



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

CARACTERIZACIÓN DE LA SUBSIDENCIA EN EL ACUÍFERO MESA DEL SERI – LA VICTORIA APLICANDO INTERFEROMETRÍA DE IMÁGENES DE RADAR (InSAR)

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

GEÓLOGO

PRESENTA:

MARÍA LUISA HERRERA QUEZADA



Hermosillo, Sonora a Febrero del 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

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

Hermosillo, Sonora, 09 de diciembre de 2016

DRA. SILVIA MARTÍNEZ RETAMA
JEFA DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
UNIVERSIDAD DE SONORA
Presente.-

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

"CARACTERIZACION DE LA SUBSIDENCIA EN EL ACUIFERO MESA DEL SERI – LA VICTORIA APLICANDO INTERFEROMETRIA DE IMÁGENES DE RADAR (InSAR)".

Esto es con el fin de que la alumna: **María Luisa Herrera Quezada** con exp. **9622563**, pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Licenciatura en Geología.

Sin otro en particular y agradeciendo de antemano su atención al presente, quedamos de Usted.

ATENTAMENTE
"EL SABER DE MIS HIJOS HARA MI GRANDEZA"



Alejandra Montijo González
DIRECTOR



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA

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, 26 de enero, 2017

M.C. ALEJANDRA MONTIJO GONZÁLEZ
DIRECTORA DE TESIS
P R E S E N T E.-

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

"CARACTERIZACION DE LA SUBSIDENCIA EN EL ACUIFERO MESA DEL SERI – LA VICTORIA APLICANDO INTERFEROMETRIA DE IMÁGENES DE RADAR (InSAR)"

Esto es con el fin de que la alumna: **MARÍA LUISA HERRERA QUEZADA** con **Expediente No. 9622563** pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Licenciatura en Geología. Así mismo les comunico que han sido asignados los siguientes Sinodales:

PRESIDENTE M.C. ISMAEL MINJAREZ SOSA
SECRETARIO M.C. JOSÉ ALFREDO OCHOA GRANILLO
VOCAL M.C. ALEJANDRA MONTIJO GONZÁLEZ

Sin otro en particular y agradeciendo de antemano su atención al presente, quedo de Usted.

A T E N T A M E N T E
"EL SABER DE MIS HIJOS HARÁ MI GRANDEZA"

DRA. SILVIA MARTÍNEZ RETAMA
JEFA DEL DEPARTAMENTO.



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

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

NOMBRE DE LA TESIS:

"CARACTERIZACION DE LA SUBSIDENCIA EN EL ACUIFERO MESA DEL SERI – LA VICTORIA APLICANDO INTERFEROMETRIA DE IMÁGENES DE RADAR (InSAR)"

NOMBRE DEL SUSTENTANTE:

MARÍA LUISA HERRERA QUEZADA

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


M.C. ISMAEL MINJAREZ SOSA

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


M.C. ALEJANDRA MONTIJO GONZÁLEZ

ATENTAMENTE
"EL SABER DE MIS HIJOS HARÁ MI GRANDEZA"


DRA. SILVIA MARTÍNEZ RETAMA
JEFA DEL DEPARTAMENTO



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

C.c.p. Archivo.

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedicado a las personas más especiales de mí vida, que siempre han estado a mi lado apoyándome y dando lo mejor de sí para que yo siga progresando personal y profesionalmente.

A **Juan Antonio Herrera**, mi amado padre, me siento feliz de tenerte a mi lado porque no cualquiera tiene un padre como el mío, mi viejón, te amo papi.

A **María Quezada Pacheco**, mi adorada y hermosa madre, gracias mami por siempre estar para mí y mis hijos. Te amamos.

A mis hermanos **Miguel, Jr., Miriam, Lucero, Lupita y Zulma**, por estas ahí siempre cuando mas lo he necesitado. Los amó con todo mi corazón.

A mis hijos **Tadeo, Mathias y Lucas**, lo más preciado que tengo, gracias por estar conmigo, gracias por ser mi norte, mi sostén emocional, impulsores de mis sueños, que aun entre muchos vaivenes de la vida por ustedes pude alcanzar esta meta. Los amó y los bendigo.

A mi sobrina **Evelin**, quien nos cuida desde el cielo, te extraño y te amamos.

“Con todo mi amor, para ustedes”

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios ser maravilloso que me dio fuerza y fe para creer en lo que me parecía imposible terminar. A mi familia por ayudarme siempre y por estar a mi lado a cada momento de mi vida.

Agradezco de todo corazón a la M. C. Alejandra Montijo Gonzales por tomar la dirección de esta tesis y por todo su apoyo brindado para lograr esta meta en mi vida, agradezco al M. C. Ismael Minjárez Sosa y al M. C. José Alfredo Ochoa Granillo, por aceptar ser parte de mi jurado. A mis amigos, que de una u otra manera me apoyaron para que esto fuera posible.

Gracias por su amistad y apoyo incondicional.

CONTENIDO

1 GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Localización del área de estudio	2
1.4 Población y actividad económica.....	6
1.5 Estudios previos	7
1.6 Método de trabajo.....	14
1.7 Actividades de campo	14
1.8 Actividades de gabinete.....	14
2 MARCO FÍSICO	15
2.1 Fisiografía	15
2.2 Climatología	15
2.3 Hidrografía	20
2.4 Suelos	24
2.5 Geología	27
3 FUNCIONAMIENTO ACUÍFERO	35
3.1 Unidades Hidroestratigráficas	35
3.2 Geometría del sistema.....	38
3.3 Parámetros hidráulicos	38
3.4 Rasgos indicadores de sistemas de flujo	41
3.5 Hidrogeoquímica.....	41
4 PROSPECCION GEOFISICA	42
4.1 Sondeos existentes y reinterpretación	42
5 HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA	51
5.1 Configuración de profundidad, elevación y evolución del nivel estático.....	51
6 APROVECHAMIENTOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA	66
6.1 Localización de los aprovechamientos del agua subterránea	66
6.2 Evolución histórica del bombeo de agua subterránea	68
7 SUBSIDENCIA DEL SISTEMA ACUÍFERO	76
7.1 Aplicación del método InSAR.....	76
7.2. Descripción de los datos utilizados	89
7.3. Método de análisis y resultados	90
8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	98
9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

1 GENERALIDADES

1.1 Introducción

Debido a la sobreexplotación que existe en el acuífero Mesa del Seri – La Victoria, desde años atrás se han generado estudios en los cuales se habla de la disponibilidad del agua, comportamiento hidráulico, niveles piezométricos, otros donde se usaron métodos geofísicos para delimitar zonas favorables para extraer agua y algunos sobre la calidad del agua. Todo esto por la creciente demanda de agua potable para los habitantes de las localidades que se encuentran dentro de los límites del acuífero, así como para la ciudad de Hermosillo y el desarrollo de las actividades de mayor peso económico en la región; la agricultura y la industria.

De manera general el abatimiento del nivel estático de un acuífero provoca subsidencia (hundimiento) y el agrietamiento del terreno. Anualmente el hundimiento del subsuelo por subsidencia puede ser del orden de centímetros, pudiendo ser entonces no perceptible a simple vista, pero en el transcurso del tiempo puede tener consecuencias en el drenaje del suelo y dar lugar a la aparición de agrietamientos. La geología y la ubicación del acuífero (así como sus condiciones de operación) son los principales factores que determinan que tan severo es el problema de la subsidencia.

El presente estudio tiene un objetivo diferente a los realizados años atrás, ya que en este se estudia el fenómeno conocido en la literatura como subsidencia por extracción de agua subterránea, la cual ocurre con la sobreexplotación acuífera en cuencas sedimentarias y puede llegar a tener como consecuencia la generación de hundimientos graduales del suelo. Para el desarrollo de este trabajo se consideró la herramienta InSAR, la cual consiste en utilizar imágenes de satélite (radar) para ver el movimiento gradual del suelo.

En este trabajo se llevó a cabo la revisión de trabajos previos de los cuales se consideraron aspectos como: piezometría, geofísica y geología, a la vez que se aplicó el método InSAR para determinar condiciones actuales de la topografía del acuífero

Mesa del Seri - La Victoria y las consecuencias de la sobreexplotación del agua subterránea.

1.2 Objetivos

El objetivo es llevar acabo la caracterización morfológica del terreno donde se ubica el acuífero Mesa del Seri - La Victoria, mediante un estudio de la variación espacial del hundimiento que lo afecta como consecuencia del bombeo del agua subterránea, teniendo como objetivos específicos:

- Definir la estratigrafía del acuífero Mesa del Seri-La Victoria.
- Efectuar mediciones del hundimiento utilizando Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR).
- Comparar los resultados obtenidos a partir del uso de la tecnología InSAR, con respecto a los datos de la nivelación topográfica de estudios realizados anteriormente.
- Correlacionar los resultados obtenidos en los objetivos anteriores, así como con la evolución de los niveles piezométricos y la actividad histórica del bombeo de agua subterránea.

1.3 Localización del área de estudio

El acuífero Mesa del Seri-La Victoria, definido con la clave 2621 del Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se encuentra ubicado en el municipio de Hermosillo, Sonora y se localiza al este de la ciudad capital. Geográficamente, el área está delimitada por las siguientes coordenadas: 110° 45' y 110° 57' Longitud Oeste (506 000 a 525 000 UTM), y 29° 01' y 29° 12' Latitud Norte (3 209 000 a 3 230 000 UTM), abarcando una superficie de 1,049 km² (Figura 1.1). El acuífero se localiza en su totalidad dentro del municipio de Hermosillo, destacando que sus límites cubren el extremo oriental de la ciudad de Hermosillo, Sonora, además de comunidades rurales como: en él la ciudad de Hermosillo, cabecera municipal y comunidades rurales como Mesa del Seri, La Victoria y San Pedro.

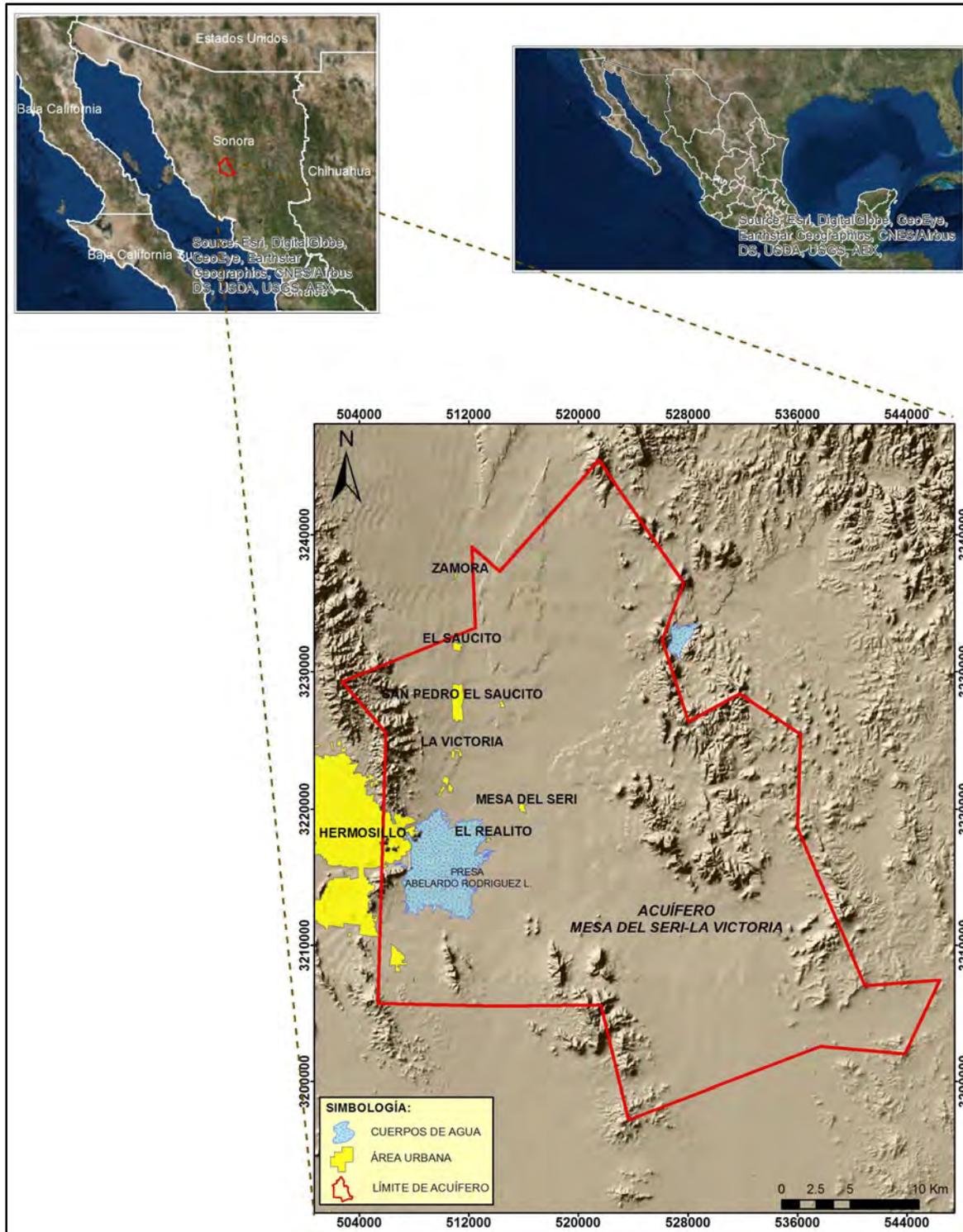


Figura 1.1.- Localización del área de estudio.

Las principales vías de acceso al acuífero Mesa del Seri – La Victoria son las siguientes: la carretera internacional México 15, que une a las ciudades de Nogales y Hermosillo, en el estado de Sonora, la cual lleva una dirección norte – sur dentro del acuífero; la carretera federal México 14, que une a Hermosillo con el poblado de Ures y Mazocahui, llevando una dirección suroeste – noreste; y la carretera estatal Sonora 104, que une a Hermosillo con los poblados de Mazatán y Sahuaripa, con una dirección preferente oriente – poniente, (figura 1.2).

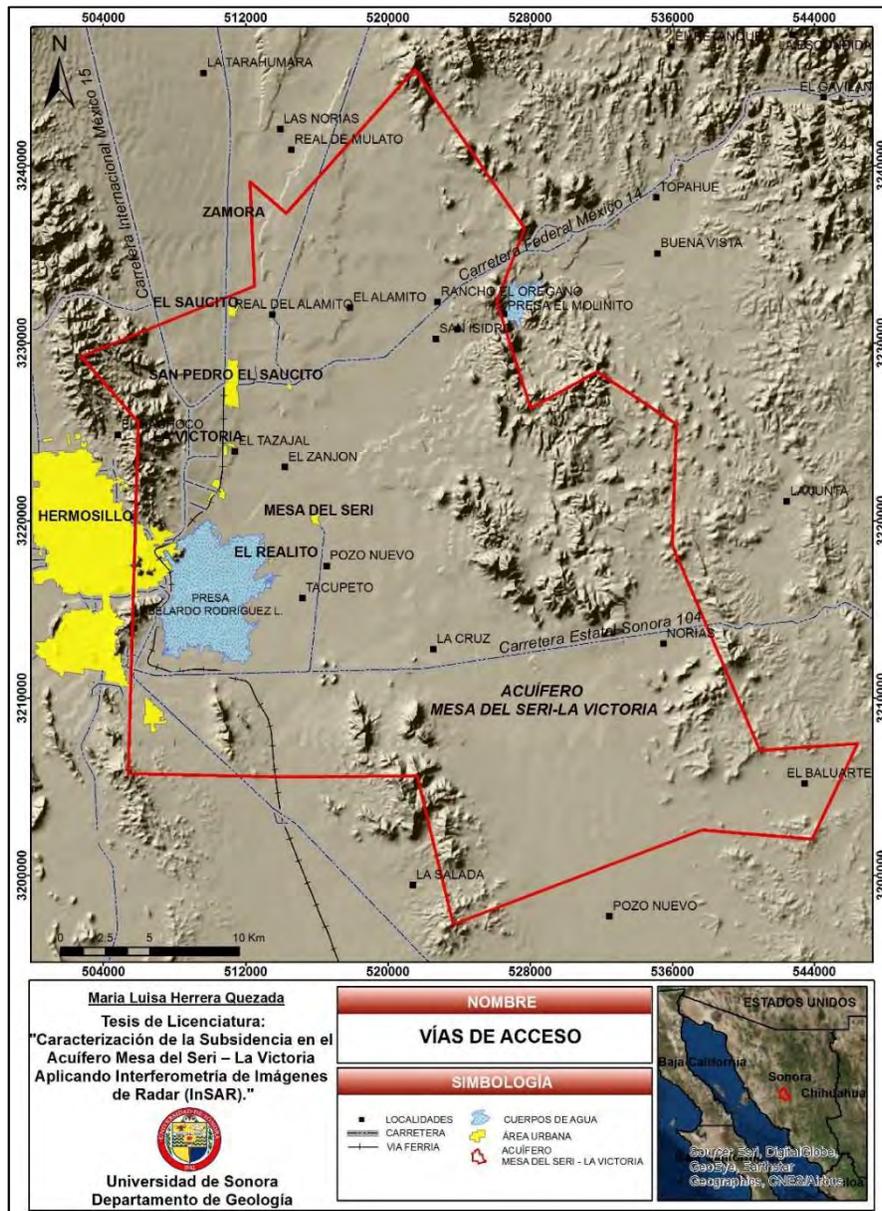


Figura 1.2.- Vías de acceso.

