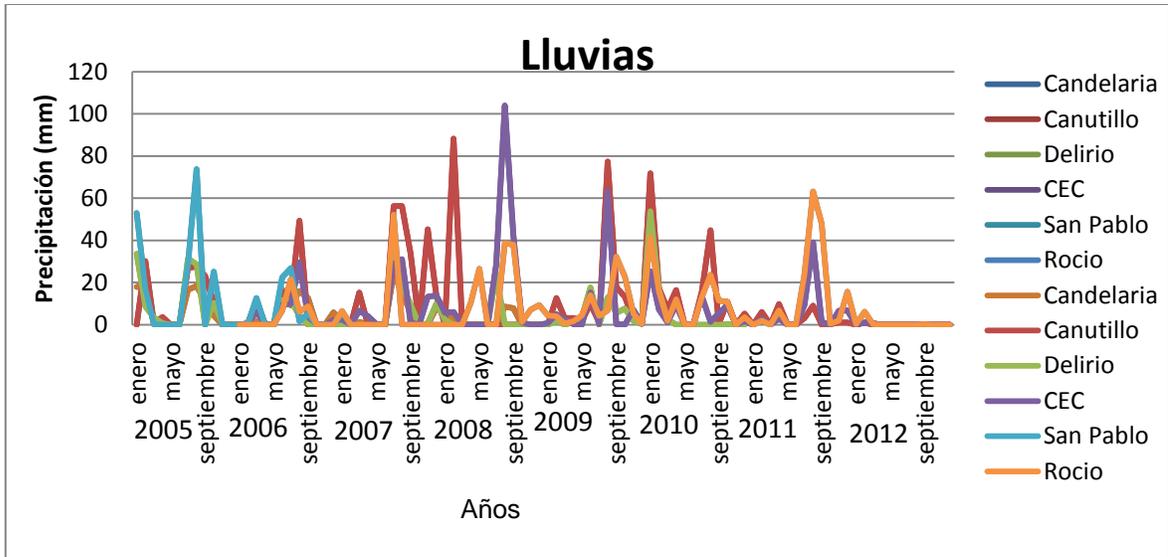


Figura 12.- Lluvias totales anuales, datos de las estaciones del INIFAP presentes dentro de la subcuenca.

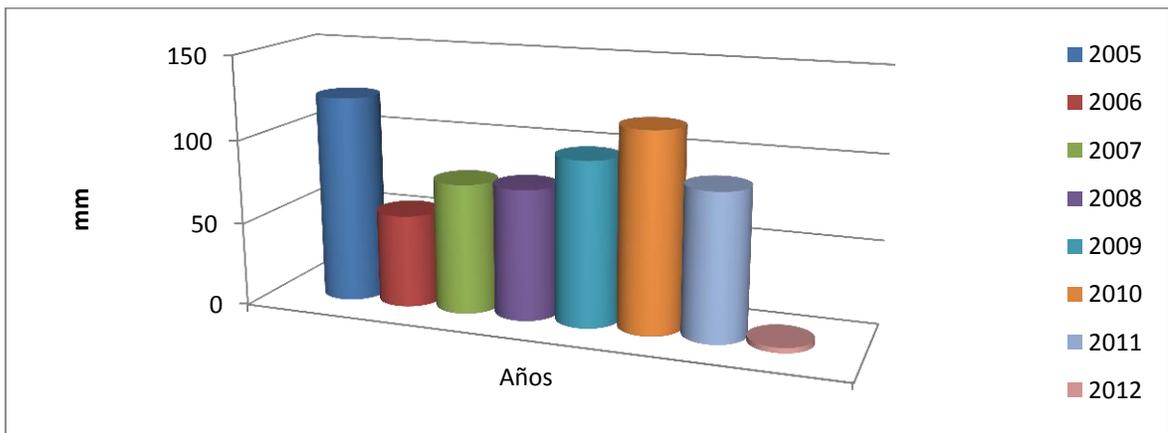


Figura 13.- Lluvias totales promedio anuales, datos de las estaciones INIFAP dentro de la subcuenca Caborca.

3.2.4 Evapotranspiración real.

El cálculo de la evapotranspiración real (EVTR) por el método de Turc (Fórmula 5) obtuvieron valores de 192.6 mm para el 2011 y de 6.7 mm para el 2012, estos son mayores que lo datos de lluvias para cada año evaluado, sin embargo, para el cumplimiento de las condicionantes del método de Turc y debido a los valores de

evapotranspiración determinados, fue necesario considerar la evapotranspiración real igual a la precipitación. Por lo tanto la EVTR es de 87 mm y 3.02mm anuales respectivamente.

