

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

Uso de la Evaluación Hidrogeológica del Sistema Acuífero Mesa del Seri-Zamora y su importancia en la planeación de la provisión de agua potable para la Ciudad de Hermosillo, Sonora, México.

TESIS

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



PRESENTA:

LUZ ANGÉLICA AGUIRRE LÓPEZ.

Hermosillo, Sonora, Agosto de 2017

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



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



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

Departamento de Geología
División de Ciencias Exactas y Naturales

F01

Hermosillo, Sonora, a 04 de Julio de 2017

Dr. Jesús Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología
Departamento de Geología

Por este conducto y de la manera más atenta, me permito someter a su consideración, para su aprobación el siguiente tema de tesis, intitulado:

"EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL SISTEMA ACUÍFERO MESA DEL SERI-ZAMORA Y SU IMPORTANCIA EN LA PLANEACIÓN DE LA PROVISIÓN DE AGUA PARA LA CIUDAD DE HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO"

Esto es con el fin de que la alumna: **LUZ ANGÉLICA AGUIRRE LÓPEZ**, pueda presentar su examen de defensa de tesis para la obtención del Grado de Maestría en Ciencias-Geología.

Sin otro en particular quedamos de Usted.

ATENTAMENTE


MC. José Ismael Minjárez Sosa

Director de Tesis



C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

Hermosillo, Sonora a 05 de julio de 2017

M.C. José Ismael Minjárez Sosa
Director de Tesis

Por este conducto le comunico que ha sido aprobado el tema de tesis propuesto por Usted, intitulado:

"EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL SISTEMA ACUÍFERO MESA DEL SERI-ZAMORA Y SU IMPORTANCIA EN LA PLANEACIÓN DE LA PROVISIÓN DE AGUA PARA LA CIUDAD DE HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO"

Esto, con el fin de que la alumna **LUZ ANGÉLICA AGUIRRE LÓPEZ** pueda presentar su examen profesional, para la obtención del título de Grado. Asimismo le comunico que han sido asignados los siguientes sinodales:

| | |
|--|--------------------------------|
| Dr. Francisco Javier Grijalva Noriega | Presidente |
| M.C. José Alfredo Ochoa Granillo | Secretario |
| M.C. Lucas Antonio Oroz Ramos | Vocal (Sinodal Externo) |
| M.C. José Ismael Minjarez Sosa | Vocal |

Sin otro en particular quedo de Usted

Atentamente

Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**

C.c.p. Interesada
C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

NOMBRE DE LA TESIS:

"EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL SISTEMA ACUÍFERO MESA DEL SERIZAMORA Y SU IMPORTANCIA EN LA PLANEACIÓN DE LA PROVISIÓN DE AGUA PARA LA CIUDAD DE HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO"

NOMBRE DE LA SUSTENTANTE:

LUZ ANGÉLICA AGUIRRE LÓPEZ

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

Dr. Francisco Javier Grijalva Noriega

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

M.C. José Alfredo Ochoa Granillo

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

M.C. Lucas Antonio Oroz Ramos

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

M.C. José Ismael Minjárez Sosa

Atentamente

Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

F07

Hermosillo, Sonora, a 07 de agosto de 2017

Dr. Jesús Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología
Departamento de Geología

Por medio de la presente, nos permitimos informarle que después de revisar y aprobar el trabajo de tesis de la alumna **LUZ ANGÉLICA AGUIRRE LÓPEZ**, hemos acordado que la presentación del examen de grado de la alumna se lleve a cabo el día jueves 10 de agosto del presente a las 17:00 horas.

Sin otro particular, quedamos a la espera de su respuesta.

ATENTAMENTE
Comité de Tesis



Dr. Francisco Javier Grijalva Noriega



M.C. José Alfredo Ochoa Granillo

M.C. Lucas Antonio Oroz Ramos



M.C. José Ismael Minjarez Sosa
Director de Tesis

C.c.p. Archivo





"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

Hermosillo, Sonora a 08 de agosto de 2017

M.C. José Ismael Minjarez Sosa
Director de Tesis

Por este conducto y en atención a la solicitud recibida el día de hoy, 08 de agosto del presente, le comunico que ha sido aprobada la fecha para la presentación de Examen de Grado de la alumna **LUZ ANGÉLICA AGUIRRE LÓPEZ** propuesta por el Comité de Tesis.

Dicho examen se llevará a cabo el día **jueves 10 de agosto del presente a las 17:00 horas** en el *Auditorio del Departamento de Física*.

Sin otro en particular quedo de Usted

Atentamente

Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**

C.c.p. Archivo



Dedicatoria

Dedico esta Tesis principalmente a mis padres, Cesar Rafael y Luz Belia, por su apoyo incondicional y por motivarme siempre a superarme profesionalmente, todo lo que hoy soy y llegaré a ser es gracias a ustedes.

A mis hermanos Cesar y Génesis por su inagotable cariño, por ser siempre mi ejemplo a seguir, por estar siempre en los momentos buenos y malos, por ser mi pilar ,por siempre y para siempre serán mi más grande orgullo.

A ti, porque de alguna u otra manera siempre has estado presente en todos mis logros alentándome con las palabras adecuadas que me impulsan a seguir , por siempre creer que lograré todo aquello que me proponga y sobre todo por aceptar mis virtudes y defectos.

A mi maestro, mi mentor y tutor, Ismael Minjárez, a usted que me brinda todo su apoyo cuando más lo necesito, por despertar en mí la pasión por la hidrogeología, por apoyar mis ideas y sobre todo por creer en mí.

A mi maestra Alejandra Montijo por todo el cariño incondicional que me ha brindado desde el primer día que me conoció, por abrirme las puertas de su casa y de su familia, alentarme siempre a seguir adelante y sobre todo por estar ahí siempre en todo momento.



Agradecimientos

Principalmente quiero agradecer a la Universidad de Sonora y al programa de Maestría en Ciencias Geología por permitirme ser parte de él, por los apoyos y facilidades brindados a lo largo de mi travesía por esta misma.

A CONACyT agradezco la beca brindada durante el periodo de estudios 2015-2017 y sobre todo complacida por ser parte de su estadística como una mexicana más que pudo superarse profesionalmente gracias a su apoyo. Número de Becario: 585491.Registro de Cv: 708352.

Agradezco infinitamente a mi comité tutorial primeramente a mi director de tesis el Mc. José Ismael Minjárez Sosa por su apoyo incondicional desde mi formación como Geóloga, guiarme a lo largo de mi trabajo de tesis y sobre todo por todos los conocimientos otorgados, a mi tutor Dr. Francisco Javier Grijalva Noriega, por su paciencia, vocación de enseñar e inagotable conocimiento, al Mc. Jesús Alfredo Ochoa Granillo por sus consejos y atinadas correcciones, y también al Mc. Lucas Antonio Oroz Ramos por aceptar formar parte de mi comité como sinodal externo.

A los ingenieros Rafael García de Agua de Hermosillo y Arturo López de la CONAGUA, agradezco su colaboración y deposición para proporcionar datos utilizados en este trabajo de tesis.

Por último y no menos importantes agradezco a la Mc. Alejandra Montijo González, al Dr. Francisco Cuen Romero y a la Mc. Grisel Gutiérrez Anguamea, por su apoyo incondicional y confianza en mí.



Resumen

La Ciudad de Hermosillo presenta un problema histórico de escasez de agua. Diversas alternativas se han intentado, la más reciente es el Acueducto Independencia. Sin embargo, a pesar de la puesta en operación de ésta obra, la fuente principal de agua potable con la que cuenta la Ciudad son los acuíferos situados al Este de la Ciudad: Mesa del Seri La Victoria, Zanjón y San Miguel. Según datos oficiales la producción de agua por fuentes subterráneas es del 73% para el 2016 mientras que las superficiales solo son el 23% siendo estas la presa Abelardo L. Rodríguez, la Presa El Molinito y el Acueducto independencia, es por esta razón que es de vital importancia el estudio de esta área como un solo sistema acuífero.

A partir de la interpretación de la geología y geofísica se obtiene que el sistema acuífero se ubica dentro de un graben con relleno de sedimentos clásicos terciarios y cuaternarios, mientras que las partes altas están representadas por rocas sedimentarias de edad paleozoico y volcánicas terciarias. A partir de este modelo y considerando parámetros hidrológicos y geofísicos se pudieron definir 4 unidades hidrogeológicas donde la unidad 2, que consiste de arena de grano medio a grueso, es la principal unidad hidrogeológica portadora de agua subterránea para el sistema acuífero.

Se evaluó el balance de aguas subterráneas con el cual se obtuvo una recarga vertical de 40.58 Hm³/año y una recarga total de 76.74 Hm³/año, mientras que la descarga es de 142.24 Hm³/año con un cambio de almacenamiento de -65.5, entre 2015 y 2016. A partir del análisis de las piezometrías de los años 1998 y 2016 se obtuvo que durante los últimos 18 años se ha minado la reserva del sistema acuífero en 1,615.7 hectómetros cúbicos.

Considerando escenarios de crecimiento de la demanda de agua potable de la Ciudad de Hermosillo al 2030, obtenemos que en el peor de los escenarios la demanda llegaría hasta los 136 hm³ anuales. Por ello, es de vital importancia un reajuste en las políticas de extracción para esta zona. En este sentido, considerando los aspectos conceptuales y legales se propone un cambio en los límites administrativos de los acuíferos oficiales: Mesa de Seri-Victoria, Río Zanjón y Río San Miguel, con el fin de tener un mayor control del agua subterránea que abastece a la ciudad.

Palabras Clave: Evaluación, Sistema, Geohidrológicas, Escenarios.



Abstract

The city of Hermosillo presents a historical problem of water scarcity. In order to solve it, several actions have been tried, the most recent being the ‘Acueducto Independencia’. However, despite the start of operations of this aqueduct, the main sources of potable water are the aquifers located east of the city: Mesa del Seri, La Victoria, Zanjón and San Miguel. According to official data in 2016, the water extraction from underground sources is of 73% whereas the surficial sources are of 23%, these being the Abelardo L. Rodriguez and El Molinito dams as well as the Acueducto Independencia. Because this, the study of this area as a whole aquifer system, is of vital importance.

A conceptual model is proposed from the geological and geophysical interpretation. This states that the aquifer system is located inside a graben with tertiary and quaternary sediments fill, whereas the higher zones are represented by paleozoic sedimentary and tertiary volcanic rocks. Considering hydrological and geophysical parameters 4 hydrogeological units were defined. Unit 2 composed by medium to coarser grain clastics is the main groundwater storage unit of the aquifer system.

The groundwater balance was evaluated between 2015 and 2016 where a vertical recharge of 40.58 Hm³/year and a total recharge of 76.74 Hm³/year was obtained while the discharge is of 142.24 Hm³/year with a storage of -65.5. Since 1998, the aquifer system has been mined 1,615 cubic hectometers.

The scenarios compiled of growth in the demand of potable water in the City of Hermosillo towards 2030, states that in the worst case, the demand can reach 136 hm³ per year. Therefore, a readjustment in the extraction policies for this zone is of vital importance. In that sense, and considering the conceptual and legal aspects, we propose, a change in the administrative limits of the official aquifers: Mesa de Seri-Victoria, Río Zanjón and Río San Miguel, in order to have greater control of the groundwater system that supplies the city.

Keywords: Evaluation, System, Geohidrological, Scenarios.



Índice

| | |
|---|----|
| 1.-Introducción | 1 |
| 2.-Objetivos y actividades desarrolladas | 5 |
| 3.-Antecedentes | 6 |
| 4.- Descripción del área de estudio..... | 9 |
| 4.1.-Localización | 9 |
| 4.2.-Vías de comunicación | 10 |
| 5.-Climatología | 10 |
| 5.1.-Temperatura media anual..... | 13 |
| 5.2.-Precipitación media anual | 13 |
| 5.3.-Evapotranspiración media anual | 14 |
| 6.-Medio Natural del Acuífero | 15 |
| 6.1.-Hidrografía | 15 |
| 6.2.-Fisiografía | 18 |
| 6.3.-Unidades Hidrogeomorfológicas | 20 |
| 6.4.-Geología | 23 |
| 6.4.1.-Estratigrafía | 23 |
| 6.4.2.-Estructuras | 26 |
| 6.5.-Acuíferos | 27 |
| 6.6.-Geología del Subsuelo..... | 28 |
| 6.6.1.-Gravimetría..... | 33 |
| 6.6.2.-Geometría del basamento | 40 |
| 7.-Modelo Hidrogeológico Conceptual | 41 |
| 7.1.-Modelo Geológico Conceptual..... | 41 |
| 7.2.-Modelo Hidrogeológico conceptual | 42 |
| 8.-Censo de Aprovechamientos..... | 44 |
| 8.1.-Usos del agua | 44 |
| 8.2.-Piezometría del área de estudio..... | 45 |
| 8.2.1.-Profundidad del nivel estático 2016 | 45 |
| 8.2.2.-Elevación del nivel estático 2016..... | 45 |
| 8.2.3. Evolución del nivel estático 2015-2016 | 48 |
| 9.-Balance integral de aguas subterráneas..... | 48 |
| 9.1.- Parámetros Hidráulicos | 50 |
| 9.2.-Recarga Natural Inducida o Retorno de Riego..... | 51 |



| | |
|---|----|
| 9.3.-Cambio de almacenamiento ($Hm^3/año$) | 53 |
| 9.4.-Recarga Vertical (Rv)..... | 54 |
| 10.-Planeación de escenarios y discusión..... | 56 |
| 10.1.- Problemática de la sequía..... | 56 |
| 10.2 -La importancia de las aguas subterráneas para la Ciudad de Hermosillo | 60 |
| 10.3 Evolución de la Sistema Acuífero Mesa del Seri Zamora..... | 63 |
| 10.4 Una revisión de los conceptos legales para el manejo de aguas subterráneas..... | 66 |
| 10.5- Escenarios de la Demanda de Agua Potable | 68 |
| 10.6. Discusión de propuestas para el manejo de agua de la Ciudad de Hermosillo | 70 |
| 11.-Resultados y conclusiones..... | 73 |
| 12.-Recomendaciones..... | 74 |
| 13.-Bibliografía | 76 |
| 14.-Anexos..... | 79 |
| Anexo 1.- Piezometría 2016 dentro del área de estudio | 79 |
| Anexo 2.-Secciones Geoeléctricas dentro del área de estudio. | 81 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1.-Análisis de estaciones climatológicas del área de estudio | 13 |
| Tabla 2.-Características de perfiles gravimétricos Mesa del Seri-La Victoria (CEA, 2006)39 | |
| Tabla 3.-Propiedades de las unidades hidrogeológicas del área de estudio | 42 |
| Tabla 4.-Cálculo de Celdas de Flujo | 51 |
| Tabla 5.-Valores de Entradas y Salidas del sistema Acuífero | 54 |
| Tabla 6.-Balance del área de estudio | 55 |
| Tabla 7.-Evolución de la producción de agua por captación (SAMZA es Sistema Acuífero Mesa del Seri-Zamora). | 61 |
| Tabla 8.-Acepciones de las unidades geológicas aprovechables para explotación de aguas subterráneas en la legislación mexicana..... | 66 |
| Tabla 9.-Escenarios de crecimiento de la demanda de agua potable de la Ciudad de Hermosillo al 2030 (Salazar y Pineda, 2012)..... | 69 |
| Tabla 10.-Piezometría 2016 dentro del área de estudio (CONAGUA, 2016)..... | 79 |



Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.-Localización área de estudio respecto a los límites administrativos de los acuíferos (INEGI) | 4 |
| Figura 2.-Localización del área de estudio | 9 |
| Figura 3.-Vías de comunicación | 10 |
| Figura 4.-Tipo de Clima del área de estudio | 12 |
| Figura 5.-Regiones hidrográficas | 15 |
| Figura 6.-Subregiones hidrológicas del estado de Sonora..... | 16 |
| Figura 7.-Cuencas del estado de Sonora..... | 16 |
| Figura 8.-Hidrografía del área de estudio | 17 |
| Figura 9.-Fisiografía del área de estudio | 19 |
| Figura 10.-Unidades Hidrogeomorfológicas | 22 |
| Figura 11.-Geología del área de estudio | 24 |
| Figura 12.-Columna Estratigráfica modificada de Guysa 2000 | 25 |
| Figura 13.-Acuíferos Administrativos..... | 27 |
| Figura 14.-Localización de perfiles SEV en el área de estudio..... | 29 |
| Figura 15.-Sección Zamora Orientada NO-SE (Minjárez y otros ,2005)..... | 30 |
| Figura 16.-Sección San Pedro Norte. Orientada O-E (Minjárez y otros, 2005)..... | 31 |
| Figura 17.-Sección San Pedro. Orientada O-E (Minjárez y otros, 2005)..... | 32 |
| Figura 18.-Sección geológica San Pedro Sur Orientada O-E.(Minjárez y otros , 2005)..... | 33 |
| Figura 19.-Localización Secciones Gravimétricas (CEA,2006) | 34 |
| Figura 20.-Profundidad del Basamento obtenida por el Perfil Gravimétrico Presa-El Tronconal. (CEA, 2006) | 35 |
| Figura 21.-Profundidad del Basamento obtenida por el Perfil Gravimétrico Cerro La Flojera-Casa Combate. (CEA, 2006)..... | 36 |
| Figura 22.-Profundidad del Basamento obtenida por el Perfil Gravimétrico Lanix-Carretera a Presa el Molinito. (CEA, 2006) | 36 |
| Figura 23.-Profundidad del Basamento obtenida por el Perfil Gravimétrico Estación Ferrocarril – La Victoria (CEA, 2006). | 37 |
| Figura 24.-Profundidad del Basamento obtenida por el Perfil Gravimétrico Presa ALR-Lomas del Rayo. (CEA, 2006) | 38 |



| | |
|---|----|
| Figura 25.-Profundidad del Basamento obtenida por el Perfil Gravimétrico Termoeléctrica-Mesa del Seri-Molino de Camou. (CEA, 2006) | 39 |
| Figura 26.-Configuración del Basamento (CEA,2006) | 40 |
| Figura 27.-Modelo Geológico Conceptual | 41 |
| Figura 28.-Modelo de unidades Geohidrológicas Conceptual | 43 |
| Figura 29.-Profundidad del nivel estático 2016 | 46 |
| Figura 30.-Elevación del nivel estático 2016 | 47 |
| Figura 31.-Evolución del nivel estático 2015-2016 | 49 |
| Figura 32.-Celdas de Flujo del área de estudioLa ley de Darcy, se expresa de la siguiente manera (Fetter, 1994): | 52 |
| Figura 33.-Comportamiento de diferentes índices de sequía para la estación climatológica Hermosillo, de CONAGUA (tomado de Universidad de Sonora, 2014) | 56 |
| Figura 34.-Evolución del nivel estático de los años 1998-2016..... | 64 |
| Figura 35.-Comportamiento de los niveles estáticos históricos desde 2008 a 2016 | 65 |
| Figura 36.-Propuesta de Redefinición de Limite de Acuíferos | 75 |
| Figura 37.-Sección Geoeléctrica-San Pedro el Chino(CEA,2006) | 81 |
| Figura 38.-Sección Geoeléctrica- La Reforma(CEA 2006) | 81 |
| Figura 39.-Sección Geoeléctrica -La Victoria(CEA, 2006) | 82 |
| Figura 40.-Sección Geoeléctrica-La Victoria 2(CEA,2006) | 82 |
| Figura 41.-Sección Geoeléctrica -Buenos Aires-Rancho viejo(CEA, 2006)n | 82 |



Índice de Gráficas

| | |
|--|----|
| Gráfica 1.-Producción de agua para la ciudad de Hermosillo, Sonora (2000-2016)..... | 1 |
| Gráfica 2.-Distribución de Temperatura Media anual..... | 13 |
| Gráfica 3.-Distribución de Precipitación Media anual | 14 |
| Gráfica 4.-Evapotranspiración Media anual..... | 14 |
| Gráfica 5.-Usos REPDA-2013 | 44 |
| Gráfica 6.-Tipos de Aprovechamiento | 44 |
| Gráfica 7.-Índice Estandarizado de Precipitación en la Cuenca del Río Sonora..... | 57 |
| Gráfica 8.-Comportamiento de los escurrimientos del Río San Miguel en la Estación Hidrométrica El Cajón, suavizado con medias móviles (Universidad de Sonora, 2014)..... | 57 |
| Gráfica 9.-Comportamiento de los escurrimientos del Río Sonora en la estación Hidrométrica El Orégano, suavizado con medias móviles (Universidad de Sonora, 2014). | 58 |
| Gráfica 10.-Comportamiento de los almacenamientos de la Presa Abelardo L. Rodríguez (Universidad de Sonora, 2014)..... | 58 |
| Gráfica 11.-Comportamiento de los almacenamientos de la Presa El Molinito..... | 59 |
| Gráfica 12.- Dotación de agua por fuente para la Ciudad de Hermosillo porcentual..... | 60 |
| Gráfica 13.-Dotación de agua por fuente para la Ciudad de Hermosillo por volumen | 60 |
| Gráfica 14.-Evolución de la producción de agua por captación para la Ciudad de Hermosillo. | 62 |
| Gráfica 15.-Evolución de la producción de agua por captación para la Ciudad de Hermosillo zonas de mayor importancia. | 62 |
| Gráfica 16.-crecimiento supuesto de la demanda de agua por quinquenio para cada escenario | 69 |

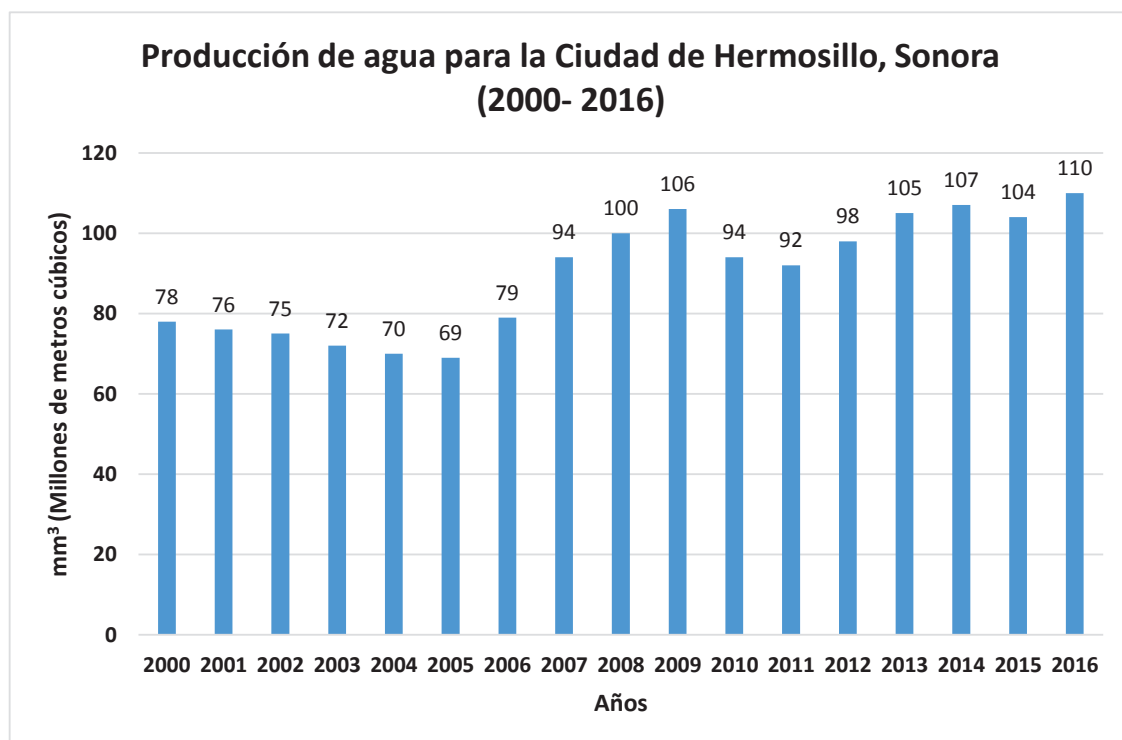


1.-Introducción

La Ciudad de Hermosillo, capital del Estado de Sonora, manifiesta una relativa escasez de agua característica de las regiones áridas y semiáridas de la porción norte del territorio nacional.

El incremento demográfico ejerce una presión constante y progresiva sobre la disponibilidad del recurso hídrico lo cual implica un aumento continuo de la demanda y desemboca en requerimientos de infraestructura y búsqueda de nuevas fuentes alternativas de abastecimiento. Como resultado de esto, el tema del agua en Hermosillo resulta prioritario y estratégico para las autoridades estatales y municipales.

De acuerdo a la información proporcionada por el Ing. Rafael García de Agua de Hermosillo (comunicación personal, 2017), en el año 2000 la producción de agua llegó a ser de 78 millones de metros cúbicos (mm^3), para el año 2015 la producción llegó a 104 mm^3 (Gráfica 1) y para el año 2016 la producción fue de 110.2 hm^3 , correspondiendo al sector doméstico el 95% de las tomas. (Gráfica 1)



Gráfica 1.-Producción de agua para la ciudad de Hermosillo, Sonora (2000-2016)

Fuente: Agua de Hermosillo (2016)



Se observa que la producción de agua va en constante aumento, correspondiendo a un aumento de la demanda. Sin embargo, la provisión de agua para la Ciudad de Hermosillo presenta diversas amenazas, a saber:

- a) El agua subterránea, es la principal fuente de la ciudad y ha disminuido su potencial, producto del sobrebombeo en los acuíferos de los que se extrae.
- b) El gran impacto de la sequía de los últimos años en la cuenca del Río Sonora.
- c) Conflictos sociales derivados de: 1.- La oposición de sectores importantes del sur de Sonora a la operación del Acueducto Independencia, y 2.- La problemática social generada por la duda generalizada de la población de la ciudad de que el agua está contaminada por residuos de la industria minera, en especial por el derrame ocurrido en agosto de 2014 aguas arriba por la minera de Buenavista del Cobre en Cananea, Sonora.

Una revisión a los acuíferos de los alrededores de la ciudad vigilados por la Comisión Nacional del Agua establece que la disponibilidad en general de esta fuente tiende a disminuir. El acuífero Mesa del Seri-La Victoria (clave 2621), presenta un déficit de -45.5 mm^3 por año y se encuentra en veda desde 1967 (CONAGUA, 2015); el Acuífero Costa de Hermosillo (clave 2619), presenta un déficit de 97.6 mm^3 y se encuentra en veda desde 1967 con fuertes problemas de intrusión salina desde 1970 (CONAGUA 2015); el acuífero Río Zanjón (Municipios de Hermosillo-Carbó-Benjamín Hill, Rayón, clave 2626), presentan un déficit de -13.11 mm^3 con veda desde 1967 (CONAGUA, 2015b).

En suma, la extracción de agua subterránea tiende a disminuir y los acuíferos alrededor de la ciudad se encuentran en déficit, por lo que la necesidad de agua superficial, en este caso del Acueducto Independencia, se hace mayor y la posibilidad del reuso del agua residual tratada, cada vez más necesaria.

Otras causas de este problema son: a) la presa Abelardo L. Rodríguez, desde entonces a la actualidad seca y con lo cual la ciudad de Hermosillo perdió el 42% de su oferta disponible, que fue el promedio de aportación entre los años 1992 y 1997, y b) Adicionalmente a esta pérdida, también dejó de existir la fuente de abastecimiento de la Galería Filtrante localizada en el Río Sonora, construida en 1996, que aportaba un gasto aproximado de 500 l.p.s, dependiendo esta disponibilidad de los escurrimientos del sistema de presas Abelardo L. Rodríguez-El Molinito.



Diversas alternativas se han intentado para soportar esta escasez, la más reciente es el Acueducto Independencia. Sin embargo, a pesar de la puesta en operación de esta obra, la fuente principal de agua potable con la que cuenta la ciudad son los acuíferos: Mesa del Seri La Victoria, Zanjón y San Miguel.

En este sentido el entendimiento de sus características hidrogeológicas y su funcionamiento hidrodinámico son importantes. En la zona se han realizado diversos estudios por parte de la Universidad de Sonora y varias tesis, así como de compañías contratistas de la Comisión Nacional del Agua. Esta misma, realiza campañas anuales de levantamiento de piezometría.

El común denominador de estos trabajos es que se han considerado los límites administrativos de los acuíferos, como los límites de sus estudios, sin considerar que en general la zona es una sola entidad. Este es uno de los aspectos relevantes de este trabajo: el estudio de la zona establecida como una sola unidad hidrogeológica. Los acuíferos administrativos mencionados no se considerarán en su extensión completa, sino solamente la parte que ha sido utilizada para la provisión de agua a la ciudad.

En este sentido y tomando en cuenta que en México, las normas relativas a agua, han usado diversas acepciones de los conceptos referidos a las unidades geológicas aprovechables para extracción de agua subterránea y que el aspecto que es rescatable en estas definiciones, es que el concepto central para la definición de las unidades de manejo de las aguas subterráneas está relacionado a su uso, es decir, a la posibilidad de su explotación, proponemos la definición del Sistema Acuífero Mesa del Seri –Zamora (SAMSA), como área de estudio, y sobre el que se hará una evaluación hidrogeológica actualizada, evaluando asimismo su importancia para la provisión de agua a la ciudad de Hermosillo y, a partir de escenarios de la evolución de la demanda y hacer propuestas para su manejo.(Figura 1)

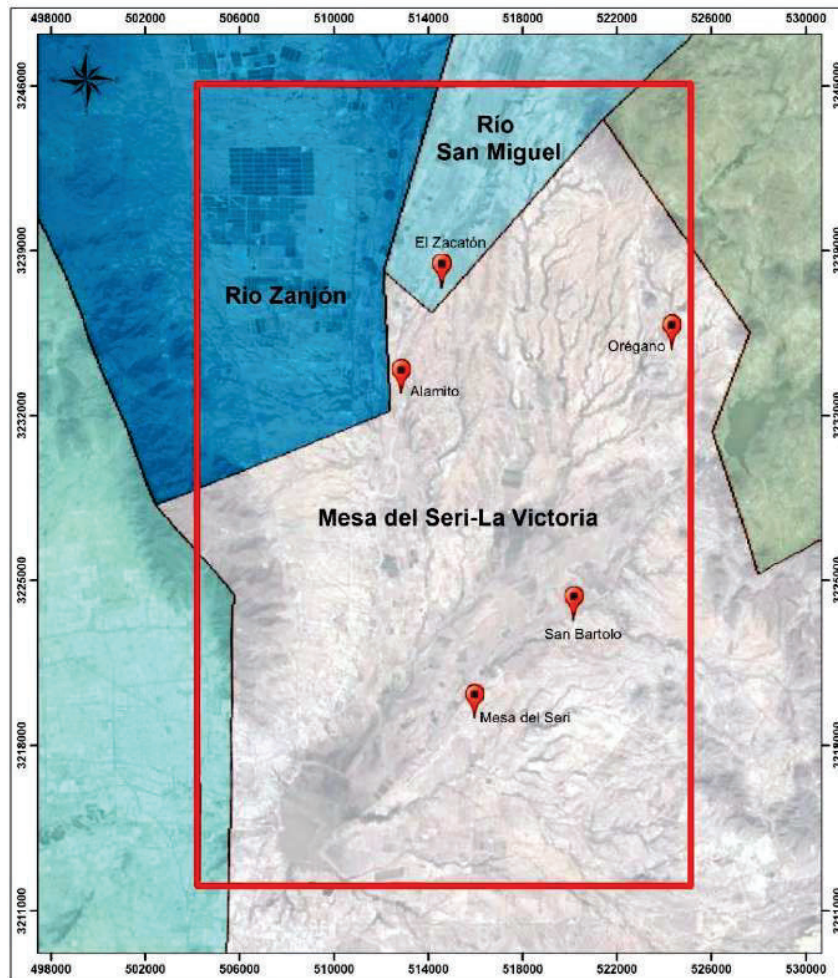


Figura 1.-Localización área de estudio respecto a los límites administrativos de los acuíferos (INEGI)



2.-Objetivos y actividades desarrolladas

Presentar una evaluación hidrogeológica actualizada del Sistema Acuífero Mesa del Seri -Zamora, y un análisis de su uso para la provisión de agua para la Ciudad de Hermosillo.