El área en estudio colinda al norte con los acuíferos Río San Miguel y Río Zanjón, al poniente con el acuífero Costa de Hermosillo, al sur con el acuífero La Poza, y al oriente con los acuíferos del Río Sonora y Santa Rosalía; todos ellos pertenecientes al estado de Sonora (Figura 1.3). La poligonal simplificada que delimita al acuífero Mesa del Seri – La Victoria se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la Tabla 1.1.

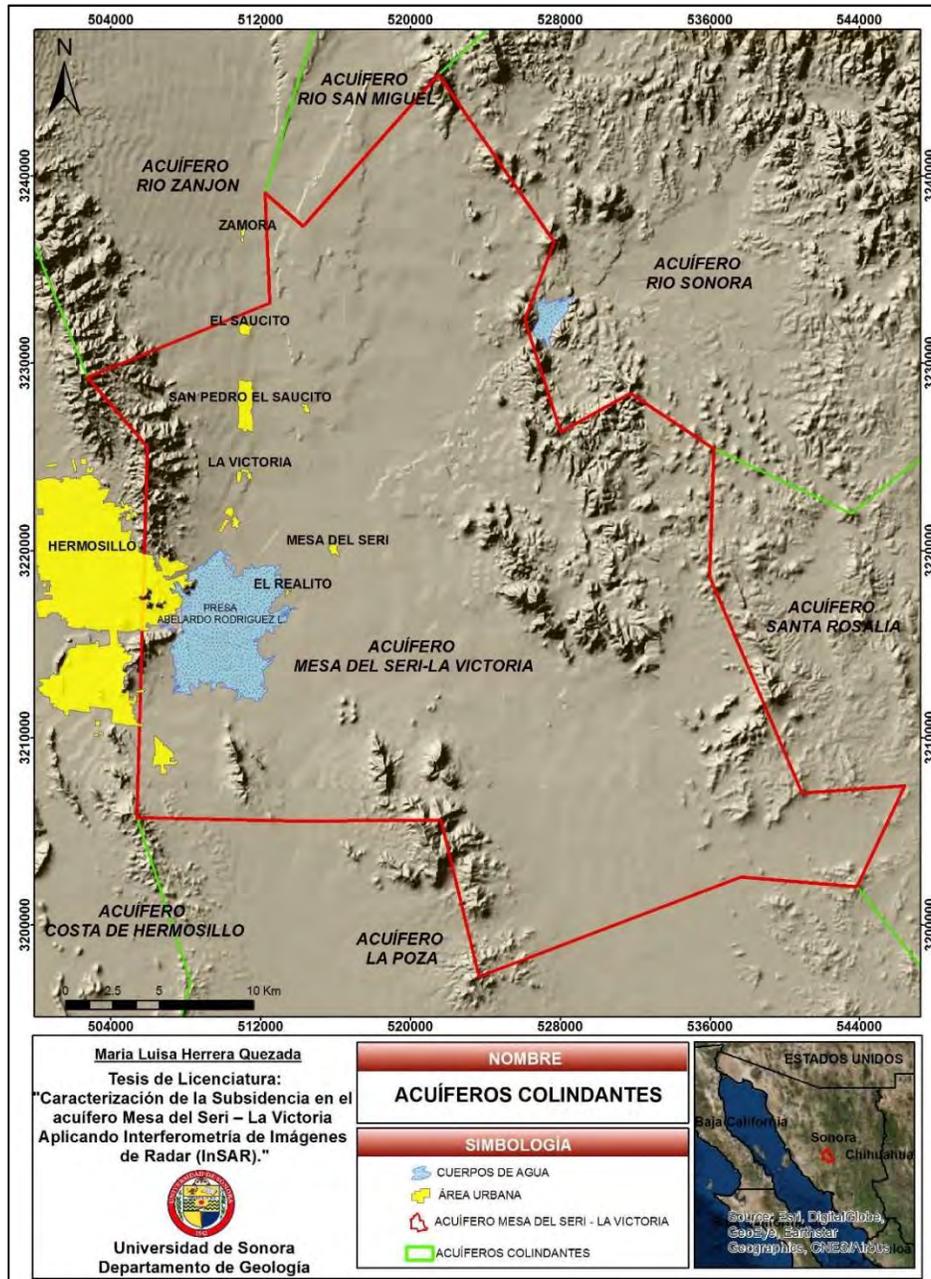


Figura 1.3.- Ubicación de acuíferos colindantes a la zona de estudio.

VERITCE	X	Y
1	531749.53	3228395.45
2	536215.77	3225435.33
3	535985.59	3218630.07
4	540918.53	3207052.39
5	546397.41	3207438.68
6	543842.53	3202049.06
7	537661.29	3202582.72
8	523669.26	3197245.61
9	521634.64	3205629.28
10	514151.91	3205550.95
11	505376.35	3205755.23
12	505940.38	3225551.76
13	502754.44	3229268.13
14	512497.75	3233228.89
15	512227.76	3239106.11
16	514259.23	3237337.45
17	521498.27	3245434.45
18	527683.99	3236497.52
19	526115.05	3232331.13
20	528022.22	3226350.71
1	531746.27	3228393.66

Tabla 1.1.- Vértices de la poligonal del acuífero.

1.4 Población y actividad económica

Las poblaciones con mayor número de habitantes en el acuífero son: San Pedro El Saucito (2,938 Habs.), Ejido La Victoria (1,966 Habs.), El Tazajal (2,062 Habs.), Mesa del Seri (908 Habs.), San Isidro (1,116 Habs.), El Tronconal (712 habs.) y una parte de la ciudad de Hermosillo de acuerdo al Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática (INEGI 2010). Las principales actividades económicas son: la industria, agricultura, ganadería, pesca y comercio.

1.5 Estudios previos

Debido a su importancia como fuente de abastecimiento de agua para los usos público urbano, agrícola, pecuario, industrial y de servicios, el acuífero Mesa del Seri - La Victoria ha sido objeto de un buen número de estudios con diferentes objetivos, principalmente enfocados a determinar su potencial y funcionamiento hidrogeológico. A continuación se presenta un resumen de los principales informes técnicos consultados:

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, ORGANISMO DE CUENCA NOROESTE. ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA SUBTERRÁNEA ACUÍFERO (2621), MESA DEL SERI-LA VICTORIA, ESTADO DE SONORA, PUBLICADO EN EL DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN EL 28 DE AGOSTO DE 2009. El documento expone que se trata de un acuífero libre con condiciones locales de semiconfinamiento debido a presencia de lentes irregulares de sedimentos arcillosos y rocas volcánicas interestratificadas. Respecto a parámetros hidráulicos destacan valores promedio de transmisividad entre 1 y 15×10^{-3} m²/s, así como valores de conductividad hidráulica horizontal de 6 a 90 m/d y vertical de 0.1 a 17 m/d, asimismo se establece un coeficiente de almacenamiento que varía entre 0.005 y 0.000005 y un rendimiento específico entre 0.05 y 0.25.

Respecto al comportamiento hidráulico destaca que el nivel piezométrico en este acuífero es sensible a la recarga por lluvia o por infiltración a través del cauce del Río Sonora, esto cuando se producen desfuegos de la presa Rodolfo Félix Valdez (“El Molinito”). En relación a los niveles piezométricos, el documento reporta que para 1997 se registraron valores de profundidad entre 5 y 10 m, asimismo valores máximos de 60 m al noroeste del acuífero (en las inmediaciones del poblado San Pedro). Con respecto a la elevación del nivel estático se registraron valores que varían entre 244 y 220 msnm, con direcciones preferentes de flujo subterráneo en forma paralela al cauce del Río Sonora.

Con respecto a la calidad del agua se reporta un agua subterránea caracterizada como sódica-bicarbonatada, con presencia local de sulfatos y cloruros, estos últimos

aparentemente con influencia hidrotermal asociada a varios eventos geológicos presentes en la zona del acuífero. Destaca también la presencia de flúor y arsénico en concentraciones superiores a la normatividad oficial mexicana actual (NOM-127-SSAI-2004).

El documento hace referencia a un censo de aprovechamientos hidráulicos realizado en el año 2006, el cual reporta la presencia de 474 aprovechamientos, de los cuales 289 son pozos y 185 corresponden a norias. De acuerdo con el uso del agua subterránea, el 64.1% de los aprovechamientos se destinaba al uso agrícola, el 13.6% al pecuario, el 11.3% para público-urbano, el 7.5% para industrial y el 3.5% restante se destina al uso doméstico-abrevadero. A su vez, el volumen de extracción reportado ascendía en forma conjunta a los 120 Mm³ anuales, de los cuales el 64.2% se utiliza en la agricultura, un 33.3% para el abastecimiento de agua potable a los centros de población, el 1.7% para uso doméstico-abrevadero y finalmente 0.8% para uso industrial.

En el estudio referido el cálculo de la disponibilidad media anual de agua subterránea se establece que no existen volúmenes adicionales para otorgar nuevas concesiones, asimismo se determina un déficit de 37.82M m³ anuales que se están extrayendo a costa del almacenamiento no renovable del acuífero Mesa del Seri - La Victoria.

INFORME DE EXPLORACIONES GEOFÍSICAS EN EL ÁREA DE “LA VICTORIA”, “MESA DEL SERI” Y “SAN PEDRO EL SAUCITO”, MUNICIPIO DE HERMOSILLO, ESTADO DE SONORA. 1986. ELABORADO POR LA EXTINTA SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRÁULICOS. El objetivo del estudio fue aplicar el método eléctrico de resistividad (SEV) y delimitar zonas favorables para la extracción de agua subterránea por medio de la realización de secciones geoelectricas a profundidades de 310 m, asimismo, recomendar los sitios más atractivos para llevar a cabo perforaciones para la extracción de agua con el fin de abastecer a la ciudad de Hermosillo, Sonora.

Se elaboran 35 sondeos eléctricos verticales, de los cuales 14 presentan resistividades relacionadas con un potencial hidrogeológico alto a 300 m de profundidad, mientras que los 21 sondeos restantes salieron negativos, es decir, no se encontraron resistividades favorables.

En el informe destaca la localización de zonas favorables para perforación de pozos profundos con el fin de extraer agua subterránea para dotar a la ciudad de Hermosillo, Sonora, en particular en las márgenes del Río San Miguel y en zonas de los ejidos La Victoria y San Pedro El Saucito.

El informe referido presenta la elaboración de cuatro secciones geoeléctricas construidas a partir de los registros eléctricos, presentando una distribución general de las unidades litológicas que forman el subsuelo de la zona de estudio.

DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE EXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO LA VICTORIA COMO FUENTE DE ABASTECIMIENTO A LA CIUDAD DE HERMOSILLO, SONORA, 1990. REALIZADO POR ESTUDIOS DE PLANEACIÓN REGIONAL S.A. DE C.V., PARA LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. El estudio contempla la definición de la geometría del acuífero y sus características hidrodinámicas, se evalúa el mecanismo de recarga y descarga de igual forma, se determinan las causas del termalismo y posibles modificaciones de calidad del agua en los niveles profundos. Se hace un balance geohidrológico para conocer la situación real de explotación y el conocimiento a futuro del acuífero, se estima además su vida útil en términos de un volumen de explotación seguro.

Del análisis químico de muestras de agua colectadas en los trabajos de campo, se concluye que en lo general, el agua subterránea en la región pertenece a la familia sódica–bicarbonatada y cálcica-bicarbonatada, lo cual está relacionado con la naturaleza geológica de las rocas y materiales por las que circula el agua, destacando que algunas muestras de agua presentan concentraciones de arsénico que rebasan el límite máximo permisible por la normatividad oficial mexicana vigente.

El documento establece que la composición química del agua subterránea es similar entre pozos que tienen distinta profundidad, lo que sugiere de una comunicación vertical entre los diferentes horizontes acuíferos.

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO COMPRENDIDO ENTRE LAS PRESAS ABELARDO L. RODRÍGUEZ Y RODOLFO FÉLIX VALDÉZ. TESIS DE LICENCIATURA PARA OBTENER EL TÍTULO DE GEÓLOGO POR LA UNIVERSIDAD DE SONORA. 1999. LUIS HERMAN VALENZUELA SALAS Y CARLOS ALBERTO CORONADO CRUZ. Se trata de un estudio enfocado hacia la definición del modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del acuífero.

Las principales conclusiones apuntan a la definición de un acuífero constituido por tres subsistemas, superior, intermedio e inferior. El primero funciona como acuífero libre con una extracción de 40 Mm³ y en condiciones de equilibrio precario a sobreexplotado; el intermedio es de carácter semiconfinado a libre, con una extracción de 25 Mm³ y también se considera en equilibrio precario a sobreexplotado; el acuífero profundo se considera confinado con una extracción de 12 Mm³ y potencial desconocido.

MODELO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA DEL ACUÍFERO MESA DEL SERI-LA VICTORIA, SONORA. 1999. COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS. El documento destaca la elaboración del modelo matemático utilizando el programa Visual MODFLOW, versión 2.61 de Waterloo Hydrogeologic Inc.

Previo al modelo se hace énfasis en la piezometría, balance y parámetros hidráulicos del acuífero. Entre sus conclusiones más importantes refieren una extracción en el acuífero de 120 Mm³. De igual forma se refiere que la recarga de 1997 a 1998 fue del orden de 70 Mm³, cifra que se puede reducir a 40 Mm³ si el período de sequía se prolonga.

El documento concluye que los 14 pozos de la captación en Mesa del Seri para uso público urbano representan un desequilibrio importante en el balance de agua subterránea, lo cual posiblemente se agudizaría al construir y operar pozos adicionales.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LAS SUBCUENCAS DE LOS RÍOS SONORA, SAN MIGUEL, MESA DEL SERI-LA VICTORIA Y CUENCA BACOACHITO. 2004. REALIZADO POR LA UNIVERSIDAD DE SONORA PARA LA COMISIÓN ESTATAL DEL AGUA DE SONORA (CEA). Se realiza un censo de aprovechamientos, muestreo geoquímico, secciones geofísicas (gravimetría y SEV's), cálculo de la disponibilidad de aguas para las cuencas y acuíferos que conforman la parte media y alta del Río Sonora, que incluyen las cuencas de los Ríos Zanjón, San Miguel, Bacanuchi, Sonora-Arizpe, Sonora-Banámichi, Arroyo La Junta, y parte de la Subcuenca La Manga, la cual forma parte de la Cuenca del Río Bacoachi.

ESTUDIO GEOFÍSICO DE SENSORES POR EL MÉTODO TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO (TEM), PARA DETERMINAR POSIBILIDADES ACUÍFERAS EN LOS TERRENOS DONDE SE PROYECTA LA CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA CEMENTERA HOLCIM-APASCO, DE LA CIUDAD DE HERMOSILLO, SONORA. 2007. REALIZADO POR LA EMPRESA SEISMOCONTROL S.A. DE C.V. PARA LA COMPAÑÍA CEMENTERA HOLCIM-APASCO. Mediante exploraciones geofísicas se evalúan las posibilidades de explotación del acuífero, en los terrenos donde se proyecta la construcción de la planta cementera Holcim-Apasco de la ciudad de Hermosillo.