3.2.5 Balance hídrico.

Las recargas fueron estimadas utilizando la superficie de 2,000 Km² de captación de la subcuenca Caborca y las lluvias promedio de todas las estaciones dentro de la subcuenca para el 2011 y 2012, por lo que la recarga por flujo vertical fue de ~0.421 Mm³/año y ~0.014 Mm³/año respectivamente. El valor de la recarga inducida (riego) se estimó en ~8.52 Mm³/año, la recarga por flujo horizontal de ~116.9 Mm³/año (CONAGUA, 2011); Obteniendo como volumen total de la recarga de ~135.841 Mm³ para el 2011 y ~135.434 Mm³ para el 2012

Al igual que las recargas, las descargas o salidas estimadas para la subcuenca, son estimadas para la superficie delimitada como área de captación de la subcuenca. Para el caso de la evapotranspiración real estimada por medio del método de Turc, fue de ~16 Mm³ para el 2011 y ~0.52 Mm³ para el 2012. La extracción por bombeo dentro de la subcuenca fue de ~126 Mm³ y el bombeo fuera de la subcuenca pero que se encuentra agua arriba de la subcuenca de estudio fue de ~69.62 Mm³. Por lo tanto el valor total del volumen estimado para la descarga fue de ~211.62 Mm³ para el 2011 y ~196.14 Mm³ para el 2012

Utilizando la fórmula de balance (formula 7) y las sumatorias de las recargas y descargas se obtuvo un déficit de ~75.78 Mm³ para el 2011 y ~60.71 Mm³ para el 2012.

Capítulo 4

Discusión

4.1 Parámetros hidrogeoquímicos.

4.1.1 *In situ*

Los resultados de los análisis fisicoquímicos expresados en la Tabla 1 y 2, presenta los valores de SDT, los cuales oscilaron de 475 a 1363 mg/L para el mes de abril del 2013 a 2013 de 368 a 921 mg/L para el mes de septiembre, De acuerdo a la clasificación de Fetter (Tabla 10), los pozos que presentaron contenidos mayores a 1000 mg/L considerados salobres son, el San Daniel y Jawey 2, con valores de 1363 y 1331 mg/L respectivamente, únicamente durante el muestreo del mes de abril del 2013. La disminución de la concentración de SDT durante el segundo muestreo (septiembre), podría sugerir una variación interanual debido a la marcadas diferencia entre las temporadas de sequias y lluvias, las cuales se presentan en Invierno-Primavera y Verano-Otoño, respectivamente; y se pueden apreciar perfectamente en las Figura 11 y los Anexos II. Inclusive, Celaya (2005) menciona que las aguas de los municipios de Caborca presentan dureza y salinidad, Sin embargo, esto no explica el exceso de salinidad, aunque de antemano sabemos que existe intrusión salina, no podemos asegurar que dicho aumento sea causado por esta.

Tabla 10. Clasificación del agua a partir del contenido de SDT (Fetter, 2001).

Tipo de agua	SDT (mg/L)
Potable	0-1,000
Salobre	1,000-10,000
Salina	10,000-100,000
Salmuera	>100,000

Por otro lado Vega y colaboradores (2011) mencionan que las aguas residuales producidas por la agricultura no alcanzan a llegar al mar, por lo que se infiltran al subsuelo con su carga de plaguicidas, afectando los acuíferos. Moreno (1995) menciona que, en 1989, Caborca descargaba un volumen de 3.5 Mm³ por año de aguas negras, este contaminante orgánico era vertido a las tierras agrícolas sin ningún tratamiento, aunque en Caborca existen lagunas de oxidación, pero que no operaban de manera eficiente o total (SEDESOL, 1994), por lo que ese excedente de salinidad podría ser el reflejo de dichos contaminantes.

4.1.2 Laboratorio

4.1.2.1 Aniones y Cationes.

Por medio del análisis de aniones del muestreo realizados durante el mes de Abril del 2013, se determinó que para los valores de Cloruros en general estuvieron por debajo de la NOM y la WHO (Tabla 11), sin embargo, hubo tres muestras que se encontraron por encima de los límites permisibles de la NOM, Jawey 2, Don Manuel y San Daniel.

Para el caso de los Nitratos únicamente dos de los pozos lograron estar por debajo de los límites permisibles según la NOM, ya que presentaban concentraciones menores de 10 mg/L, el resto alcanzó concentraciones de hasta 26 mg/L, sin embargo, la WHO tiene como límite máximo permisible hasta 50 mg/L por lo que para dicha norma todos las muestras de pozo no presentan riesgo a la salud por nitratos.

Los Sulfatos presentaron concentraciones entre los 36.1 y 85.6 mg/L, las cuales se encuentra por debajo de NOM y WHO, las cuales registran concentraciones de 400 y 500 mg/L como límites máximos permisibles respectivamente para el consumo humano.

Los bicarbonatos que fueron determinados por medio del balance iónico, variaron entre 150.3 a 695.5 mg/L para el mes de abril, de las cuales 3 muestras obtuvieron valores mayores a los límites permisibles de la NOM de 500 mg/L. Jawey 2. Campo Norte y San Daniel, con concentraciones de 535, 550 y 695 mg/L respectivamente.