Como objetivos secundarios se contemplan:

- Determinar la geometría del área de estudio.
- Establecer el Modelo Geológico y Hidrogeológico Conceptual del Área.
- Presentar las condiciones piezométricas y su evolución.
- Determinar un balance de aguas subterráneas.
- Presentar una discusión sobre su importancia para la provisión de agua para la ciudad de Hermosillo y propuestas para su manejo.
- Plantear posibles escenarios futuros de demanda de agua potable.
- Definir la problemática en las políticas de extracción de agua y proponer un cambio en los límites administrativos.

Actividades Desarrolladas

- Determinación de la geometría del sistema acuífero.
- Compilación, integración, resumen y análisis crítico de estudios previos.
- Descripción del entorno fisiográfico y análisis geológico, climatológico e hidrológico.
- Interpretación de la geología del subsuelo con información geofísica y geológica existente y reinterpretación de estudios geofísicos complementarios.
- Presentación de Modelo Geológico e Hidrogeológico conceptual.
- Compilación e integración del censo de aprovechamiento y piezometría.
- Definición de los parámetros hidráulicos a partir de pruebas de bombeo e información existente.
- Determinación del balance de aguas subterráneas para el área de estudio.
- Discusión, conclusiones y recomendaciones.



3.-Antecedentes

La cuenca del Río Sonora donde se encuentra el área de estudio ha sido ampliamente estudiada tanto por dependencias públicas como gubernamentales por ser la zona de donde se extrae la mayor parte del agua utilizada para abastecer la ciudad de Hermosillo, y dichos estudios son la base para conformar el marco físico de referencia. A continuación se expone en orden cronológico los resúmenes de los estudios recopilados.

Estudio climatológico de los valles de los ríos San Miguel, Sonora, Zanjón, Bacoachi y Mátape, Sonora. Este estudio fue realizado por la empresa Ariel Construcciones, S.A. de C.V. en 1970. Tuvo como objetivo conocer las condiciones climatológicas que imperaban entre otros en el valle del Zanjón.

Otro estudio fue el de Integración Geohidrogeológica en el valle del Río Zanjón para suministro de agua en bloque para Hermosillo, Sonora. Fue realizado por la empresa Consultores en Agua Subterránea, S.A. de C.V. en 1987, este estudio fue base fundamental para integrar la información que se encuentra actualmente. Los objetivos de este estudio fueron: definir las condiciones geohidrológicas en la que se encontraba el acuífero del valle del Río Zanjón para 1987 y definir el volumen aprovechable adicional de agua subterránea, sin inducir efectos perjudiciales en el acuífero y proponer recomendaciones para la explotación futura del acuífero.

La CNA (Comisión Nacional del Agua) en 1999 realizó un Reporte Técnico con el nombre de “Modelo de Simulación Hidrodinámica del Acuífero Mesa del Seri-La Victoria, Sonora” orientado a la generación de un modelo de una pequeña área cubierta por la presa Abelardo L. Rodríguez de la que se realizó un modelo hidrodinámico simulado mediante Mod-Flow.

Un estudio más fue el de Actualización Geohidrológica del acuífero del valle del Río Zanja. Municipio de Carbó, San Miguel de Horcasitas y Hermosillo, Sonora. Estudio realizado por la empresa Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. DE C.V. en el año 2000. Este estudio tuvo como objetivo conformar un marco geológico con base en la información disponible en una campaña de exploración geofísica complementaria, estimar los espesores



de las rocas susceptibles a contener agua y determinar las estructuras que controlan el almacenamiento y flujo del agua subterránea.

En el 2004 el departamento de Geología en colaboración con la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Recursos hidráulicos, Pesca y Acuicultura, realizó un estudio titulado Estudio Geohidrológico de las Subcuencas de los Ríos Sonora, Zanjón, San Miguel, Mesa del Seri – La Victoria y Cuenca Bacoachi, con la finalidad de caracterizar los acuíferos mencionados.

La Universidad de Sonora desarrolló un estudio para Comisión Estatal del Agua (CEA) en el año 2005, Estudio de Piezometría y Evolución de Niveles, En La Cuenca Media y Alta Del Río Sonora y Río Bacoachi donde se creó un modelo matemático para el acuífero del Zanjón, abarcando el área de estudio del presente trabajo, el modelo predice el abatimiento en la zona sur del área de estudio a la altura del poblado de Zamora. El bombeo oficial para este estudio se tomó REPGA proporcionado por CONAGUA (anteriormente CNA). Se utilizó un total de 514 aprovechamientos registrados para pozos de bombeo, con un volumen concesionado de 85,277.110 mm³ para todo el acuífero.

El Departamento de Geología ha hecho diversos estudios en los acuíferos mencionados durante los años de 2005 y 2006, así como se han realizado tesis como las de Miranda (2009) y Francisco Romero (2007).

La empresa IDEAS realizó un estudio para las oficinas administrativas (COTAS) del Río Zanjón, en el cual se llevó un censo detallado de dicho acuífero, tomando datos de piezometría, caudales, datos constructivos de aprovechamientos, así como sus ubicaciones de éstos. El estudio se llevó a cabo a finales del año 2007 y principios del 2008, en el cual se considera el censo más minucioso y cuidadoso que se haya hecho hasta hoy, siendo una base muy sustentable para el presente estudio en cuantos datos piezométricos, caudales y datos de hidráulicos.

CONAVI en el 2009 realizó un estudio con el siguiente nombre: Identificación de las fuentes de abastecimiento hidráulico y su infraestructura, y análisis de las tendencias de crecimiento urbano de las ciudades con alto desarrollo habitacional”.



Se compiló la información climatológica de 49 estaciones, se elaboraron planos de isotermas, isoyetas, evaporación potencial de los años 1923 a 1969, aunque en algunas estaciones no había información completa. Se realizó un análisis detallado del clima. Se propuso la instalación de estaciones climatológicas automatizadas.

En estos estudios se ha puesto en manifiesto la sobreexplotación de la que han sido objeto los acuíferos mencionados, que sin embargo todavía son la fuente principal de agua para la ciudad.

Sin embargo todos estos estudios se han orientado al estudio o modelación de acuíferos específicos, sin considerar que existe continuidad hidrogeológica entre los diferentes acuíferos, como ha sido demostrado en los trabajos mencionados.



4.- Descripción del área de estudio

4.1.-Localización

El área de estudio se encuentra localizada en el noroeste de México en el estado de Sonora, delimitado por las coordenadas: 504114.25 E; 3213383.87 N y 525252.29 E; 3246875.5 N dentro de la zona 12 R. Dicha área se encuentra al noreste de la ciudad de Hermosillo abarcando principalmente las localidades del Real del Alamito, el Zacatón, El Orégano y la cabecera municipal de Hermosillo, limitando en el norte con el Viñedo de las Malvinas, al este con el límite de la cortina de la Presa de El Molinito, al Suroeste con la Presa Abelardo L Rodríguez y con el límite sur de la ciudad ,con una extensión territorial aproximada de 693 km². (Figura 2).

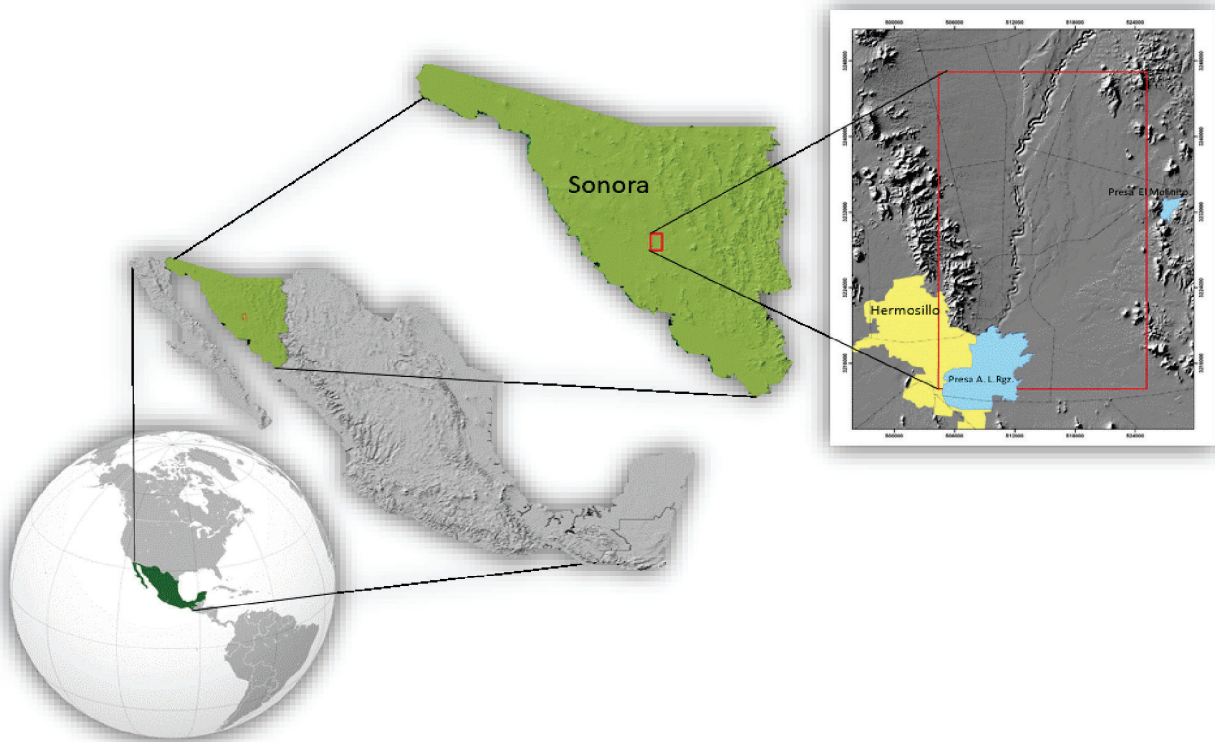


Figura 2.-Localización del área de estudio

En esta área seleccionada para la evaluación se localiza la mayoría de los aprovechamientos de agua subterránea que son utilizados para abastecer a la ciudad de Hermosillo y donde se encuentran los mayores gastos de extracción, siendo ésta de mayor interés para llevar a cabo el estudio de agua subterránea.



4.2.-Vías de comunicación

Las principales vías de comunicación al área de estudio es la carretera internacional No. 15 México - Nogales, que se ubica en la porción occidental de la zona de estudio, el ferrocarril del pacífico que corre en forma paralela a la carretera No. 15 y la carretera No. 14 Hermosillo-Moctezuma (Figura 3).

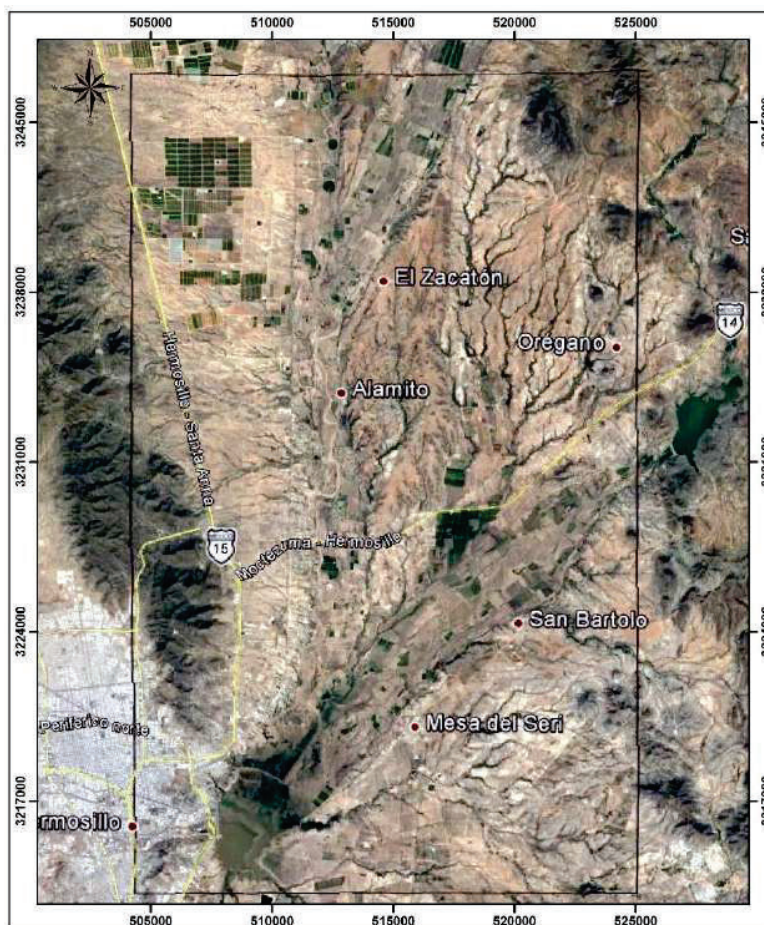


Figura 3.-Vías de comunicación

5.-Climatología

El área de estudio se caracteriza por su aridez, efecto que conlleva a una serie de resultantes que se manifiestan en el tipo de vegetación o en la falta de humedad de los suelos, esto debido a la escasa precipitación que existe en relación a los índices de evaporación, aunando una mala distribución de las corrientes superficiales perennes, mismas que han modificado su curso debido a las diferentes obras hidráulicas.



Las variables regionales del clima se determinan, en gran medida por la influencia de los vientos alisios provenientes del noreste, mismos que hacen un recorrido continental; razón por la cual las nubes van perdiendo humedad al ir chocando contra los elementos orográficos existentes en su trayecto, siendo el último de ellos la Sierra Madre Occidental

Los climas predominantes en la cuenca del Río Sonora son de carácter seco y semi-seco en cuanto que a los húmedos y templados, están restringidos en las partes altas de las sierras.

Los climas desérticos abarcan cerca del 46 % de la superficie de Sonora, y se caracterizan por su precipitación inferior a los 400 mm al año y su temperatura media anual de 18 a 25°C. Estos climas se consideran muy extremos, debido a su oscilación térmica, es decir, la diferencia entre la temperatura media del mes más cálido y la del mes más frío es mayor a 14°C. Dentro de la cuenca del Río Sonora, se tienen tres variedades de este clima: Los climas predominantes en el área de estudio son del tipo muy seco, semicálido con invierno fresco (BWhw (x')) y muy seco con invierno cálido (BW (h') hw (x')). Que se caracterizan por ser un clima muy seco cálido y con lluvias en verano (Figura 4).

Se analizó la información de cinco estaciones climatológicas, las cuales se encuentran más cercanas al área de estudio, todas ellas administradas por Comisión Nacional del Agua (Tabla 1). Estas estaciones fueron utilizadas para el análisis climatológico. El período más lluvioso se presenta en el mes de julio y la lluvia invernal ocurre en los meses de enero, febrero y marzo.

La tabla 1 presenta las estaciones climatológicas con valores de temperatura, precipitación y evapotranspiración media anual de las cinco estaciones circundantes al área de estudio. La temperatura y la precipitación son los de más solidez en el registro para todas las estaciones, por ello, los períodos de análisis varían en años debido a la falta de datos de meses o años en algunas estaciones, ya sea para uno o para los tres parámetros, pero en todos los casos se buscó realizar el análisis de 20 años, de 1995 a 2015.

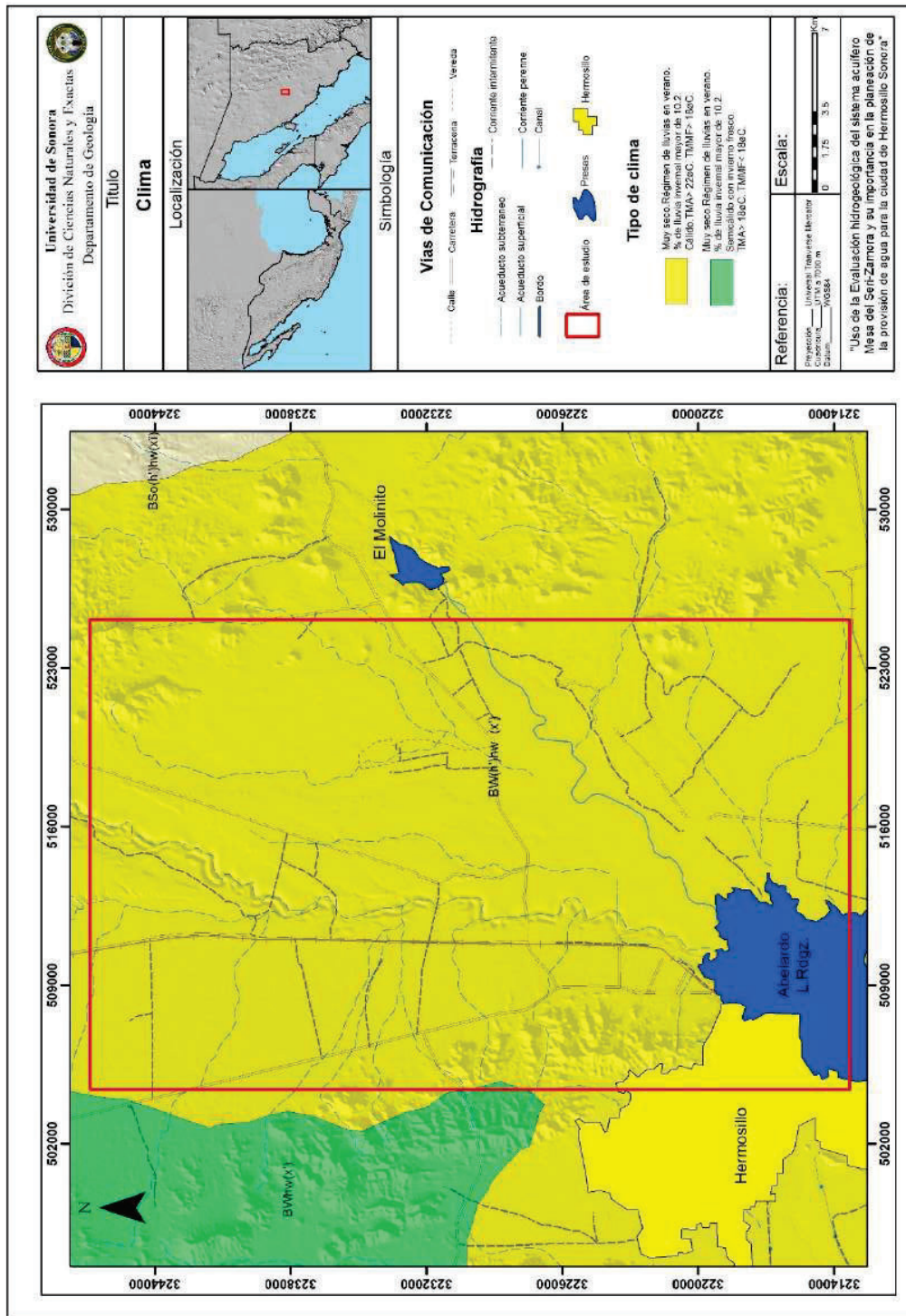


Figura 4.-Tipo de Clima del área de estudio

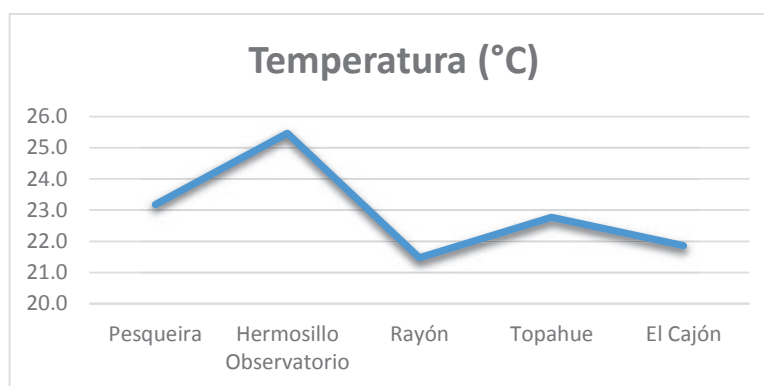


Tabla 1.-Análisis de estaciones climatológicas del área de estudio

| Estaciones | Coordenadas X | Coordenadas Y | Precipitación (mm/año) | Temperatura (°C) | Evaporación | Evapotranspiración (TURC) |
|-------------------------|---------------|---------------|------------------------|------------------|-------------|---------------------------|
| Pesqueira | 510081.51 | 3250138.59 | 309.4 | 23.2 | 1777.80 | 326.11 |
| Hermosillo Observatorio | 503957.35 | 3216052.47 | 297.73 | 25.5 | 2373.71 | 313.82 |
| Rayón | 541432.58 | 3286690.81 | 480.45 | 21.5 | 2071.00 | 506.37 |
| Topahue | 535371.08 | 3235037.78 | 369.37 | 22.8 | 1693.66 | 389.31 |
| El Cajón | 524631.51 | 3260170.69 | 371.52 | 21.9 | 2131.83 | 391.57 |

5.1.-Temperatura media anual

Las temperaturas en las cinco estaciones oscilan entre 21.5°C a 23.2°C de valor promedio de temperatura media anual con excepción de la estación de Hermosillo Observatorio, que presenta un valor de 25.5°C como valor máximo. El valor mínimo lo representan las estaciones de Rayón y El Cajón con 21.5°C y 21.9°C respectivamente como muestra la Gráfica 2. Por lo tanto el clima en el área de estudio es ideal para la siembra de la uva y otros tipos de cultivos.



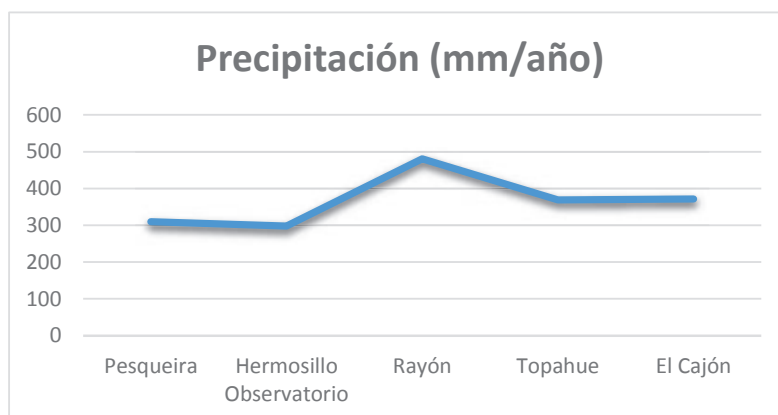
Gráfica 2.-Distribución de Temperatura Media anual

5.2.-Precipitación media anual

El tiempo de lluvias en el área de estudio son en verano y a veces en invierno, similar a la mayor parte de la región norte del país. En invierno la precipitación es frontal, debido a las masas de aire polar que intrusionan las masas de aire semitropical existente. En verano el tipo de lluvia es una conjugación de tipo orográfica y por convección, debido a su posición fisiográfica, así la lluvia es de carácter chubasco, de gran intensidad y corta duración. En el



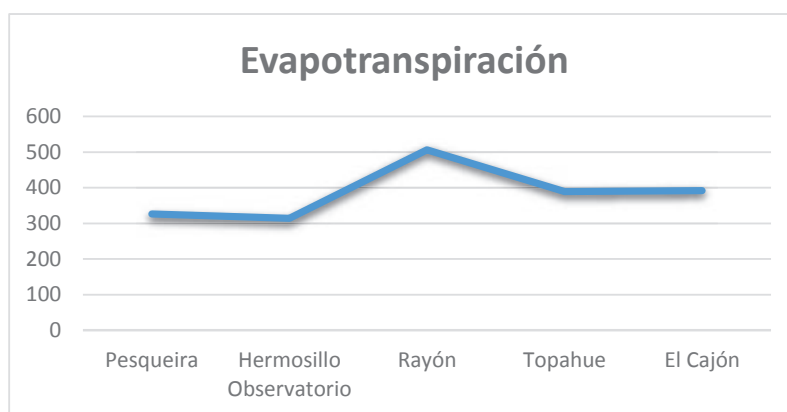
área de estudio se tiene una precipitación total anual para este período de 297.73 mm como mínima en la estación de Hermosillo Observatorio y una máxima de 480.45 mm en la estación de Rayón. Las estaciones restantes que se encuentran circundantes al área de estudio presentan precipitaciones desde 309.4 a 371.52 mm (Gráfica 3).



Gráfica 3.-Distribución de Precipitación Media anual

5.3.-Evapotranspiración media anual

En el área de estudio se calculó el dato de evapotranspiración media anual mediante la fórmula de Turc, el valor más alto lo presenta la estación de Rayón con un valor de 506.37 mm, mientras que Hermosillo Observatorio tiene el dato más bajo con 313.82 mm (Gráfica 4).



Gráfica 4.-Evapotranspiración Media anual



6.-Medio Natural del Acuífero

6.1.-Hidrografía

Dentro del sistema hidrográfico del estado de Sonora se encuentran seis regiones hidrológicas. Sin embargo el área de estudio se localiza dentro de la región con clave RH-9 (Sonora Sur) misma que pertenece a las vertientes del océano pacífico (Figura 5).

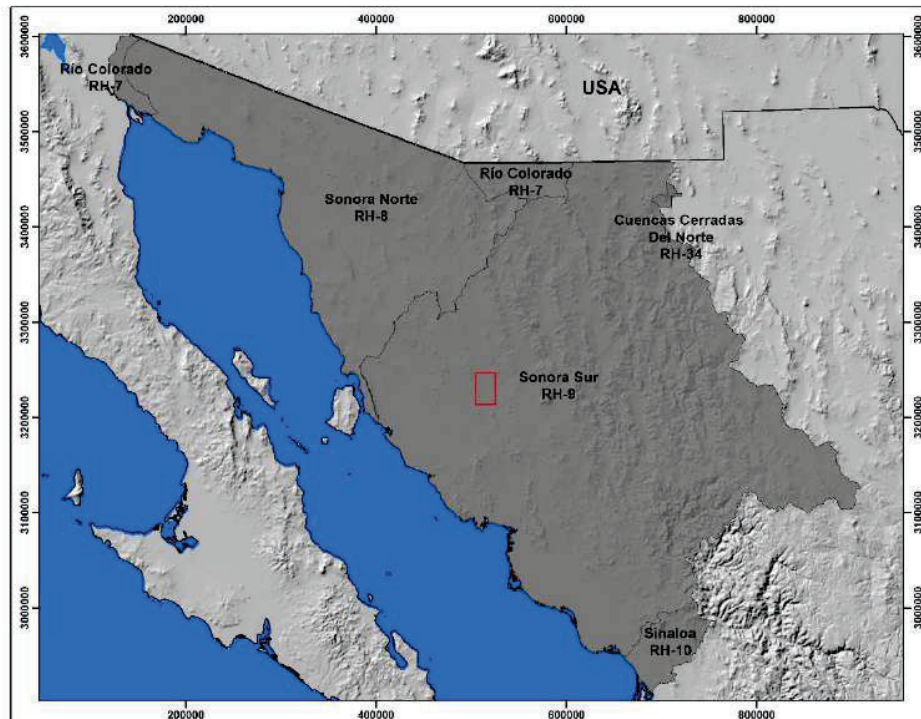


Figura 5.-Regiones hidrográficas

El área de estudio se encuentra localizado dentro de la subregión hidrológica Río Sonora que se ubica en la RH-9 (Región Hidrológica Sonora Sur), que es la segunda subregión más grande antes que la subregión Río Yaqui (Figura 6).

El área de estudio se encuentra en su totalidad dentro de la cuenca del Río Sonora (Figura 7).

Las corrientes superficiales más importantes en el área de estudio, es el Río El Zanjón, el Río San Miguel de Horcasitas y el Río Sonora, tienen su origen en la porción Norte del estado de Sonora, con una dirección general de escurrimiento de norte a sur y de noreste suroeste, a la altura del poblado de Zamora (Figura 8).