Se definieron cuatro paquetes estratigráficos: el superficial, formado por materiales aluviales con espesor máximo de 50 m y de regulares a malas posibilidades acuíferas; el segundo paquete se asocia a la presencia de tobas arcillo arenosas, con espesor de 10 a 110 m y malas posibilidades acuíferas; el tercero son calizas con espesores de 200 a más de 1000 m con buenas posibilidades acuíferas.

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOFÍSICA DEL ACUÍFERO DE LA MESA DEL SERI-LA VICTORIA, SONORA. (2006) REALIZADO POR LA UNIVERSIDAD DE SONORA PARA LA COMISIÓN ESTATAL DEL AGUA. De acuerdo a estudios realizados por la Comisión Estatal del Agua; se encontró que existe un fuerte abatimiento en los acuíferos localizados al este de la ciudad de Hermosillo, específicamente en los acuíferos Mesa del Seri y La Victoria, dada la excesiva extracción de agua subterránea realizada en los últimos años.

Por lo anterior, es importante conocer a mayor detalle la geometría del acuífero, la constitución de las capas permeables e impermeables de estos acuíferos con el fin de estimar los volúmenes almacenados y susceptibles de extraer de manera sustentable, sin agravar el daño ocasionado al mismo.

Desde el punto de vista geológico, el acuífero descansa sobre materiales granulares de diferente composición variando desde arenas, gravas, boleos, limos y arcillas. La edad de estos sedimentos varía del pleistoceno al reciente y sus espesores en algunos sitios alcanzan las centenas de metros.

El análisis conjunto de información de sondeos eléctricos verticales, cortes litológicos de pozos y registros eléctricos, permitieron determinar y configurar el comportamiento a profundidad del basamento impermeable de la zona Mesa del Seri - La Victoria.

ACTUALIZACIÓN DEL INVENTARIO HIDRÁULICO Y CONFORMACIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA EL MANEJO DEL ACUÍFERO DE MESA DEL SERI – LA VICTORIA, (2009). REALIZADO POR EL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA (ITSON) PARA COMITÉ TÉCNICO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS (COTAS) DE MESA DEL SERI – LA VICTORIA Y COMISIÓN ESTATAL DEL AGUA (CEA). Para consolidar las acciones del Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) de Mesa del Seri - La Victoria y facilitar su gestión hidrológica del acuífero, el principal objetivo de este estudio fue actualizar el inventario hidráulico para identificar la situación que guardan los aprovechamientos en cuanto a la necesidad de implementar una campaña de instalación o reparación de medidores

de flujo volumétrico y adecuaciones a los trenes de descarga para la operación óptima de los equipos de bombeo, hacer un levantamiento de nivelación de brocales y medición de profundidad al nivel estático, analizar el comportamiento de la evolución piezométrica del acuífero para identificar zonas de abatimiento importantes que han evolucionado desde 2004 al 2008. Además, determinar un proyecto de diseño óptimo del tren de descarga de cada aprovechamiento que lo requiera.

También se desarrolló un sistema de información geográfica (SIG) para el manejo del acuífero de la Mesa del Seri - La Victoria, con despliegue de información documentada y cartográfica de consulta, para la administración del agua subterránea.

ESTUDIO DE EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO MESA DEL SERI- LA VICTORIA, SONORA (OBTENCIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA SUBTERRÁNEA DEL ACUÍFERO). REALIZÓ INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE ACUÍFEROS Y AMBIENTE (2007), PARA PLANTA APASCO. Entre los objetivos del presente estudio de evaluación hidrogeológica está, la ubicación de sitios con los mejores rendimientos hidráulicos dentro del acuífero, ubicar zonas con mejor calidad del agua, definir posibilidades reales para extracción de agua subterránea, mostrar las condiciones administrativas para obtener una concesión de agua subterránea del acuífero ante la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y encontrar sitios posibles para adquirir por compra directa de derechos de concesiones.

La zona se encuentra sobre-concesionada y es deficitaria en 15 hm³/año contra su recarga, por lo que no cuenta con disponibilidad para incrementar su extracción. Para obtener agua subterránea de este acuífero es necesario adquirir de otro(s) usuario(s) derechos o concesiones de extracción, para llevarlos a la zona de interés y realizar la(s) obras nuevas.

En el área de estudio (Planta Apasco) el espesor de aluviones es del orden de 15 m, por lo que no constituye un acuífero por sí mismo. Los resultados de la prospección hidrogeológica muestran la existencia de un acuífero en rocas carbonatadas en el área de estudio, con posibilidades de proporcionar en forma sustentable el caudal

necesario para la vida útil del proyecto. Este acuífero no se encuentra evaluado dentro de los límites del acuífero administrativo. Se propuso perforar tres sitios, Proyecto Planta, Arroyo La Calabaza y Cerro la Mona, de los cuales la más recomendable es Arroyo La Calabaza, ya que hidrológicamente se ubica en una zona de captación de drenaje superficial y con estructuras que sugieren infiltración a lo largo de su microcuenca.

1.6 Método de trabajo

Las actividades de campo se llevaron a cabo una vez concluido el procesamiento InSAR. Las evidencias de subsidencia arrojadas con el uso de imágenes de radar, fueron soportadas mediante evidencia de campo, de tal forma que este apartado fue contemplado en el último informe de actividades.

1.7 Actividades de campo

Una vez que se conjuntó información previa, como cartográfica, piezometría y geofísica con la información nueva, resultado del método de interferometría (InSAR), se programaron algunos recorridos por tierra para obtener mayor certidumbre en cuanto a las posibles zonas de subsidencia en la zona de estudio, también se programó y se llevó a cabo un recorrido que se hizo con apoyo del helicóptero del Servicio Geológico Mexicano, en el cual se encontraron zonas con evidencia clara de subsidencia.

1.8 Actividades de gabinete

Como inicio de actividades de gabinete para esta tesis, se recopiló y analizó documentación histórica, como trabajos sobre censos, piezometría, hidrometría, climatología y pruebas de bombeo, también se analizó información de geología, geofísica, sondeos eléctricos, cortes litológicos y otra parte de la recopilación fue sobre temas de subsidencia en los que se describiera el mecanismo de dicho fenómeno, los cuales nos sirvieran como apoyo de antecedentes para el trabajo presente.

De la información recopilada, una parte muy importante fue la investigación sobre la aplicación del método de Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR) para mediciones de hundimientos, una vez obtenida la información histórica y conocido el método antes mencionado se procedió a desarrollar el presente proyecto, para el cual también se realizó un Sistema de Información Geográfica (SIG) con el programa Arcmap 10.2, herramienta con la que se trabajó durante todo el proceso, donde se plasmó la información obtenida, tanto histórica como la generada en el proyecto.

2 MARCO FÍSICO

2.1 Fisiografía

El área se encuentra ubicada fisiográficamente en la subprovincia del Desierto Sonorense, dentro de la provincia de Sierras Sepultadas (Figura 2.1), según la clasificación de Raisz (1959) e INEGI (1989). Limita al poniente con la provincia Desértica de Sonora, caracterizada a su vez por sierras aisladas y amplias planicies aluviales. Al norte y oriente se extiende la Sierra Madre Occidental, constituida por una meseta elevada, profundamente disectada en su borde occidental por barrancas; al sur su límite lo constituye la Planicie Costera del Pacífico, la cual empieza en la margen sur-sureste de la sierra El Bacatete y muestra una planicie aluvial formada por la unión de las planicies deltaicas. Los rasgos más característicos de la región están representados en lo general por montañas complejas constituidas por rocas ígneas y sedimentarias principalmente. Estas estructuras morfológicas se encuentran dispuestas de manera semiparalela, con orientación general norte-sur, separadas por valles intermontanos de origen tectónico.

2.2 Climatología

Tenemos que 48% del Estado tiene un clima seco y semiseco en la Sierra Madre Occidental, 46.5% presenta clima muy seco en las Llanuras Costera del Golfo y Sonorense, 4% es templado subhúmedo se encuentra hacia el este del Estado y se presenta un clima cálido subhúmedo hacia el sureste con 1.5%, (Figura 2.3).

La temperatura media anual es alrededor de 22°C, la máxima promedio es de 38°C en los meses de junio y julio, la mínima promedio es de 5°C y se presenta en el mes de enero. La precipitación media estatal es de 450 mm anuales, las lluvias se presentan en verano en los meses de julio y agosto.

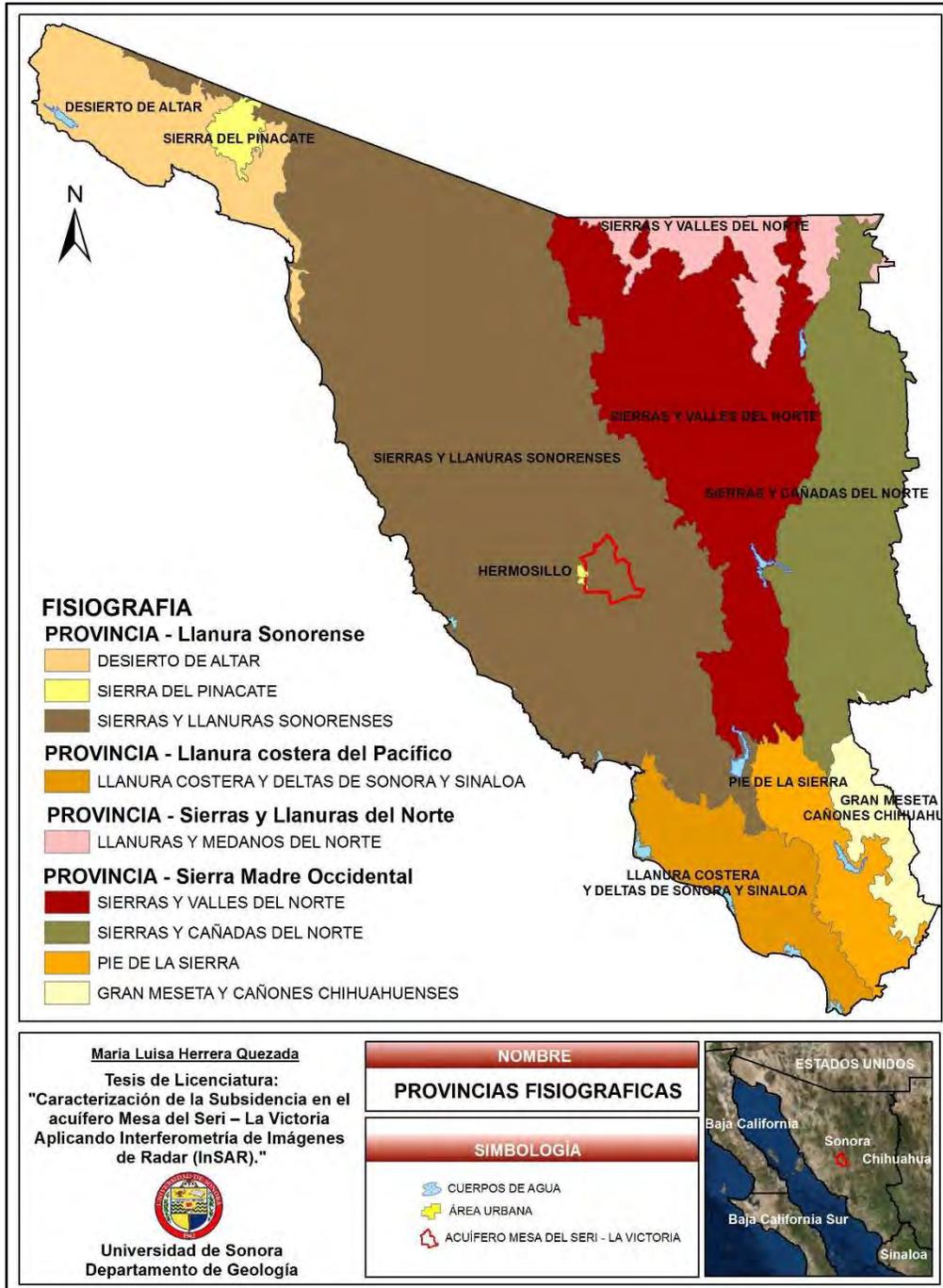


Figura 2.1.- Provincias fisiográficas, Raiz (1959) e INEGI (1989).

El clima en el Estado es una limitante para la agricultura, sin embargo se cultiva trigo, algodón, cártamo, sandía, ajonjolí, garbanzo, sorgo, maíz y vid, principalmente con riego, en la regiones de clima seco y semiseco de los Valles de El Yaqui, Mayo y Guaymas.

CLIMAS DEL ESTADO DE SONORA

Seco y semiseco	48%*
Muy seco	46.5%*
Templado subhúmedo	4%*
Cálido subhúmedo	1.5%*

*Referido al total de la superficie estatal. FUENTE:
Elaborado con base en INEGI.
Carta de Climas 1:1 000 000.



Figura 2.2.- Tipos de climas del estado de Sonora.

Para la descripción de los tipos de climas del área de estudio, fue utilizada la clasificación de Köppen, modificada por E. García (1964), a partir de esta se establece que domina el tipo de clima $BW(h')hw(x')$, el cual corresponde a B, grupo de climas secos; BW, subtipo muy seco o desértico; (h') h, con clima cálido, (Figura 2.4):

- $(BW(h')hw(x'))$.- Muy seco cálido con lluvias en verano. La temperatura media anual es mayor a 22°C . En general, la temperatura media mensual más alta se presenta en el mes de julio, mientras que la más baja se produce en enero.
- $(BW)hw$.- Muy seco-semicálido con lluvias en verano. El porcentaje de lluvia invernal es entre 5 y 10.2. La temperatura media anual es mayor de 18°C . Además

el invierno es fresco. Dentro del área de estudio, se localiza al sur-sureste, cubriendo el 13.4% del acuífero.

- (BWhw(x')).- Muy seco-semicálido. Temperatura media anual menor que 18°C. Además se tiene invierno fresco. Dentro del área de estudio, solo abarca el 0.2%, al noroeste del área.
- (BSoh(h')hw(xi)).- Seco-cálido con lluvias en verano. La temperatura media anual varía por lo general entre 22 y 26°C. El mes más húmedo es julio y el más seco es abril o mayo. Dentro del área este clima se encuentra en el límite este, abarcando un 0.9%.
- (BSohw(x')).- Seco-semicálido con lluvias en verano. Temperatura media anual que caracteriza este clima comprende un rango de 18 a 22°C. Julio es el mes más caluroso y enero el más frío. Abarca el 7.1% del área de estudio en el límite sureste.

Con base en la información disponible, se eligieron dos estaciones climatológicas, Hermosillo y El Orégano, que se localizan en las inmediaciones de la zona las cuales presentan un registro de datos más completo. El período de tiempo utilizado para este análisis comprende de 1970 a 1988.

Las temperaturas registradas en las estaciones climatológicas antes mencionadas, representan los valores más altos en los meses de julio, agosto y septiembre; en tanto que de noviembre a enero se registran las más bajas con una media anual de 24° C, con valores extremos entre -3 y 46° C. Los promedios mensuales de precipitación muestran que los meses más lluviosos son julio, agosto y septiembre, con valores máximos de 87.8 y 94.4 mm, registrados en las estaciones Hermosillo y El Orégano.