Para el análisis realizado durante el mes de Septiembre del 2013, los Cloruros variaron de 21 a 144 mg/L, lo que los ubica por debajo de los límites permisibles para ambas normas (NOM Y OMS).

Los Nitratos se presentan entre los 1 a 18 mg/l, de los cuales Campo Norte y Santa minerva son los pozos que se encuentran por encima de los límites permisibles para la NOM la cual registra concentraciones máximas de 10 mg/L, sin embargo OMS tiene como límite máximo permisible 50 mg/L. para los Nitratos. Lo que ubica a todas los pozos dentro de los límites permisibles.

Se determinaron concentraciones entre los 7 y los 50 mg/L de Sulfato las cuales se encuentra por debajo de NOM y OMS, las cuales registran concentraciones de 400 y 500 mg/L como límites máximos permisibles respectivamente para el consumo humano.

Los bicarbonatos, variaron entre 15.4 a 304.3 mg/L lo que inca que todas las muestras se encuentran dentro de los límites permisibles de la NOM de 500 mg/L.

Tabla 11. Concentración de aniones en diferentes tipos de agua; las unidades están dadas en mg/L. Datos de Langmuir (1997), Hem (1985), S.S.A. (2000) y OMS (2004). s.d.= sin dato.

Componentes	Agua superficial	Agua Subterránea	Agua Marina	NOM	OMS
HCO ₃ ⁻	58.0	200	142	500	s.d.
Cl ⁻	7.8	20	19 000	250	250
SO ₄ ²⁻	3.7	30	2 700	400	500
NO ₃ ⁻	<10	s.d.	s.d.	10	50

Al comparar las concentraciones correspondientes al muestreo realizados durante el mes de abril del 2013, con la NOM (Tabla 12) que indica que el máximo permisible es de 200 mg/L para Na^+ , en el que únicamente el pozo de San Daniel estuvo por encima de la norma, sin embargo, en la Comunidad Europea de 150 mg/L, el pozo Campo norte y Don Manuel se suman a la lista de pozos que no pasan esta última norma.

Para Mg^{2+} la Comunidad Europea indica que el máximo permisible es de 12 mg/L, y únicamente dos pozos logran estar por debajo de la norma, Jawey 1 y el Sta. Minerva, todos los demás están muy por encima de la norma.

El K^+ y el Ca^{2+} según la Comunidad Europea, se encuentra dentro de los límites permisibles para todos los pozos, excepto Jawey 2, que para la concentración de Ca^{2+} excede los 100 mg/L que marca la Comunidad Europea.

Para las concentraciones correspondientes al muestreo realizado durante el mes de septiembre del 2013, los pozos estuvieron por debajo de la NOM (1994) que indica el máximo permisible para Na^+ de 200 mg/L, en cambio, con la Comunidad Europea que indica un máximo permisible de 150 mg/L, los pozos Jawey 2, La Candelaria y Campo nortes sobrepasan esta última.

Para Mg^{2+} la Comunidad Europea indica que el máximo permisible es de 12 mg/L, y únicamente tres pozos logran estar por debajo de la norma, Jawey 1, Sta. Minerva y Don Emilio, todos los demás están muy por encima de la norma.

El K^+ y el Ca^{2+} según la Comunidad Europea, se encuentra dentro de los límites permisibles para todos los pozos.

Tabla 12. Concentración de los cationes principales en diferentes tipos de agua; unidades en mg/L. Datos de Langmuir (1997), Hem (1985), S.S.A. (2000) y Hitchon, et al. (1999). s.d. = sin dato.

Componentes	Agua superficial	Agua Subterránea	Agua Marina	NOM	COM. EUROPEA
Na^+	6.3	30	10 500	200	150
Mg^{2+}	4.1	7	1 350	s.d.	12
K^+	2.3	3	390	s.d.	50
Ca^{2+}	15	50	410	s.d.	100

Por último, SEDESOL (1994) encontró que el agua subterránea es de calidad aceptable para consumo humano, excepto para los valores de plomo que exceden la Norma Oficial Mexicana (NOM, 1994).

Incluso se puede apreciar una disminución en la concentración de aniones y cationes entre los datos muestreados, al igual que la variación en salinidad, mencionada en el apartado anterior, esto sugiere a una variación estacional debida a la temporada de lluvias y sequias presentes durante el año.

Aunque las concentraciones en la mayoría de los pozos se encontraron dentro de los rangos permisibles, son tanto el cloruro como el sodio los que están predominando en proporción, esto mismo podemos observar en el diagrama Piper (Figura 8), el cual agrupa las aguas que rigen el acuífero como cloruradas sódicas, esto sugiere una fuente marina, lo que es congruente con la antes mencionada intrusión salina, incluso la infiltración por lluvias podrían ser una fuente de Sodio, ya que el acuífero está cerca de la costa sin embargo las lluvias y la infiltración son escasas en dicha zona.