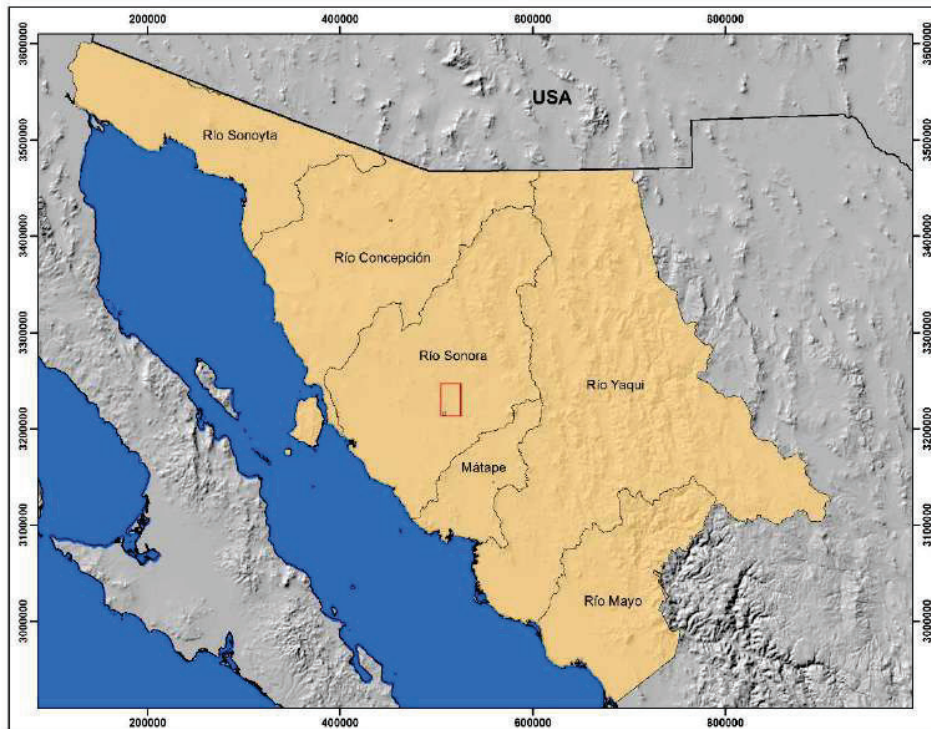


Figura 6.-Subregiones hidrológicas del estado de Sonora

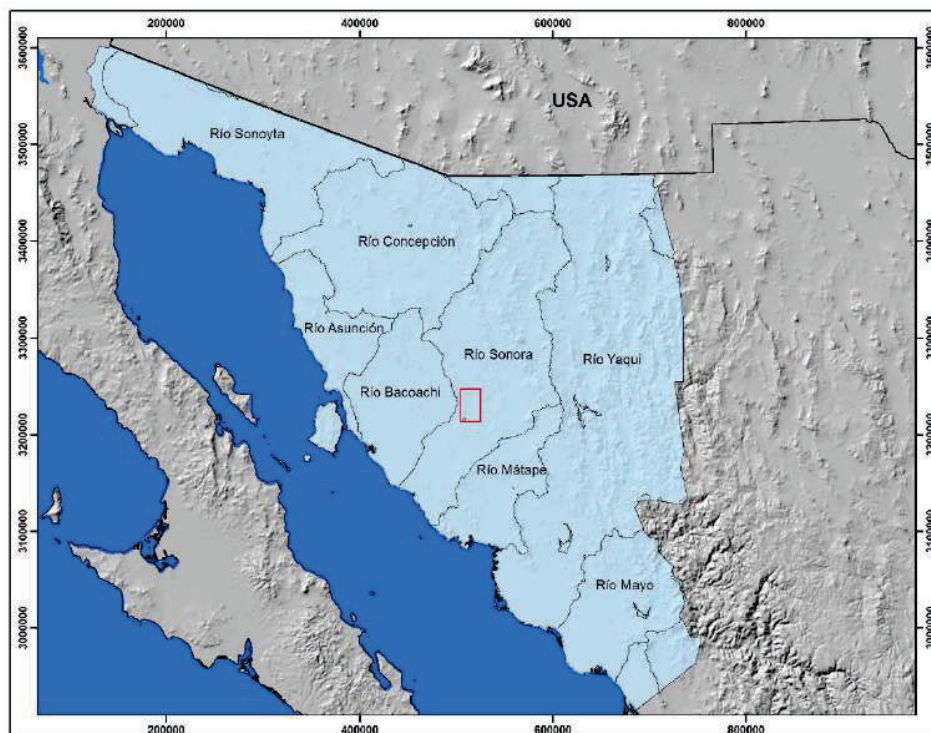


Figura 7.-Cuencas del estado de Sonora

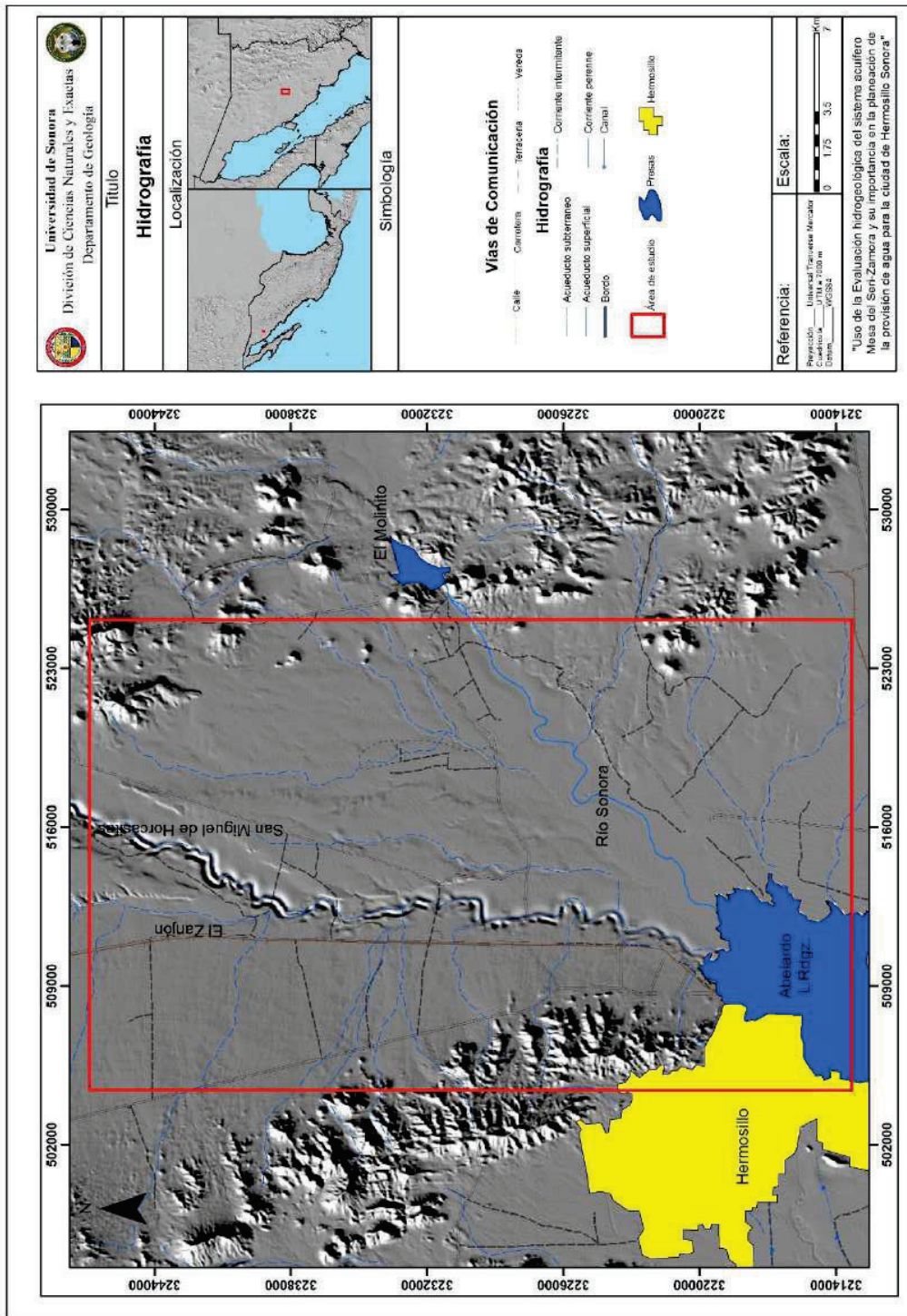


Figura 8.-Hidrografía del área de estudio



6.2.-Fisiografía

El área de estudio se encuentra ubicada fisiográficamente en la provincia Llanuras Sonorenses y colinda al este con la provincia Sierra Madre Occidental (Figura 9); correspondiendo a la subprovincia de Sierras y Llanuras Sonorenses y Sierras y Valles del Norte, respectivamente (INEGI, 1991). Estas subprovincias están compuestas principalmente por roca sedimentaria, roca ígnea extrusiva e intrusiva de composición variable, rocas metamórficas y rocas vulcanosedimentarias, con edades que varían desde el Paleozoico al Reciente.

A continuación, de manera general, se describen las subprovincias que abarcan tanto el área de estudio como su colindante al lado este el área

- La subprovincia de Sierras y Llanuras Sonorenses está formada de sierras bajas separadas por llanuras. Tales sierras son más elevadas (700 a 1400 m s.n.m.) y más estrechas (rara vez más de 6 km de ancho) en el oriente; y más bajas (de 700 m s.n.m. o menos) y más amplias (de 13 a 24 km) en el occidente. En ellas predominan rocas ígneas intrusivas ácidas, aunque también son importantes, particularmente en la parte central de la subprovincia, rocas lávicas, metamórficas, calizas antiguas y conglomerados del Terciario. Las llanuras están cubiertas en la mayor parte o en toda su extensión de amplios abanicos aluviales (bajadas) que descienden con pendientes suaves desde las sierras colindantes.
- La subprovincia Sierras y Valles del Norte está formada principalmente por sierras entre las cuales se localizan amplios valles paralelos con orientación norte-sur. En las sierras dominan las rocas volcánicas ácidas y en los valles abundan los materiales sedimentarios.

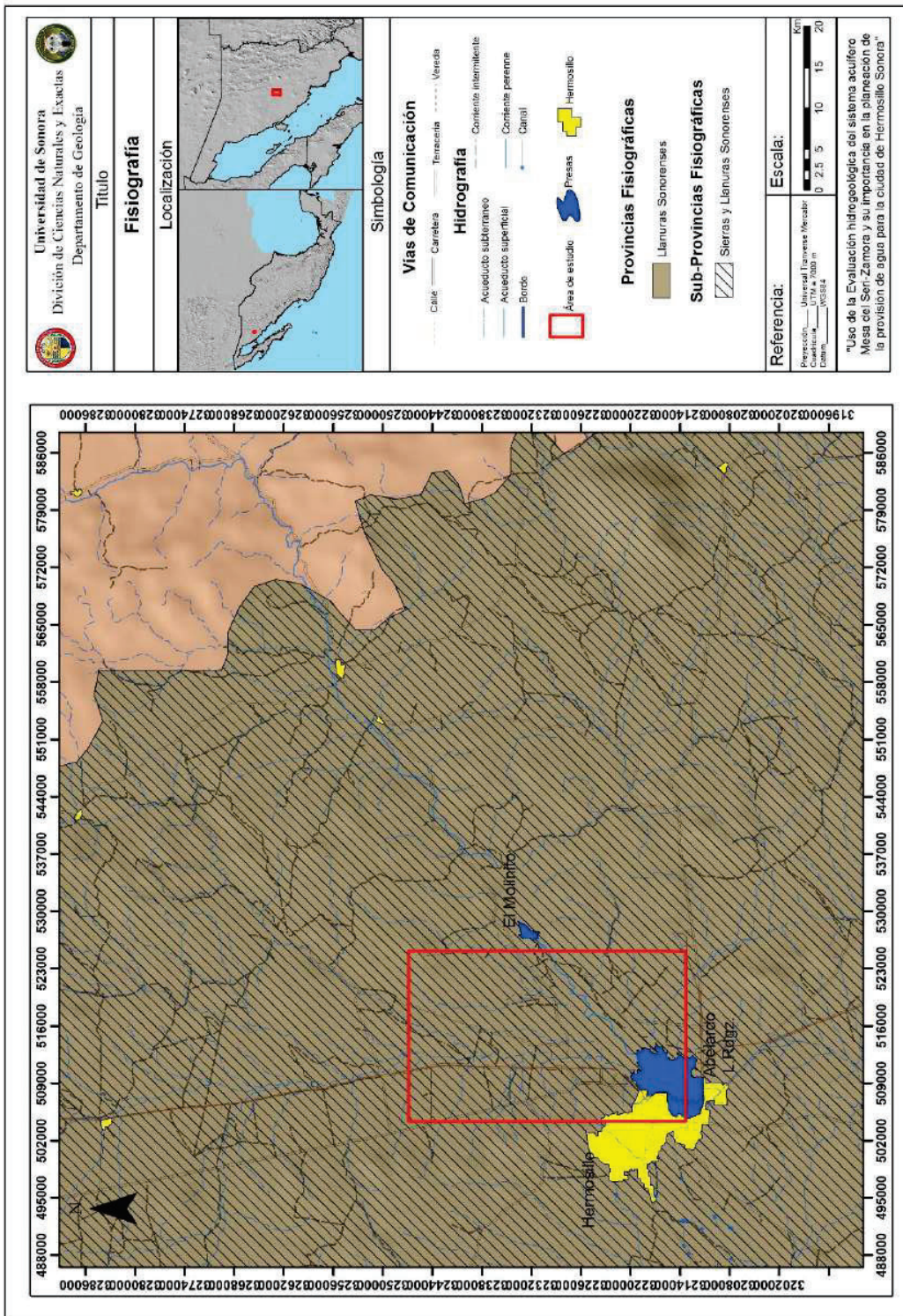


Figura 9.-Fisiografía del área de estudio



6.3.-Unidades Hidrogeomorfológicas

Este mapa contiene una interpretación analítica de acuerdo a los factores cualitativos de permeabilidad primaria (litología), secundaria (estructura) y geoforma, mediante la delimitación de unidades representadas por estas características (Gutiérrez y otros, 2012).

La clasificación de las unidades hidrogeológicas se realiza en base a las características de permeabilidad primaria y secundaria, dada por su litología y estructura, haciendo especial énfasis en el tipo de relieve al que pertenece, puesto que la forma de ladera funciona como un factor importante para la percolación de agua entre los intersticios de la roca.

Dentro del área de estudio se identifican 11 unidades hidrogeomórficas (Figura 10) las cuales se clasifican de acuerdo a su tipo de permeabilidad:

Unidades de permeabilidad alta

Las unidades que se presentan en un medio intergranular corresponden a materiales no consolidados, compuestos de partículas de diversos tamaños, litología, cantidades y materia orgánica; debido a su origen, se consideran muy permeables y la posibilidad de contener aguas subterráneas es alta. Están constituidas de gravas, arenas, limos y arcillas; en esta categoría se encuentran dentro del área de estudio las siguientes: planicie antrópica cultivada, y planicie divergente superior.

Unidades de permeabilidad media

Lo constituyen las partes transicionales de relieves topográficos altos, donde la pendiente natural del terreno permite la acumulación de material detrítico, intemperizado y erosionado de las zonas más altas, así como las amplias planicies eólicas. Litológicamente los piedemonte contienen conglomerado polimíctico, ocasionalmente intercalados con arenas y de aspecto no consolidado; las regiones eólicas están formadas de gravas y arenas móviles a metaestables. Ambas clasificaciones presentan una alta porosidad primaria que se traduce en una permeabilidad de tipo media y en una tonalidad azul claro, ubicadas al pie de los primeros relieves positivos cercanos a la franja costera sonorenses, para el área de estudio esta unidad se encuentra en: Piedemonte de conglomerado polimíctico y arenas de aspecto no consolidado.



Unidades de permeabilidad baja

En esta clasificación se encuentran los materiales consolidados y semiconsolidados de rocas conglomeráticas, vulcanosedimentarias, químicas y clásticas de altos topográficos medios y altos. Son lomeríos y montañas que presentan una permeabilidad secundaria importante y están afectadas por estructuras regionales, su posibilidad de contener aguas subterráneas es baja. Esta unidad se encuentra en el área como: lomeríos de caliza, arenisca y lutita fisurados y en algún pie de monte de conglomerados y arenas consolidados.

Los relieves más representativos de esta clasificación se localizan en unos afloramientos dispersos en el norte, noreste y centro de Sonora.

Unidades de permeabilidad muy baja

Están compuestos de potentes cuerpos rocosos fracturados, constituidos de rocas que ejercen más resistencia a eventos tectónicos y resultan afectados por fallas y fracturas que permiten la percolación y almacenamiento de aguas subterráneas por su permeabilidad secundaria. Dentro de esta categoría, se identifican dentro del área: montañas de plutónica fisurada y lomeríos volcánica fisurada. Se presentan en una gama de tonos verdes medios, puesto que de esta manera corresponden a su capacidad de almacenamiento de aguas.

Unidades de permeabilidad muy baja/nula.

Todas aquellas regiones constituidas de rocas cristalinas y volcánicas sanas, incluso las plásticamente deformables que al no presentar fisuras o una porosidad primaria importante en su estructura, son consideradas como unidades de permeabilidad muy baja o nula. Es importante aclarar que, la capacidad de contener reservorios de aguas subterráneas en estos puntos es mínima. Dentro de esta clasificación se tienen dentro del área a los lomeríos plutónica, volcánica, caliza, arenisca y lutita.

Planicie antrópica

Las zonas que han sido modificadas antrópicamente presentan una disminución drástica en la permeabilidad natural de un sitio, llegando a convertirlas en áreas prácticamente impermeables, ejemplo de esto son las urbanizaciones.

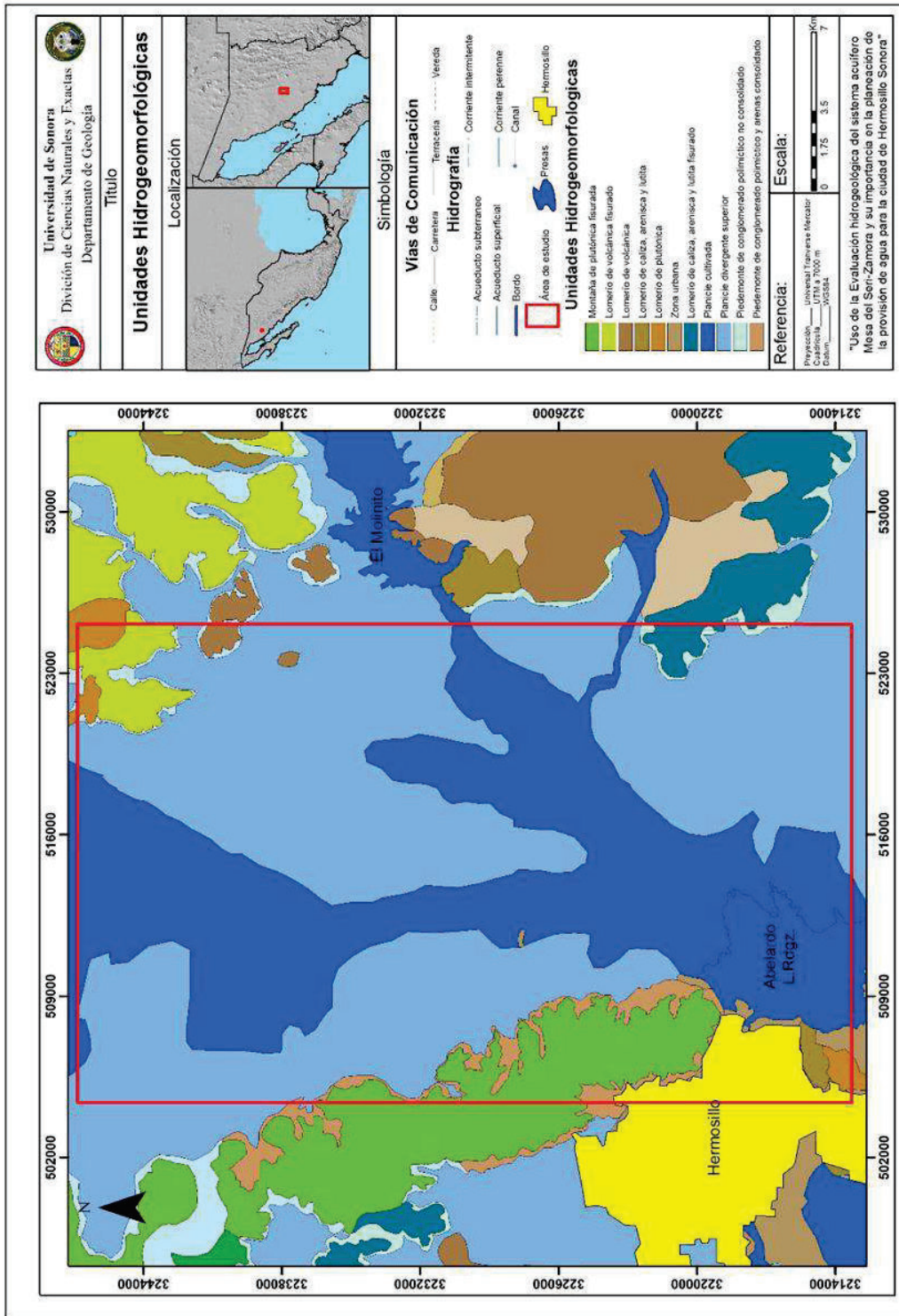


Figura 10.-Unidades Hidrogeomorfológicas



6.4.-Geología

El área de interés se encuentra sobre un valle alargado orientado NNW–SSE, formado como producto de la tectónica del *Basin & Range* sonorenses (De Cserna, 1988), el cual originó grandes valles fallados y escalonados. Esta actividad extensional generó cuencas de graben y semi-graben que están limitadas por fallas normales y bloques levantados que presentan una litología diversa. Para el caso del área estudiada, los valles del Río Sonora, San Miguel y Zanjón siendo éste último más bajo en elevación, representan estas cuencas en donde se depositaron materiales sedimentarios continentales producto de la erosión de los altos estructurales.

6.4.1.-Estratigrafía

La zona de estudio se localiza en un amplio valle en el que las unidades observadas en la superficie son principalmente rocas ígneas intrusivas y extrusivas, así como depósitos detríticos continentales y depósitos aluviales (Figura 11).

En la columna estratigráfica del área de estudio se puede apreciar las diferentes unidades litológicas que comprende desde el Paleozoico Mississípico representado por Calizas con crinoides hasta los más recientes depósitos aluviales y eólicos (Figura 12).

La unidad más antigua (PCz-Ar) corresponde a una secuencia de rocas prebatolíticas constituida por una intercalación de caliza y areniscas, que corresponden a depósitos de ambientes de plataforma somera durante el Paleozoico Tardío, ésta se encuentra intrusionada principalmente por cuerpos ígneos del Cretácico Superior (Ks Tpa Gr-Gd). Sus afloramientos más importantes se localizan en la Sierra de los Leyva, al suroeste del área, en las cercanías de la Presa el Molinito, y en menor proporción en los cerros de la Cementera, La Campana y Lomo del Rayo.

En el límite sur del área de estudio se presenta un pequeño afloramiento con una secuencia de rocas constituidas por calizas, limonita, microconglomerado, arenisca y cuarcita (TRm Ar-Cz.), depositados en un ambiente de plataforma, en estas rocas se encontraron pelecípodos a los que se les determinó de edad Triásico Medio-Tardío.

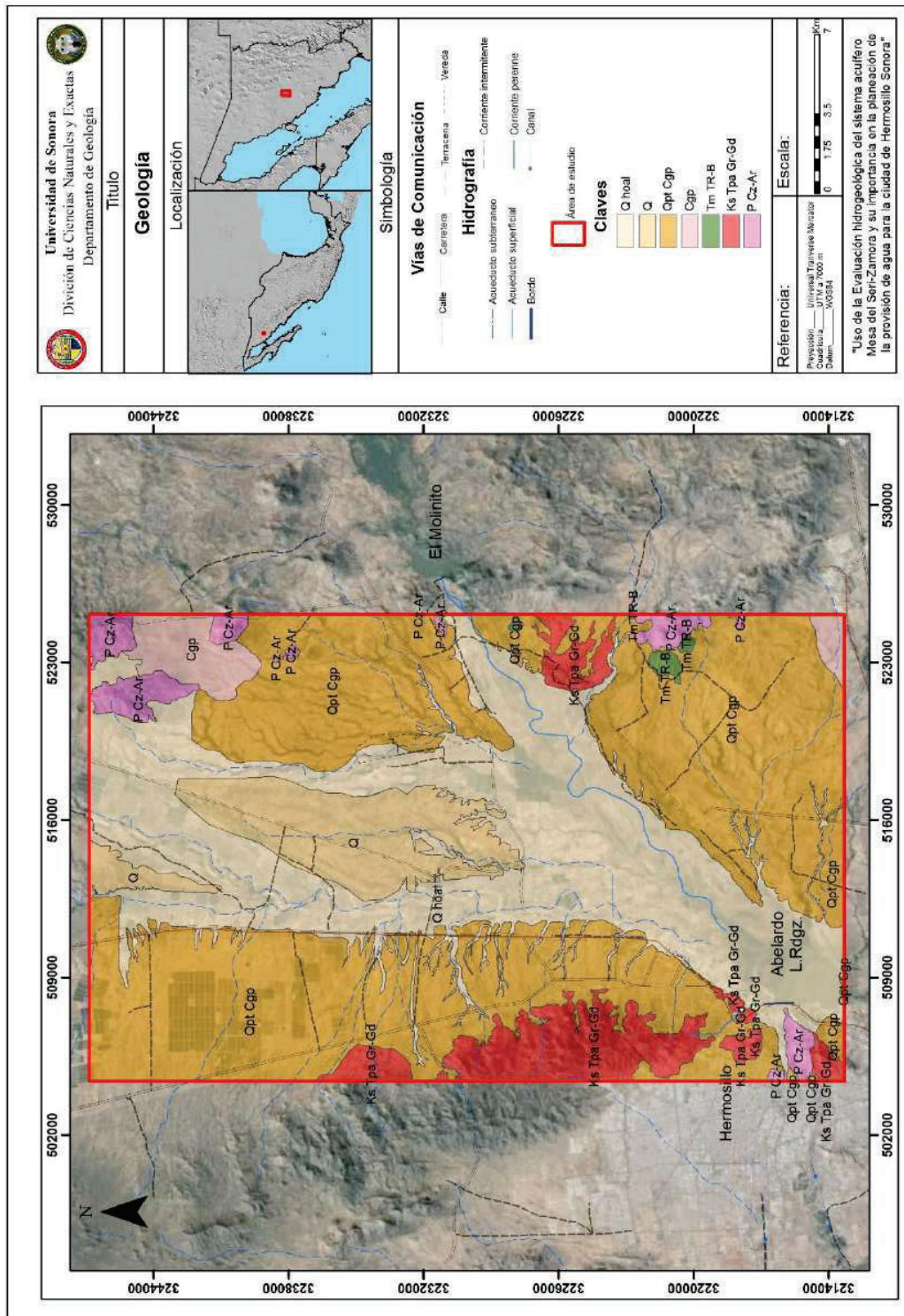


Figura 11.-Geología del área de estudio



| Litología | Descripción | Era | Periodo | Época |
|-----------|-------------------------------------|------------|--------------|-------------|
| | Depósitos Aluviales y Eólicos | Cenozoico | Cuaternario | Reciente |
| | Arcillas de grano fino a grueso | | | Pleistoceno |
| | Depósitos aluviales conglomeráticos | | | |
| | Hiato | | | Terciario |
| | Formación Báucarit | Mioceno | | |
| | Hiato | Oligoceno | | |
| | Hiato | Eoceno | | |
| | Tobas Riolíticas | Paleoceno | | |
| | Intrusivo Granítico | Mesozoico | Cretácico | |
| | Hiato | | Jurásico | |
| | Calizas con areniscas | | Triásico | |
| | Calizas | Paleozoico | Pérmico | |
| | | | Pensilvánico | |
| | | | Misisípico | |

Figura 12.-Columna Estratigráfica modificada de Guysa 2000

Las rocas del Cretácico Superior (Ks Tpa Gr-Gd) están constituidas por cuerpos ígneos de composición granito porfídico de biotita, granodiorita y cuarzomonzonita, que son afectados por fallas normales y fracturas, e intrusionados por abundantes diques aplíticos y andesíticos. Dicha unidad representa un arco magmático construido en un margen continental activa asociada a la subducción de la placa Farallón debajo de la Placa de Norteamérica durante el Cretácico Tardío -Eoceno.

Las rocas volcánicas más jóvenes (Tm TR-B) están constituidas por derrames de composición riolítica, cubiertas por un volcanismo básico de naturaleza toleítica de edad Terciario Tardío. En la mayoría de los casos estas rocas descansan discordantemente sobre las rocas más antiguas.



La unidad Tm Cgp está constituida por una secuencia de conglomerados polimítico con estratificación gruesa e intercalaciones de basaltos. Lo constituyen clastos de tamaño variado y de diferente composición litológica, con predominio de rocas volcánicas. Por sus relaciones estratigráficas se le considera de edad Mioceno, y es equivalente a la Formación Báucarit.

El Cuaternario (Qpt Cgp) está representado por secuencias que corresponden a depósitos aluviales desarrollados durante el Pleistoceno. Su granulometría y composición varían de acuerdo a su posición geográfica de la roca madre y el ambiente sedimentario donde fueron depositados.

En las planicies aluviales se tienen depósitos que se desarrollaron en forma de terrazas aluviales (Q), los cuales están constituidos por materiales como gravas, representadas por cantos, guijarros y clastos de composición variable. Dichos sedimentos están sobreyacidos por sedimentos del reciente (Qhoal) como arcillas, limos, arena y grava de grano fino a grueso, en lo que corresponde a la plnicie de inundación de los afluentes principales.

6.4.2.-Estructuras

Desde mediados del Terciario (Mioceno temprano) y hasta el Holoceno se desarrolló en la región una tectónica distensiva, que originó primeramente la provincia fisiográfica de Sierras y Valles Paralelos (*Basin and Range*) y posteriormente como consecuencia la apertura del Golfo de California. Este evento tectónico dentro del área de estudio es el más importante, ya que produjo una serie de fallas normales orientadas predominantemente NNW-SSE y N-S que delimitan las cuencas donde se depositaron los sedimentos no consolidados de aluviones y terrazas que actualmente representan los principales acuíferos (King, 1939). Eventualmente se presentan otros lineamientos orientados E-W que sugieren un movimiento transtensional, los cuales aparentemente se presentan en los estadios finales de este tectonismo.



6.5.-Acuíferos

Según los límites administrativos oficiales de CONAGUA el área de estudio se encuentra distribuida parcialmente en tres acuíferos: Mesa del Seri, Río San Miguel y El Zanjón como se muestra en la Figura 13.

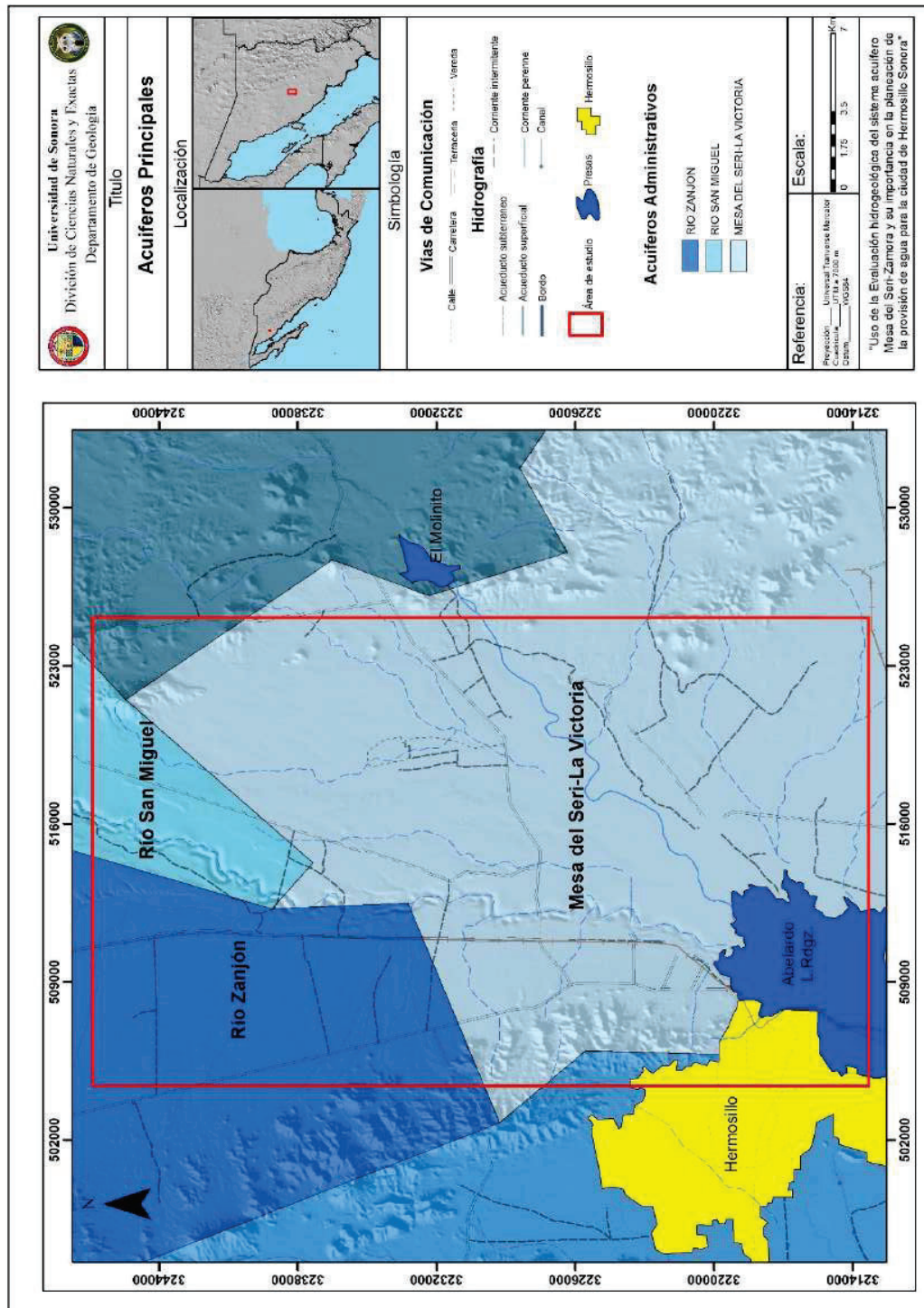


Figura 13.-Acuíferos Administrativos



6.6.-Geología del Subsuelo

El objetivo primordial del análisis de la geología del subsuelo, es definir la geometría y estructuras a profundidad del área de estudio, permite definir las condiciones de frontera, así como las características físicas de los materiales que conforman el sistema acuífero, complementando la información para la caracterización del basamento, zonas de recarga de agua subterránea al sistema; además de configurar el espesor del acuífero para el cálculo del volumen almacenado. Una de las técnicas indirectas más empleadas para apoyarse en este estudio, es la geofísica en sus distintas modalidades, que permiten correlacionar las características del subsuelo y eventualmente reconocer más fácilmente por grandes extensiones las condiciones hidrogeológicas de los materiales.

Se analizaron cuatro secciones a partir de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) (Minjárez y otros, 2005) dentro del área de estudio con una orientación NO-SE y NE-SO como se muestra en la figura 14.