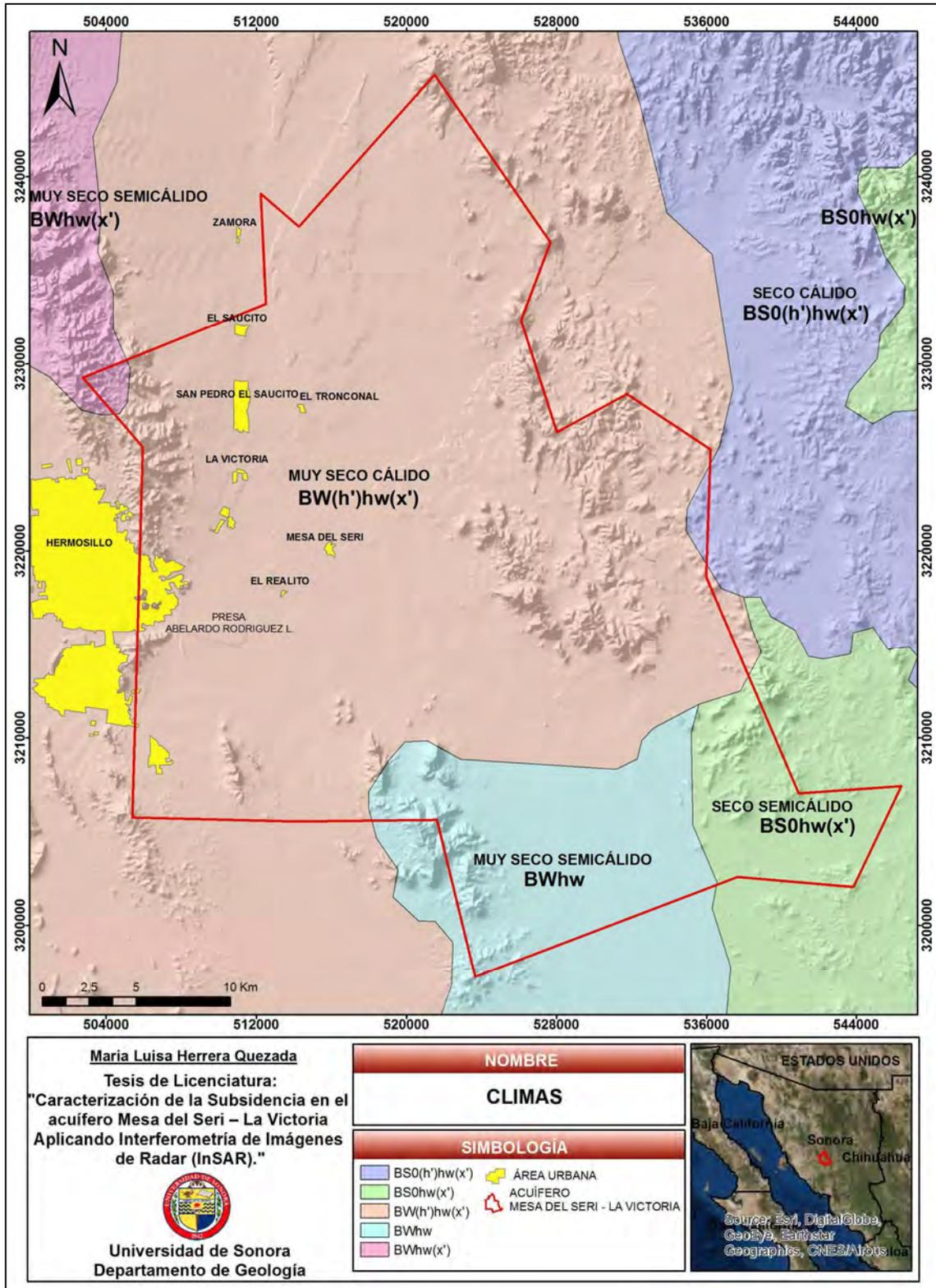


Figura 2.3.- Distribución de tipos de climas.

2.3 Hidrografía

La corriente principal del área es el Río Sonora, que tiene un área de captación hasta la Presa Abelardo L. Rodríguez de 21,900 km², (figura 2.4). La topografía de su cuenca es accidentada salvo en su parte baja, donde confluye con su afluente el Río San Miguel de Horcasitas, cuya cuenca de captación tiene un área de 8,427 Km², que representan el 40% del área drenada hacia la presa. Aguas abajo de la presa el Río discurre por zonas planas hasta su desembocadura en el estero Tastiota del Golfo de California. En este último tramo el curso es indefinido y los escasos volúmenes que escurren, generalmente se infiltran en las zonas arenosas antes de llegar a su desembocadura.

El acuífero Mesa del Seri – La Victoria se ubica dentro de la cuenca del Río Sonora, la cual se encuentra en la Región Hidrológica Sonora Norte (RH9), en el estado de Sonora y pertenece a la vertiente occidental del Pacífico. Esta cuenca limita: Río Concepción – Arroyo Cocóspera en el norte, Río Yaqui al este, al sur con el Río Mátape y al oeste con la del Río Bacoachi.

En la cuenca Río Sonora se localizan 10 subcuencas, de las cuales Río Sonora – Hermosillo y Río San Miguel cubren la mayor parte del acuífero en estudio (Figura 2.5), La totalidad de las subcuencas del Río Sonora se refieren en la Tabla 3.2.

CLAVE CUENCA	SUBCUENCA
9Dd	RÍO BACANUCHI
9Dc	RÍO SONORA - ARIZPE
9Df	RÍO ZANJÓN
9Db	RÍO SONORA - BANÁMICHÍ
9De	RÍO SAN MIGUEL
9Da	RÍO SONORA - HERMOSILLO
9Dj	ARROYO LA JUNTA
9Dh	ARROYO EL BAJÍO
9Di	ARROYO LA POZA
9Dg	ARROYO LA BANDERA

Tabla 3.2.- Subcuencas pertenecientes a la cuenca del Río Sonora.

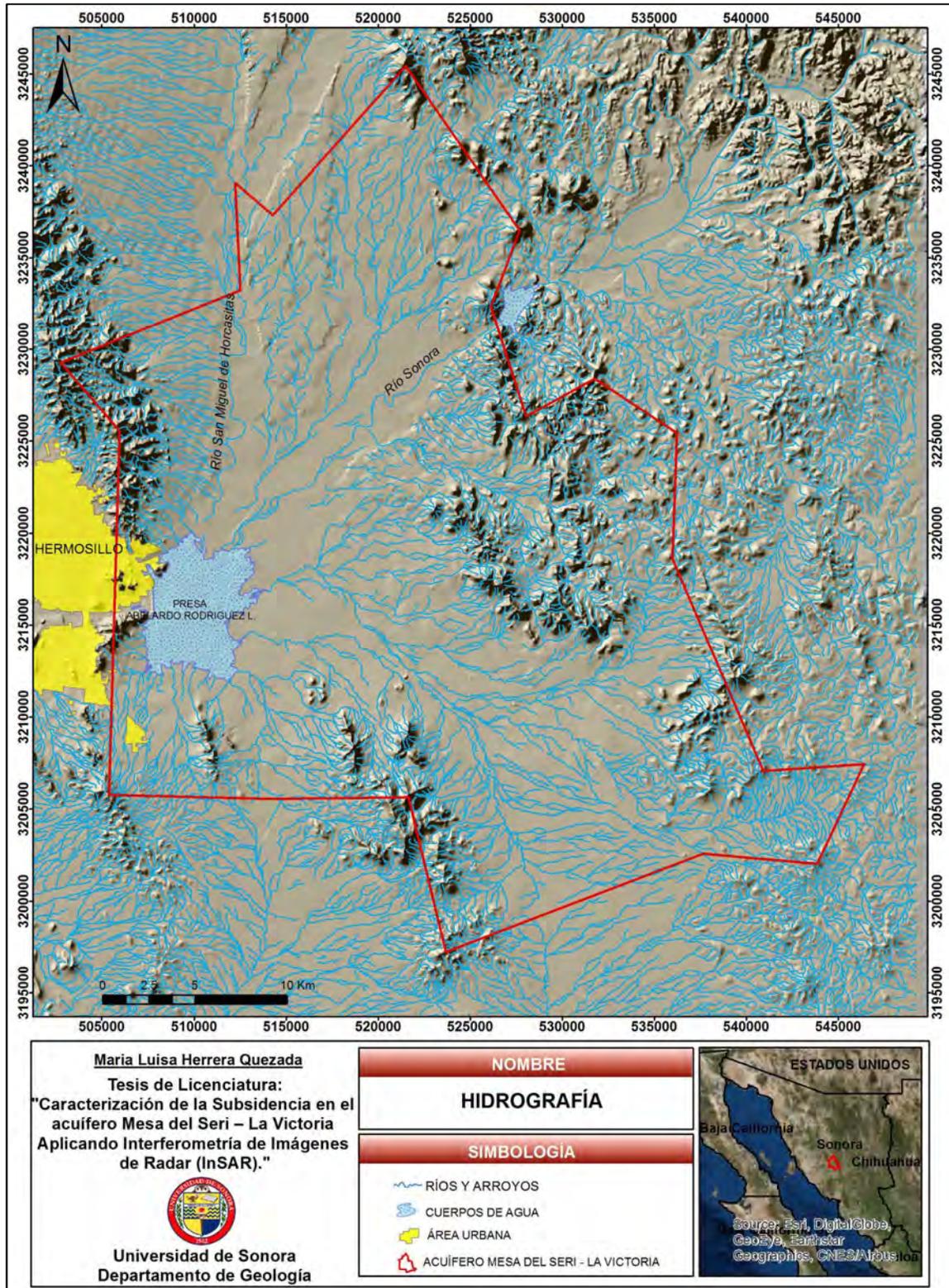


Figura 2.4.- Plano hidrográfico.

El drenaje en la región es principalmente de tipo dendrítico, el agua superficial es retenida en la presa Abelardo L. Rodríguez, la cual recibe el agua proveniente de los Ríos Sonora, San Miguel y el Arroyo La Junta. El principal uso que se le da al agua de la presa es público – urbano, y en muy baja escala agrícola. También se tienen algunas pequeñas represas construidas con fines pecuarios; sin embargo, dada la alta evaporación que predomina en la zona, su almacenamiento es de corta duración.

A lo largo del Río Sonora se tienen numerosos aprovechamientos de las aguas superficiales utilizados principalmente con fines agrícolas. En las márgenes del Río San Miguel existen pequeñas obras de riego, especialmente en la zona de Llano Grande, en San Miguel de Horcasitas y desde Zamora hasta la presa Abelardo L. Rodríguez. En el Río Zanjón, afluente del Río San Miguel, se localizan aprovechamientos para riego en varias zonas, especialmente en el poblado de Querobabi, Sonora.

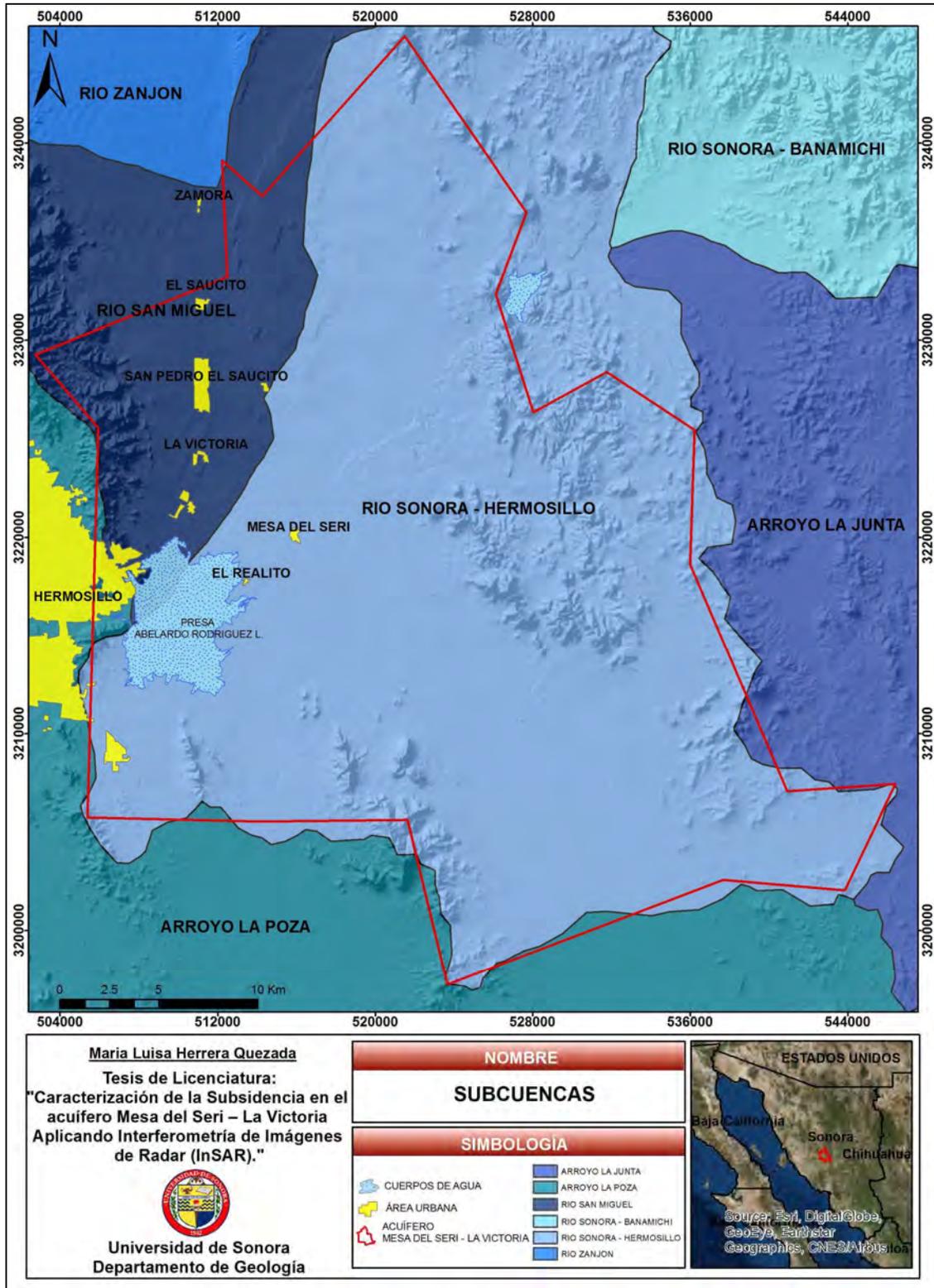


Figura 2.5.- Distribución de subcuencas.

2.4 Suelos

En el estado de Sonora existe una gran variedad de tipos de suelos y los más frecuentes son los yermosoles y los castañozem, ocupando la mayor parte de la superficie de Sonora.

Los yermosoles son suelos claros con buena retención de agua, con drenaje adaptable a las actividades agrícolas; aunque en ocasiones son necesarias algunas obras de conservación, en caso de pendientes pronunciadas. En este tipo de suelos es donde se realiza la mayor parte de la actividad agrícola del Estado.

Los suelos castañozem se encuentran en la parte oriental, centro, norte y sur del Estado. Estos suelos son ricos en materia orgánica, preferentemente dedicados a la actividad pecuaria y no a las agrícolas debido a las fuertes pendientes donde se ubican, principalmente en zonas serranas.

En una menor proporción se encuentran distribuidos los tipos de suelos Litosol, Livosol y Xerosol.

De manera más detallada, dentro de los límites del acuífero Mesa del Seri - La Victoria, se tienen los siguientes tipos de suelos, cuya distribución se observa en la Figura 2.6.

Feozem háplico, con una distribución en el acuífero rumbo al noroeste y sureste, cubriendo una superficie de 22%.

Feozem calcárico cubre un 5%, localizándose principalmente al noroeste del acuífero, lo constituye un amplio rango de materiales no consolidados, una vegetación de matorral o bosque, son suelos fértiles y soportan una gran variedad de cultivos de secano y regadío así como pastizales. Sus principales limitaciones son las inundaciones y la erosión.

Regosol eútrico, con una distribución de 19% en la zona centro y sureste del acuífero.

Regosol calcárico, con un 10% principalmente al norte del área de estudio.

Xerosol háplico, con una distribución del 11% de la superficie del acuífero, particularmente en la zona sur.

Xerosol lúvico cubre el 9% del acuífero, su distribución se centra al sureste del acuífero, son suelos de zonas áridas y semiáridas, con abundante presencia de materia orgánica.

Vertisol Crómico, con una distribución del 12% dentro del acuífero en la parte suroeste, el material original lo constituyen sedimentos con una elevada proporción de arcillas esmectíticas, o productos de alteración de rocas que las generan, la alternancia entre el hinchamiento y la contracción de las arcillas genera profundas grietas en la estación seca y la formación de superficies de presión y agregados estructurales en forma de cuña en los horizontes subsuperficiales.