Por último, al intentar identificar el deterioro y ayudar a poner en evidencia la fuente de salinidad del acuífero, no se identificó una fuente de agua subterránea con una firma diferente a la clorurada sódica, ya que al empatar los puntos de muestreo en el mapa de la Figura 2 y el diagrama Piper de la Figura 8, no se identifica un patrón congruente que evidencie el deterioro, esto sugiere que la subcuenca se encuentra dentro de una zona de mezcla y el agua subterránea refleja una composición marina.

4.1.2.2 Isótopos estables

La relación isotópica de las muestras de agua de pozo, presentan una diferencia considerable con respecto a la pendiente de las Línea Meteórica Mundial, Línea Meteórica de Sonora y la Línea Meteórica Local (Figura 8), donde las muestras de pozo y lluvia evidencian una fuerte influencia de la evaporación, ya que todas presentan un enriquecimiento isotópico (Figura 9).

Debido a que no existen datos previos acerca de isotopos estables para la cuenca Asunción, no fue posible hacer una comparación directa del comportamiento actual de los datos o inclusive agregarlos a una base de datos previa. Sin embargo el hecho de realizar este estudio nos ayuda a iniciar una base de datos.

El hecho de que las muestras de pozo presenten un menor enriquecimiento isotópico que las muestras de lluvias, sugieren que las aguas de pozo podrían ser mezcla de aguas de distinta procedencia a las lluvias en dicha zona. Ya que reflejan una menor influencia de la evaporación, inclusive podría tratarse de mezcla con aguas subterráneas antiguas, sin embargo, para llegar a una conclusión definitiva, hace falta llevar a cabo un estudio exhaustivo de isótopos estables, analizar muestras de agua de lluvias de varios años para que a su vez se pueda realizar una adecuada línea meteórica local de la cuenca Asunción ya que el número de muestras en el presente estudio son pocas para dar un diagnóstico definitivo.

4.2 Procesos Hidrogeológicos

4.2.1 Relación entre textura y la capacidad de infiltración.

En primera instancia, recordemos que el suelo muestreado en Caborca contiene un alto contenido de arenas (75 a 95%) y un bajo contenido de limos y arcillas (25 al 5%) como se mostró en el diagrama de textura de suelo, siendo catalogado como areno franco (USDA, *et al.*, 2012), lo que sugiere que debería presentarse una mayor infiltración, sin embargo, el valor promedio de la capacidad de infiltración final fue de 2.63 mm/hr con un máximo de 5.14 y un mínimo de 0.51 mm/hr y al compararlos con datos obtenidos por Francisco del Toro (2012) en la subcuenca del Moghor, determinó una capacidad de infiltración promedio de 38.3 mm/hr con un máximo de 124.0 y un mínimo de 5.6 mm/hr, por lo que los valores determinados en la subcuenca Caborca son consistentes y además de presentar una baja capacidad de infiltración. Probablemente debido a factores que afectan la infiltración tales como la temperatura, Sales y capas inferiores del subsuelo con alto contenido de arcillas, así como otros

factores. Por lo que sería importante realizar un exhaustivo análisis para encontrar el factor que rige la infiltración en dicha zona, para ayudar al entendimiento de los procesos existentes en la subcuenca Caborca, ya que la evidencia agrupada en este apartado no es suficiente para desenmascarar el factor predominante.

4.2.2 Precipitación y Evapotranspiración real.

Las lluvias en el área de estudio son principalmente durante el verano. En las figuras 12 y 13 se logra apreciar que para el 2012 fueron muy escasas (3 mm anuales) en comparación con otros años y en la figura del Anexo II se aprecia con claridad que el periodo de sequías se viene presentado desde el año 2000. Herrera (2002) reporta una precipitación media anual para Caborca menor a 150mm.

La EVTR por el método de Turc, en la cual se utilizaron directamente los datos de lluvias anuales para su cálculo, sugiere que se considere la evapotranspiración real igual a la precipitación ya que los valores calculados fueron mayores a los de la precipitación, por lo que la EVTR de 87 mm para el 2011 y 3.02 mm para el 2012. Sin embargo Herrera y colaboradores (2002) determinan una evaporación promedio anual superior a los 2,000 mm, pero no especifican que método utilizaron para llegar a ese valor.

Incluso, si la evapotranspiración es aproximadamente igual a la precipitación anual y recordando que en el apartado anterior se mencionó que la infiltración es muy baja (2.63 mm/hr), es evidente que la recarga vertical dentro de la subcuenca será prácticamente nula y no es la principal fuente de recarga del acuífero.

4.2.3 Balance hídrico.

Retomando que las recargas fueron estimadas utilizando la superficie de 2,000km², área de captación de la subcuenca y las lluvias promedio de todas las estaciones dentro de la subcuenca para el 2011 y 2012, por lo que la recarga por flujo vertical para el son de ~0.421 Mm³ y 0.014 Mm³ anuales respectivamente, el valor de la recarga inducida (riego) se estimó en ~18 Mm³/a. y la recarga por flujo horizontal es de ~11 6 Mm³ anuales (CONAGUA, 2011), obteniendo como como volumen total de la recarga de ~135 Mm³ para el 2011 y ~135 Mm³ para el 2012.