Para mejor comprensión de la geología del subsuelo se estructuraron secciones geológico-geofísicas a partir de las secciones geoelectricas (ANEXO 2), las cuales se describen a continuación:

Sección Zamora

Esta sección se localiza en las inmediaciones del poblado Zamora, dentro de la porción del área de estudio que cae en el acuífero el Zanjón y tiene una orientación preferencial NO-SE con una longitud de 8.2 km. (Figura 15) está formada por cinco unidades:

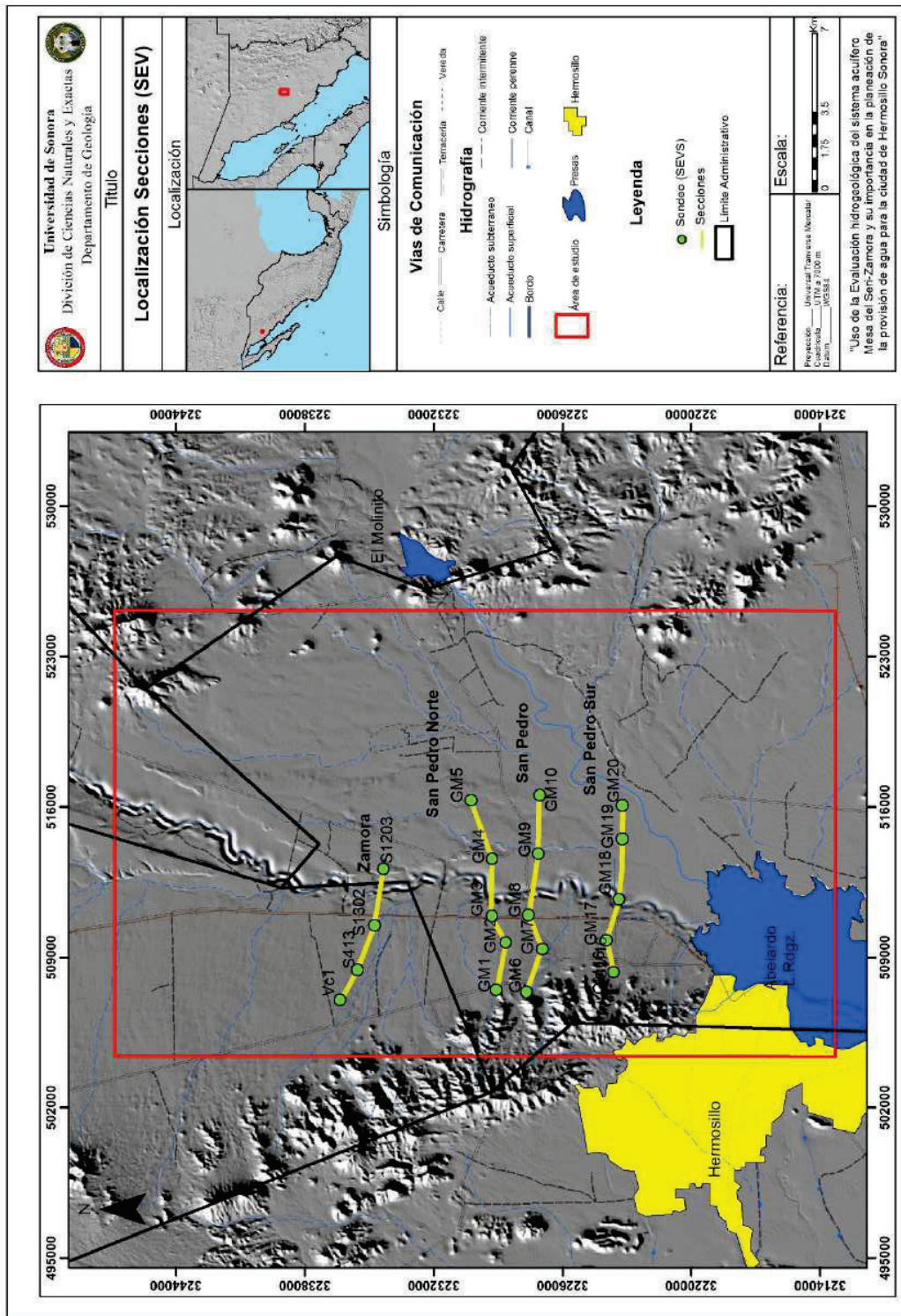


Figura 14.-Localización de perfiles SEV en el área de estudio



- Unidad 1, está constituida por suelo seco compacto, con espesores de 23 m a 54 m.
- Unidad 2, está compuesta por arena fina arcillosa con espesores variables que van de los 57 m a los 273 m; en esta unidad se observa un gran espesor de 110 m de arcilla, en el SEV. S-1203.
- Unidad 3, compuesta por un paquete de arena media-gruesa con un gran espesor de 700 m.
- Unidad 4, compuesta por arena gruesa-grava (semiconsolidada de tipo conglomerático) con espesores de 81 a 173 m.
- Unidad 5, está constituida por el basamento ígneo intrusivo alterado y fracturado que se encuentra en esta sección en el SEV. S-413 a una profundidad de 176m.

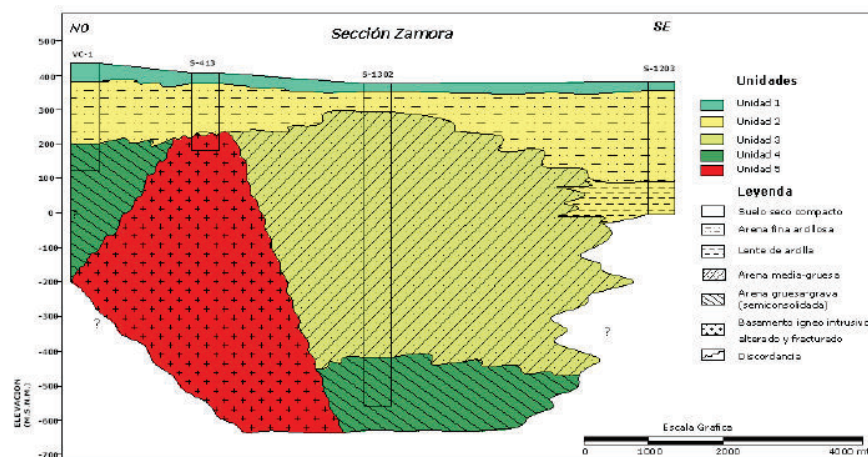


Figura 15.-Sección Zamora Orientada NO-SE (Minjárez y otros ,2005)

En la Zona Acuífera Mesa del Seri-La Victoria se cuenta con 16 sondeos eléctricos verticales (SEV's), analizados en tres secciones que siguen una orientación general NE-SO y de forma perpendicular al cauce del río.



Sección San Pedro Norte

Esta sección se localiza 2 km al norte de San Pedro, tiene una orientación general O-E con una longitud de 10.9 km. consta de 5 unidades, mismas que son descritas la sección San Pedro (Figura 16).

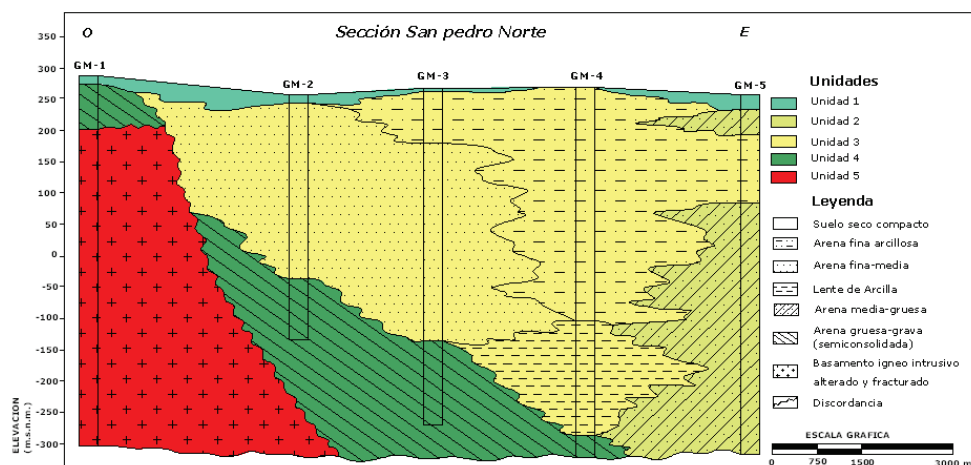


Figura 16.-Sección San Pedro Norte. Orientada O-E (Minjárez y otros, 2005)

Sección San Pedro

Esta sección se localiza a la altura del poblado San Pedro, tiene una orientación preferencial O-E con una longitud de 10.6 km. y está compuesta por cinco unidades (Figura 17).

- Unidad 1, compuesta por el suelo del lugar con espesores de 7 a 14 m.
- Unidad 2, comprendida por la arena media-gruesa se encuentra en la parte O de la sección con espesores de 21 a 214 m.
- Unidad 3, consiste de capas de arena arcillosa y arena fina-media con espesores de 157 y 464 m en las arenas finas-medias y con unos espesores de 200 y 400 m en las arenas finas arcillosas.
- Unidad 4, está compuesta por arena gruesa-grava (semiconsolidada de tipo conglomerado) sus espesores varían de 136 a 450 m.
- Unidad 5, consiste de basamento ígneo alterado y fracturado y se encuentra a 78 y 385m de profundidad en la parte oeste de la sección. Esta sección no



varía mucho de la anterior, se encuentran los mismos paquetes pero con la diferencia de que E a O la granulometría de la sección va en aumento de arena fina arcillosa a arena media-gruesa.

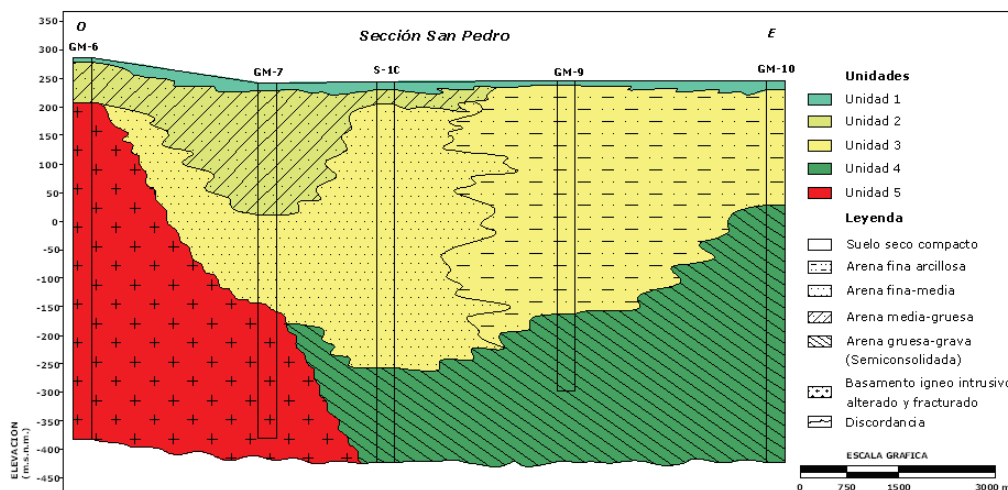


Figura 17.-Sección San Pedro. Orientada O-E (Minjárez y otros, 2005)

Sección San Pedro Sur

Esta sección se ubica 4 km al sur de San Pedro, tiene una orientación general O-E con una longitud de 9.8 km y está conformada por cinco unidades (Figura 18).

- Unidad 1, tiene un espesor que varía de 5.5 a 16 m.
- Unidad 2, compuesta por una intercalación de arena media-gruesa y arena gruesa-grava con espesores de 33 a 72m y de 33 a 94 m respectivamente.
- Unidad 3, compuesta por arena fina arcillosa con espesor de 222 a 283 m.
- Unidad 4, consiste de arena gruesa-grava (semiconsolidada de tipo conglomerático) con espesores de 66 a 83 m.
- Unidad 5, compuesta de basamento ígneo intrusivo alterado y fracturado que se encuentra a una profundidad de 100 m. En esta sección se observa que el aumento en la granulometría de E a O es más evidente con el aumento de arena fina arcillosa a arena media-gruesa-grava.

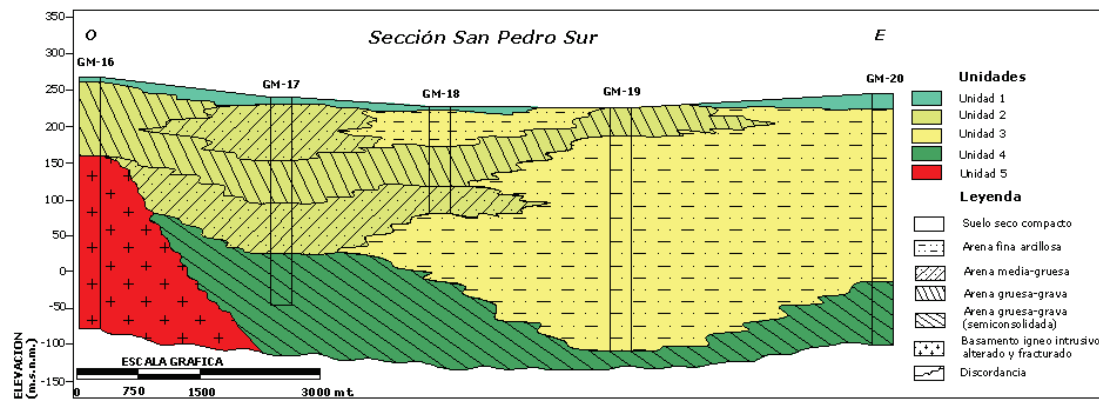


Figura 18.-Sección geológica San Pedro Sur Orientada O-E.(Minjárez y otros , 2005)

6.6.1.-Gravimetría

En el acuífero Mesa del Seri- La victoria Se levantaron un total de 89.4 kilómetros correspondiente a 227 estaciones gravimétricas (CEA, 2006) (Figura 19). Se efectuaron seis levantamientos de perfiles gravimétricos (Figuras 20 a 25) junto con secciones reinterpretadas (ANEXO 2):

- Perfil Presa-Tronconal
- Perfil Cerro la Flojera-Casa Combate
- Perfil Lanix-Carretera a Presa el Molinito
- Perfil Estación de Ferrocarril-la Victoria
- Perfil Presa Abelardo L. Rodríguez-Lomas del Rayo
- Perfil Termoeléctrica-Mesa de Seri-Molino de Camou

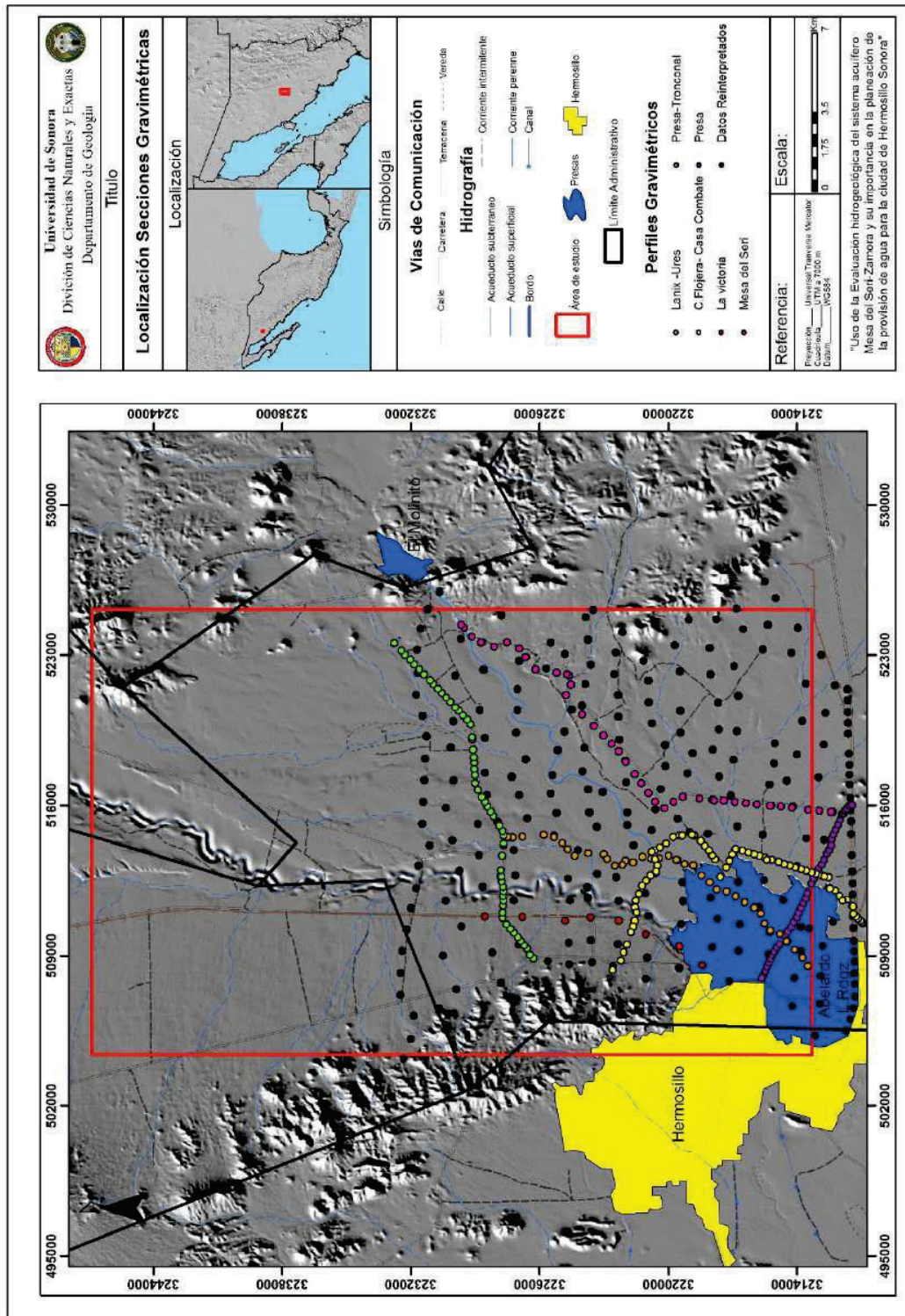


Figura 19.-Localización Secciones Gravimétricas (CEA,2006)

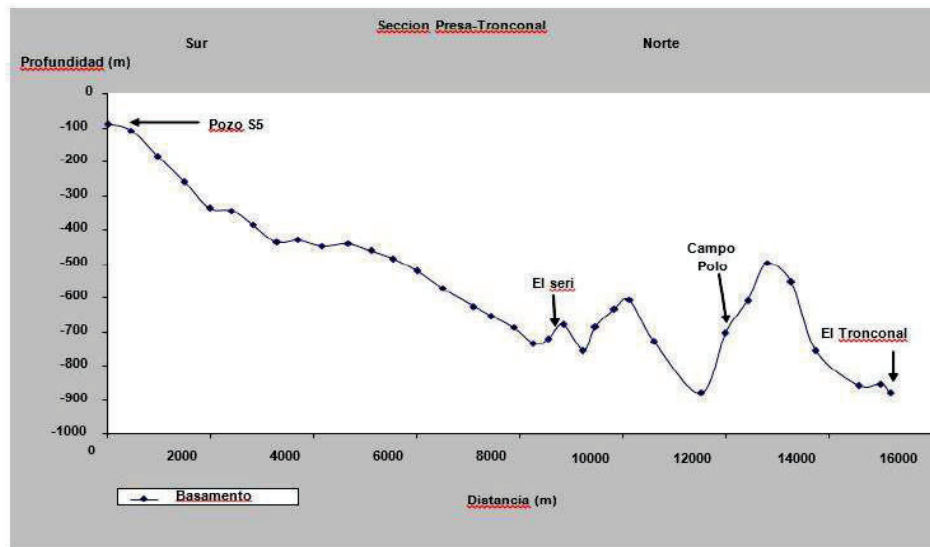


Figura 20.-Profundidad del Basamento obtenida por el Perfil Gravimétrico Presa-El Tronconal. (CEA, 2006)

Perfil Presa-Tronconal:

Perfil con dirección norte-sur con una longitud de 15.2 kilómetros; conformada por 34 estaciones gravimétricas con una separación entre ellas de aproximadamente 500 metros. Se detectó en el perfil un gradiente negativo alcanzando su mínimo en el poblado San Alberto. Las profundidades del perfil varían en el rango de -89 a -879 metros, existe un promontorio de basamento al final del perfil a un kilómetro de la localidad de Campo Polo con una aproximación a los -500 metros de profundidad (Figura 20).

Perfil Cerro la Flojera-Casa Combate:

Perfil con dirección de sur a norte con longitud de 19.25 kilómetros, formada por 61 estaciones gravimétricas separadas entre ellas a cada 250 metros. En este perfil se aprecia un gradiente con tendencia negativa y sobresalen a la altura del kilómetro 11 al inicio de la sección, ubicado en la localidad de San Juanico, las profundidades del perfil varían entre el rango de -18 a -1088 metros. Se manifiesta un perfil con tendencia decreciente alcanzando su máxima profundidad a la mitad del mismo, característica de un graben (Figura 21).

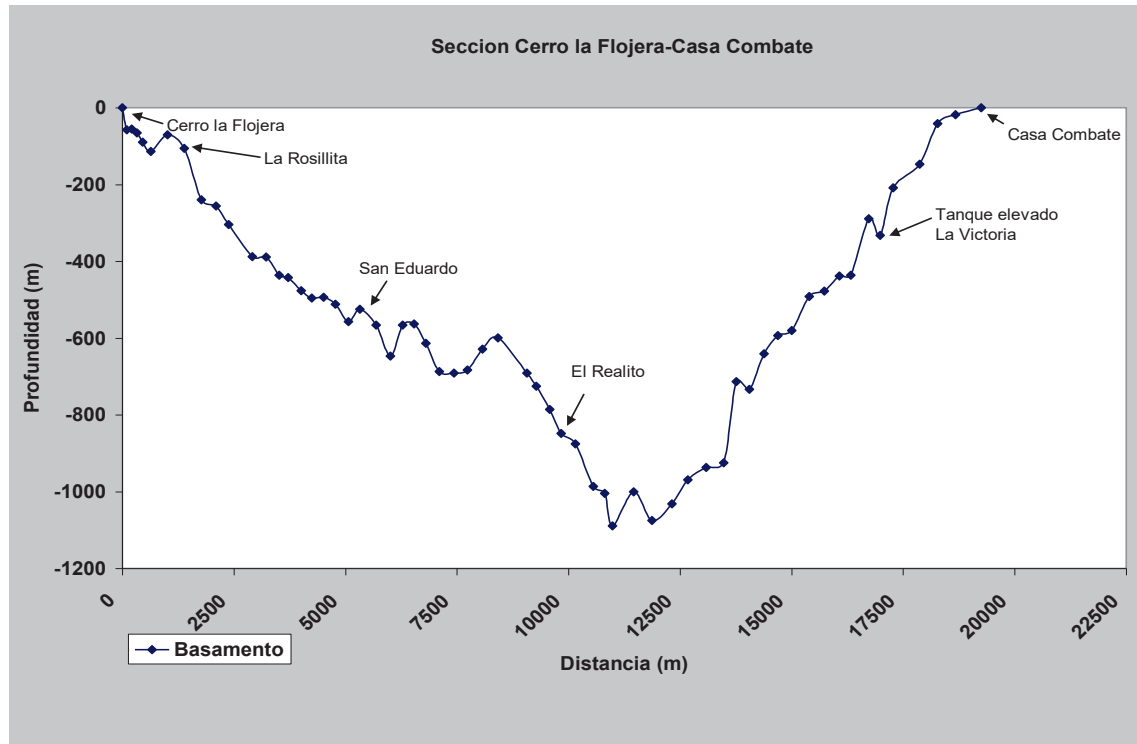


Figura 21.-Profundidad del Basamento obtenida por el Perfil Gravimétrico Cerro La Flojera-Casa Combate. (CEA, 2006)

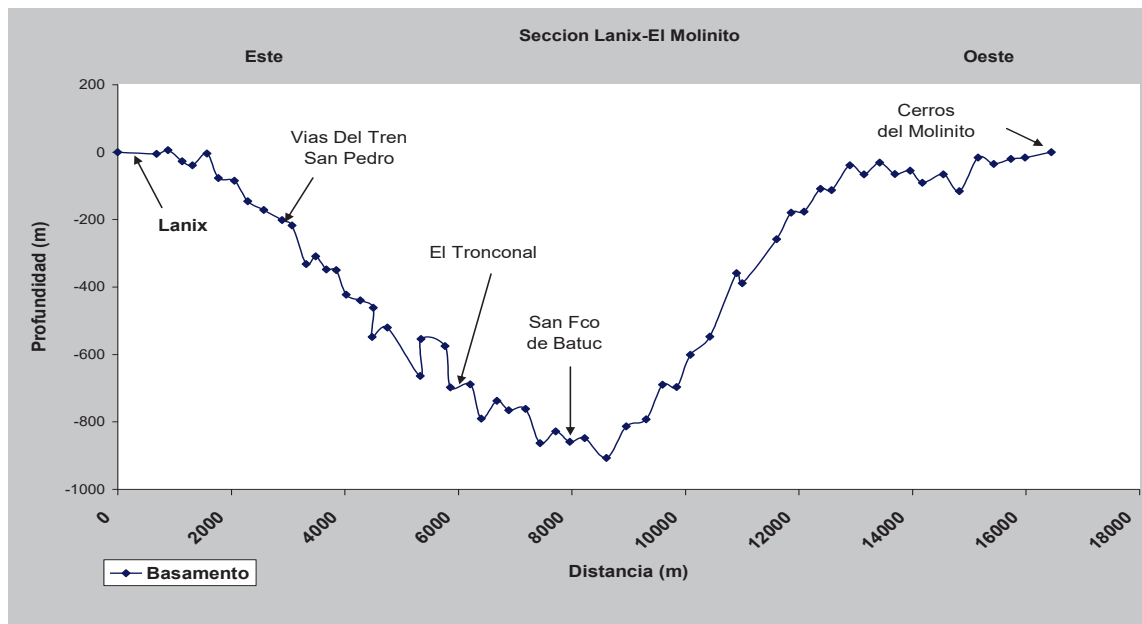


Figura 22.-Profundidad del Basamento obtenida por el Perfil Gravimétrico Lanix-Carretera a Presa el Molinito. (CEA, 2006)



Perfil Lanix-Carretera a Presa El Molinito:

Perfil con dirección oeste-este con una longitud aproximada de 16.50 kilómetros, constituida de 31 estaciones gravimétricas con una separación de 500 metros. Sobre el perfil se aprecia un gradiente muy característico por su comportamiento, ya que se aprecia una depresión pronunciada a la altura del kilómetro 9 desde su inicio, localizándose a dos kilómetros del poblado San Pedro en la parte este. Las profundidades del perfil varían desde -4 a -907 metros, localizadas aproximadamente a la altura de la localidad de San Francisco Batuc (Figura 22).

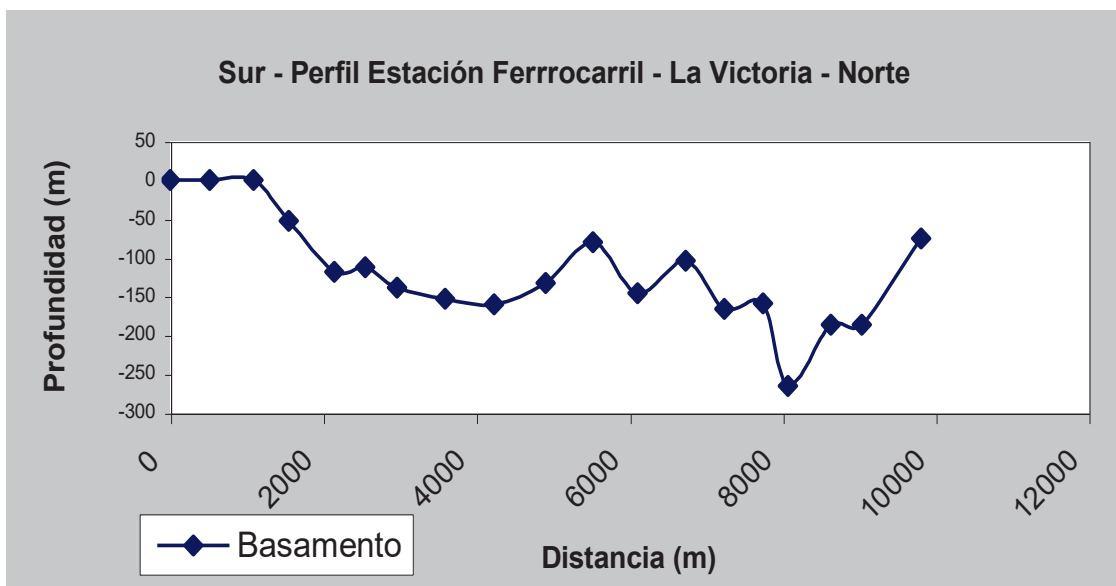


Figura 23.-Profundidad del Basamento obtenida por el Perfil Gravimétrico Estación Ferrocarril – La Victoria (CEA, 2006).

Perfil Estación de Ferrocarril-La Victoria:

Perfil con orientación sur- noreste con una longitud de 9.30 kilómetros. Constituida por 19 estaciones gravimétricas con separación de 500 metros. En el perfil se detecta una profundidad máxima de 250 metros al sur de San Pedro. Los altos y bajos observados obedecen a la continuación del basamento cristalino que se sepulta rápidamente hacia el oriente, debido a la presencia de fallas normales escalonadas (Figura 23).