Litosol, con una distribución del 7% en la superficie del acuífero, constituyen la etapa primaria de formación del suelo, la capa del mismo es menor a 10 cm de espesor, predominando en ella la materia orgánica, con una fertilidad de media a alta. Se presentan en pendientes altas, lo cual impide su explotación económica.

Yermosol lúvico, con el 5% de la superficie del acuífero, característico de zonas áridas con contenido bajo en materia orgánica. Se distribuye hacia la parte oeste y suroeste del acuífero.

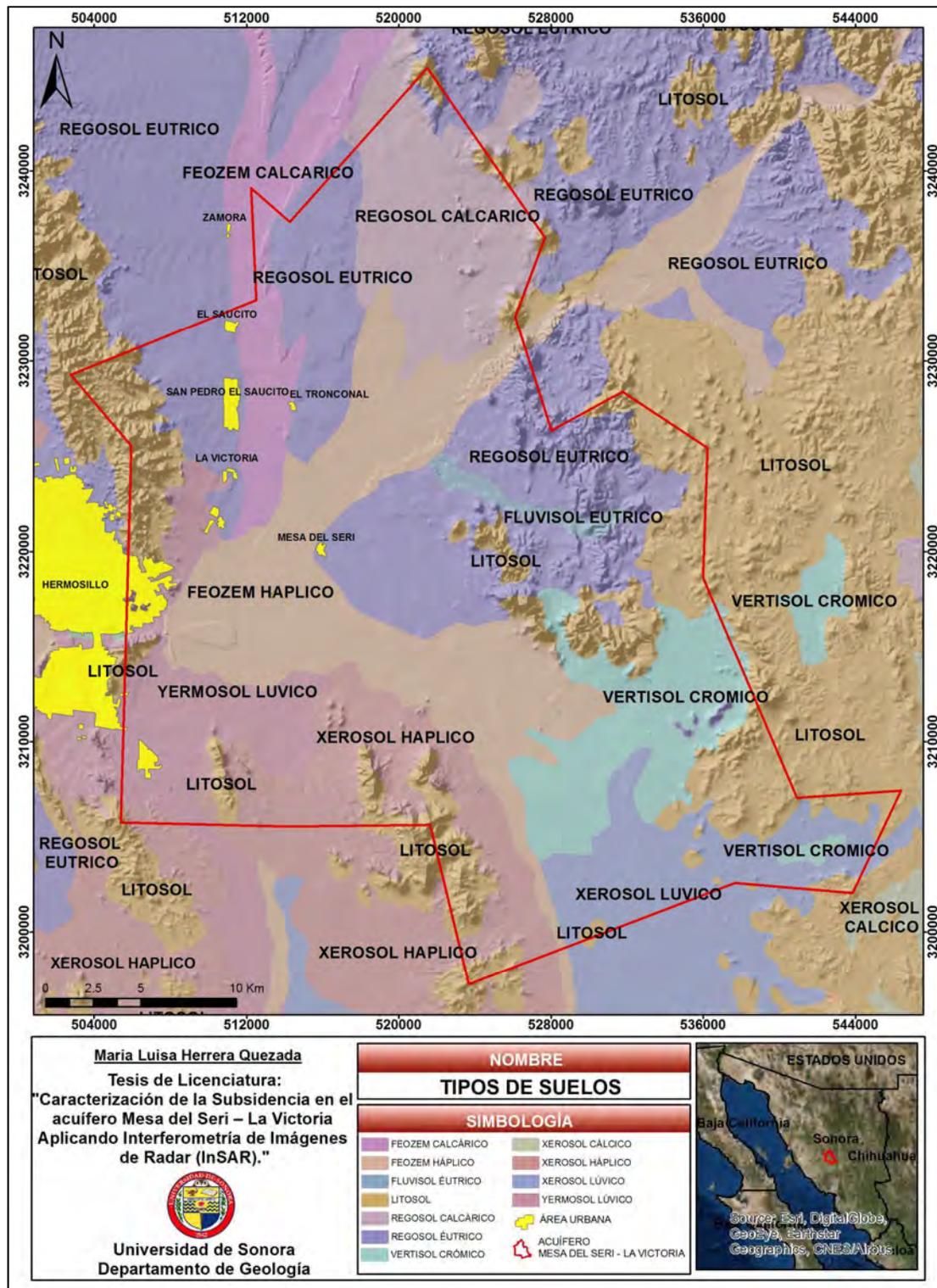


Figura 2.6.- Distribución de suelos en el área de estudio.

2.5 Geología

En la zona de estudio afloran rocas cuyo registro estratigráfico abarca desde el Precámbrico hasta el Reciente. El Precámbrico y Paleozoico están representados por rocas sedimentarias constituidas por areniscas, dolomías y calizas de plataforma, que han sufrido los efectos de metamorfismo regional. La secuencia mesozoica está conformada por sedimentos rojos conglomeráticos del Triásico-Jurásico, asociados con depósitos de ambiente reductor que generaron capas de carbón transformados en grafito.

Las secuencias paleozoicas y mesozoicas se encuentran afectadas por cuerpos ígneos intrusivos de composición granítica y félsica, emplazados durante el Cretácico y el Terciario temprano. Dentro de los límites del acuífero se tienen rocas volcánicas terciarias, constituidas por riolitas y tobas riolíticas que son el resultado de la influencia que ha tenido la proximidad de la Sierra Madre Occidental sobre la región. La zona se caracteriza por presentar una serie de sierras sepultadas por los rellenos sedimentarios que se correlacionan con las Formaciones Báucarit, Maune y Fuerte, depositadas en otras cuencas como son las de la Costa de Hermosillo y las de los Ríos Yaqui, Fuerte y Mayo, (Figura 2.7).

Estratigrafía

A continuación se hace una descripción de la secuencia de unidades expuestas en la zona de estudio, de la más antigua a la más reciente, observándose su distribución en la Figura 2.8, mientras que en la Figura 2.9 se observa su columna estratigráfica.

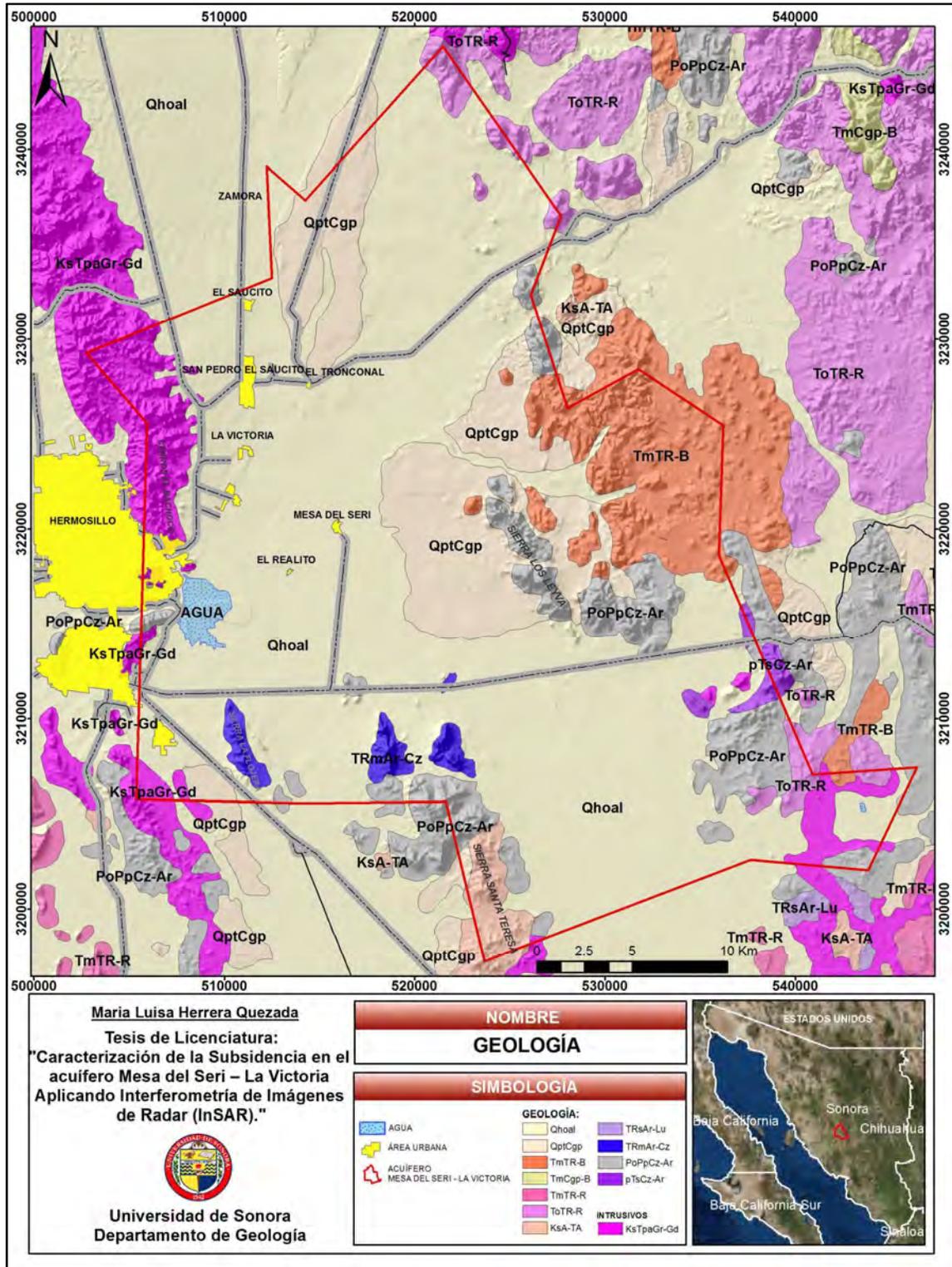


Figura 2.7.- Plano geológico (modificado de SGM, (1999).

Unidad Caliza-Arenisca (pTsCa-Ar). Formaciones El Arpa, Caborca, Clemente, Pitiquito, Gamuza, Papalote, Cuarcita Tecolote y La Ciénega.

Las formaciones agrupadas en esta unidad afloran en la parte centro occidental del estado al sureste de la población de Trincheras, al sur de Pitiquito y sur y suroeste de Caborca. También afloran en la parte centro-norte, al noreste de Hermosillo en las inmediaciones de los Poblados de Rayón y Opodepe y al este de Hermosillo en la Sierra Chiltepín entre los poblados de Bacanora y Sahuaripa. Estudiadas por Eells (1972) como unidades de la 1 a la 12, y posteriormente fueron definidas por Longoria (1978) con los nombres de Formaciones El Arpa, Caborca, Pitiquito, Gamuza, Papalote y Gachupín. Stewart et al (1984) conserva los mismos nombres integrando las Formaciones Clemente (base de la Formación Pitiquito), Tecolote y La Ciénega. Esta unidad se considera de edad de Proterozoico Superior. Se encuentra distribuida en la parte sureste del acuífero en los Cerros El Todillo, El Aprejo, la Calabaza y Del Caballo.

Unidad de caliza, arenisca y limolita (PopsCz- Ar). Grupo Tinajas, formaciones Picacho Colorado y Mina México (informales).

Esta secuencia está constituida por caliza de plataforma fosilífera con corales, crinoides y fusulínidos, con intercalaciones de arenisca de cuarzo y escasa lutita y calcarenitas, hacia la cima está constituida por algunas capas de limolita con algunas capas de arenisca conglomerática y lutita silíceo negra. Noll (1981) nombran y describen la Formación Picacho Colorado y Grupo Tinaja. Hewett y Schmidt (1978) describen informalmente la formación Mina México, Amaya (2004) la redefine y la ubica en el Pérmico medio (Guadalupiano). Ketner y Noll (1987) les asignan una edad de Cámbrico-Ordovícico. Menicucci (1975) reporta fusulínidos del Pérmico Inferior (Wolfcampiano-Leonardiano). En ese trabajo por referencia se asigna al Pérmico inferior-medio. Esta unidad se encuentra aflorando en la parte central, suroeste, noroeste y sureste del área de estudio.

Unidad de Areniscas y Calizas (TRm Ar- Cz).

Está representado por areniscas, limolitas, microconglomerados y alternancia de calizas y cuarcitas. Aflora en la Sierra Flojera, cerros Prieto y Las Hilachas Esta unidad se le asigna una edad del Triásico Medio (Rodríguez, 1981)

Unidad lutita-arenisca (TRsAr-Lu). Grupo Barranca.

Unidad formada por lutita y arenisca, primeramente fueron reportadas por Remond (1866) y después Dumble (1900) les asignó el nombre de “División Barranca”. Posteriormente King (1939) las denomina Formación Barranca, asignándole una edad del Triásico Superior -Jurásico Inferior. Alencaster (1961) propone modificar el rango, de Formación a Grupo Barranca, dividiéndolo en tres formaciones, que de la base a la cima son: Formación Arrayanes, Formación Santa Clara y Formación Coyote. Esta unidad aflora en la porción Sureste del acuífero.

Unidad de andesita y toba andesítica (KsA-TA). Formación Tarahumara

Esta unidad consiste de toba y derrames de composición andesítica, toba riolíticas con intercalaciones de rocas sedimentarios, definida por Wilson y Rocha, 1946, como Formación Tarahumara; las edades varía entre 70 y 90 Ma del Cretácico Superior-Paleoceno (McDowell et al., 1994). En estas rocas también se incluyen otras unidades formales e informales como la Formación El Chanate, la formación Mesa, y la formación El Tuli. Se observan afloramientos de esta unidad en el Cerro el Calvo y Sierra Santa Teresa.

Unidad ignimbrita-toba riolítica (ToR-TR, TmTR-R)). Grupo Yécora (informal).

Grupo Yécora (informal) propuesto por Grijalva-Noriega y Roldán-Quintana (1998) para agrupar a todas las rocas volcánicas y piroclásticas de composición ácida con basaltos que afloran principalmente en la porción superior de la Sierra Madre Occidental en Sonora. A continuación se describen las unidades informales que afloran en el área de estudio.

Unidad Riolita – Toba riolítica (ToTR-R)

Definida informalmente. Se presenta en las porciones centro, noreste y sureste del estado. Está constituida por ignimbritas, tobas, brechas riolíticas, riolitas, aglomerados, riodacitas y dacitas, con edades de: 24 ± 0.4 , 27.1 ± 0.9 , 31.2 ± 0.7 , a 39.2 Ma. Damon et al (1983), McDowell (1997), M. Kunk (1994), aflorando al noreste, sureste del acuífero.

Unidad Riolita – Toba riolítica. (Tm TR-R)

Unidad informal. Aflora en la porción sureste del estado en las inmediaciones de Álamos. Está cubierta volcánica está constituida de ignimbrita, toba riolítica, toba lítica y riolita con vitrófidos hacia la base, en Cucurpe reportan edades de $22.7\pm$ Miranda y Jong (1992). En el acuífero se observan pequeños afloramientos hacia el sureste y noroeste.

Unidad Toba Riolítica-Basalto (TmTR-B)

Unidad informal que se presenta en la parte sureste del estado, en las rancherías El Colorado, El Pedregoso, Sierra La Laguna, Se presenta una secuencia de andesitas con intercalaciones de riolitas e ignimbritas conforman las partes altas de las sierras cubriendo a la secuencia de ignimbritas. Con edades radiométricas de 24.0 a 27.0 ± 0.6 Ma. Aflora en la parte central y otros pequeños al noreste y sureste.

Unidad conglomerado polimíctico-arenisca (TmCgp-Ar). Formación Baucarit.

Dumble (1900) lo definió como Formación Báucarit; Posteriormente Grijalva-Noriega y Roldán-Quintana (1998). Lo incluyen en el Grupo Yaqui. Aflora en la porción norte, noreste centro sur, sureste, del estado. Litológicamente está constituido por conglomerados polimícticos de rocas volcánicas e intrusivas, con intercalaciones de areniscas y basaltos principalmente, gravas y arenas poco consolidadas con espesores variables de 100 a 700.

Se tiene edades de radiométricas de K/Ar 10.4 ± 0.2 Ma Bartollini et al (1991), Se tienen 15 muestras datadas por K/Ar con edades que variables de 10.3 ± 0.3 a 23.5 ± 0.8 Ma, (Cochemé 1985, Montigni 1987, Demant 1991, M.Kunk 1994, Demant 1991, Mora.A,G.