En años anteriores se han estimado diferentes valores de recarga, pero utilizando las dimensiones del acuífero y no las de captación de la subcuenca o la de toda la cuenca, lo que hace complicada una comparación precisa entre los datos obtenidos en este estudio y los bibliográficos, sin embargo, para el caso de Montgomery Watson en 1997 determino ~370Mm³ de recarga anual (Moreno, 2000), INEGI en el 2000 determino ~490 Mm³, Herrera y colaboradores (2002) calculados a través del Modflow una recarga de ~379 Mm³ y por último, Retes y Quintero (2009) repostaron un volumen de Recarga de ~300 Mm³ de un balance hídrico realizado el 2005.

Las descargas fueron calculadas con el área de captación de la subcuenca, para el caso de la evapotranspiración real estimada por medio del método de Turc, resultó en ~16 Mm³ para el 2011 y ~0.52 Mm³ para el 2012. La extracción por bombeo dentro de la subcuenca fue de ~126 Mm³ y el bombeo aguas arriba de la subcuenca es de ~69.62 Mm³. Por lo tanto el valor total del volumen estimado para la descarga es de ~211 Mm³ para el 2011 y ~196 Mm³ para el 2012, sin embargo Reyes y Quintero (2009) reportaron un volumen de descarga de ~376.7 Mm³ de un balance hídrico realizado el 2005, no obstante, ellos solo utilizaron los datos de los volúmenes extraídos por bombeo de todos los pozos dentro del acuífero sin delimitar la cuenca o subcuenca, inclusive no involucraron datos de evapotranspiración.

El déficit calculado en el presente estudio fue de $\sim 75 \text{ Mm}^3$ para el 2011 y $\sim 60 \text{ Mm}^3$ para el 2012, sin embargo a pesar de que se utilizaron distintas técnicas y metodologías, Reyes y Quintero (2009) calcularon que en el 2005 existía un déficit de $\sim 76.7 \text{ Mm}^3$ para el acuífero, si a pesar de las diferencias en las metodologías utilizadas, se empatan los datos, es evidente que se ha mantenido el déficit, inclusive si observa la Tabla en Anexos I, se puede ver que las extracciones por bombeo del acuífero se han mantenido por debajo de los $\sim 370 \text{ Mm}^3$ desde el 2005 hasta el 2012, pero esas no son buenas noticias, ya que el déficit implica que cada año están haciendo falta un promedio $\sim 70 \text{ Mm}^3$ en el acuífero, por ende, es importante y de vital importancia para los agricultores, ciudadanos de Caborca y el estado de Sonora, encontrar una alternativa adecuada e inmediata para permitir no solo la recuperación del acuífero, sino, salvar los cultivos altamente rentables del Municipio de Caborca.

Capítulo 5

Conclusión

Existen variaciones interanuales en la concentración de SDT, probablemente debido a la marcada diferencia entre la temporada de lluvias y sequías. La evidencia apunta a 3 posibles fuentes de salinidad, las aguas residuales de los cultivos, las aguas negras del municipio y la intrusión salina. Sin embargo el hecho de que el agua del acuífero sea clorurada sódica, sugiere que la salinidad tiene procedencia marina.

Los datos de isótopos estables de las aguas subterráneas de la subcuenca Caborca no reflejan relación isotópica con las muestras de lluvia, ésto sumado a los datos de infiltración y evapotranspiración, sugieren que el aporte vertical no es fuente principal de la subcuenca Caborca, por lo tanto, la fuente del acuífero debe estar fuera de dicho perímetro. Esto mismo puede evidenciarse con los datos de recarga horizontal.

El déficit del acuífero es de $\sim 75 \text{ Mm}^3$ para el 2011 y $\sim 60 \text{ Mm}^3$ para el 2012 estos datos evidencian la vital importancia de encontrar una alternativa adecuada e inmediata para permitir no solo la recuperación del acuífero, sino, salvar los cultivos altamente rentables del Municipio de Caborca.

Sugerencias.

Así, este proyecto sugiere que para que los recursos hídricos en la región puedan ser usados sosteniblemente, es necesario insistir con la investigación de la cuenca Asunción, ya que hace falta establecer una línea meteórica regional por medio de isótopos estables.

El monitoreo constante de los parámetros Hidrogeoquímicos para identificar contaminación por fertilizantes e intrusión salina. Realizar pruebas de bombeo con el fin de actualizar los datos del flujo subterráneo. Continuar con el monitoreo de los niveles piezométricos.

Planeación y desarrollo de mejores métodos de riego. (Uso de geles para cultivos que mantengan húmedo el suelo), Utilizar otras fuentes de agua (Reinyección de aguas residuales tratadas y/o la Instalación de Desaladoras).