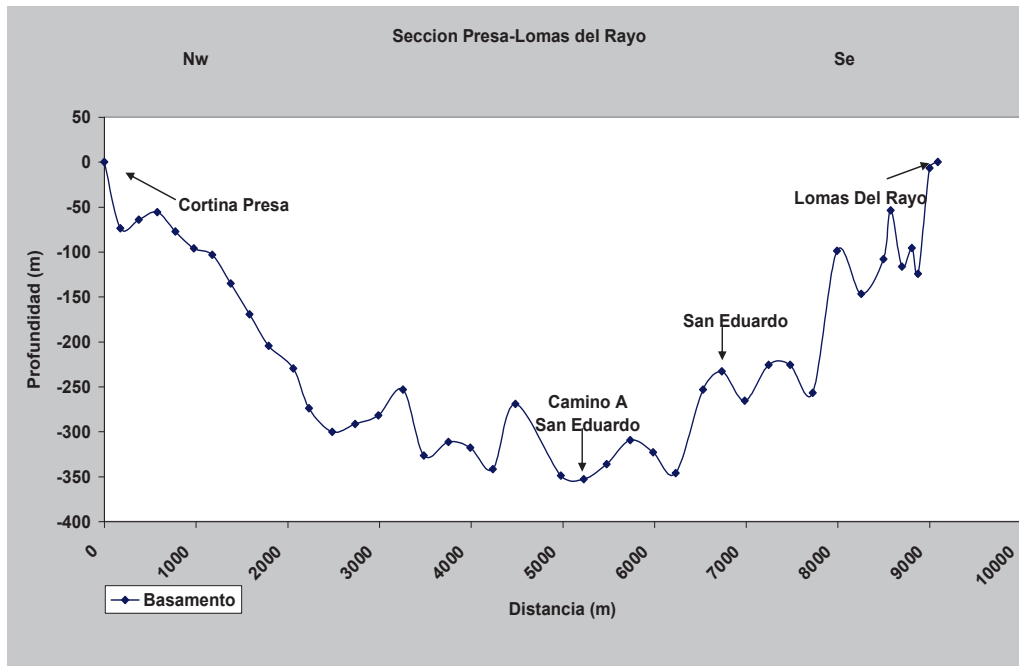


Figura 24.-Profundidad del Basamento obtenida por el Perfil Gravimétrico Presa ALR-Lomas del Rayo. (CEA, 2006)

Perfil Presa Abelardo L Rodríguez-Lomas del Rayo:

Perfil con dirección de oeste a este con una longitud de 9.10 kilómetros; conformada por 42 estaciones gravimétricas, separadas a cada 250 metros entre cada estación. El perfil se manifiesta con una geometría uniforme simétrica con un gradiente paulatino, alcanzando su máximo en -346 metros en el vaso de la presa. Las profundidades manifestadas en este perfil fluctúan entre -6 a -346 metros alcanzando la máxima a la altura del cruce del camino rumbo a San Eduardo. (Figura 24)

Perfil Termoeléctrica-Mesa del Seri-Molino de Camou:

Perfil con dirección suroeste- noreste con una longitud de 20.00 kilómetros, conformada por 42 estaciones gravimétricas separadas a cada 500 metros cada una. A lo largo del perfil se manifiesta un gradiente máximo de -736 metros, alcanzando el punto de mayor profundidad a la altura de la localidad de la Mesa de Seri. Las profundidades del perfil se manifiestan en el rango de -6 a -736 metros, el comportamiento va decreciendo rumbo a la



localidad de San Bartolo, donde las profundidades son mínimas, casi cero y al Ej. Fructuoso Méndez, son aproximadamente de -40 metros. (Figura 25)

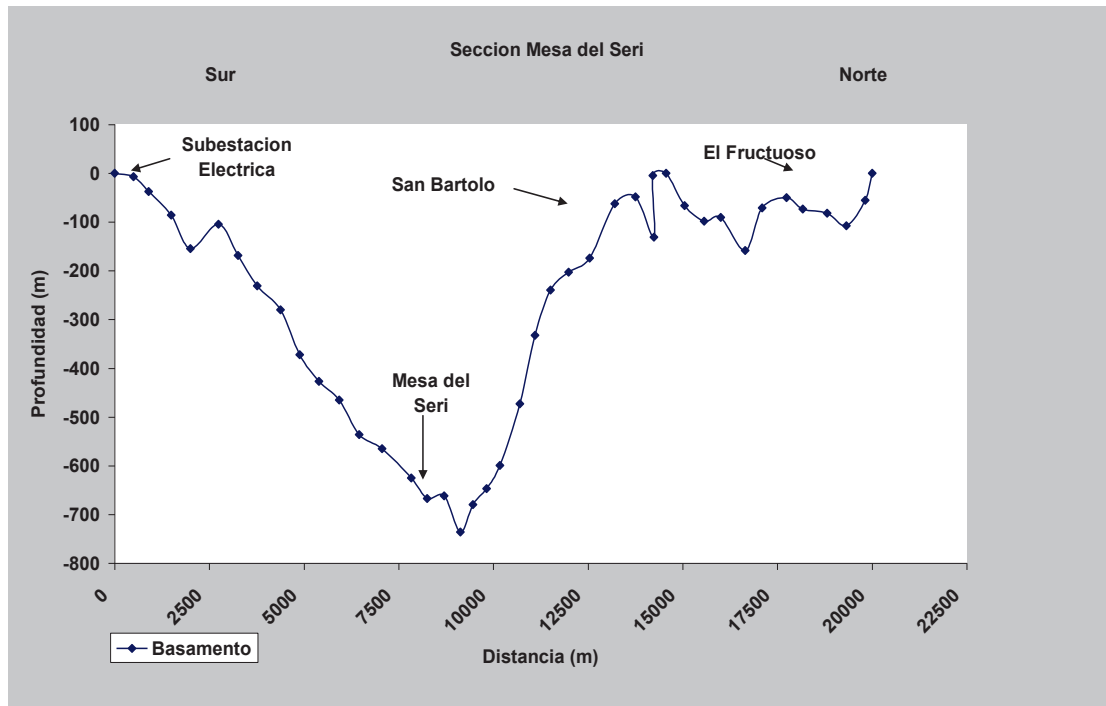


Figura 25.-Profundidad del Basamento obtenida por el Perfil Gravimétrico Termoeléctrica-Mesa del Seri-Molino de Camou. (CEA, 2006)

La Tabla 2 muestra las características de cada uno de los perfiles gravimétricos dentro del área de estudio como distancia de cada una de ellas, el número de estaciones tomadas y la separación entre cada estación.

Tabla 2.-Características de perfiles gravimétricos Mesa del Seri-La Victoria (CEA, 2006)

| Perfil | Distancia en km. | Número de Estaciones | Separación entre estaciones (metros) |
|---|------------------|----------------------|--------------------------------------|
| Presa-Tronconal. | 15.2 | 34 | 500 |
| Cerro la Flojera-Casa Combate. | 19.3 | 61 | 250 |
| Lanix-Carretera a Presa el Molinito. | 16.5 | 31 | 500 |
| Estación de Ferrocarril-La Victoria. | 9.3 | 19 | 500 |
| Presa Abelardo L. Rodríguez Lomas del Rayo. | 9.1 | 42 | 250 |
| Termoeléctrica-Mesa del Seri-Molino de Camou. | 20 | 42 | 500 |
| TOTALES | 89.4 | 229 | |



6.6.2.-Geometría del basamento

A partir de los datos obtenidos de los perfiles gravimétricos, se realizó una interpolación de valores con los datos de profundidad del basamento, es decir para la obtención de la geometría del acuífero para el área de estudio se obtuvo el siguiente resultado: se pueden observar dos fosas las cuales son identificadas como la fosa Zamora y la Fosa San Pedro y entre ellas es visible una barrea natural del basamento, siendo la segunda la más profunda (Figura 26).

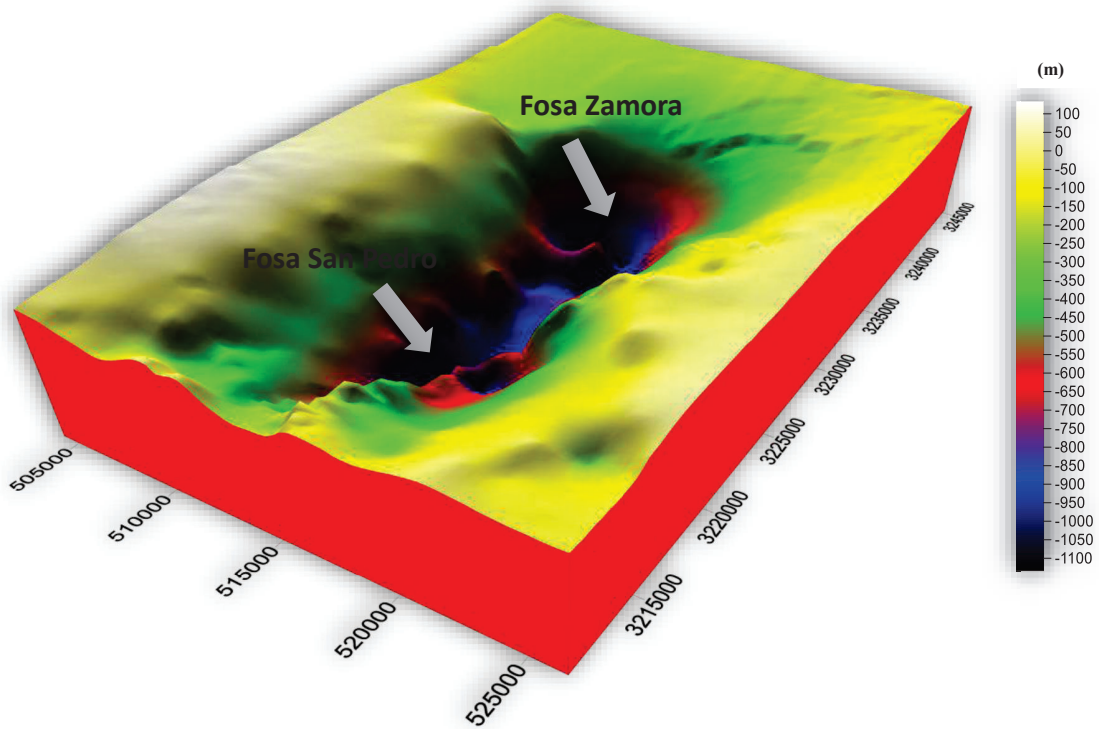


Figura 26.-Configuración del Basamento (CEA,2006)



7.-Modelo Hidrogeológico Conceptual

7.1.-Modelo Geológico Conceptual

A partir de la reinterpretación geofísica y geológica del área se obtuvo el modelo geológico, donde se observan cuatro unidades litológicas principales (Figura 27).

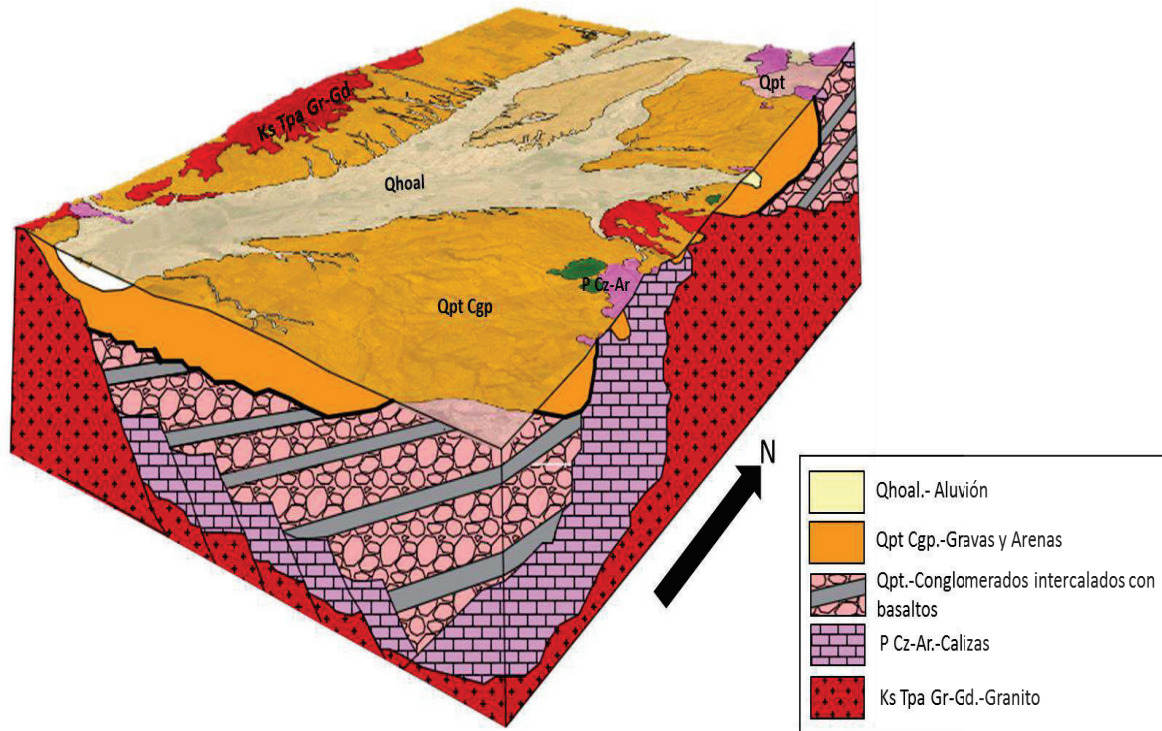


Figura 27.-Modelo Geológico Conceptual

La primera de ellas y más superficial está conformada por una delgada capa de material no consolidado de espesor muy reducido (< 10 m) que representa el desarrollo de suelo y sedimentos no-saturados. La segunda es una unidad que acumula sedimentos no-consolidados dominados por gravas, arenas y limos, eventualmente saturados, que representan la principal zona acuífera del área, de hecho, a lo largo de una capa de arenas medias a gruesas se presenta la mayor parte de los aprovechamientos subterráneos. A mayor profundidad se encuentra una unidad que está constituida por arena gruesa a grava semi-consolidadas, así como areniscas y conglomerados con intercalaciones de basaltos (Fm. Báucarit), la cual se considera una unidad de poca permeabilidad, pero con probabilidades medias a bajas de contener agua subterránea. Finalmente en la porción basal se tiene la unidad



que se puede considerar como el basamento hidrogeológico de la zona, el cual está constituido principalmente por rocas intrusivas graníticas, calizas y eventualmente rocas volcánicas.

7.2.-Modelo Hidrogeológico conceptual

A partir de la reinterpretación del subsuelo obtenida de los perfiles geoelectricos y gravimétricos se pudieron identificar las diferentes condiciones hidrogeológicas presentes en el área de estudio, basados principalmente en las características granulométricas y litológicas de cada una de éstas, en el rango de conductividad hidráulica, y en los valores resistivos, complementados con el ambiente de depósito (Tabla 3).

Tabla 3.-Propiedades de las unidades hidrogeológicas del área de estudio

| Unidad | Litología Principal | Rango de Conductividades Hidráulicas (m/s) | Rango de resistividad (Ohm/m) | Ambiente |
|-----------|--|--|-------------------------------|-----------------|
| 1 | Arenas finas arcillosas | 10^{-7} a 10^{-8} | >8 | Fluvial |
| 2 | Arenas medias y gravas | 10^{-3} a 10^{-4} | >30 | Fluvio-Aluvial |
| 3 | Arenas gruesas ,gravas, conglomerado semiconsolidado | 10^{-1} a 10^{-2} | >50 | Aluvial-Fluvial |
| Basamento | Granito, y caliza | 10^{-5} a 10^{-14} | >1000 | - |

De acuerdo con la información geológica y parámetros hidráulicos consultados de los diferentes acuíferos se realizó un modelo de unidades hidrogeológicas donde se obtienen 4 unidades en el área de estudio (Figura 28).

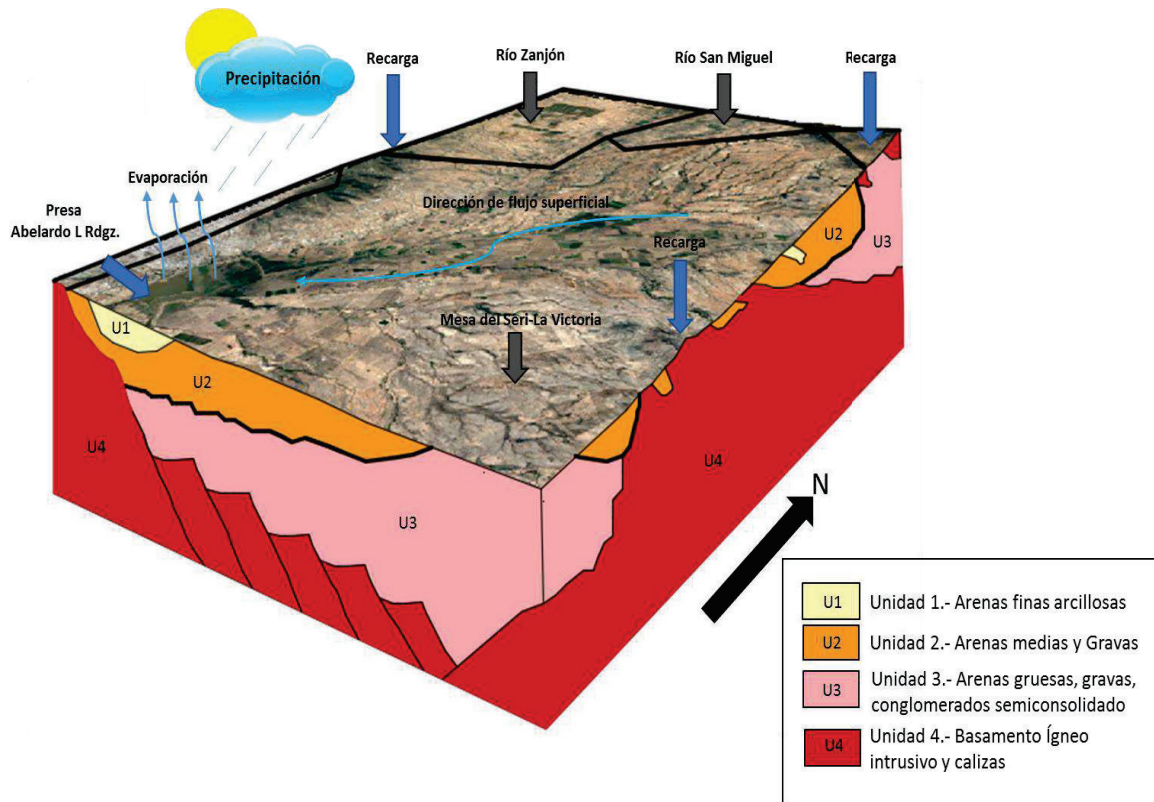


Figura 28.-Modelo de unidades Geohidrológicas Conceptual

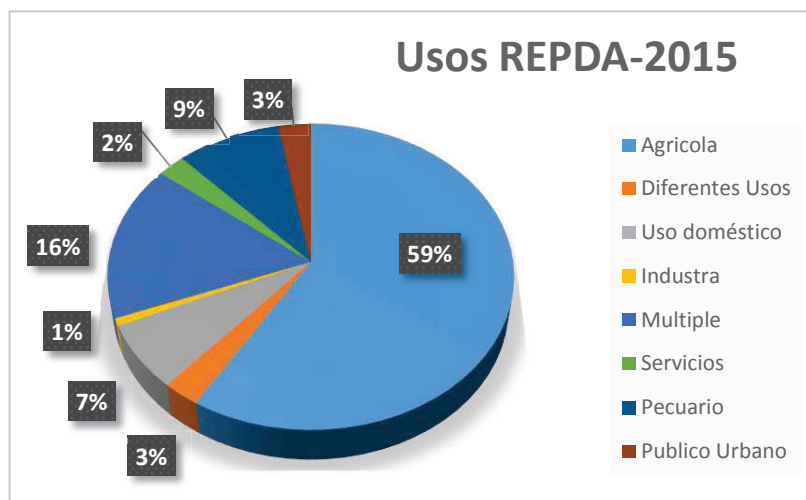
- La primera unidad hidrogeológica se conforma por arenas finas arcillosas en la parte superior del acuífero.
- La unidad dos que consiste de arenas media a gruesa, en esta se encuentra el mayor número de aprovechamientos, lo cual indica que es la principal unidad hidrogeológica portadora de agua subterránea para el sistema acuífero.
- La tercera unidad se considera a la Formación Báucarit que está conforma por conglomerado polimíctico y arenas semiconsolidadas.
- Por último, la cuarta está representada por el basamento predominantemente ígneo-carbonatado.



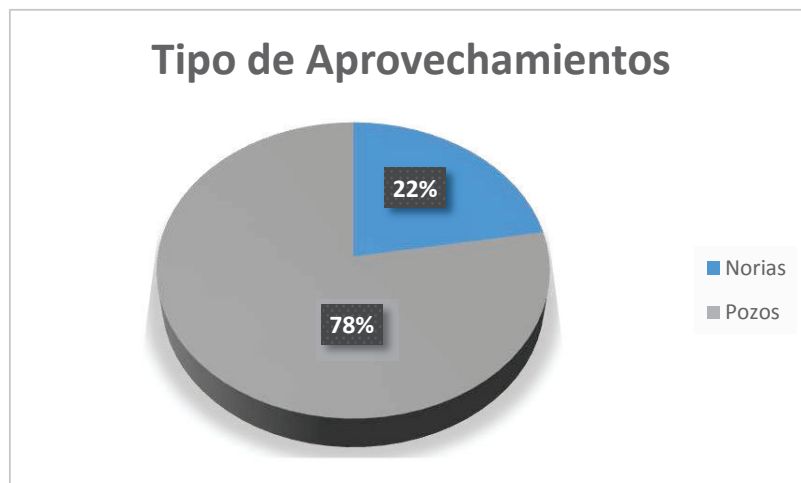
8.-Censo de Aprovechamientos

8.1.-Usos del agua

Según el REPDA de 2015 los usos del agua para este sistema acuífero se distribuyen de la siguiente manera: el 59% es de Uso Agrícola, para Usos Múltiples es el 16%, Pecuario 9 %, Uso Doméstico 7%, Público urbano y diferentes usos con 3% cada uno, Servicios con el 2% y el industrial con el 1% (Gráfica 5). Por otro lado, de acuerdo al censo para la piezometría de dicho año, alrededor del 78% de los aprovechamientos corresponden a pozos, mientras que solo el 22% son norias (Gráfica 6).



Gráfica 5.-Usos REPDA-2013



Gráfica 6.-Tipos de Aprovechamiento



8.2.-Piezometría del área de estudio

8.2.1.-Profundidad del nivel estático 2016

Con la información integrada de los niveles piezométricos de alrededor de 70 aprovechamientos medidos por la CONAGUA para el año 2016 (ANEXO 1) dentro del sistema acuífero aquí definido, se puede establecer que los niveles más someros se presentan hacia las porciones centro-norte y noreste del área de estudio con valores de 15 a 30 m de profundidad; mientras que los valores más profundos se ubican en la parte noroeste en las inmediaciones de los poblados Estación Pesqueira y Zamora, con valores desde 90 m y hasta los 180 m de profundidad (Figura 29).

8.2.2.-Elevación del nivel estático 2016

La elevación del nivel estático para el año 2016 dentro del área de estudio varió entre 160 y 300 msnm. Las elevaciones mayores se presentaron en la zona noreste del área de estudio con valores que van de 200 msnm a 300 msnm, a la altura de los poblados Mesa del Seri y San Bartolo. Por otra parte, los valores más bajos se registraron en la zona centro y noroeste del área estudio a la altura del poblado Zamora y al sur de Pesqueira, con un rango de elevación de entre los 160 msnm a 180 msnm (Figura 30).

En términos generales la elevación tiende a ser mayor en las laderas principalmente en la porción oriental, de manera que el agua subterránea fluye hacia los cauces principales del Río San Miguel y Sonora de noreste a suroeste. Sin embargo en la porción noroeste del este sistema acuífero se puede ver claramente una zona de abatimiento a la altura del poblado de Zamora, esto se debe principalmente a la presencia de varios aprovechamientos con niveles profundos y con fuertes extracciones para uso agrícola, por lo que a este último hecho se le atribuye el desarrollo de esta anomalía que actualmente invierte la dirección natural del flujo.

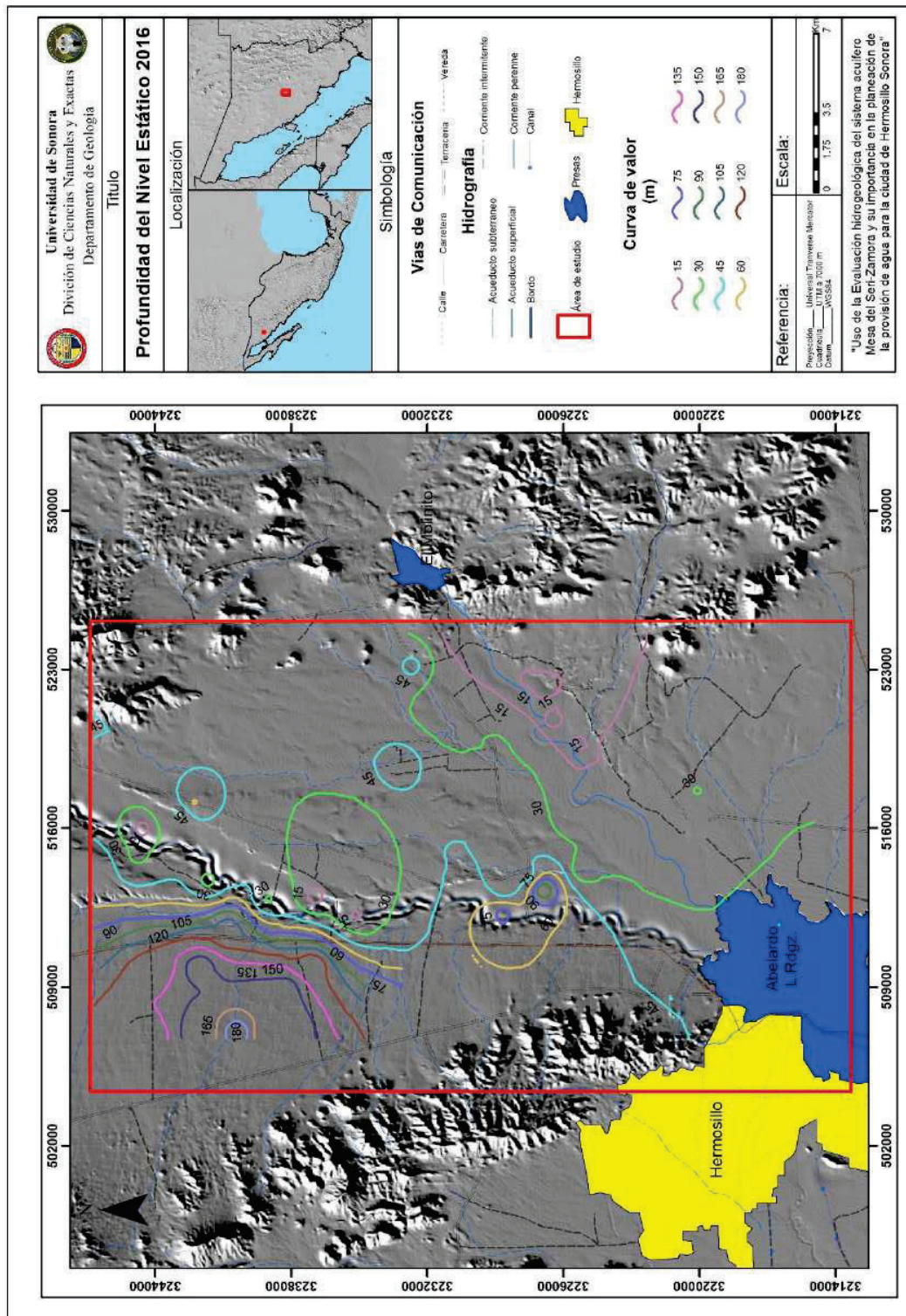


Figura 29.-Profundidad del nivel estático 2016

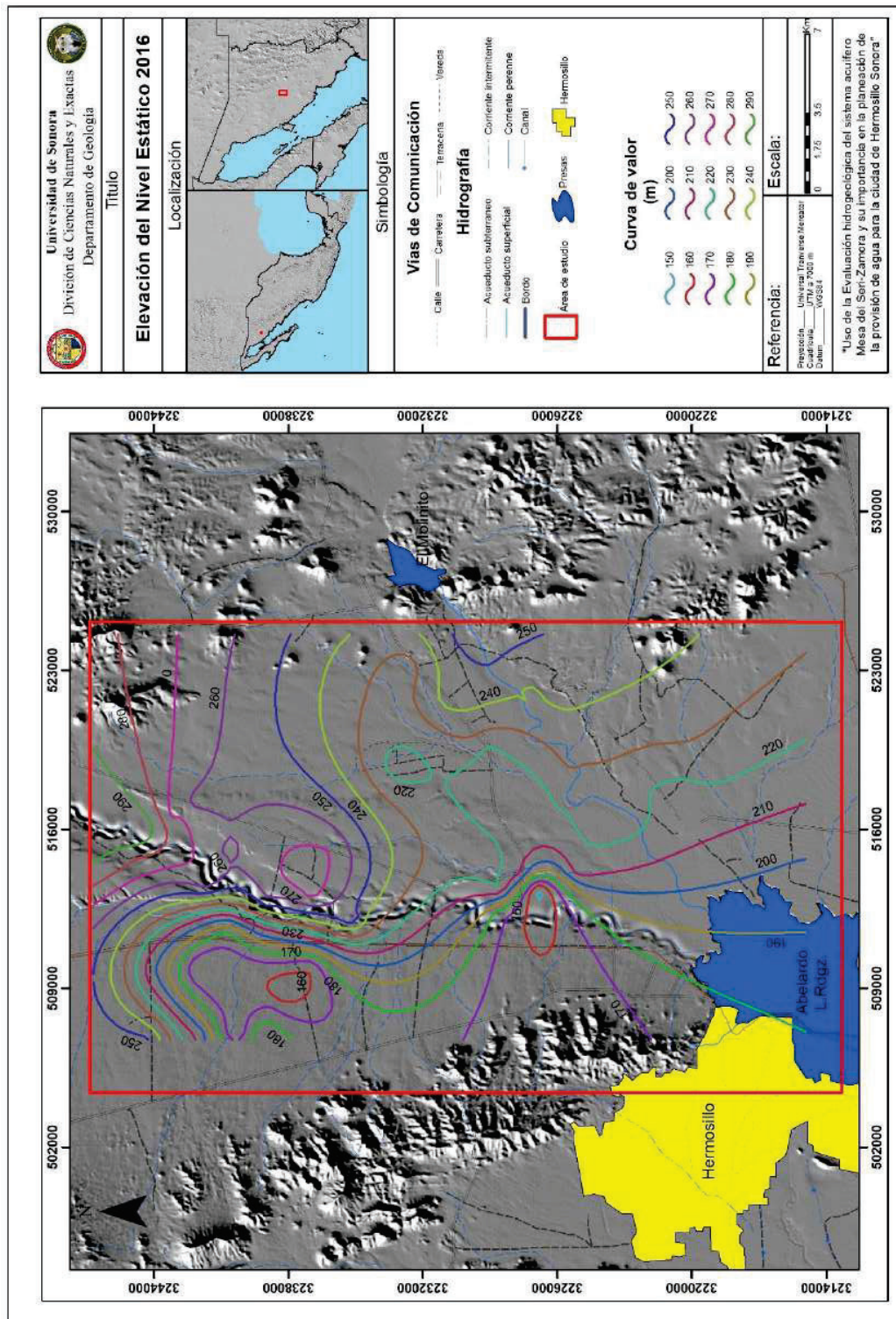


Figura 30.-Elevación del nivel estático 2016



8.2.3. Evolución del nivel estático 2015-2016

Para este período de evolución que corresponde a los años 2015-2016, se correlacionaron datos de 48 aprovechamientos que se pudieron medir en ambos años de acuerdo a las piezometrías recabadas de (CONAGUA, 2016). A partir de ellos se generaron las curvas de isovalores mediante el método de interpolación.

Los valores más anómalos de evolución negativa se localizan al sureste y de igual manera al noroeste del área de estudio a la altura del poblado de San Bartolo y Mesa del Seri, y al noroeste sobre el cauce del Río San Miguel, donde se tienen valores desde -2 m hasta -6 m; mientras que en el poblado de Zamora se registran valores también negativos de -1 m a -3 m. Sin embargo, se tienen evoluciones positivas a lo largo del centro del área de estudio cercano a las localidades del Zacatón y el Alamito con valores de 1 m y hasta 4 m, inclusive con zonas estables con valor de 0. Los lugares donde las curvas son más pronunciadas corresponden a las zonas de mayor abatimiento dentro del área de estudio (Figura 31).