1993, Gans 1997, Gastil y Krummenacher 1977). Esta unidad aflora un pequeño afloramiento en la parte noreste.

Conglomerado polimíctico (QptCgp). Grupo Sonora (informal).

Wilson (1948) propuso el nombre de Formación Infierno para referirse a esta unidad, pero posteriormente, Grijalva-Noriega y Roldán-Quintana (1998), la asignan al grupo Sonora (informal). Consiste de conglomerado polimíctico semiconsolidado y consolidado, con fragmentos de rocas riolíticas, andesíticas, graníticas, metamórficas y calcáreas contenidos en una matriz arenosa, formando depósitos de talud y terrazas con espesores variables de 20 a 50 m. Descansan discordantemente sobre todas las unidades y solo está cubierta por depósitos sin consolidar aluviales, lacustres y eólicos. Por su posición se le ubica en el Pleistoceno. Se correlaciona en edad con los basaltos del campo volcánico Moctezuma en donde se tienen edades de 0.53, y 1.7 Ma que indican una edad del Pleistoceno (Paz-Moreno et al., 2003). La unidad se depositó en cuencas someras formando abanicos aluviales. Esta unidad se presenta en la parte Noroeste y Suroeste del área de estudio.

Unidad Aluvión (Qhoal).

Esta unidad está compuesta por sedimentos no consolidados, principalmente gravas, arenas, limos y arcillas con espesores variables de más de 50m. Aflora en los valles y en los arroyos del área de estudio. Cubre a todas las unidades desde las precámbricas hasta las pleistocénicas. El ambiente de depósito son lechos de arroyos, ríos, planicies y valles costeros. Esta unidad se presenta muy ampliamente distribuida en área de estudio.

Unidad granito-granodiorita (KsTpaGr-Gd). Batolito Laramide (informal), suite intrusiva El Jaralito (informal).

Esta unidad forma parte del batolito Laramide que aflora ampliamente en el noroeste de México y fue ampliamente estudiado por Damon et. al. (1983). Posteriormente fue informalmente propuesto el nombre de suite intrusiva El Jaralito por Grijalva-Noriega y Roldán-Quintana (1998), esta unidad litodémica trata de agrupar aquellos afloramientos de rocas intrusivas de composición principalmente ácida a intermedia, cuyas edades varían desde el Cretácico Temprano al Eoceno, los cuales son muy abundantes a lo largo de toda la geografía del estado de Sonora. En el área de estudio solo se observan afloramientos en el norte suroeste y sureste. Con edad que va de 90 a 40 M.a. según Damon et al. 1983.

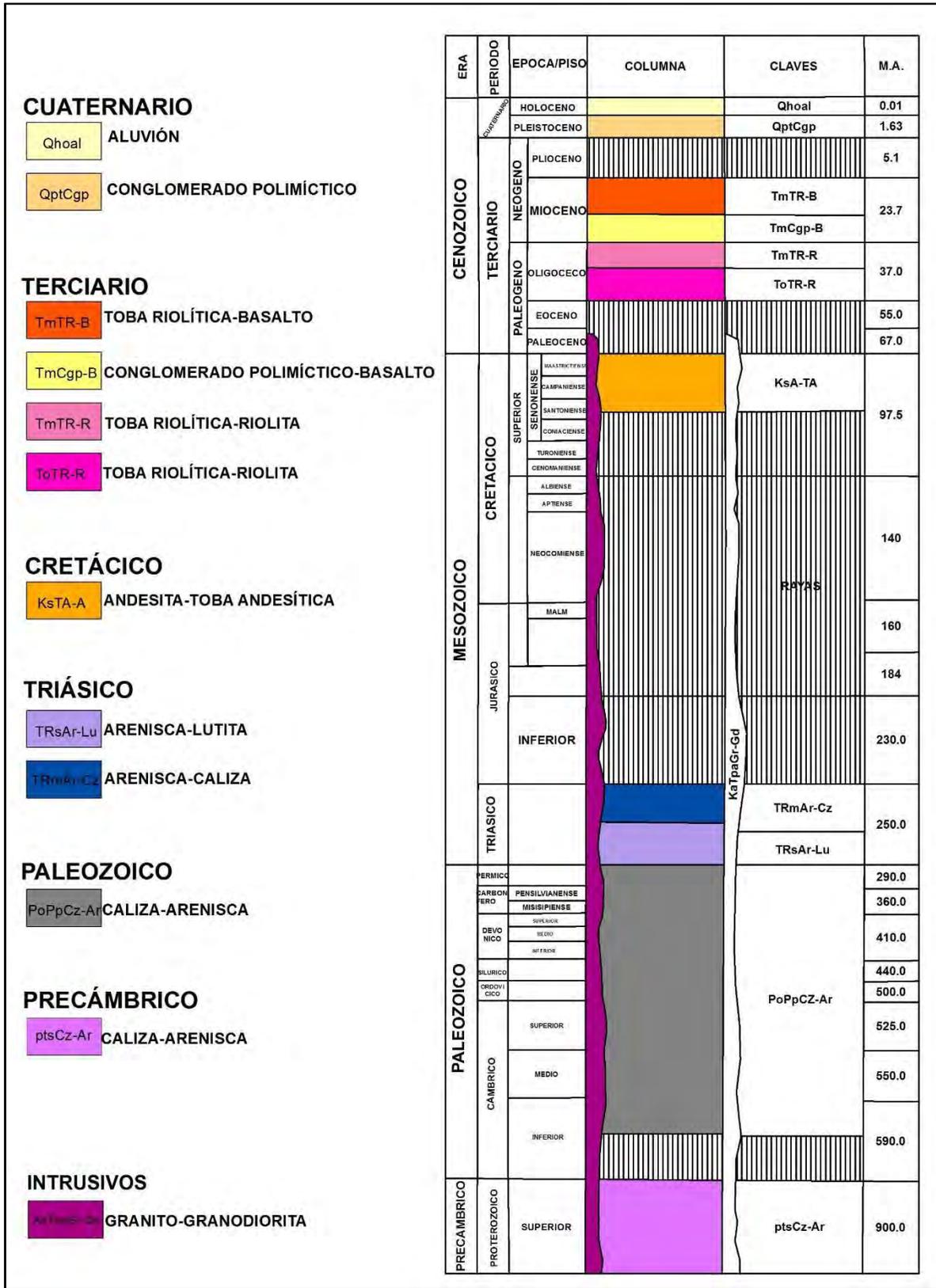


Figura 2.8.- Columna Estratigráfica (modificado de SGM, 1999).

3 FUNCIONAMIENTO ACUÍFERO

3.1 Unidades Hidroestratigráficas

Con la información geológica existente y la información obtenida de estudios previos, se definieron, identificaron y describieron a detalle las unidades hidrogeológicas existentes.

Las unidades geohidrológicas son constituidas por uno o varios tipos de material, han sido definidas tomando en consideración las características físicas (como porosidad, disolución, fracturamiento y estructura o grado de cementación) y geohidrológicas (como permeabilidad, transmisibilidad, etc.) de las rocas y materiales granulares, con el fin de determinar el funcionamiento de las mismas como acuíferos y acuitardos, clasificándolas en Unidades de Material Consolidado con Posibilidades Altas, Medias y Bajas y, Unidades de Material No Consolidado con Posibilidades Altas, Medias y Bajas (Figura 3.1), como resultado se obtuvieron cuatro unidades, las cuales se describen a continuación;

UNIDAD I.- Permeabilidad Baja con Materiales Consolidados (PoPpCz-Ar, KsTpaGr-Gd, TRmAr-Cz, TRsAr-Lu).- Las unidades litológicas formadas por rocas del Paleozoico, Cretácico y Triásico presentan características de muy baja permeabilidad, formando verdaderas barreras al flujo del agua subterránea, asimismo, por las características físicas de compacidad, estas rocas son de naturaleza impermeable, ya que responden de manera negativa al flujo y al almacenamiento de agua subterránea.

Por otra parte, las rocas del Mesozoico presentan una permeabilidad que varía de baja a media-baja; también fue agrupada dentro de la unidad geohidrológica de material consolidado con posibilidades bajas porque no permiten el flujo y el almacenamiento de agua subterránea. Sin embargo, el grado de alteración y fracturamiento que presentan algunas de las rocas ígneas, les permite almacenar cantidades mínimas de agua, sin llegar a transmitirla a otras unidades litológicas.

Se agrupan en la unidad de material consolidado con posibilidades bajas a las rocas metamórficas (esquisto y gneis), sedimentarias (caliza y conglomerado) y extrusivas ácidas (riolita y tobas) que por su origen, escaso fracturamiento y baja porosidad limitan en alto grado la circulación del agua. Dichas rocas se distribuyen en las llanuras, pero dominan sobre todo en los sistemas serranos.

UNIDAD II.- Permeabilidad Alta con Materiales No Consolidados (Qhoal, QptCgp). Las unidades litológicas del Cuaternario, que al estar formadas por materiales aluviales y fluviales como boleos, gravas y arenas, tienen una distribución horizontal muy reducida, ya que se encuentran supeditados a los cauces de los ríos, arroyos y planicies de inundación. Pertenecen a esta unidad los depósitos constituidos por conglomerado, grava, arena y arcillas, con buena selección y porosidad intercomunicada.

Esta unidad comprende a las llanuras aluviales situadas desde el suroeste de la zona de estudio (Presa Abelardo L. Rodríguez en Hermosillo) hasta el noreste (Presa El Molinito) y constituyen los acuíferos libres de alta transmisividad con altos valores de caudales específicos y es en éstos donde se tiene el mayor número de aprovechamientos subterráneos.

UNIDAD III.- Permeabilidad Media con Materiales No Consolidados (ToTR-R, TmTR-B, TmCgp-B). Estas unidades se localizan en la parte noreste de la zona de estudio en áreas intermontanas muy reducidas.

UNIDAD IV.- Permeabilidad Media Con Materiales Consolidados (pTsCz-Ar). Unidad litológica formada por rocas del Precámbrico, localizada en una pequeña porción al sureste del acuífero en la cercanías del rancho Las Norias.

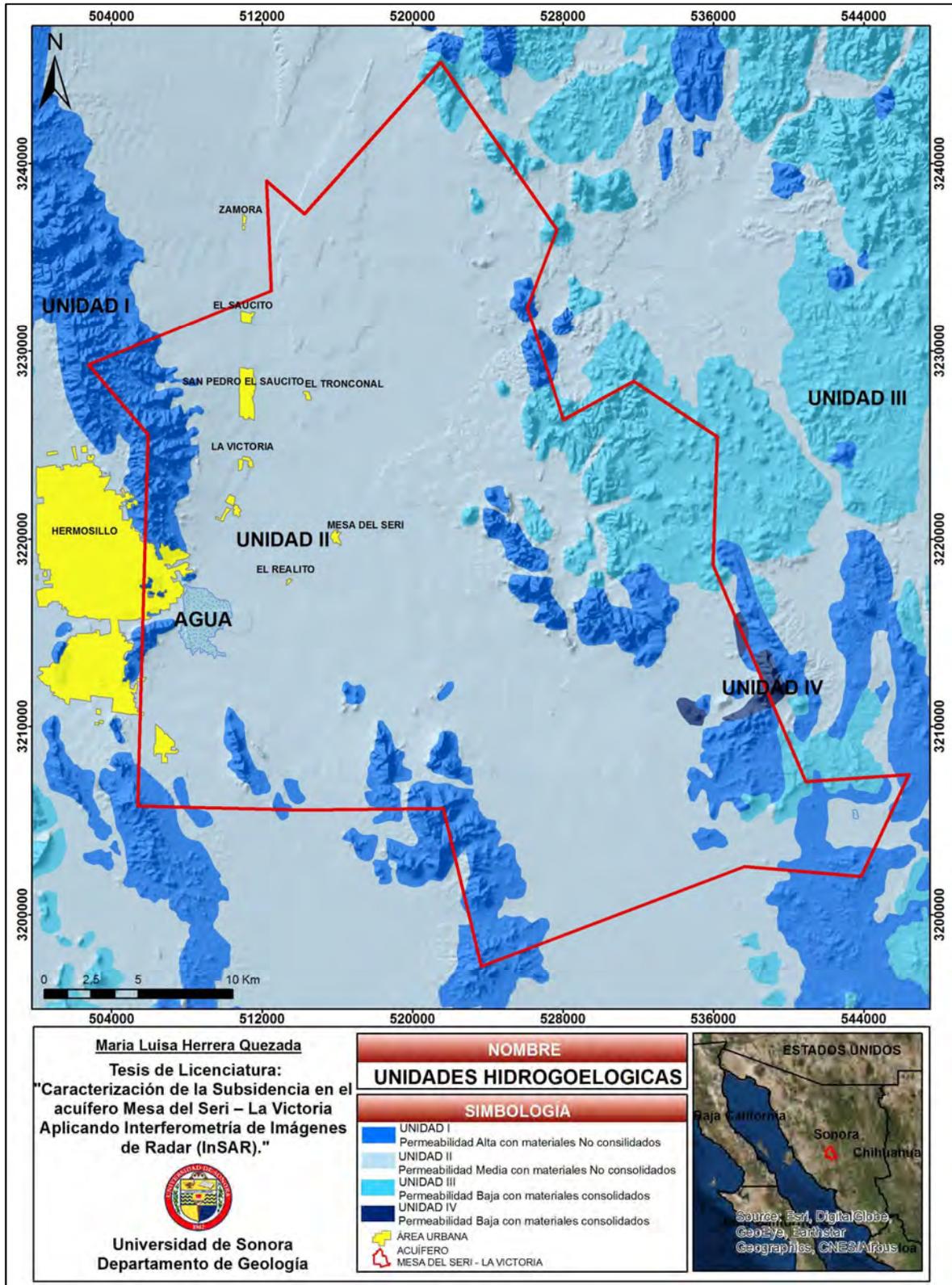


Figura 3.1.- Unidades Hidrogeológicas.

3.2 Geometría del sistema

Destacan las condiciones de semiconfinamiento del acuífero, ya que su funcionamiento está relacionado a un sistema libre, esto debido a lentes irregulares de sedimentos arcillosos. El sistema acuífero se forma por varios horizontes de continuidad lateral no definida, cuyas permeabilidades, tal como lo expone el párrafo siguiente, son variadas.

El contacto de las unidades permeables con zonas serranas es irregular, tal como lo evidencia los resultados de sondeos geofísicos en el apartado correspondiente, mostrando que el basamento granítico se localiza a un máximo de 100 m de profundidad; sin embargo, en zonas específicas de la porción occidental del acuífero, no fue detectado en al menos 800 m de profundidad.

Depósitos granulares rellenan una fosa tectónica, por lo cual sus límites laterales están definidos por las Sierras El Espinazo Prieto al occidente y Los Leyva al oriente, mientras que al noroeste existe un límite definido.

3.3 Parámetros hidráulicos

La información que se muestra fue tomada del informe “Estudio de evaluación hidrogeológica del acuífero Mesa del Seri - La Victoria” ⁽¹⁶⁾ (IDEAS, 2007). Las pruebas de bombeo referidas en el estudio se ejecutaron a caudal constante, midiendo los descensos del nivel dinámico en el pozo de explotación, durante el período de bombeo hasta obtener el nivel de estabilización. Cada medición se realizó a diferentes intervalos de tiempo, siendo la primera a los 15 segundos, luego a los 30, 45, 60, 120, 240, 480, 900, 1800, 2700, etc., hasta lograr la estabilización del nivel dinámico.

En el estudio mencionado, los valores de transmisividad obtenidos en 10 pruebas de bombeo se complementaron con la recopilación de otras pruebas realizadas en otros informes. Las interpretaciones fueron realizadas usando el software Aquifer Test Pro, bajo el método de Theis and Jacob correction y Hantush-Jacob (Walton), para acuíferos semiconfinados. Las pruebas de bombeo fueron de corta duración y los

resultados fueron analizados en la etapa de abatimiento. La distribución de estas 10 pruebas y las de recopilación no se encuentran distribuidas uniformemente en el área, sino que se encuentran en la parte oeste – noroeste.

En esa zona existen las condiciones técnicas de los pozos para llevarlas a cabo y debido también a que se concentran la mayor cantidad de aprovechamientos en el acuífero, mientras que en el lado oriente los pozos son escasos y muchos de ellos no tienen las condiciones necesarias para realizar una prueba de bombeo.