Lista de referencias

- Campos, A. D. (1992).** Procesos del ciclo hidrológico. *Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México.* (2^a. ed.).
- Chow, V.T., Maidment, D.R., y Mays, L.W., (1994).** *Hidrología aplicada.* McGraw-Hill Interamericana. Santa Fe Bogotá, Colombia. 584 pp.
- CONAGUA, (2005).** *Elaboración de Atlas de Aguas Subterráneas para el Estado de Sonora y Diseño de una Red de Monitoreo Piezométrico.* Realizado en convenio por Universidad de Sonora. En CONAGUA, (2011). *Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero 2605 Caborca, Estado de Sonora.* Publicado en el DOF, México, D.F. 28pp. Recuperado en Septiembre del 2012 de: <http://www.conagua.gob.mx/OCNO07/Noticias/2605%20Caborca.pdf>
- CONAGUA, (2006).** *Estudio de Caracterización Físicoquímica y Piezometría de los Acuíferos Costeros de la Región Noroeste.* Realizado en convenio por Universidad de Sonora. En CONAGUA, (2011). *Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero 2605 Caborca, Estado de Sonora.* Publicado en el DOF, México, D.F. 28pp. Recuperado en Septiembre del 2012 de: <http://www.conagua.gob.mx/OCNO07/Noticias/2605%20Caborca.pdf>
- 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 en convenio con la Universidad de Sonora
- CONAGUA, (2008).** *Plan maestro de manejo del Acuífero Guadalupe, Municipio de Ensenada, B.C. Tomo III.* Informe técnico. Ensenada, B.C. México. 111 pp.
- CONAGUA, (2010).** *Estadísticas del agua en México.* Comisión Nacional del Agua. México. Edición 2013. 165 pp. En CONAGUA, (2011). *Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero 2605 Caborca, Estado de Sonora.* Publicado en el DOF, México, D.F. 28pp. Recuperado en Septiembre del 2012 de: <http://www.conagua.gob.mx/OCNO07/Noticias/2605%20Caborca.pdf>
- CONAGUA, (2011).** *Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero 2605 Caborca, Estado de Sonora.* Publicado en el DOF, México, D.F. 28pp. Recuperado en Septiembre del 2012 de: <http://www.conagua.gob.mx/OCNO07/Noticias/2605%20Caborca.pdf>
- Del Toro, G. 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. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, División Ciencias de la Tierra. 118pp.
- Domenico, P.A., and Schwartz, F.W., (1998).** *Physical and Chemical Hidrogeology*(Vol. 44). New York: John Wiley & Sons, Inc. (2^a. ed.). 494 pp.
- Drever, J.I., (1997).** *The Geochemistry of Natural Waters: Surface and Groundwater Environments.* Prentice-Hall Inc. Upper Saddle River, New Jersey. Tercera edición. 436 pp.
- EPA, (1991).** *Supplemental Guidelines for Plans and Operations of Monitoring Wells at Class I Injection Facilities.* United States Environmental Protection Agency: Region V. Recuperado en junio 2013 de: http://www.epa.gov/R5water/uic/r5guid/supp_monitor_well.htm#F

- Espinoza, O. E., (2003).** *Evaluación de riesgo a la salud por exposición a arsénico en agua potable en poblados de la costa agrícola de H. Caborca, Sonora*: Hermosillo, México. Tesis de maestría, Universidad de Sonora, División de Ingeniería, 79 pp.
- Fangmeier, D.D., Elliot, W.J., Workman, S.R., Huffman, R.L., and Schwab, G.O., (2006).** *Soil and water conservation engineering*. 5th edition. Thomsondelmar learning. 502 pp.
- Fetter, C.W. (2001).** *Applied Hydrogeology*. Prentice-Hall Inc. Upper Saddle River, New Jersey. Cuarta edición. 598 pp.
- Flamand R. C. L., (1995).** *Introducción a la mecánica de suelos.* Universidad Autónoma de Chapingo. México. (2ª. ed.) 310 pp.
- Brouwer, C., Prins, K., Kay, M., and Heibloem, M. (1988).** *Irrigation water management: irrigation methods. Training manual, 5.*
- Hem, J. D. (1985).** *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (Vol. 2254).* Department of the Interior, US Geological Survey.
- Hernández, J. L., (2007).** INCA, (Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas), Métodos para el análisis físico de los suelos. La Habana, Cuba. Edición INCA. 40pp. [Consultado en Enero 2014] Disponible en: http://ediciones.inca.edu.cu/files/folleto/metodos_analisis.pdf
- Herrera, J.C., Unland, H., Pulido, L., Zavala, M., Ojeda, W., y De León, B., (2002),** *Tecnificación y reconversión productiva del distrito de riego 037 Altar-Pitiquito-Caborca, Sonora*, p. 55-61.
- Hitchon, B., Perkins, E.H., and Gunter, W.D. (1999).** *Introduction to Ground Water Geochemistry. Geoscience.* Publishing Ltd. Alberta, Canadá. Primera edición. 310 pp.
- INEGI, (2000).** *Síntesis de Información Geográfica del Estado de Sonora.* Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Secretaría de Programación y Presupuesto.
- INEGI, (2000).** Modelo digital de elevación. H12A66, Instituto Nacional de estadística, geografía e información. Heroica Caborca, Sonora. Escala 1:50,000.
- INEGI, (2000).** Modelo digital de elevación. H12-4, Instituto Nacional de estadística, geografía e información. Heroica Caborca, Sonora. Escala 1:250,000.
- Langmuir, D., (1997).** *Aqueous Environmental Geochemistry.* Prentice-Hall Inc. Upper Saddle River, New Jersey. Primera edición. 600 pp.
- Moreno, V. J.L., (1995).** *El agua en Sonora escasa, mal utilizada y contaminada.* México, D.F., Comisión Nacional de Derechos Humanos, p. 221-257.
- NOM, (1994).** 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*, Volumen 18.
- Ojeda, D. A., (1994).** *Explotación futura del acuífero del Valle de Caborca, Sonora*: Monterrey. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil. 111 p.
- OMS, (2004).** *Guidelines for Drinking-Water Quality. World Health Organization.* Ginebra, Suiza. Tercera edición. 515 pp.
- Pankow, J.F., 1991.** *Aquatic Chemistry Concepts.* Lewis Publishers, Inc. Chelsea, Michigan. (1 edición. 673 pp.