9.-Balance integral de aguas subterráneas

Un balance de aguas subterráneas consiste en registrar las entradas, salidas y cambio en el volumen de almacenamiento, que acontecen en un volumen específico del sistema acuífero en un determinado lapso de tiempo; por tanto, se debe de conocer las componentes que intervienen en el área de balance, como pueden ser la evapotranspiración, bombeo, caudal base, flujo subterráneo que entra o sale lateralmente, etc. Para lograr este fin, se realizó el balance para la zona de valle dentro del área de estudio.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es:

$$\text{Entradas (E) - Salidas (S) = Cambio de Almacenamiento}$$

Aplicando esta ecuación, las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento de una unidad hidrogeológica.

$$\text{Recarga total} - \text{Descarga total} = \text{Cambio de almacenamiento en la unidad hidrogeológica}$$

De esta forma la ecuación de balance queda de la siguiente manera:

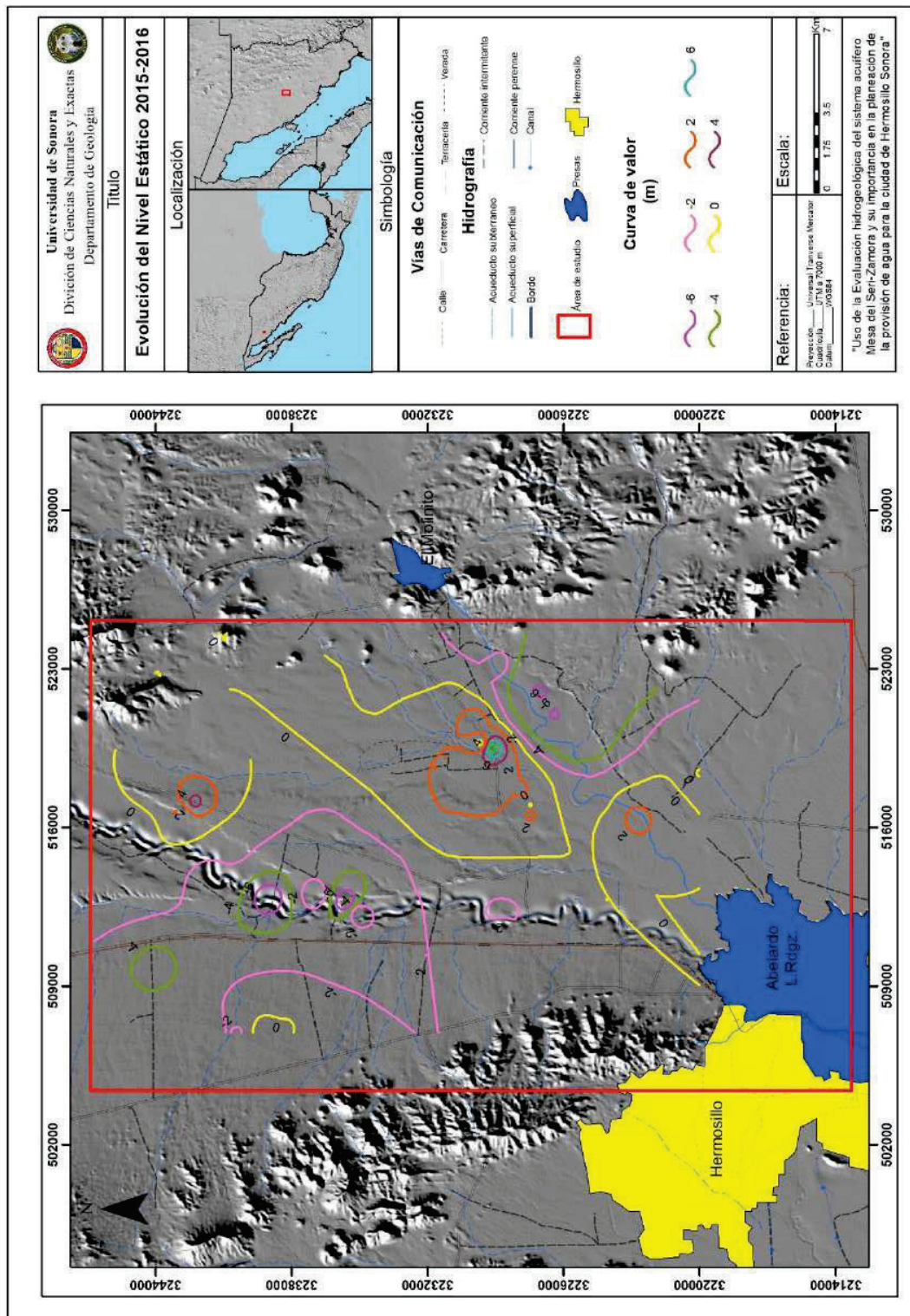


Figura 31.-Evolución del nivel estático 2015-2016



$$R_v + E_h + R_i - B - S_h - ETR = \pm \Delta V(S)$$

Donde:

- R_v= Recarga vertical por lluvia
- E_h= Recarga por flujo subterráneo
- R_i= Recarga inducida
- B= Bombeo
- S_h= Salidas por flujo horizontal
- ETR= Evapotranspiración real
- AV(S)= Cambio de volumen almacenado

9.1.- Parámetros Hidráulicos

El agua subterránea se desplaza a través de una serie de sedimentos y rocas de origen diverso que conforman estructuras tectónicas de tipo horst y graben, estos últimos rellenos por materiales sedimentarios de origen continental, los cuales se agrupan en dos medios físicos diferenciados. Estos medios son: i) granular y ii) fracturado.

Las rocas que conforman a los horst y graben, agrupan alternadamente y en superposición a los medios fracturados (andesitas, ignimbritas y tobas) y granular (depósitos sedimentarios continentales) con conductividades hidráulicas obtenidas a partir de la interpretación de pruebas de bombeo mediante métodos diversos.

- Para las andesitas, ignimbritas y tobas se desconoce su conductividad hidráulica debido a que no existe información para su estimación y valoración.

El medio granular se consideró anisotrópico, debido a la estratificación horizontal de sedimentos; por tanto, los valores de conductividad hidráulica vertical se podrían estimar en un orden de magnitud menor a la K_h , como lo asignan en la literatura mundial.

Transmisividad

Los valores de transmisividad para este sistema acuífero varían de 1×10^{-3} a $9.7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. La principal aportación de agua subterránea proviene de la tercera capa que se conforman por gravas y arenas. Estos valores de transmisividad fueron obtenidos de un modelo anteriormente hecho para el acuífero del Zanjón usando el promedio ponderado de esos valores para este estudio.



9.2.-Recarga Natural Inducida o Retorno de Riego

Del número total de aprovechamientos, del REPDA 2015 se calculó el volumen total de uso agrícola, obteniendo un valor de 14.56 Hm³/año que es el 20% del volumen total para el retorno de riego o recarga inducida bajo referencia de Fetter, 1994 (Tabla 5).

Bombeo (Hm³/año)

Para obtener los datos de bombeo se usó la base de datos de REPDA 2015 proporcionada por la CEA. Calculando aproximadamente como volumen total bombeado de 142.24 Hm³

Entradas y Salidas Horizontales (Hm³/año)

Se calculó mediante el método de celdas de flujo, basado en la ecuación de Darcy, donde se tomaron como base las curvas de igual elevación al NE y se obtuvieron los diferenciales de carga y de distancia entre las curvas (gradiente dh/dl), tratando de ubicar las celdas en los extremos del acuífero, donde es visible, según las curvas, que existe un flujo subterráneo de entrada o salida (Tabla 4) (Figura 32).

Tabla 4.-Cálculo de Celdas de Flujo

| CANAL | ANCHO B (m) | LONGITUD L (m) | h ₂ -h ₁ (m) | Gradiente i (m) | T (m ² /s) | CAUDAL Q (m ³ /s) | VOLUMEN (hm ³ /año) |
|-----------------------|-------------|----------------|------------------------------------|-----------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|
| E1 | 666.44 | 290.56 | 10 | 0.0344 | 0.001049 | 0.0241 | 0.76 |
| E2 | 475.54 | 299.06 | 10 | 0.0334 | 0.001049 | 0.0167 | 0.53 |
| E3 | 321.32 | 294.17 | 10 | 0.0340 | 0.001049 | 0.0115 | 0.36 |
| E4 | 341.02 | 304.64 | 10 | 0.0328 | 0.001049 | 0.0117 | 0.37 |
| E5 | 421.03 | 237.30 | 10 | 0.0421 | 0.001049 | 0.0186 | 0.59 |
| E6 | 190.76 | 421.78 | 10 | 0.0237 | 0.009755 | 0.0441 | 1.39 |
| E7 | 510.00 | 536.47 | 10 | 0.0186 | 0.009755 | 0.0927 | 2.92 |
| E8 | 786.12 | 739.33 | 10 | 0.0135 | 0.009755 | 0.1037 | 3.27 |
| E9 | 324.17 | 934.27 | 10 | 0.0107 | 0.009755 | 0.0338 | 1.07 |
| E10 | 512.28 | 962.21 | 10 | 0.0104 | 0.009755 | 0.0519 | 1.64 |
| E11 | 455.08 | 1086.42 | 10 | 0.0092 | 0.009755 | 0.0409 | 1.29 |
| E12 | 334.65 | 1134.66 | 10 | 0.0088 | 0.009755 | 0.0288 | 0.91 |
| E13 | 361.23 | 1076.16 | 10 | 0.0093 | 0.009755 | 0.0327 | 1.03 |
| E14 | 427.72 | 1274.08 | 10 | 0.0078 | 0.009755 | 0.0327 | 1.03 |
| E15 | 563.30 | 1320.72 | 10 | 0.0076 | 0.009755 | 0.0416 | 1.31 |
| E16 | 446.24 | 1427.17 | 10 | 0.0070 | 0.009755 | 0.0305 | 0.96 |
| E17 | 590.17 | 1536.02 | 10 | 0.0065 | 0.009755 | 0.0375 | 1.18 |
| E18 | 569.59 | 1775.65 | 10 | 0.0056 | 0.009755 | 0.0313 | 0.99 |
| Total entradas | | | | | | 21.5992010 | |

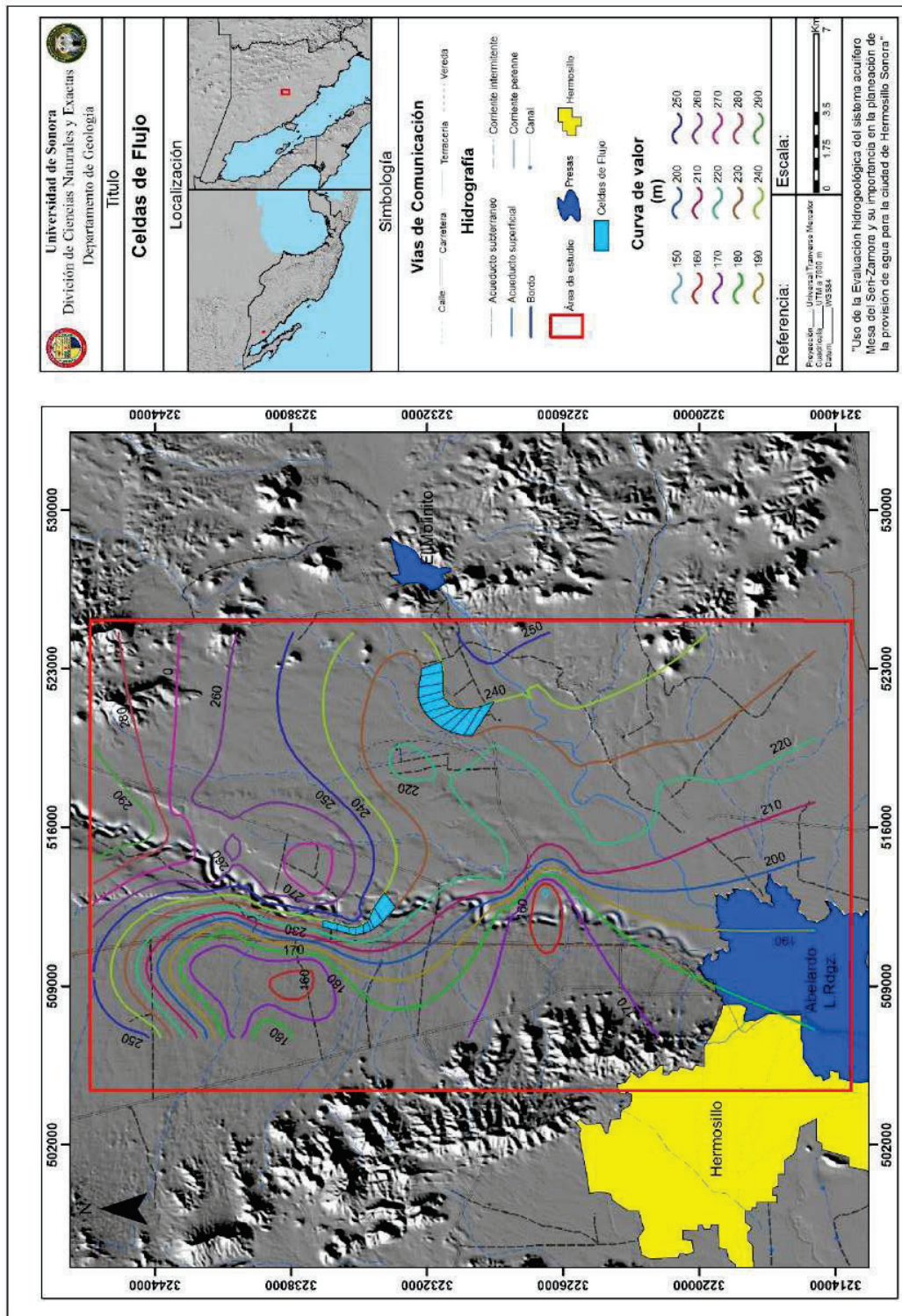


Figura 32.-Celdas de Flujo del área de estudio



La ley de Darcy, se expresa de la siguiente manera (Fetter, 1994):

$$Q = - K A (h_1 - h_2) / L$$

Donde:

Q = Gasto, en m³/s

K = coeficiente de permeabilidad (m/s)

A = Área de la sección transversal por donde pasa el flujo, en m²

h₁, h₂ = Cargas hidráulicas (m)

L = Distancia entre curvas de igual valor (m), o en su caso distancia entre piezómetros

El signo negativo solo indica que la dirección del flujo es hacia donde el gradiente hidráulico disminuye.

Conductividad Hidráulica (K)

Se obtiene a partir de las pruebas de bombeo, éstas arrojan un valor de transmisividad, que viene a ser el producto de la permeabilidad por el espesor saturado:

$$T = K b$$

9.3.-Cambio de almacenamiento (Hm³/año)

Normalmente se consideran como entradas al acuífero: entradas por flujo horizontal de otros acuíferos (EH), infiltración vertical directa de lluvia y corrientes superficiales (IV), y normalmente se empieza a incluir el término de recarga de ladera (RL). Pero como es muy difícil evaluar las entradas al acuífero, se evalúan las salidas, que son: salidas por flujo subterráneo horizontal (SH), descarga de manantiales (M) (este incluye el flujo base mencionado anteriormente, siempre y cuando la descarga sea del acuífero que se está evaluando), extracciones mediante pozos de bombeo (B), y evapotranspiración (ETR). El cambio de almacenamiento (ΔV) será la suma de estos parámetros.

El cambio de almacenamiento en el intervalo de tiempo considerado en el balance, se determina mediante la evolución de los niveles de agua en el intervalo de tiempo considerado y valores representativos del coeficiente de almacenamiento del acuífero.



Hay varias formas para obtener el cambio del almacenamiento, una manera es obtenerla partir de pruebas de bombeo o de consideraciones relativas al tipo y litología de la zona de estudio, otro modo (el que se utilizó en este trabajo) es creando a partir de la evolución del nivel estático obtenido en el área para los años 2014 y 2015 los polígonos de Thiessen con ayuda de la herramienta ArcGis y a su vez delimitar un área donde se encuentran concentrados los pozos, y por último multiplicar el área por el valor de evolución de nivel estático dentro de cada polígono para posteriormente multiplicar la suma de esto por el valor de S1 para este caso de 0.08.

Tabla 5.-Valores de Entradas y Salidas del sistema Acuífero

| VOL BOMBEO (Hm³/año) | VOL USO AGRÍCOLA (Hm³/año) | VOL RETORNO DE RIEGO (Hm³/año) |
|--|--|--|
| 142.24 | 72.81 | 14.562 |

9.4.-Recarga Vertical (Rv)

La recarga vertical es uno de los términos que mayor incertidumbre implica a su cálculo. Debido a que el cambio de almacenamiento (ΔV) fue considerado de acuerdo al método mencionado en el apartado anterior, también se tiene información para calcular las entradas y salidas por flujo subterráneo con base en la Ley de Darcy (Tabla 6), el valor de la recarga vertical fue despejado de la ecuación de balance definida por la siguiente expresión.

$$R_v + E_h + R_i - B - S_h - ETR = \pm \Delta V(S)$$

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = B + S_h + ETR + \Delta V(S) - E_h - R_i$$

$$R_v = 142 + 0 + 0 + (-65.5) - 21.60 - 14.56$$

$$R_v = 40.58 \text{ Hm}^3/\text{año}$$



Tabla 6.-Balance del área de estudio

| | |
|---|---------------|
| ENTRADAS | |
| Entradas Horizontales (celdas de flujo) | 21.60 |
| Retorno de riego | 14.56 |
| Recarga vertical (por lluvia y por infiltración a lo largo de ríos) | 40.58 |
| $R_v = Sh + B + ETR + D_n - DV(S) - E_h$ | |
| | |
| Recarga Total | 76.74 |
| | |
| SALIDAS | |
| Bombeo | 142.24 |
| Salidas Horizontales (celdas de flujo) | 0.00 |
| Descarga de manantiales (flujo base) | 0.00 |
| Evapotranspiración en niveles someros | 0.00 |
| | |
| Salidas totales | 142.24 |



10.-Planeación de escenarios y discusión

10.1.- Problemática de la sequía

Diversos trabajos han abordado la situación de sequía de la Cuenca del Río Sonora (Universidad de Sonora, 2014). Estos han coincidido en lo extremo y de larga duración que ha tenido este fenómeno, así como las consecuencias, no sólo en lo que respecta a las aguas superficiales, como se verá a continuación, sino también en las aguas subterráneas, como se discutirá en el apartado siguiente.

La siguiente gráfica muestra la evolución de la precipitación en la estación climatológica de Hermosillo, a partir de la aplicación de diferentes índices de sequía (Universidad de Sonora, 2014), mostrando el abrupto cambio ocurrido a partir del 1995 en los patrones de precipitación (Figura 33).

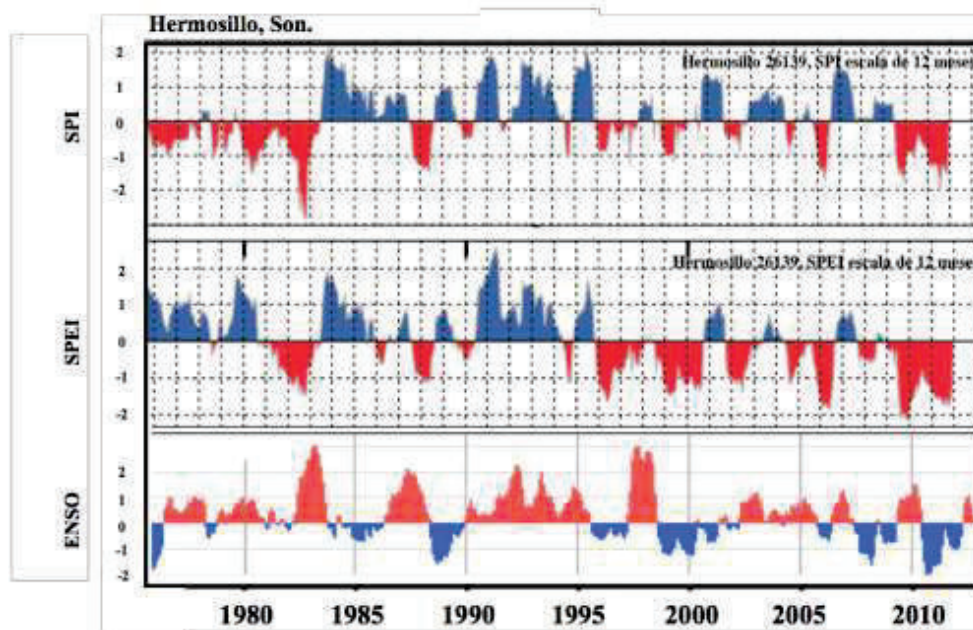
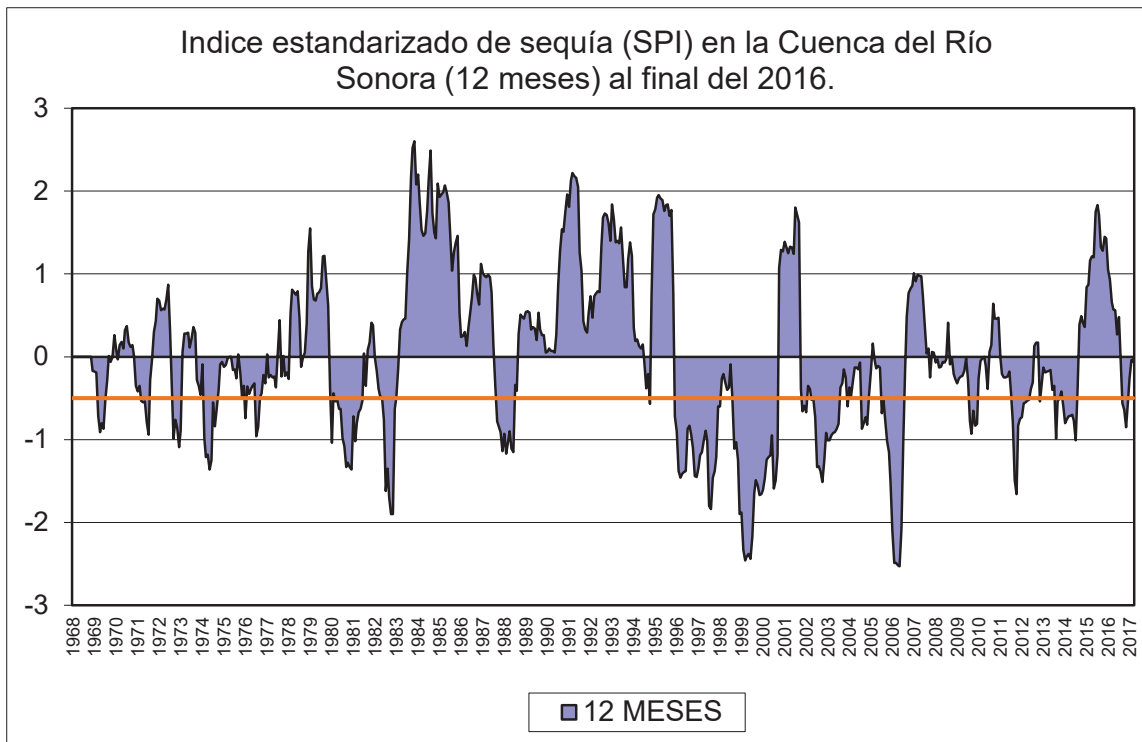


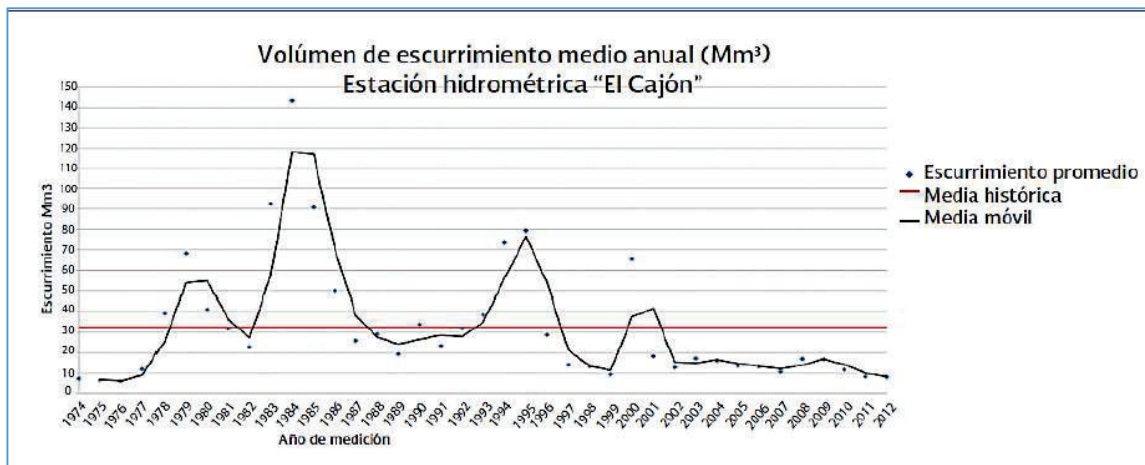
Figura 33.-Comportamiento de diferentes índices de sequía para la estación climatológica Hermosillo, de CONAGUA (tomado de Universidad de Sonora, 2014)

Este mismo comportamiento es posible observarlo para toda la cuenca en la figura siguiente (información proporcionada por el Ing. Arturo López, de CONAGUA). Donde a partir de la aplicación del Índice Estandarizado de Precipitación (McKee, 1993), es posible observar el cambio de patrón ocurrido en toda la cuenca a partir de 1996 (Gráfica 7).

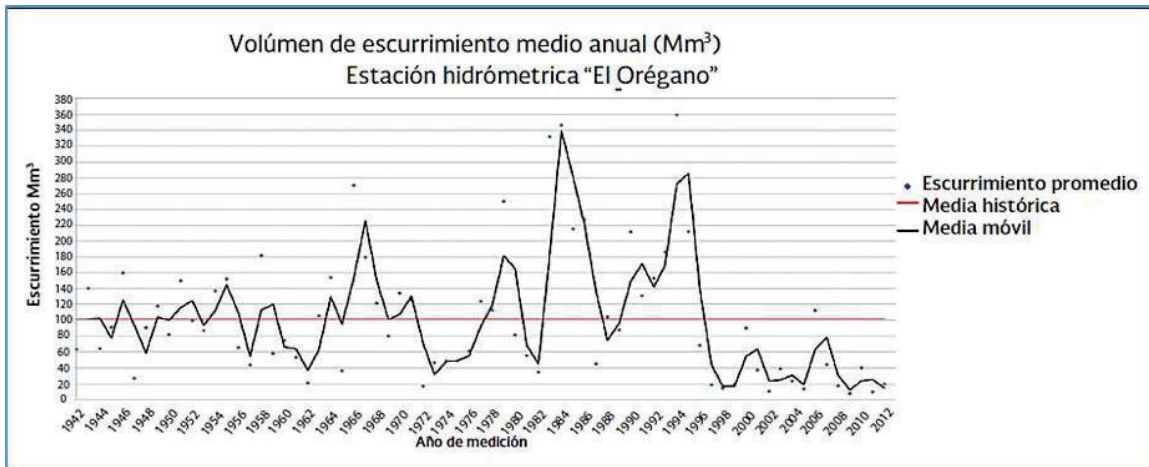


Gráfica 7.-Índice Estandarizado de Precipitación en la Cuenca del Río Sonora

Este cambio en el patrón de precipitación ha tenido como consecuencia una disminución en los caudales de los ríos Sonora y San Miguel como se puede observar en las gráficas siguientes (Gráficas 8 a 11).

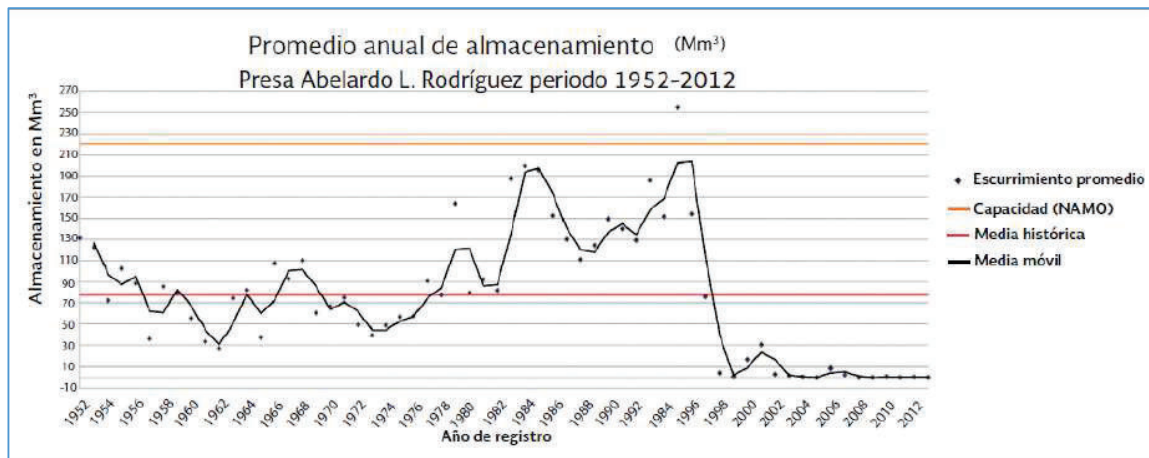


Gráfica 8.-Comportamiento de los escurrimientos del Río San Miguel en la Estación Hidrométrica El Cajón, suavizado con medias móviles (Universidad de Sonora, 2014).

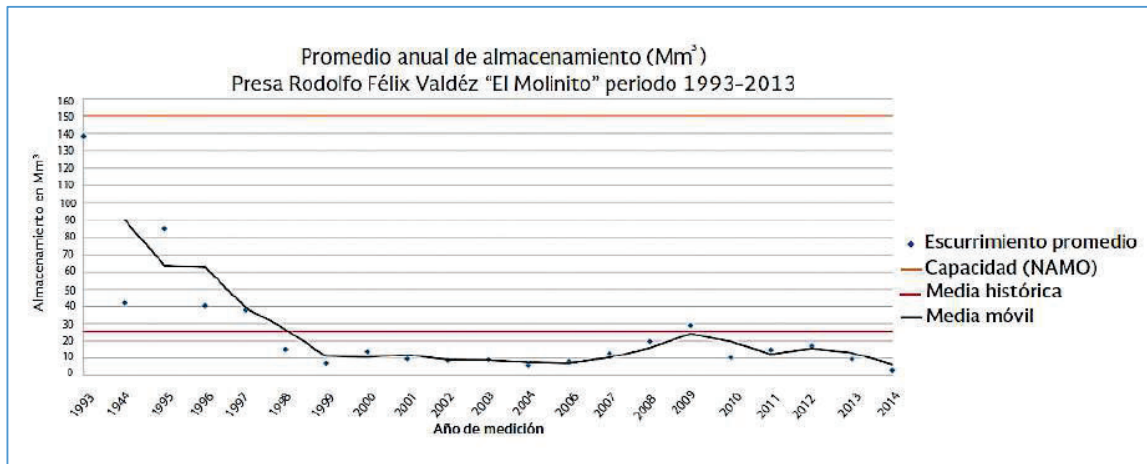


Gráfica 9.-Comportamiento de los escurrimientos del Río Sonora en la estación Hidrométrica El Orégano, suavizado con medias móviles (Universidad de Sonora, 2014).

Asimismo, otra consecuencia de este cambio de patrón es el comportamiento de los almacenamientos de las presas que dependen de los escurrimientos de los Ríos Sonora y San Miguel.



Gráfica 10.-Comportamiento de los almacenamientos de la Presa Abelardo L. Rodríguez (Universidad de Sonora, 2014)



Gráfica 11.-Comportamiento de los almacenamientos de la Presa El Molinito

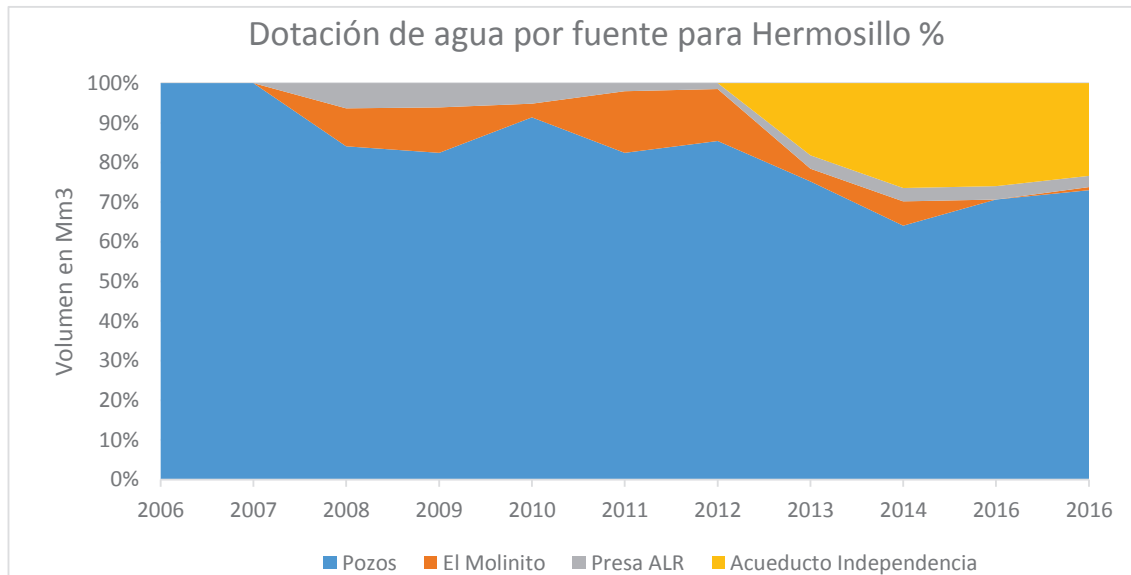
Como ya se había comentado en el capítulo 1, las aguas superficiales han sido históricamente una de las fuentes importantes de agua potable para la ciudad de Hermosillo, mismas que se han visto prácticamente reducidas a cero debido a la sequía.