De la geofísica e interpretación geológica, se concluye que en la zona el material aluvial tiene un espesor pequeño (del orden de los 15 m), subyacente por material rocoso (calizas), cuya permeabilidad es debida a grietas y fisuras, tanto de origen mecánico como de disolución, tomando así importancia hidrogeológica. Para fines de las posibles respuestas a un bombeo en este tipo de acuíferos en roca, cabe mencionar que son capaces de almacenar una cantidad de agua considerable por unidad de volumen de acuífero, por lo tanto son medianamente rápidos y con moderada inercia.

Respecto al acuífero en el relleno aluvial, se puede decir que las transmisividades son muy homogéneas, tienen un valor medio de $3.42 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, alcanzando máximos de $1.86 \times 10^2 \text{ m}^2/\text{s}$, (pozo La Herradura) y la mínima de $8.21 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (pozo SUR-5). El valor medio de la transmisividad indica que se trata de un acuífero semiconfinado.

Los cortes litológicos de varios pozos muestran que existen capas de arcillas entre el acuífero libre y el acuífero profundo. El corte litológico típico muestra que los primeros metros están constituidos por material granular como arenas, gravas y boleos con poca presencia de arcillas hasta llegar a un material semipermeable de arenas empacadas en arcillas con un espesor de 20 m y posteriormente material granular, hasta encontrar en la base una arcilla que sirve como substrato como el basamento hidrogeológico del acuífero.

Para el 2003, la información disponible muestra que los resultados de pruebas son bastante homogéneas, teniendo una transmisividad del orden de $1.72 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ la media. El valor máximo es de $1.66 \times 10^1 \text{ m}^2/\text{s}$ presentado en el pozo con clave MS-7, cuyo corte litológico está constituido de material granular principalmente. El menor valor de trasmisividad es $5.23 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ en el sitio MS-3.

La conductividad hidráulica del mismo acuífero aluvial presenta valores que oscilan entre $1.23 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ y $7.08 \times 10^{-6} \text{ m/s}$. Localmente presenta heterogeneidades originadas por las distintas capas productoras intercaladas con variaciones texturales. A corta distancia, las variaciones de la conductividad hidráulica dan lugar a distintos niveles que no resultan fáciles de correlacionar, por lo que la configuración de curvas de isovalores de conductividad hidráulica no se pudo realizar.

Podemos mencionar que la mayor conductividad hidráulica es del orden de $1.25 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, perteneciente al pozo González, que se encuentra localizado en la parte norte y apartado de la concentración de sitios con ensayos, en tanto que la menor se presentó en el pozo SUR-5, con $7.08 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, ubicado al sur-suroeste de la zona de concentración de aprovechamientos. Como representativa de la zona se puede tomar una conductividad hidráulica de $6.35 \times 10^{-5} \text{ m/s}$.

Para poder determinar el coeficiente de almacenamiento en una unidad acuífera es necesario contar al menos con un pozo de observación en cada prueba de bombeo, condición que no se realizó en los estudios previos consultados, por lo que no se presentan coeficientes de almacenamiento calculados. Sin embargo, para el tipo de acuífero estudiado, los valores de coeficiente de almacenamiento se encuentran en el rango de 0.05 a 0.25 (5 a 25%). Éstos fueron obtenidos por el método de tanteo con las muestras de los terrenos, comparando sus curvas granulométricas con otros estandarizados, según (CNA, Marzo de 1999).

3.4 Rasgos indicadores de sistemas de flujo

Existe una recarga vertical producto de precipitaciones pluviales; asimismo, destaca la familia de agua bicarbonatada cálcica, con niveles piezométricos someros y posibles acuíferos colgados delimitados por lentes arcillosos, también someros.

La presencia de un sistema de flujo de tipo intermedio lo evidencian las equipotenciales de la elevación de nivel estático, que muestran entradas subterráneas al sistema acuífero provenientes de sierras aledañas. Existen familias de agua asociadas a la firma sódico-bicarbonatada, lo cual implica que el agua de lluvia ya tuvo interacción con el medio geológico por donde esta circula, dando soporte a la presencia de este sistema de flujo intermedio.

No existe evidencia de la presencia de agua caracterizada como sódico-clorurada ni aprovechamientos que extraigan agua termal, por lo cual no se considera, a reserva de estudios especializados, la presencia del sistema de flujo tipo regional en el acuífero en estudio.

3.5 Hidrogeoquímica

De acuerdo con estudios consultados (CONAGUA, 1999 Y CONAGUA, 2009), se tiene que el agua subterránea de la zona de estudio tiene una interacción con las rocas de origen ígneo que conforman la zonas de recarga al acuífero. La familia de agua predominante es la sódica-bicarbonatada, que representa agua de reciente infiltración, aunque localmente se identifica a predominancia de sulfatos y cloruros, éstos últimos posiblemente asociados a la influencia hidrotermal (GYMSA, 1990); existen manifestaciones de su presencia en la zona aledaña a la falla normal que pone en contacto la granodiorita cretácica con los materiales granulares, desde La Victoria hasta San Pedro El Saucito.

En algunos pozos de la captación La Victoria, en la zona de El Alamito y La Resolana, cuyas profundidades varían entre 100 y 300 m, se han detectado concentraciones de flúor (1.8 a 3.6 mg/l) y arsénico (0.0056 a 0.084 mg/l) que sobrepasan la norma oficial para el agua destinada al consumo humano.

Estas evidencias señalan la existencia de una estratificación en la calidad del agua: una serie de flujos locales que se presentan en los rellenos granulares y un sistema de flujo regional que se caracteriza por una mayor temperatura y concentración de elementos como el flúor y arsénico. Recientemente, en el año 2007, se realizó el análisis fisicoquímico a 10 muestras de agua de pozos representativos distribuidos en el acuífero.

De acuerdo con sus resultados, se observa que las concentraciones de Sólidos Totales Disueltos (STD) varían de 300 a 500 ppm, registrándose los valores más bajos hacia la presa El Molinito y los más altos hacia el poblado La Victoria y el vaso de la presa Abelardo L. Rodríguez.

Esta condición tan favorable se puede explicar debido al reducido tiempo de permanencia del agua, y al efecto de disolución que se produce al infiltrarse el agua de lluvia o el agua desfogada de la presa El Molinito a través del cauce del Río Sonora.

4 PROSPECCION GEOFISICA

4.1 Sondeos existentes y reinterpretación

La geofísica se define como la ciencia que investiga la naturaleza física de la tierra. La prospección geofísica se puede definir como un conjunto de técnicas físico-matemáticas, aplicadas a la exploración del subsuelo por medio de observaciones efectuadas sobre la superficie de la tierra. Dichas observaciones consisten en la medición de alguna propiedad física de los materiales del subsuelo (resistividad eléctrica, densidad, elasticidad, etc.).

La exploración geofísica es la prospección de estructuras geológicas y de depósitos minerales realizada por medio de la medición de ciertas cantidades físicas, verificadas en la superficie del terreno como fenómenos que pueden ser interpretados por las leyes fundamentales de la física y el empleo de instrumentos adecuados.

La realización de la prospección geofísica con diferentes métodos auxilia a la geología para investigar las condiciones del subsuelo y localizar mediante estudios y mediciones superficiales, así como sustancias explotables contenidas en él, tales como petróleo, agua, depósitos minerales, etc.

La experiencia ha demostrado que muchas estructuras del subsuelo y depósitos minerales, pueden ser localizadas siempre que existan diferencias detectables en sus propiedades físicas, de entre las principales: densidad, magnetismo, elasticidad y conductividad eléctrica. Estas originan cuatro métodos geofísicos: Gravimétrico, Magnético, Sísmico y Eléctrico.

Para estudios de acuíferos, los métodos de resistividad eléctrica pueden ser muy útiles, por ejemplo son los únicos que detectan la profundidad de la interfase de agua dulce y agua salada, ningún otro método como el de gravimetría, magnéticos o sísmicos, puede proporcionar esta información; por ejemplo, una capa de arcilla separando dos acuíferos puede ser detectada fácilmente, en cambio esta misma capa de arcilla de baja velocidad puede causar errores al estimar la profundidad, con el método de refracción sísmica.

La gravimetría es un método muy importante en la búsqueda de depósitos minerales, petróleo, aguas subterráneas, entre otros. Este método aprovecha las diferencias de la gravedad en distintos sectores. Grandes cuerpos mineralizados pueden aumentar la gravitación en una región determinada porque rocas de mayor densidad aumentan la aceleración.

El método gravimétrico hace uso de campos de potencial natural igual al método magnético y a algunos métodos eléctricos. Se realiza a través de mediciones relativas, midiendo las variaciones laterales de la atracción gravitatoria de un lugar a otro, puesto que en estas mediciones se puede lograr una precisión satisfactoria más fácilmente, en comparación con las mediciones del campo gravitatorio absoluto. Los resultados

se expresan en miligals y los tipos de prospección varían de terrestre a marina, generalmente en brigadas de cinco a ocho elementos.

De varios estudios se han realizado en los últimos años alrededor de 140 sondeos eléctricos verticales entre estos está un estudio realizado por la Universidad de Sonora ⁽¹⁴⁾ (2006), en el cual se usaron los métodos geofísicos gravimétricos para conocer el relieve del basamento y el de Resistividades Eléctricas (SEV) para conocer la hidroestratigrafía. Como complemento al estudio mencionado se reinterpretaron 35 sondeos eléctricos verticales efectuados por TMI y 30 realizados por GYMSA. A continuación se presenta un resumen del desarrollo del método de Resistividad que realizó dicho estudio.

En el estudio mencionado anteriormente, en los sondeos eléctricos, se realizaron cerca de cien SEV's. De los resultados de los modelos óptimos obtenidos y de la información disponible de los niveles freáticos se construyeron cuatro secciones geoelectricas las cuales se muestran en este capítulo haciendo una breve descripción, figura 4.1.

Las secciones geoelectricas fueron nombradas de la siguiente manera; La Victoria, La Victoria 2, Reforma y San Pedro-el Chino. Las cuales permitieron diferenciar al menos cuatro unidades geoelectricas, Ug1, Ug2, Ug3 y Ug4, donde:

Ug1: zona de paleocauces, gravas y arenas con poca arcilla.

Ug2: arenas finas.

Ug3: arcillas.

Ug4: Basamento cristalino.

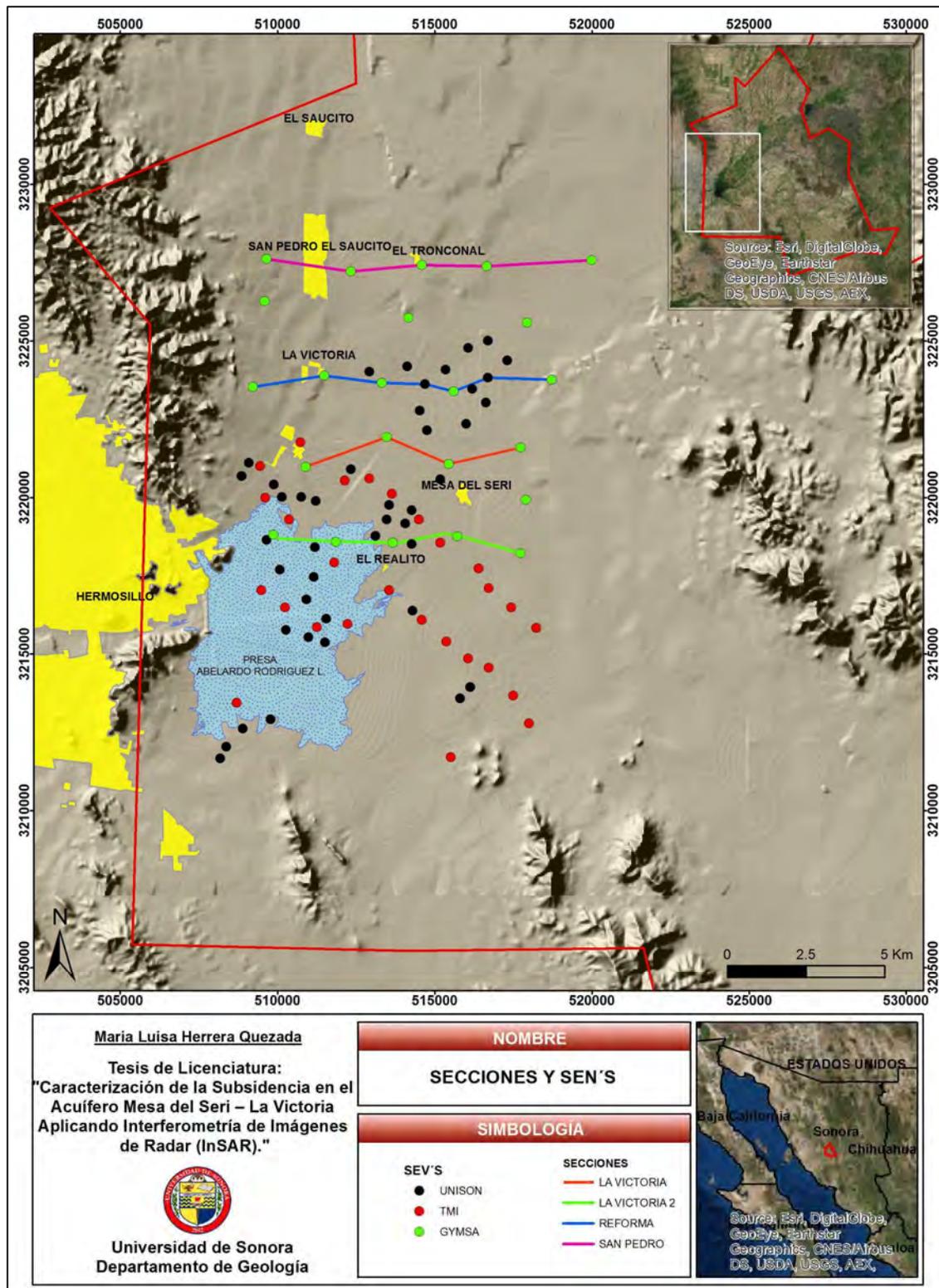


Figura 4.1.- Ubicación de SEV'S y secciones geoelectricas, (UNISON, 2006).

Sección Geoeléctrica San Pedro - El Chino.

Esta sección está constituida por cinco sondeos eléctricos verticales, con espaciamientos variables, cubriendo una longitud del orden de los 10.5 kilómetros. Inicia al poniente del poblado de San Pedro El Saucito y termina al noreste del campo agrícola El Chino, sobre la margen derecha del río Sonora, figura 4.2.

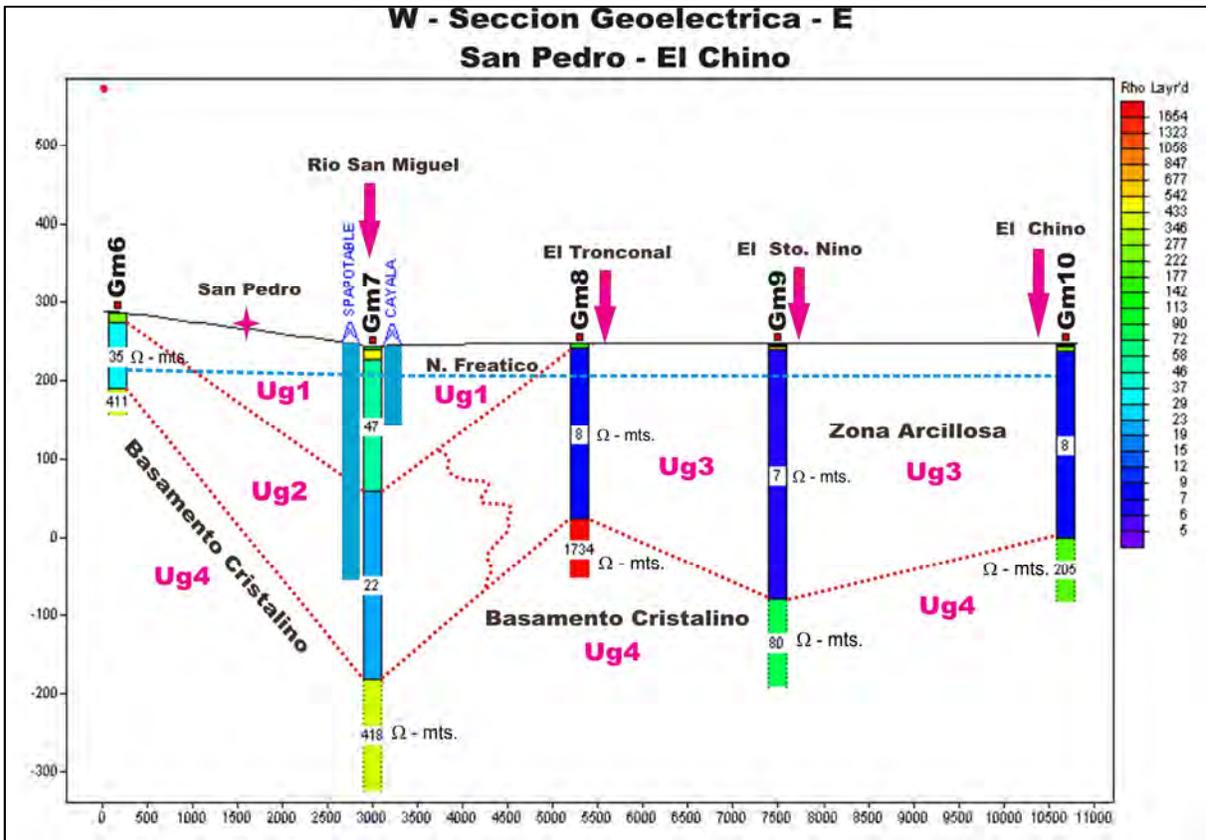


Figura 4.2.- Sección geoelectrica San Pedro-El Chino.