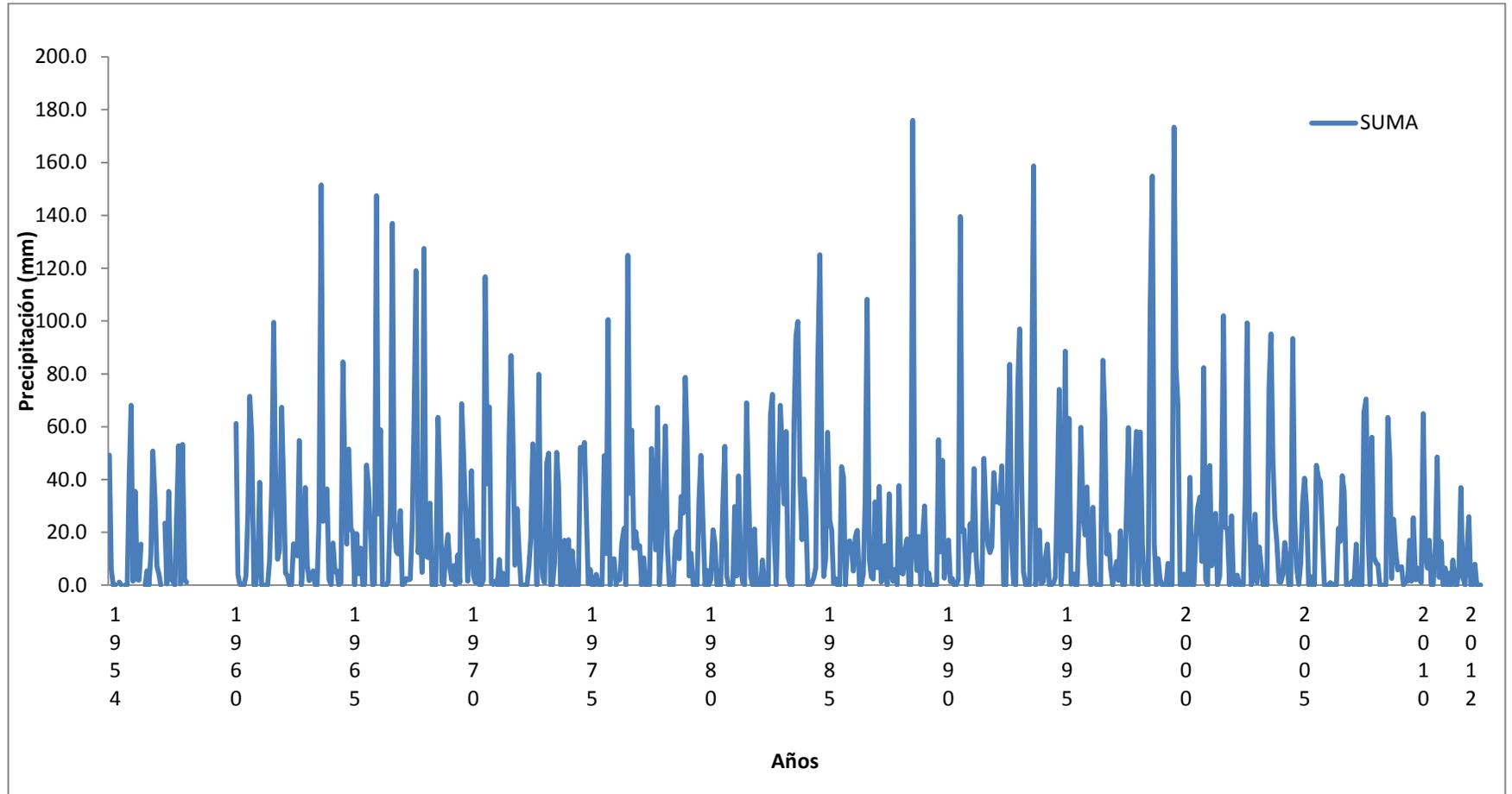
- Rendón, M. G. (1995).** *Técnicas petrográficas para el estudio de rocas y sedimentos en el laboratorio de petrología del CICESE. Informe técnico.* Comunicaciones académicas, serie geología, CICESE. Ensenada, B.C. México. 33 pp.
- Reyes, M. A., y Quintero, S. M. L., (2009).** Problemática del agua en los distritos de riego por bombeo del estado de Sonora, *Revista Digital Universitaria*, DGSCA-UNAM, Vol. 10 Núm. 6.
- SRH, (1977).** *Elaboración del Modelo Matemático para Simular el Avance de Intrusión Salina de la Costa de Caborca*, Sonora. Realizado por la empresa Ingenieros Civiles Geólogos y Asociados, S.A. Consultores. En CONAGUA, (2011). *Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero 2605 Caborca, Estado de Sonora.* Publicado en el DOF, México, D.F. 28pp. Recuperado en Septiembre del 2012 de: <http://www.conagua.gob.mx/OCNO07/Noticias/2605%20Caborca.pdf>
- SRH, (1975).** *Interpretación de Datos y Determinación del Potencial Actual del Acuífero en la Costa de Caborca*, Sonora. Realizado por la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A. En CONAGUA, (2011). *Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero 2605 Caborca, Estado de Sonora.* Publicado en el DOF, México, D.F. 28pp. Recuperado en Septiembre del 2012 de: <http://www.conagua.gob.mx/OCNO07/Noticias/2605%20Caborca.pdf>
- SEDESOL, (1994).** Diagnóstico preliminar de la calidad del agua de la cuenca del río Concepción-Arroyo Cocóspera en el municipio de Magdalena de Kino, Sonora: Hermosillo, Estudios Sociales, *Revista de Investigación del Noroeste*, v. 9, p. 103-139.
- S.S.A., (2000).** Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, *salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.* Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario. México, 7 pp.
- Telis, P.A. (2001).** *Estimation of infiltration rates of saturated soils at selected sites in the Caloosahatchee river basin, southwestern Florida.* U.S. Geological Survey (USGS). Tallahassee, Florida. 16 pp.
- USDA, NSSC, and NRCS , (2012).** *Field book for describing and sampling soils.* 300 pp. Recuperado en septiembre 2013 de: http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_052523.pdf
- Vega, G. E. L., Cirett, G. S., de la Parra, V. M. L., y Zavala, J. R., (2011).** Hidrogeología de Sonora, México. *Panorama de la geología de Sonora, México.* Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 57-88 pp.
- Weight, W.D., and J.L. Sonderegger, (2001).** *Manual of Applied Field Hydrogeology.* McGraw-Hill. Estados Unidos. 608 pp.