No sólo esto es lo relevante, sino que tanto la precipitación como el escurrimiento son una fuente muy importante para la recarga de los acuíferos, por lo que esta situación de sequía ha redundado en una disminución de la misma.

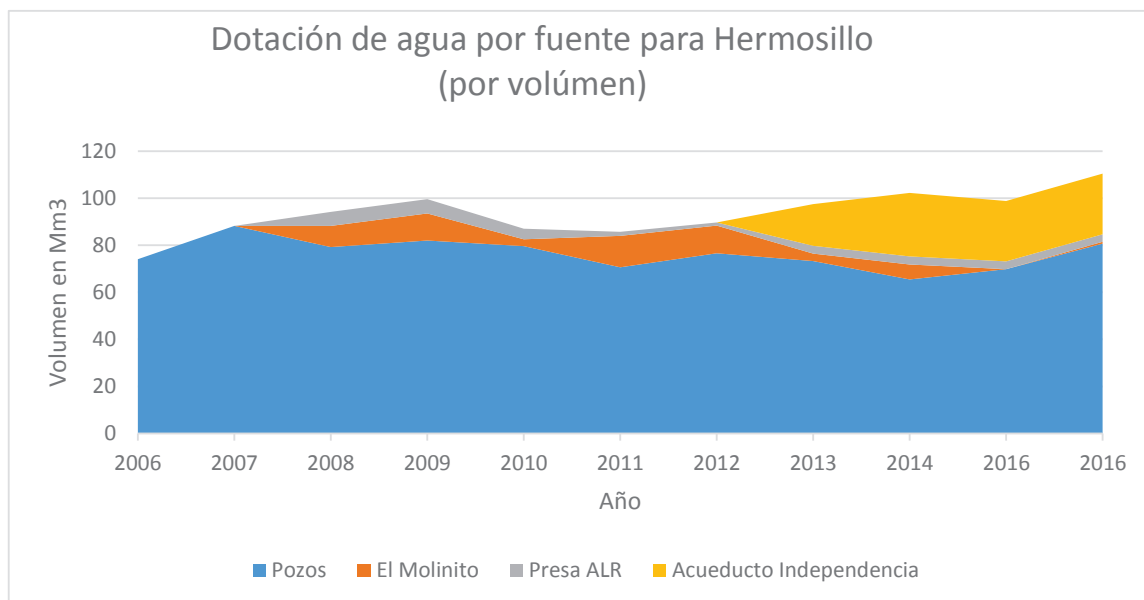


10.2 -La importancia de las aguas subterráneas para la Ciudad de Hermosillo

En lo referente a la provisión de agua de parte de las fuentes de agua subterránea, éstas han sido históricamente las más importantes y constantes, tal como lo muestran las gráficas 12 y 13:



Gráfica 12.- Dotación de agua por fuente para la Ciudad de Hermosillo porcentual



Gráfica 13.-Dotación de agua por fuente para la Ciudad de Hermosillo por volumen

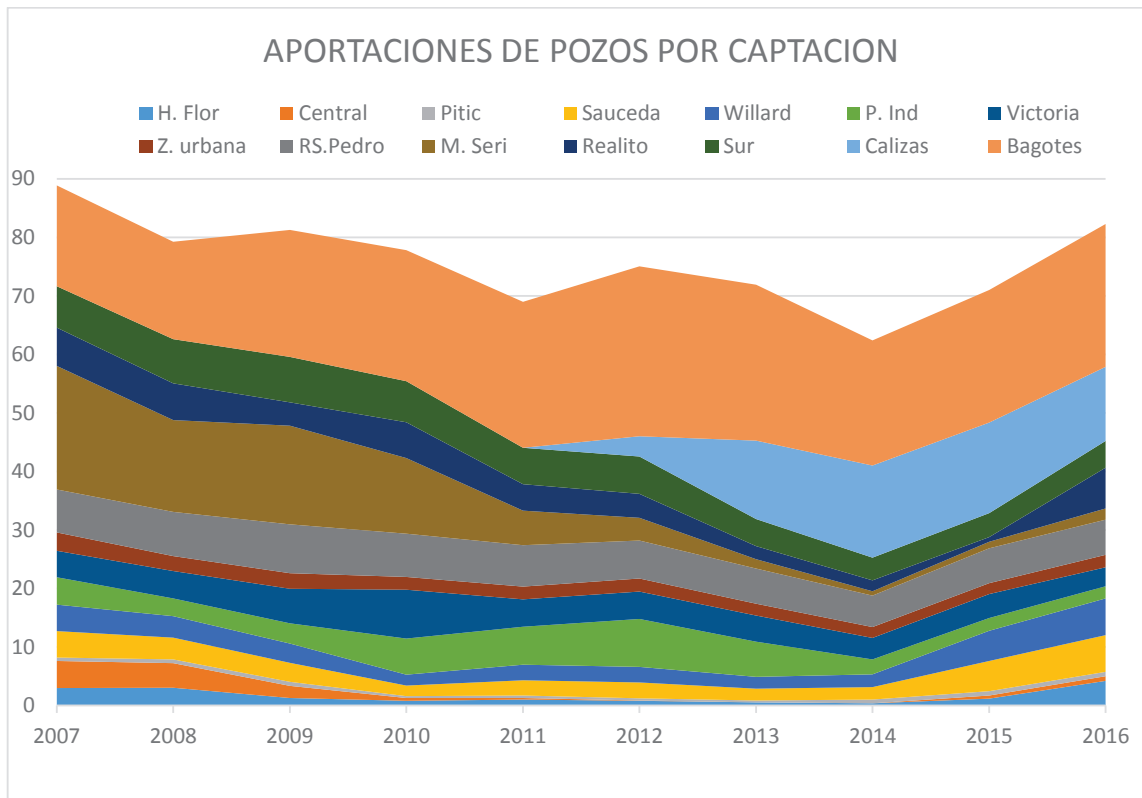
Las zonas de producción más importantes de agua subterránea se encuentran a la baja. La zona de los Bagotes, al norponiente pasa de una extracción máxima histórica de 29.03



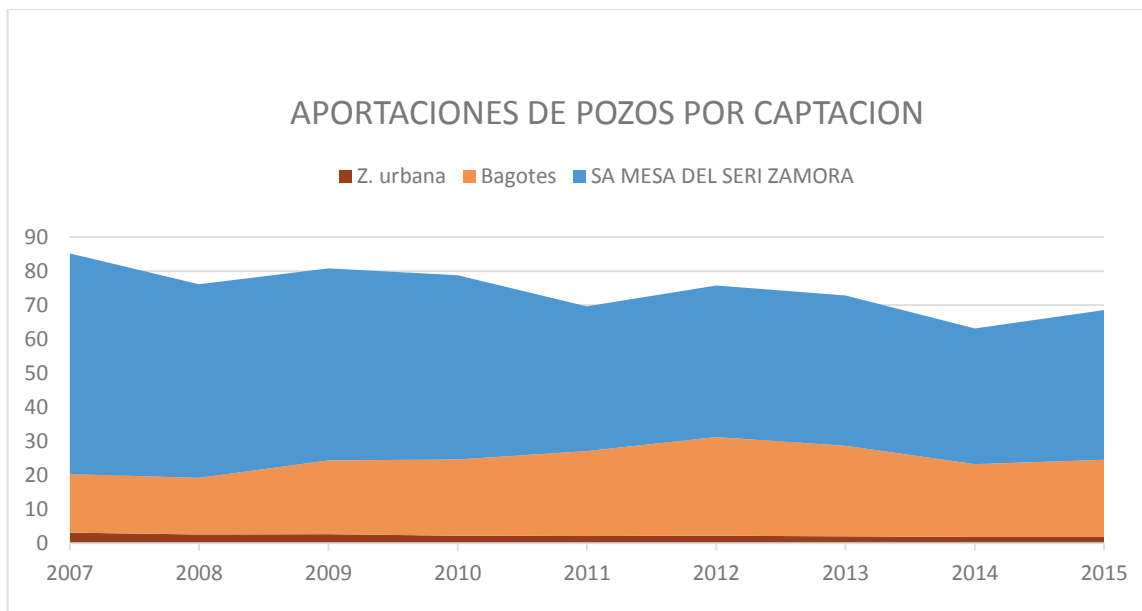
mm³ en el año 2012 y con 22 pozos a una extracción de 24.31 mm³ en el año 2016 ya con 17 pozos (Agua de Hermosillo, 2017); la zona del Parque Industrial (sur oriente) pasa de una extracción máxima de 8.21 mm³ en el año 2012 a una extracción de 2.06 mm³ en el año 2016; la zona de la Mesa del Seri (este de la ciudad) pasa de una extracción histórica de 21.14 mm³ en el año 2007 a 1.91 mm³ en el año 2016; La Victoria (también al este de la ciudad) pasan de una extracción histórica de 8.34 mm³ en el año 2010 a una extracción de 3.28 mm³ en 2016 (Agua de Hermosillo, 2017) y Zona Sur al pasar de una extracción de 7.07 mm³ en el año 2007 a una extracción de 4.61 mm³ en 2016. Algunas zonas en cambio, ha aumentado ligeramente la extracción, tal es el caso de la zona de Willard (suroriente de la ciudad), Hacienda de la Flor y Realito con extracciones importantes que suman casi los 15 mm³, otras zonas han aumentado considerablemente su extracción, tal es el caso de Calizas al pasar de 3.4 mm³ en el año 2013 a 13.8 mm³ (Tabla 7 y gráficas 14 y 15).

Tabla 7.-Evolución de la producción de agua por captación (SAMZA es Sistema Acuífero Mesa del Seri-Zamora).

| Captación | Pozos | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| H. Flor | 3 | 2.95 | 3.01 | 1.28 | 0.79 | 0.98 | 0.78 | 0.5 | 0.35 | 1.18 |
| Central | 7 | 4.64 | 4.24 | 2.09 | 0.49 | 0.29 | 0.07 | 0 | 0 | 0.54 |
| Pitic | 1 | 0.62 | 0.64 | 0.65 | 0.3 | 0.41 | 0.39 | 0.33 | 0.65 | 0.7 |
| Sauceda | 5 | 4.52 | 3.68 | 3.27 | 1.84 | 2.64 | 2.67 | 2.03 | 2.15 | 5.18 |
| Willard | 7 | 3.83 | 3.58 | 4.03 | 3.58 | 4.26 | 4.16 | 3.41 | 3.19 | 3.9 |
| P. Ind | 5 | 4.68 | 3.05 | 3.5 | 6.16 | 6.5 | 8.21 | 6 | 2.57 | 2.18 |
| Victoria | 10 | 4.5 | 4.67 | 5.86 | 8.34 | 4.69 | 4.68 | 4.46 | 3.69 | 4.1 |
| RS.Pedro | 2 | 7.32 | 7.54 | 8.31 | 7.39 | 7.1 | 6.51 | 6 | 5.4 | 5.94 |
| M. Seri | 19 | 21.14 | 15.71 | 16.88 | 12.96 | 5.88 | 3.89 | 1.63 | 0.72 | 1.12 |
| Realito | 7 | 6.52 | 6.25 | 3.97 | 6.07 | 4.54 | 4.09 | 2.23 | 1.84 | 0.8 |
| Sur | 6 | 7.07 | 7.59 | 7.81 | 7.03 | 6.18 | 6.37 | 4.63 | 3.9 | 4.1 |
| Calizas | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3.47 | 13.38 | 15.75 | 15.49 |
| SAMSZA | 77 | 64.84 | 56.95 | 56.37 | 54.16 | 42.49 | 44.51 | 44.1 | 39.86 | 44.05 |
| Z. urbana | 6 | 3.14 | 2.56 | 2.7 | 2.19 | 2.16 | 2.2 | 2.02 | 1.83 | 1.83 |
| Bagotes | 22 | 17.23 | 16.65 | 21.69 | 22.41 | 24.98 | 29.03 | 26.67 | 21.41 | 22.68 |



Gráfica 14.-Evolución de la producción de agua por captación para la Ciudad de Hermosillo.



Gráfica 15.-Evolución de la producción de agua por captación para la Ciudad de Hermosillo zonas de mayor importancia.



10.3 Evolución de la Sistema Acuífero Mesa del Seri Zamora

La explotación intensiva del acuífero, aunado a la prolongada sequía de los últimos 20 años ha hecho que el SAMSZA tienda a bajar sus niveles piezométricos y por lo tanto a reducir sus volúmenes de reservas de aguas subterráneas.

Se hizo una comparación de las piezometrías de los años 1998 y 2016 con la finalidad de obtener la estadística de abatimiento del área de estudio a partir de la cual se obtuvo que durante los últimos 18 años, en la zona noroeste se tienen los abatimientos más grandes que van de 41.86 m hasta 105.54m y los más bajos en la zona centro y este del área que van de 27.71m a 0.58 m, la estadística indica que para esta área en base a los datos obtenidos se tiene una máxima de abatimiento de hasta 105.5 m y una mínima de 0.58 m y como media hasta los 29 m. (Figura 34).

Considerando un Si de 0.08, tal y como se ha usado en los capítulos anteriores, este abatimiento significa un minado de la reserva del SAMZA de 1,615.7 hectómetros cúbicos.

Esta situación puede ilustrarse con el comportamiento de los niveles estáticos de los pozos de la zona durante el período 2008 al 2016, que se ilustra en la figura 35, donde se puede notar el comportamiento de cada pozo durante dicho período para cada uno de los acuíferos.

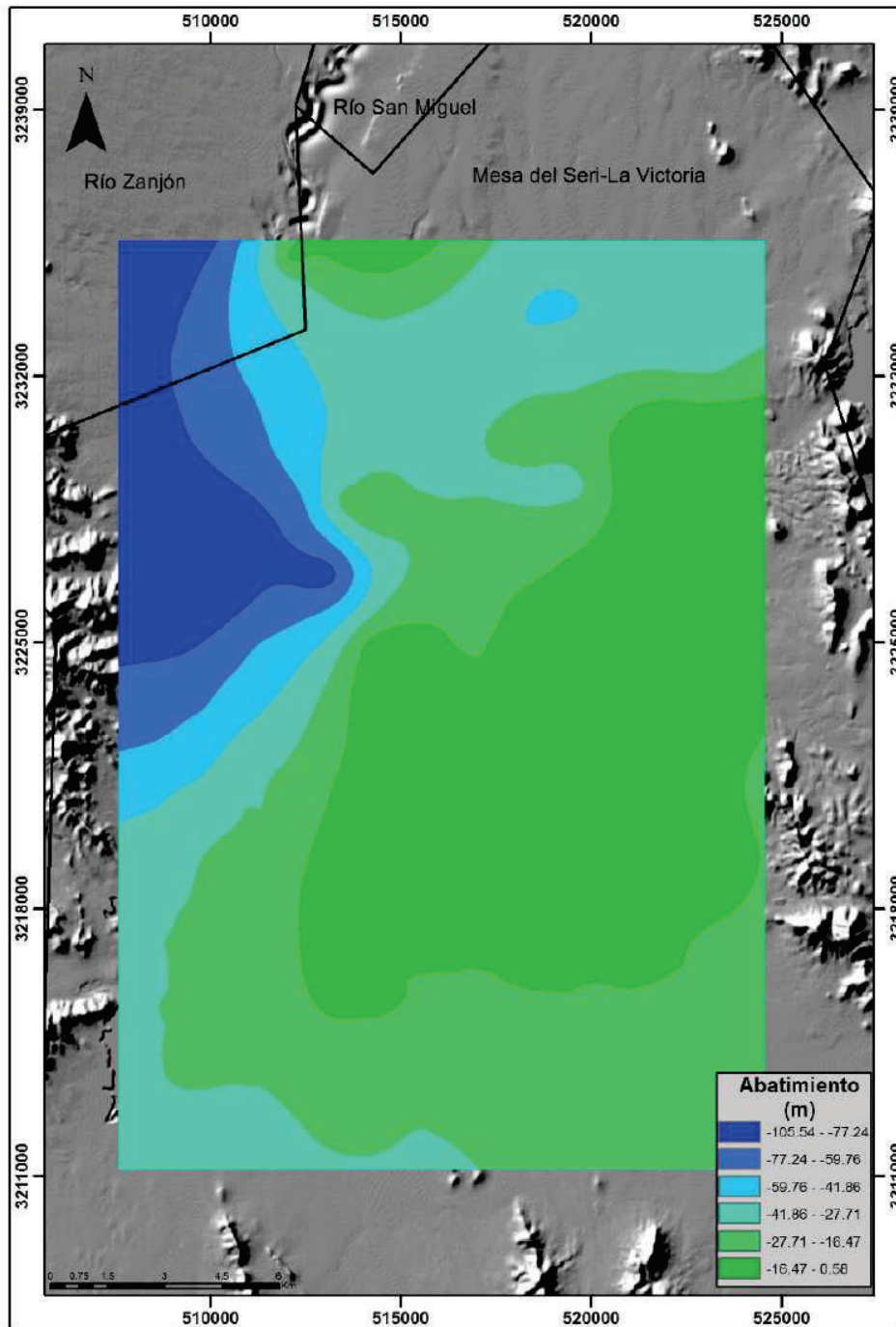


Figura 34.-Evolución del nivel estático de los años 1998-2016

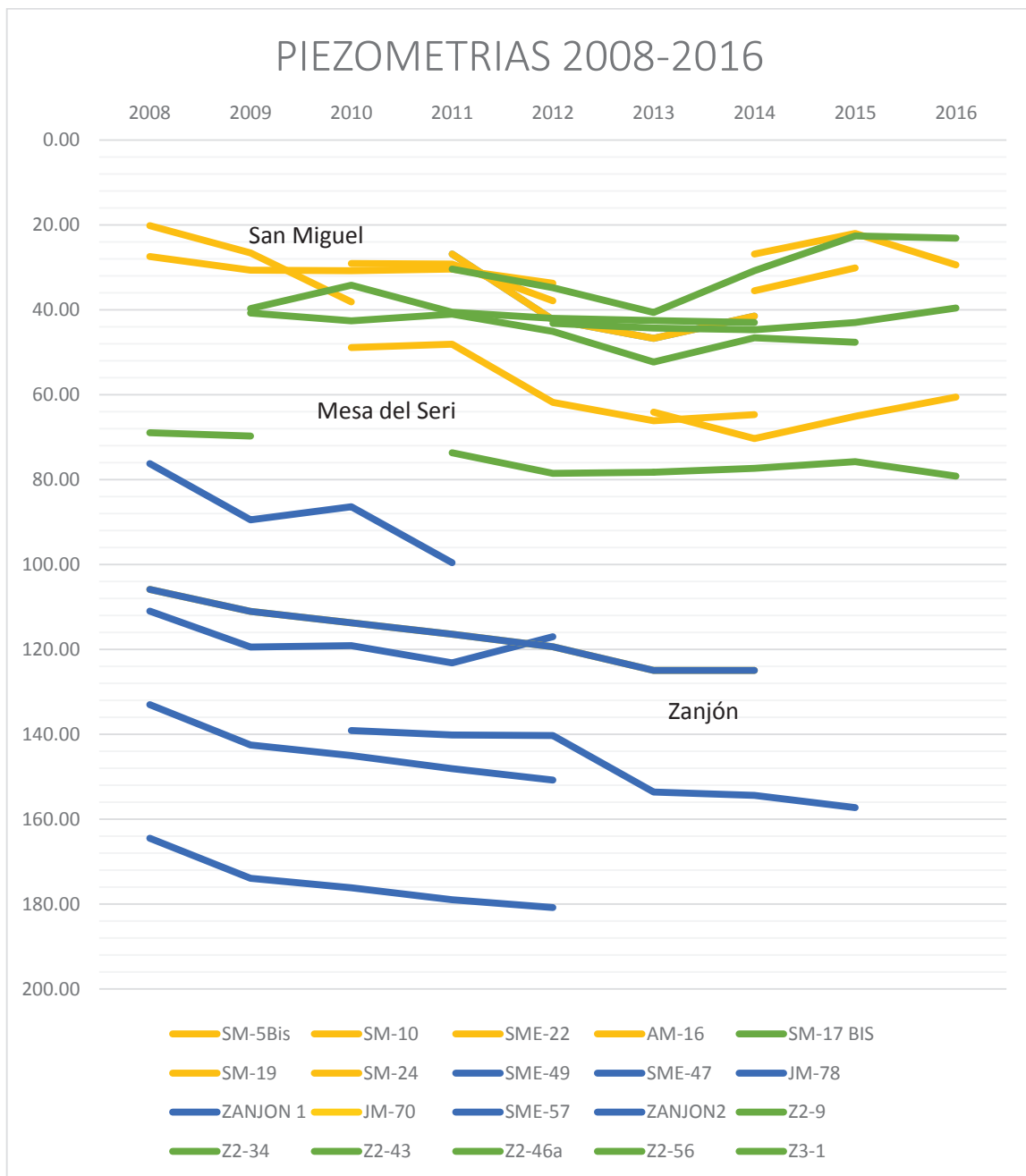


Figura 35.-Comportamiento de los niveles estáticos históricos desde 2008 a 2016



10.4 Una revisión de los conceptos legales para el manejo de aguas subterráneas

El estudio de los recursos naturales de aguas subterráneas se ha realizado mediante la evaluación de los acuíferos y su respuesta ante la explotación de ellos. Sin embargo el concepto *acuífero* se usa de acuerdo a varias acepciones, cuando menos en el medio hidrogeológico mexicano.

En México, las normas relativas a agua, han usado diversas acepciones de los conceptos referidos a las unidades geológicas aprovechables para extracción de agua subterránea, la Tabla 8 presenta éstas.

Tabla 8.-Acepciones de las unidades geológicas aprovechables para explotación de aguas subterráneas en la legislación mexicana

| ACEPCIONES DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS APROVECHABLES PARA EXPOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA LEGISLACIÓN MEXICANA | | |
|--|---|---|
| Norma o Ley | Acuífero | Unidad Hidrogeológica |
| Ley de Aguas Nacionales (1992) | Art. “, II.- cualquier formación geológica por la que circulan o se almacenan aguas subterráneas que puedan ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento; | |
| Norma Oficial Mexicana NOM-CNA-011-2000 | Art. 3, 1.- cualquier formación geológica por la que circulan o se almacenan aguas subterráneas que puedan ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento; | 3, 33.- Conjunto de estratos geológicos hidráulicamente conectados entre sí cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales subterráneas |
| Ley de Aguas Nacionales (2016) | Art. 3, II.- Cualquier formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo; | Art. 3, XXIV.- "Disponibilidad media anual de aguas del subsuelo": En una unidad hidrogeológica - entendida ésta como el conjunto de estratos geológicos hidráulicamente conectados entre sí, cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales subterráneas-, es el volumen medio anual de agua subterránea que puede ser extraído de esa unidad hidrogeológica para diversos usos, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro el equilibrio de los ecosistemas; |
| Acuerdo de denominación única a los acuíferos reconocidos en la República Mexicana. DOF 5 de dic. 2001. | | |



De acuerdo al Glosario Hidrológico Internacional, editado por la Organización Meteorológica Mundial, Organismo de la UNESCO (2012), el término *acuífero* se refiere a:

Formación geológica permeable, capaz de almacenar, transmitir y proporcionar cantidades aprovechables de agua; mientras que por *Sistema acuífero*, se entiende como: acuíferos formados por materiales porosos de diversas permeabilidades que pueden constituir una fuente de recursos hídricos de ámbito regional.

La CONAGUA, a través del Diario Oficial de la Federación publicó el 5 de diciembre del 2001 el Acuerdo por el que se le otorga una denominación única a los acuíferos reconocidos en la República Mexicana. Lo que dio automáticamente a estos *acuíferos*, así nombrados, su propiedad de ser usados como unidad de manejo de aguas subterráneas, aspecto reservado por la NOM 011 a las *Unidades Hidrogeológicas*.

Como se observa en el análisis de la información anterior, existe un manejo confuso de los conceptos de acuífero y unidad hidrogeológica, que no coincide con el manejo a nivel internacional.

Un aspecto es rescatable en estas definiciones, es que el concepto central para la definición de las unidades de manejo de las aguas subterráneas está relacionado a su uso, es decir, a la posibilidad de su explotación.

En este sentido y considerando que el SAMSZA es explotado principalmente para proveer de agua potable a la ciudad de Hermosillo, se propone como alternativa para el manejo de esta reserva la redefinición de los límites de los acuíferos Mesa del Ser Victoria, Zanjón y San Miguel a fin de que el Acuífero Mesa de Seri Victoria tenga los límites que aquí se describen para el SAMSZA.

Una propuesta adicional, sería que la Comisión Nacional del Agua considere el renombrar los conceptos de *Unidad Hidrogeológica* y *Acuífero* como *Sistema Acuífero*, de manera de equiparar estos conceptos con los usados a nivel internacional.



10.5- Escenarios de la Demanda de Agua Potable

Salazar y Pineda (2012) presentan diversos escenarios de comportamiento de la demanda de agua potable para Hermosillo. Estos escenarios se basan en los criterios de: crecimiento poblacional, precio, crecimiento económico, eficiencia de cobro y eficiencia de contabilización de agua. Estos escenarios son:

Escenario 1: Sin cambios

No se producen mejoras en la administración del agua, así que se mantienen los niveles de agua no contabilizada del 36% y una eficiencia en cobranza del 72%.

Escenario 2: Incremento en la cobranza

En este escenario, se incrementa la eficiencia en cobranza de manera gradual hasta alcanzar una eficiencia del 95% en cinco años. El período considerado es factible ya que varios organismos en el país han logrado incrementar su cobranza en poco tiempo, algunos a través de la subcontratación del servicio de cobranza.

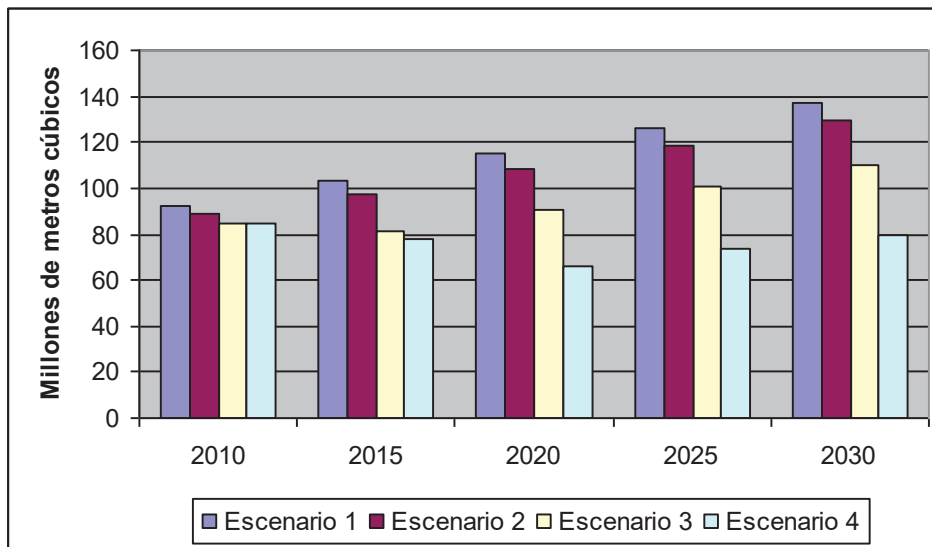
Escenario 3: Escenario 2 + Incremento en tarifas

Una vez que se ha mejorado la cobranza, el aumento de tarifas permitiría reducir aún más el consumo y generar mayores recursos para el organismo de agua. En el escenario propuesto, se aplican incrementos del 100% en la tarifa, que es aproximadamente lo necesario para el mantenimiento sostenible del servicio, como se ha mencionado antes.

Escenario 4: Escenario 3 + Reducción del agua no contabilizada.

Esta logrará reducir los requerimientos globales de agua de la ciudad. Se considera que este escenario solamente es sostenible con el aumento de las tarifas. En el escenario se presenta un aumento gradual de la eficiencia hasta alcanzar un nivel de 85%.

De este análisis resulta la siguiente gráfica, que muestra el crecimiento supuesto de la demanda de agua por quinquenio para cada escenario.



Gráfica 16.-crecimiento supuesto de la demanda de agua por quinquenio para cada escenario

Para el 2030 los resultados que plantean estos autores son:

Tabla 9.-Escenarios de crecimiento de la demanda de agua potable de la Ciudad de Hermosillo al 2030 (Salazar y Pineda, 2012)

| Año | Población (habitantes) | Escenario 1 | Escenario 2 | Escenario 3 | Escenario 4 |
|------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 2030 | 966,821 | 136 hm ³ | 129 hm ³ | 110 hm ³ | 80 hm ³ |

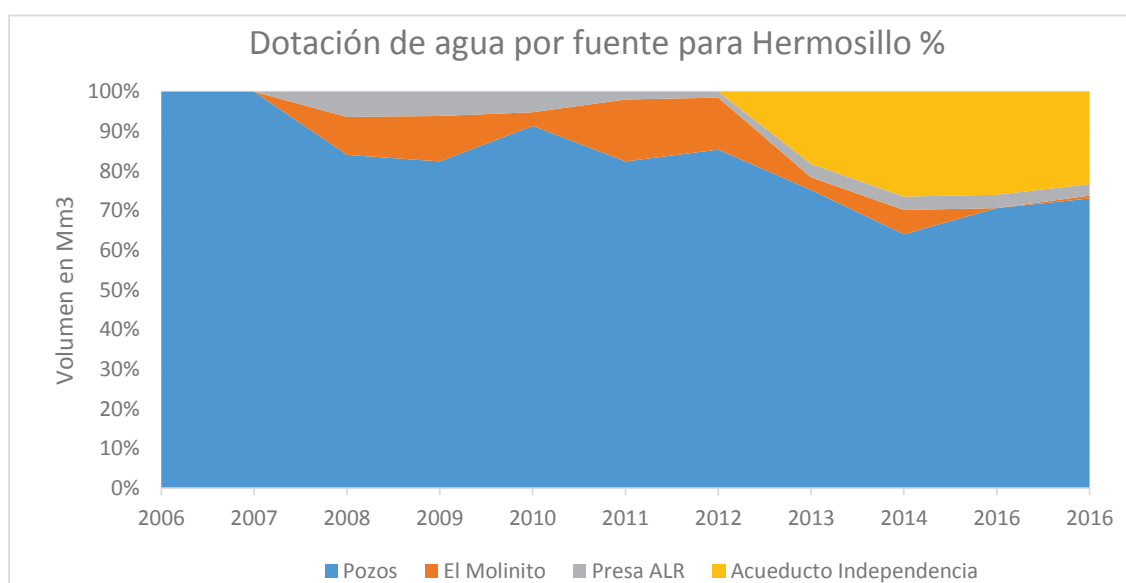
González y otros (2012) plantean como escenario de crecimiento de la demanda un 1.7% anual a partir del 2012, esto daría como resultado para el 2030 una demanda de 135 hm³, similar al escenario 1 de Salazar y Pineda.



10.6. Discusión de propuestas para el manejo de agua de la Ciudad de Hermosillo

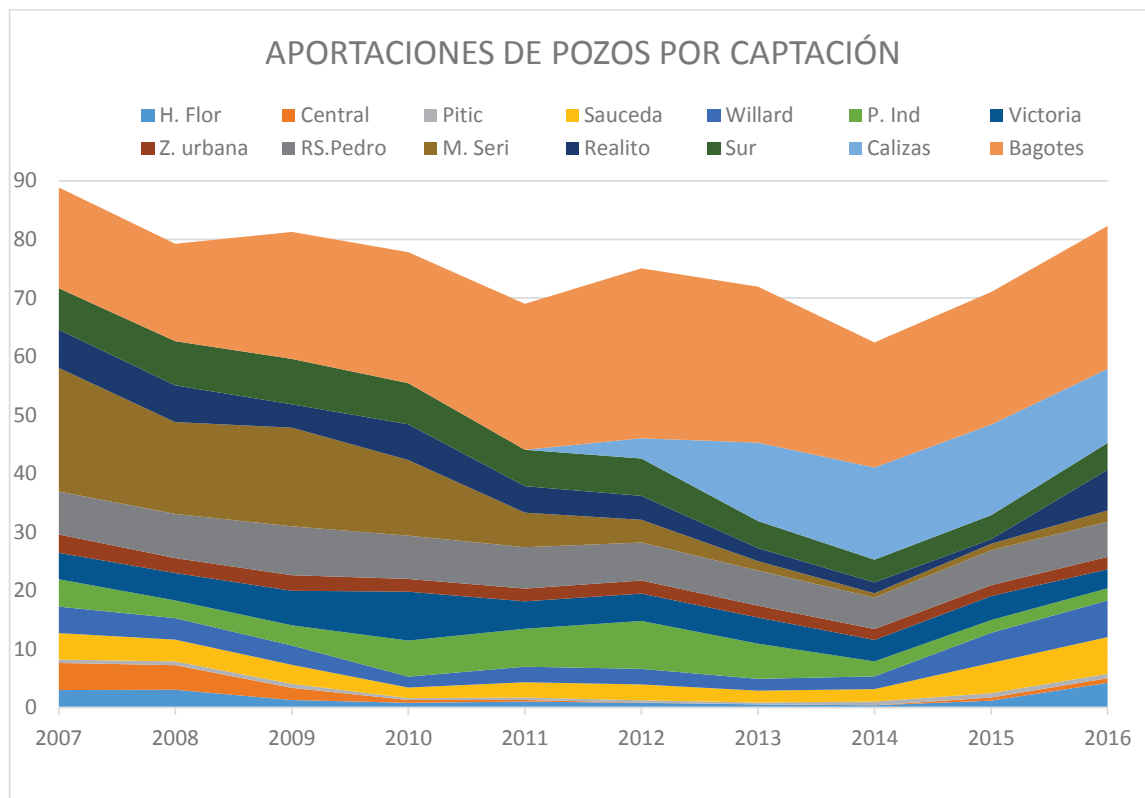
Problemática del Manejo por parte del organismo operador.

Dado que la Ciudad de Hermosillo cuenta con diversas fuentes que le proporcionan agua para su consumo, es necesario analizar las tendencias de su comportamiento, a fin de discutir alternativas para el futuro. Estas tendencias se pueden observar verlas en la gráfica 11, ya presentada:



1.- Las fuentes superficiales de agua (El Molinito y la Presa Abelardo L. Rodríguez) se han reducido casi totalmente, debido a la prolongada sequía de 20 años y no se avizora una recuperación en los próximos años, debido a que los estudios de Cambio Climático apuntan que las precipitaciones en la Cuenca del Río Sonora disminuirán aún más en los próximos años (Universidad de Sonora, 2014).

2.- Las fuentes de aguas subterráneas han sido exploradas intensamente y tienden a disminuir sus aportaciones, tal y como lo mostramos en la gráfica 14, ya mostrada anteriormente:



Sólo las captaciones de Los Bagotes y Calizas han mantenido relativamente sus volúmenes de extracción, sin embargo los pozos ubicados en estas extracciones tienden al abatimiento y a reducir sus caudales, provocando la necesidad de perforar nuevos pozos, como el caso de Los Bagotes.

3.- El Acueducto Independencia ha aportado hasta 27 hectómetros cúbicos de agua para la ciudad desde el inicio de su operación el 2012, sin embargo su capacidad es de 75 hectómetros cúbicos por año. Se ha visto limitado por disposiciones legales motivadas por el conflicto entre diversos sectores del sur del Estado contra esta obra.

4.- Recientemente ha entrado en operación la Planta Tratadora de Aguas Residuales de la Ciudad (PTAR), de acuerdo a información proporcionada por Agua de Hermosillo, esta planta tendría la capacidad de comercializar hasta 40 hectómetros cúbicos de agua por año, sin embargo no se cuenta todavía con un esquema ni infraestructura adecuada para ello.



5.- De acuerdo a Pineda y otros (2012), la ciudad pierde en la operación de la infraestructura de producción y distribución de agua hasta el 34% de la misma. La proporción es importante, sin embargo, considerando los límites posibles de mejoramiento de la eficiencia, y convirtiéndola en aportación de agua, este mejoramiento no solucionaría el problema de provisión de agua para la ciudad.

Con base a estas consideraciones, se presentan los siguientes aspectos como discusión y propuestas con un horizonte del 2030:

- a) Parece necesario que el Acueducto Independencia opere con toda su capacidad de hasta 75 hectómetros cúbicos, para la demanda proyectada de 135 hectómetros cúbicos, significaría todavía un faltante de 60 hectómetros cúbicos.
- b) Este faltante tendría que ser cubierto por:
 - a. Mayor eficiencia. Un incremento del 10%, hasta niveles cercanos a otras ciudades, en la eficiencia significaría 13 millones más, aún lejos de los 60 necesarios.
 - b. Aguas superficiales (El Molinito y la Presa ALR).- Entre el 2006 y el 2016 estas fuentes han aportado en promedio 9.1 hectómetros.
 - c. Reúso de aguas residuales.- No existe una estimación fiable de esta posibilidad, sin embargo, se ha planteado comercializarla para allegar recursos al organismo operador (Ing. Rafael García, AGUAH). En este caso no aportaría para el agua potable.
 - d. Aguas subterráneas.- Las fuentes actuales de aguas subterráneas de acuerdo a lo expuesto debería aportar, en el mejor de los casos, alrededor de 40 millones de metros cúbicos, aunque si no se supera el conflicto legal con el acueducto, esta cantidad puede alcanzar hasta 75 hectómetros cúbicos por año, una cantidad hasta 25 % mayor que la actual.

De estos comentarios se desprende la necesidad de estudiar alternativas que protejan las fuentes de aguas subterráneas para la Ciudad de Hermosillo.



11.-Resultados y conclusiones

Con base a las características físicas, hidrológicas y sobre todo a la ubicación de los pozos de extracción de agua utilizados para abastecer a la ciudad de Hermosillo, se determinó la frontera o geometría del área de estudio la cual llamamos sistema acuífero Mesa del Seri-Zamora. Según datos oficiales la producción de agua por fuentes subterráneas es del 73% para el 2016 mientras que las superficiales solo son el 23%, siendo éstas la presa Abelardo L. Rodríguez, la Presa El Molinito y el Acueducto independencia, es por esta razón que es de vital importancia el estudio de esta área como un solo sistema acuífero.

A partir de la interpretación de la geología y geofísica se obtiene que el sistema acuífero se ubica dentro de un graben con relleno de sedimentos clásicos terciarios y cuaternarios, mientras que las partes altas están representadas por rocas sedimentarias de edad paleozoico y volcánicas terciarias. A partir de este modelo y considerando parámetros hidrológicos y geofísicos se pudieron definir cuatro unidades hidrogeológicas donde la unidad 2, que consiste de arena de grano medio a grueso, es la principal unidad hidrogeológica portadora de agua subterránea para el sistema acuífero.

Para este estudio se analizaron las piezometrías más recientes y la más vieja a las que se tuvo acceso, en este caso las del año 2016 y 1998, mediante la configuración de éstas se puede apreciar como la zona con mayores abatimientos son sobre el cauce del Río San Miguel. Se hizo una comparativa de los niveles piezométricos para los años 1998 y 2016 con el fin de obtener una media de abatimiento para ese período y un volumen total de disminución de la reserva para esta área la cual fue de 1615.7 hm³ aproximadamente.

Se determinó el balance de Aguas subterráneas, donde se obtuvo que para el sistema acuífero se tiene una recarga total de alrededor de 76.74 hm³ tomando en cuenta que se tiene una entrada vertical de 21.60 hm³ y una recarga vertical de 40.58 hm³ y por último una extracción total por bombeo de 142.24 hm³.

Considerando escenarios de crecimiento de la demanda de agua potable de la Ciudad de Hermosillo al 2030, se obtiene que en el peor de los escenarios la demanda llegaría hasta los 136 hm³ anuales. Por ello, es de vital importancia un reajuste en las políticas de extracción para esta zona. En este sentido, considerando los aspectos conceptuales y legales, se propone un cambio en los límites administrativos de los acuíferos oficiales: Mesa de Seri-Victoria,



Río Zanjón y Río San Miguel, con el fin de tener un mayor control del agua subterránea que abastece a la ciudad.

12.-Recomendaciones

- Se recomienda realizar un modelo matemático de simulación de flujos del área de estudio con la encomienda de reforzar la propuesta de cambio en los límites administrativos que delimitan dicha zona.
- Actualización de estudios hidrogeoquímicos del área.
- Llevar un control de los parámetros de cada uno de los pozos de extracción por parte de las autoridades encargadas del manejo y distribución del agua potable con la finalidad de que estos datos sirvan para futuros estudios.
- Se debe establecer una red de monitoreo en las zonas afectadas y disminuir su bombeo de extracción e impedir que crezca más de la zona de abatimiento.
- Actualizar la base de datos de pozos con sus características y situación actual.

Considerando los aspectos legales discutidos se propone:

- a) La definición de la zona de explotación prioritaria de aguas subterráneas para la ciudad de Hermosillo, que aquí se ha nombrado como Sistema Acuífero Mesa del Seri Zamora (SAMSZA).
- b) La redefinición de los límites de los acuíferos administrativos: 2621 Mesa del Seri Victoria, 2626 Río Zanjón y 2625 Río San Miguel, de tal manera que el Acuífero Mesa del Seri Victoria tenga sus límites coincidiendo con SAMSZA (Figura 36).
- c) Definición de políticas de manejo del acuífero así redefinido, de manera que priorice el uso público urbano y lo proteja de su abatimiento.
- d) Explorar alternativas de proyectos de recarga artificial del acuífero para aumentar su reserva.

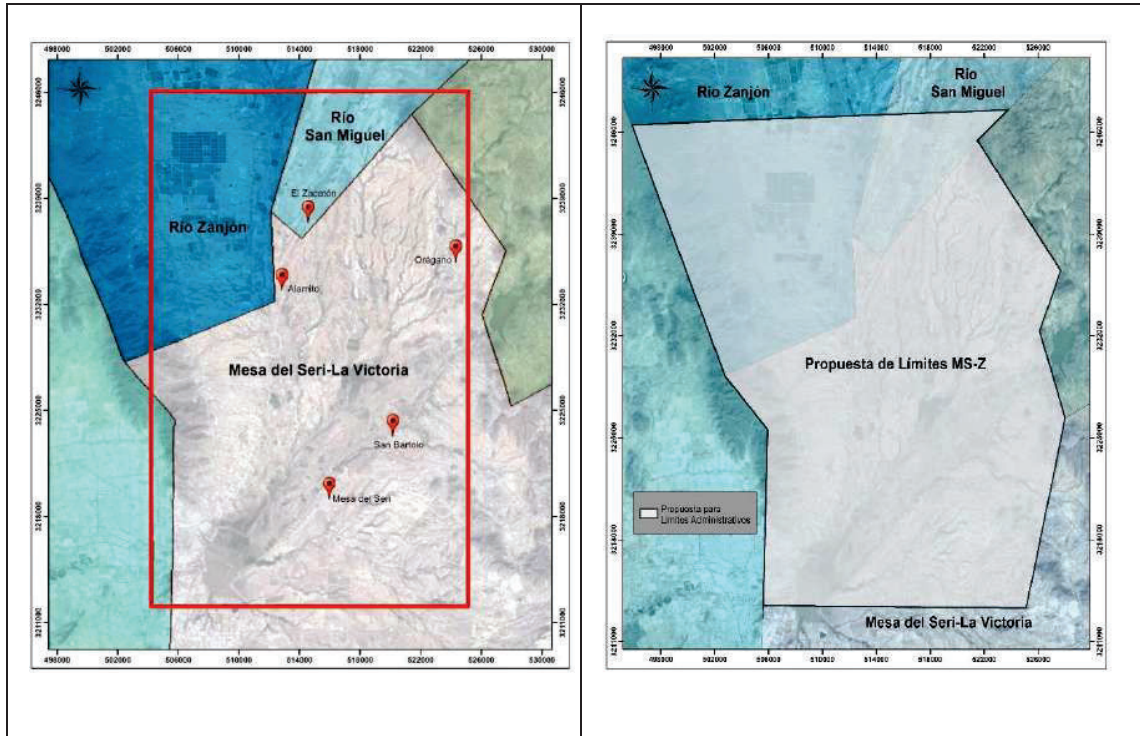


Figura 36.-Propuesta de Redefinición de Limite de Acuíferos



13.-Bibliografía

- Ariel Construcciones, S.A. (1970). Censo de aprovechamientos hidráulicos (superficiales y subterráneos) en los valles del río Sonora, desde Mazocahui hasta Arizpe, Sonora. (Para la dirección de Aguas Subterráneas, SRH).
- Ariel Construcciones, S.A. (1996). Estudio del manejo de la demanda para la estabilización y recuperación de los acuíferos de Hermosillo, Son. Y Querétaro, Qro.- Costa de Hermosillo, Son. Comis. Nal. Agua, Subdir. Gral. Téc., Ger. Aguas Subterráneas, Contrato GAS-010-PRO-96, 134pp más anexos.
- CEA.2006.Informe final del Proyecto: Caracterización Geológica y Geofísica Del Acuífero de la Mesa del Seri y la Victoria, Sonora.
- CONAGUA, 2016. Organismo de Cuenca Noroeste, Dirección Técnica. Base de datos Piezométricos 2016.
- CNA, 1999.-Modelo de Simulación Hidrodinámica del Acuífero Mesa del Sri La Victoria, Sonora.
- C. Serna,(1988). An outline of the geology of Mexico, in Bally, A.W. and Palmer, A.R., eds., The geology of North America, an over view: Boulder Colorado, Geol. Soc. Of Am., The geology of North America, V.A.,p233-264.
- FETTER, C.W. (1994) Applied Hydrogeology, Third ed. University of Wisconsin, Prentice Hall, USA., 592p.
- Geofísica de Exploraciones GUYSA, S.A. de C.V. 2000. Estudio de actualización geohidrológica del valle del Río Zanjón, municipios de Carbó, San Miguel de Horcasitas y Hermosillo, Sonora. México, D.F.
- Glosario Hidrológico Internacional, 2012.World Meteorological Organitation.461p.
- González, V. F., Cruickshank, V. C. y Palma, N. A. (2012) “Sistema de apoyo a las decisiones para el manejo integral de cuencas en zonas áridas: El caso de la cuenca del río Sonora”. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
- Gutiérrez, G.A, Oroz L.A., Minjárez I., 2013, Mapa Hidrogeológico del Estado de Sonora Escala 1:750,000.CONAGUA, Organismo de Cuenca Noroeste Dirección técnica, Universidad De Sonora.
- KING, R.E. (1939), Geological reconnaissance in northern Sierra Madre Occidental of México; Geological society of America Bulletin, 50, 1625-1722



- Minjárez, J.I., Ochoa, J.A., Rangel M., M., Grijalva N., F., Romero P., F., Rodríguez M., F., , 2005, Estudio geohidrológico de las Subcuencas de los Ríos Sonora, Zanjón, San Miguel, Mesa del Seri-La Victoria y Cuenca Bacoachito: Hermosillo, Comisión Estatal del Agua, Informe final, 11-9 p. (inédito).
- Miranda, Francisco Ariel (2009). Modelación del comportamiento hidrodinámico del agua subterránea de la zona comprendida entre Carbó, Pesqueira y Zamora, Sonora. Tesis de Maestría en Ciencias (Geología) Universidad de Sonora.
- Ojeda, Arturo, Adolfo Benítez y Jesús Quintana, 2013, Gestión del agua doméstica urbana en Hermosillo (Sonora, México), Cuadernos de Geografía, Revista Colombiana de Geografía, Vol. 23, No. 1, pp. 147-164.
- Romero Padilla, Francisco (2007).- Caracterización gravimétrica del subsuelo en el área de San Pedro-Mesa del Seri, municipio de Hermosillo, Sonora, México. Tesis de Maestría en Ciencias (Geología) Universidad de Sonora.
- Salazar Adams, Alejandro y Pineda Pablos, Nicolás. 2010. Escenarios de demanda y políticas para la administración del agua potable en México: el caso de Hermosillo, Sonora. Región y sociedad. Revista de El Colegio de Sonora XXII(47): 105-122.
- Universidad de Sonora (2014) Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía del Consejo de Cuencas Alto Noroeste. Informe a CONAGUA.
- CONAGUA, 2015, Actualización de la disposición media anal del Acuífero Mesa del Seri-La Victoria, Sonora, Comisión Nacional del Agua, en: http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/104314/DR_2621.pdf, consultado el 22 de abril de 2017.
- CONAGUA, 2015b, Actualización de la disposición media anal del Acuífero Río Zanjón, Sonora, Comisión Nacional del Agua, en: http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/104319/DR_2626.pdf, consultado el 22 de abril de 2017.
- IMTA-PIGOO, Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores, Instituto Mexicano de Tecnología de Agua, en: http://www.pigoo.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=614, consultado el 01 de diciembre de 2016.
- CONAGUA, 2015a, Actualización de la disposición media anal del Acuífero Costa de Hermosillo, Sonora, Comisión Nacional del Agua, en: http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/104312/DR_2619.pdf, consultado el 22 de abril de 2017.



ANEXOS



14.-Anexos

Anexo 1.- Piezometría 2016 dentro del área de estudio

Tabla 10.-Piezometría 2016 dentro del área de estudio (CONAGUA, 2016)

| Pozo | X | Y | Z | NE 2016 | ELE NE 16 |
|---------------------------------|-----------|------------|--------|---------|-----------|
| SMN-108 | 514228.00 | 3246699.00 | 345.00 | 56.90 | 288.10 |
| SME-42 | 509831.00 | 3242042.00 | 319.50 | 159.70 | 159.80 |
| | 509803.00 | 3244022.00 | 327.00 | 125.97 | 201.03 |
| SMN-50 | 506742.00 | 3244263.00 | 374.00 | 122.10 | 251.90 |
| JM-74 | 506977.00 | 3240367.00 | 355.00 | 194.30 | 160.70 |
| SMN-090 | 511576.00 | 3240784.00 | 292.00 | 111.12 | 180.88 |
| VLC4 | 506939.00 | 3239169.00 | 349.85 | 158.40 | 191.45 |
| JM-72 | 507234.00 | 3238258.00 | 339.00 | 160.00 | 179.00 |
| JM-73 | 508122.00 | 3238839.00 | 329.00 | 157.04 | 171.96 |
| JM-71 | 508795.00 | 3238258.00 | 315.00 | 162.55 | 152.45 |
| JM-70 | 509965.00 | 3237025.00 | 291.00 | 129.57 | 161.43 |
| SME-57 | 507006.00 | 3241943.00 | 364.00 | 158.85 | 205.15 |
| SM-1 Bis | 513023.00 | 3236952.00 | 282.00 | 10.60 | 271.40 |
| SM-10 | 512867.00 | 3238995.00 | 287.50 | 29.40 | 258.10 |
| Pozo a 850 al NE de San Agustín | 513711.00 | 3241674.00 | 296.00 | 27.50 | 268.50 |
| SM-17 Bis | 515024.00 | 3240718.00 | 297.00 | 39.12 | 257.88 |
| SM-19 | 517144.00 | 3242271.00 | 319.10 | 60.53 | 258.57 |
| SM-20 | 516507.00 | 3242937.00 | 305.00 | 32.14 | 272.86 |
| SM-21 | 516674.00 | 3243096.00 | 311.20 | 45.50 | 265.70 |
| SM-26 | 514830.00 | 3244759.00 | 309.30 | 27.90 | 281.40 |
| SM-28 Bis | 515965.00 | 3244554.00 | 311.00 | 10.84 | 300.16 |
| Z1-18 | 514181.00 | 3225081.00 | 238.00 | 22.40 | 215.60 |
| Z1-28 | 511901.00 | 3228673.00 | 250.00 | 75.30 | 174.70 |
| Z1 | 513266.00 | 3226877.00 | 246.00 | 101.35 | 144.65 |
| Z2-10 | 513390.00 | 3228608.00 | 255.26 | 34.88 | 220.38 |
| | 517502.00 | 3224427.00 | 242.00 | 15.00 | 227.00 |
| Z2-34 | 516689.00 | 3225574.00 | 243.00 | 23.10 | 219.90 |
| Z2-36 | 512728.00 | 3235598.00 | 277.00 | 20.58 | 256.42 |
| Z2-38 | 516980.00 | 3225586.00 | 242.00 | 19.88 | 222.12 |
| Z2-46 | 517654.00 | 3227826.00 | 248.00 | 35.00 | 213.00 |
| Z2-40 | 519510.00 | 3229148.00 | 257.00 | 38.90 | 218.10 |
| Z2-46a | 517820.00 | 3229008.00 | 254.00 | 39.55 | 214.45 |
| Z2-49 | 512229.00 | 3235052.00 | 272.00 | 8.10 | 263.90 |



| | | | | | |
|-------|-----------|------------|--------|-------|--------|
| Z2-50 | 512310.00 | 3234931.00 | 271.00 | 26.26 | 244.74 |
| Z2-52 | 513665.00 | 3228451.00 | 249.00 | 33.10 | 215.90 |
| Z2-56 | 512221.00 | 3228661.00 | 252.00 | 79.15 | 172.85 |
| Z2-63 | 513967.00 | 3227642.00 | 247.00 | 38.60 | 208.40 |
| Z2-66 | 516602.00 | 3227451.00 | 248.00 | 33.40 | 214.60 |
| Z2 | 516990.00 | 3227466.00 | 248.00 | 35.90 | 212.10 |
| Z3-1 | 523139.00 | 3232689.00 | 273.00 | 47.80 | 225.20 |
| Z3-2 | 521754.00 | 3230937.00 | 260.00 | 16.45 | 243.55 |
| Z3-3 | 524587.00 | 3230302.00 | 260.32 | 7.60 | 252.72 |
| Z3-5 | 520679.00 | 3229951.00 | 256.00 | 19.91 | 236.09 |
| Z3-6 | 519726.00 | 3229686.00 | 256.18 | 29.40 | 226.78 |
| Z3-7 | 518792.00 | 3233188.00 | 269.38 | 54.50 | 214.88 |
| Z3-10 | 515087.00 | 3236096.00 | 291.00 | 21.50 | 269.50 |
| Z4-2 | 516403.00 | 3222707.00 | 242.00 | 17.81 | 224.19 |
| Z4-5 | 517721.00 | 3221709.00 | 249.00 | 29.70 | 219.30 |
| Z4-6 | 519205.00 | 3225121.00 | 244.00 | 13.92 | 230.08 |
| Z4-7 | 519038.00 | 3225332.00 | 246.00 | 13.85 | 232.15 |
| Z4-8 | 519865.00 | 3224975.00 | 247.34 | 14.60 | 232.74 |
| Z4-9 | 519757.00 | 3225145.00 | 249.00 | 15.72 | 233.28 |
| Z4-14 | 517667.00 | 3220087.00 | 246.00 | 30.54 | 215.46 |
| Z4-15 | 522333.00 | 3226764.00 | 259.00 | 15.20 | 243.80 |
| Z4-16 | 521994.00 | 3227059.00 | 254.00 | 17.02 | 236.98 |
| Z4-17 | 521289.00 | 3226533.00 | 253.00 | 14.19 | 238.81 |
| Z4-18 | 521090.00 | 3226368.00 | 254.00 | 17.30 | 236.70 |
| Z4-19 | 521170.00 | 3226150.00 | 253.00 | 14.14 | 238.86 |
| Z4-20 | 520894.00 | 3225607.00 | 253.00 | 14.20 | 238.80 |
| Z4-21 | 521468.00 | 3227354.00 | 251.00 | 12.64 | 238.36 |
| Z4-22 | 521648.00 | 3227368.00 | 253.00 | 12.60 | 240.40 |
| Z4-24 | 522580.00 | 3227513.00 | 257.00 | 15.70 | 241.30 |
| Z4-27 | 523200.00 | 3228997.00 | 260.00 | 10.02 | 249.98 |
| Z4-29 | 523866.00 | 3229458.00 | 262.00 | 9.70 | 252.30 |
| Z4-32 | 516682.00 | 3220138.00 | 245.00 | 29.09 | 215.91 |
| Z5-27 | 513914.00 | 3214922.00 | 233.00 | 36.30 | 196.70 |
| Z5-30 | 518791.00 | 3220458.00 | 249.00 | 23.06 | 225.94 |
| Z5-31 | 518440.00 | 3220010.00 | 247.00 | 21.01 | 225.99 |
| Z5-34 | 517674.00 | 3220092.00 | 240.00 | 30.06 | 209.94 |



Anexo 2.-Secciones Geoelectricas dentro del área de estudio.

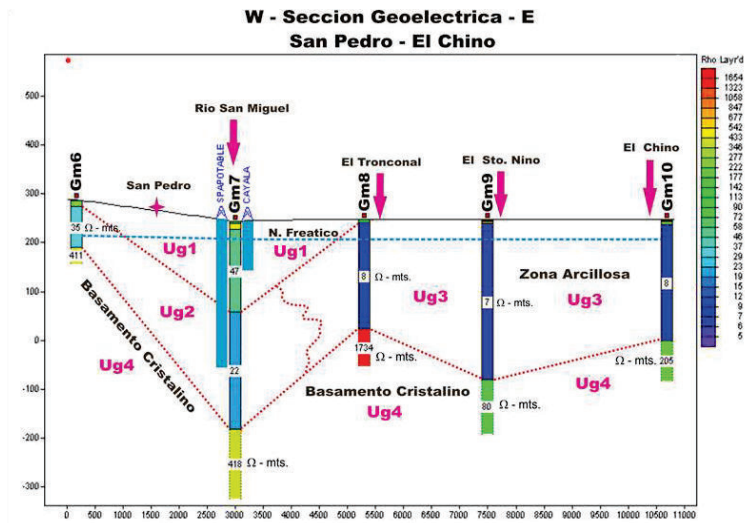


Figura 37.-Sección Geoelectrica-San Pedro el Chino(CEA,2006)

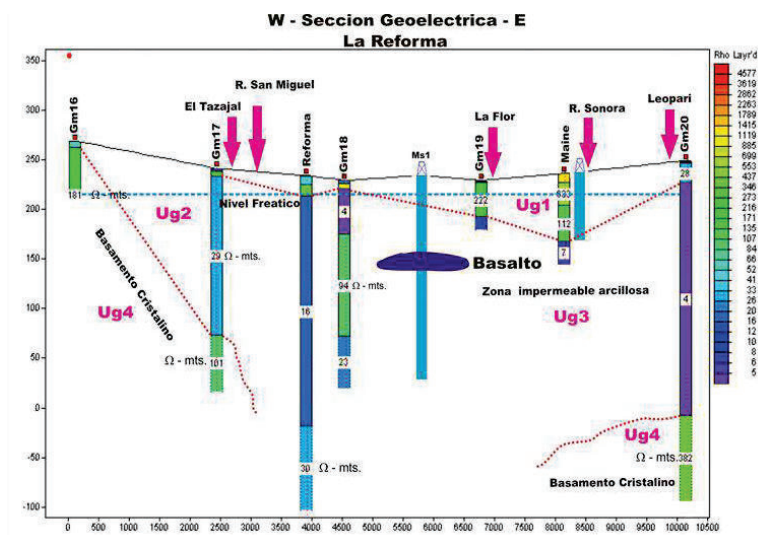


Figura 38.-Sección Geoelectrica- La Reforma(CEA 2006)

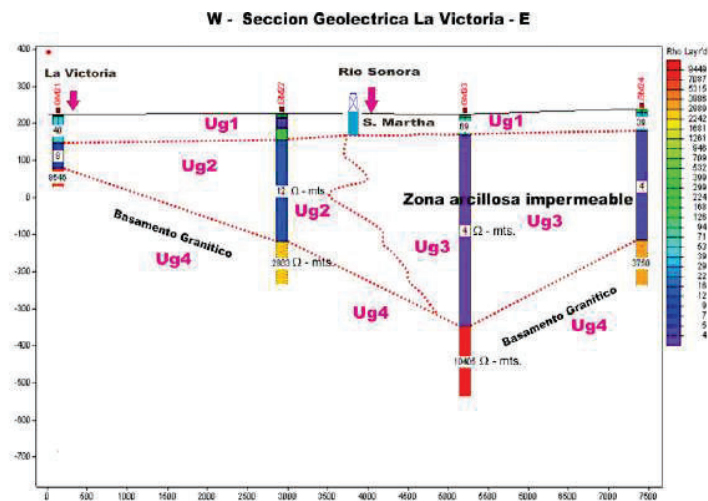


Figura 39.-Sección Geoeléctrica -La Victoria(CEA, 2006)

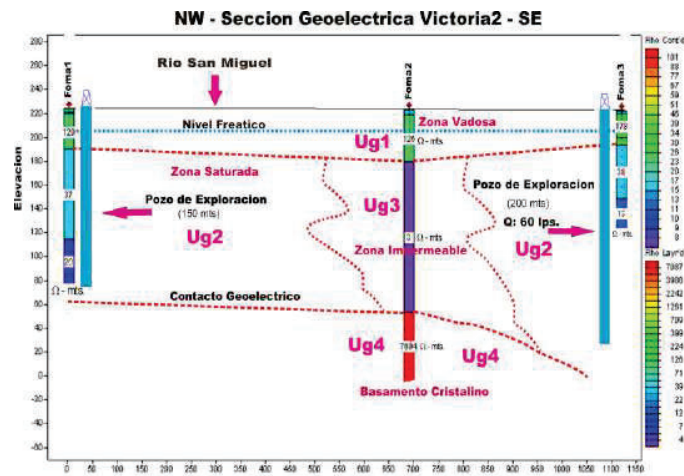


Figura 40.-Sección Geoeléctrica-La Victoria 2(CEA,2006)

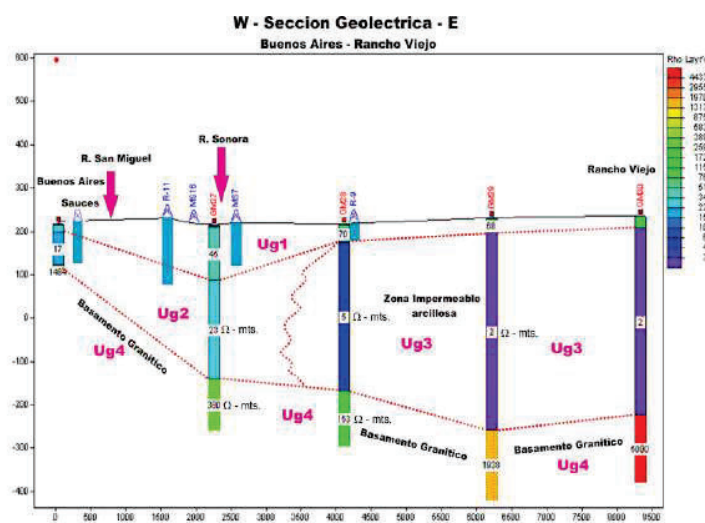


Figura 41.-Sección Geoeléctrica -Buenos Aires-Rancho viejo(CEA, 2006)n