Anexos

Anexo I Datos de la superficies sembradas y volúmenes de agua utilizados del distrito de riego 037 Altar-Pitiquito-Caborca.

CICLO AGRÍCOLA	SUPERFICIE FÍSICA REGADA (HA)	HECTÁREAS RIEGO (HA)	VOLUMEN SERVIDO (Mm³)
89-90	39,774	334,535	354,159
90-91	39,620	335,008	361,607
91-92	37,821	310,473	414,592
92-93	33,765	279,315	353,569
93-94	35,518	329,508	705,476
94-95	38,426	347,044	756,719
95-96	41,078	363,491	711,150
96-97	36,648	333,285	645,755
97-98	36,190	339,456	621,604
98-99	33,423	322,184	544,941
99-00	29,716	287,068	469,119
00-01	30,860	179,399	265,446
01-02	26,528	252,510	359,353
02-03	26,211	236,736	353,344
03-04	21,437	212,580	310,876
04-05	21,386	194,352	286,813
05-06	22,257	180,099	310,415
06-07	23,748	206,726	332,385
07-08	23,827	211,982	321,428
08-09	24,292	129,172	307,065
09-10	23,819	215,136	368,819
10-11	23,903	225,654	370,157
11-12	23,299	232,543	304,239
PROMEDIO	57,457	336,347	453,369

Anexo II Datos históricos del promedio anual de lluvias, desde 1952 hasta el 2012 Estación meteorológica Pitiquito, Sonora (CONAGUA, 2013).



Anexo III Graficas de las 6 pruebas de infiltración realizadas durante el muestreo de septiembre del 2013.