Sección Geoeléctrica Reforma.

Esta sección está constituida por siete sondeos eléctricos verticales con espaciamientos variables cubriendo una longitud del orden de los 10 kilómetros. Inicia al poniente del poblado El Tazajal, sobre la carretera internacional y termina en el campo El Leópari, sobre la margen izquierda del río Sonora, figura 4.3

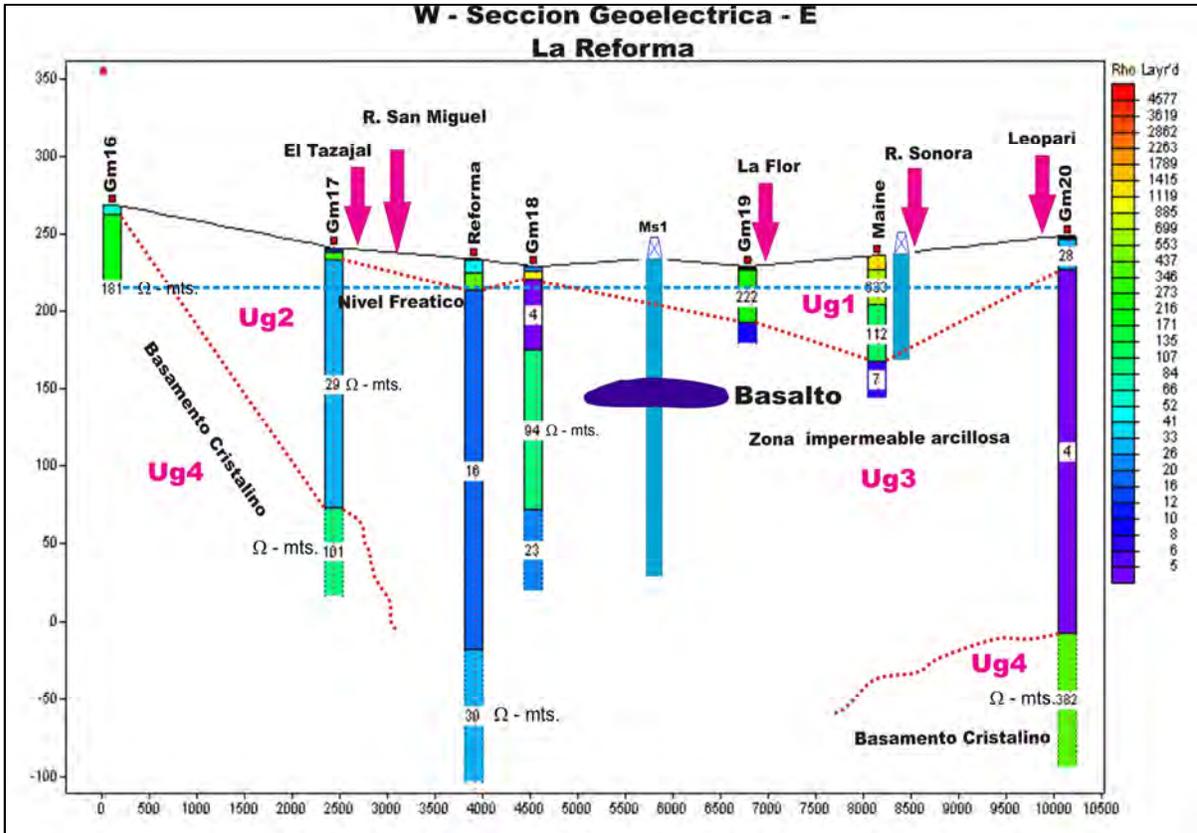


Figura 4.3.- Sección geoelectrica Reforma.

Sección Geolétrica La Victoria.

Esta sección está constituida por cuatro sondeos eléctricos verticales con espaciamientos variables, cubriendo una longitud del orden de los 7 kilómetros. Inicia al sur del poblado La Victoria, y termina sobre el camino que conduce de La Mesa del Seri a San Bartolo hacia la margen izquierda del río Sonora, figura 4.4.

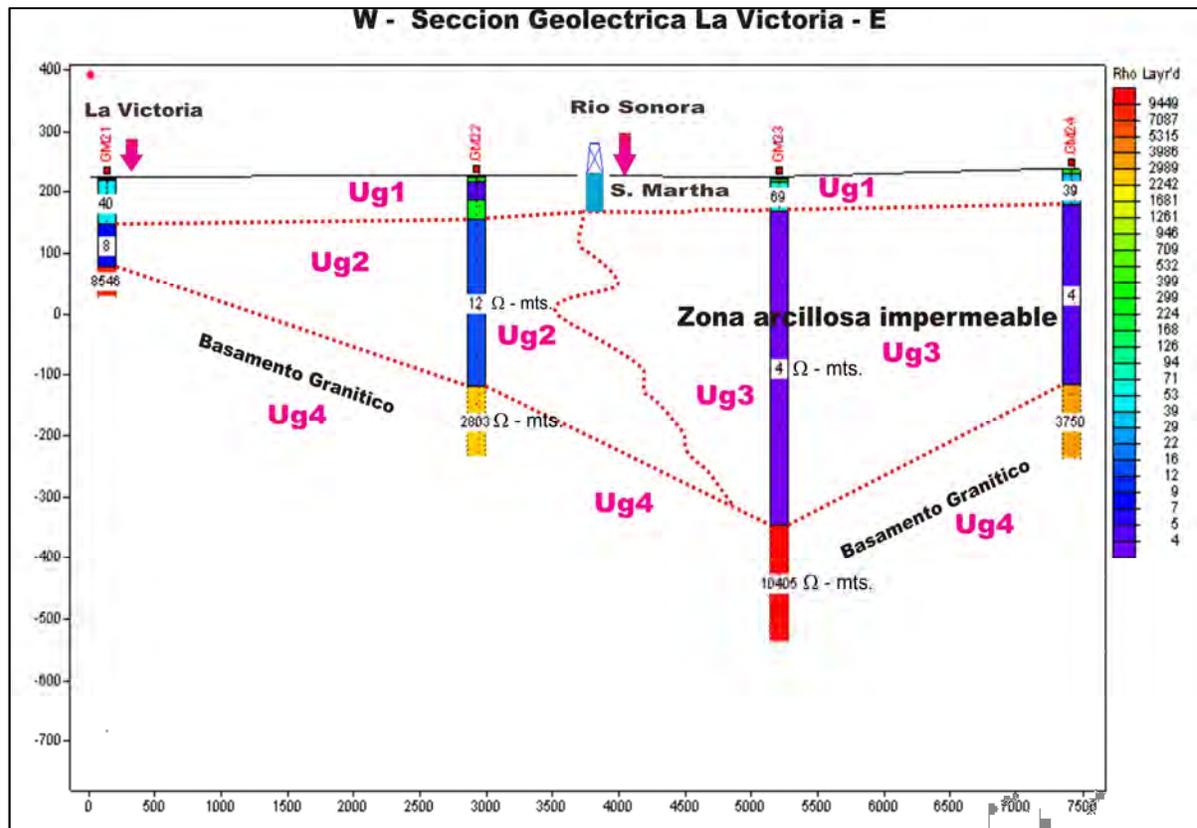


Figura 4.4.- sección geoelectrica La Victoria.

Sección Geoelectrica La Victoria2.

Esta sección está constituida por tres sondeos eléctricos verticales con espaciamento máximo de 700 metros cubriendo una longitud del orden de los 1.1 kilómetros. Inicia al suroeste del poblado La Victoria, y termina al noroeste del rancho San Juanico, figura 4.5.

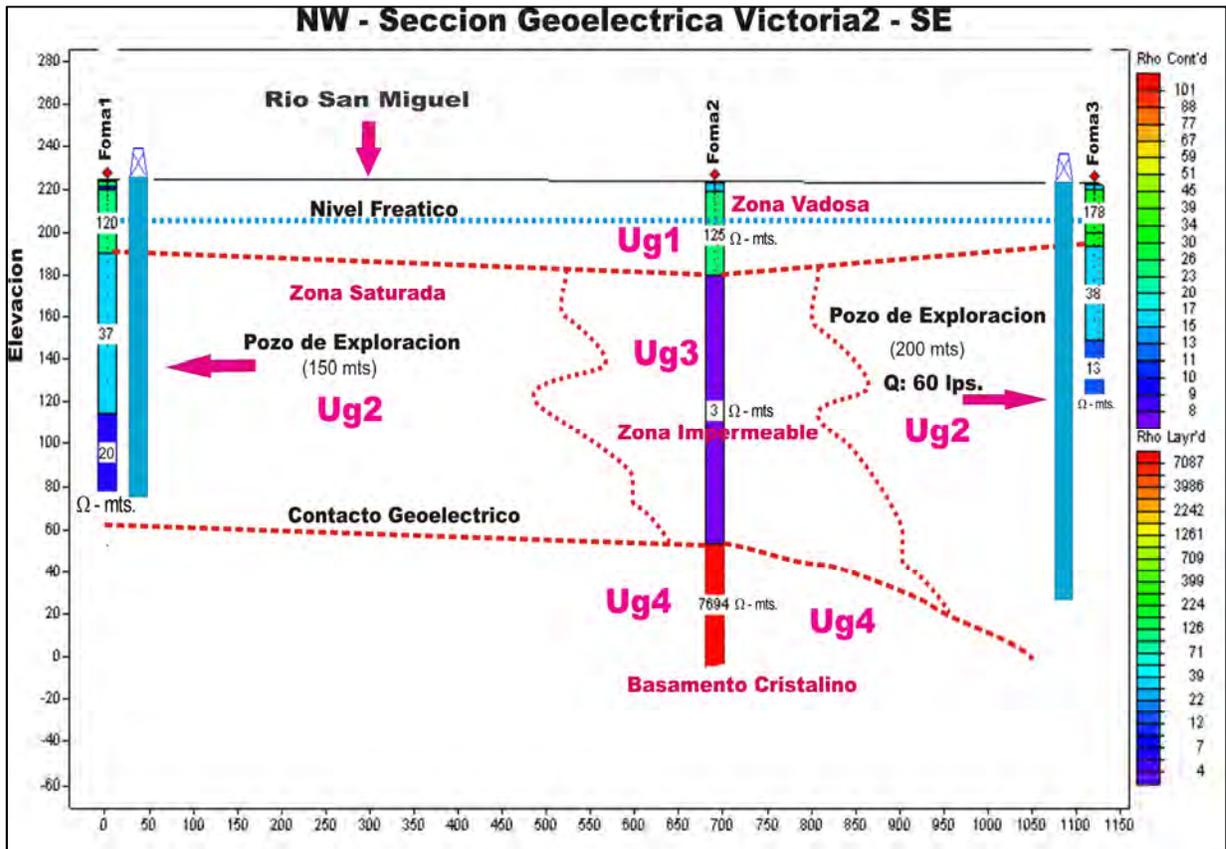


Figura 4.5.- Sección geoelectrica La Victoria 2.

El análisis de las secciones precedentes indica la presencia de una capa arcillosa impermeable cuyo espesor varía de las decenas, a las centenas de metros y en términos generales su espesor se incrementa hacia La Mesa del Seri. Las resistividades características que se observan para dicha capa son por lo general inferiores a los 10 Ω - mt.

La extensión en sentido horizontal reduce fuertemente la distribución de las zonas favorables desde el punto de vista geohidrológico y por ende, la concentración de pozos generando fuertes conos de abatimiento.

Las conclusiones de dicho estudio consisten en varios puntos. Se concluyó que, desde el punto de vista geológico, el acuífero descansa sobre materiales granulares de diferente composición, variando desde arenas, gravas, boleos, limos y arcillas.

La edad de estos sedimentos varía del Pleistoceno al Reciente y sus espesores en algunos sitios alcanzan las centenas de metros, que la profundidad máxima de perforación ha alcanzado los 300 metros, cortando en algunos sitios el basamento cristalino de composición granítica y que la profundidad máxima de la capa impermeable desde el punto de vista geohidrológico, alcanza los 200 metros en el vaso de la presa Abelardo L. Rodríguez.

También se concluyó que al este de la zona de estudio (Mesa del Seri), los espesores máximos de materiales favorables alcanzan escasos 60 metros, debido a la presencia en el subsuelo de un horizonte arcilloso, superior en algunos sitios a los 400 metros de espesor. Desde el punto de vista geofísico los materiales favorables para el confinamiento del agua subterránea presentan resistividades mínimas del orden de los 15 Ω - m. El comportamiento del flujo subterráneo hasta el año de 1998, se mantenía con una dirección noreste - suroeste (condición de equilibrio).

Sobre la piezometría se concluyó que debe analizarse la evolución piezométrica en varias etapas:

a).- La primera etapa que comprenda de los años anteriores a 1970, cuando el bombeo era incipiente y no rebasaba el volumen de recarga natural al acuífero.

b).- La segunda de 1970 a 1987, año en que empiezan a operar los pozos de aguapotable SIDUR (13 pozos).

c).- La tercera de 1987 a 1998, cuando se perforaron los pozos de Mesa del Seri (17 pozos).

d).- La cuarta de 1998 al 2002, con el inicio de los pozos alrededor de la presa Abelardo L. Rodríguez (27 pozos).

Como consecuencia de lo anterior, el efecto del bombeo excesivo de pozos aguas arriba sobre el Arroyo El Zanjón y la prolongada sequía en el Estado, han formado varios conos de abatimiento en las cercanías de La Victoria, San Pedro y vaso de la presa lo que propició el abandono de norias y pozos someros.

La aplicación de los métodos de gravimetría y resistividad, en conjunto con la información de pozos y registros eléctricos, han permitido conocer con mayor detalle la hidroestratigrafía y geometría del subsuelo que alberga el acuífero Mesa del Seri – La Victoria.

5 HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

5.1 Configuración de profundidad, elevación y evolución del nivel estático

Profundidad al nivel estático

De acuerdo a información consultada (IDEAS 2007⁽¹⁶⁾, Figura 5.1, CONAGUA 1997, Figura 5.2) la configuración de la profundidad del nivel estático indica que los niveles más profundos se encuentran en la parte norte y suroeste del acuífero. Las profundidades medidas varían de 3.6 a 58.6 m. El promedio de las profundidades que se midieron es de 20.31 m. Para 2007 la mayor profundidad se encontró en el pozo del Tecnológico de Monterrey, ubicado al Norte de la Presa Abelardo L. Rodríguez, y la menor se ubica en el rancho Las Norias, si bien este aprovechamiento está clasificado como manantial, sin embargo el agua no aflora necesariamente, si no que brota de las rocas fracturadas en una excavación a 3.6 m de profundidad.

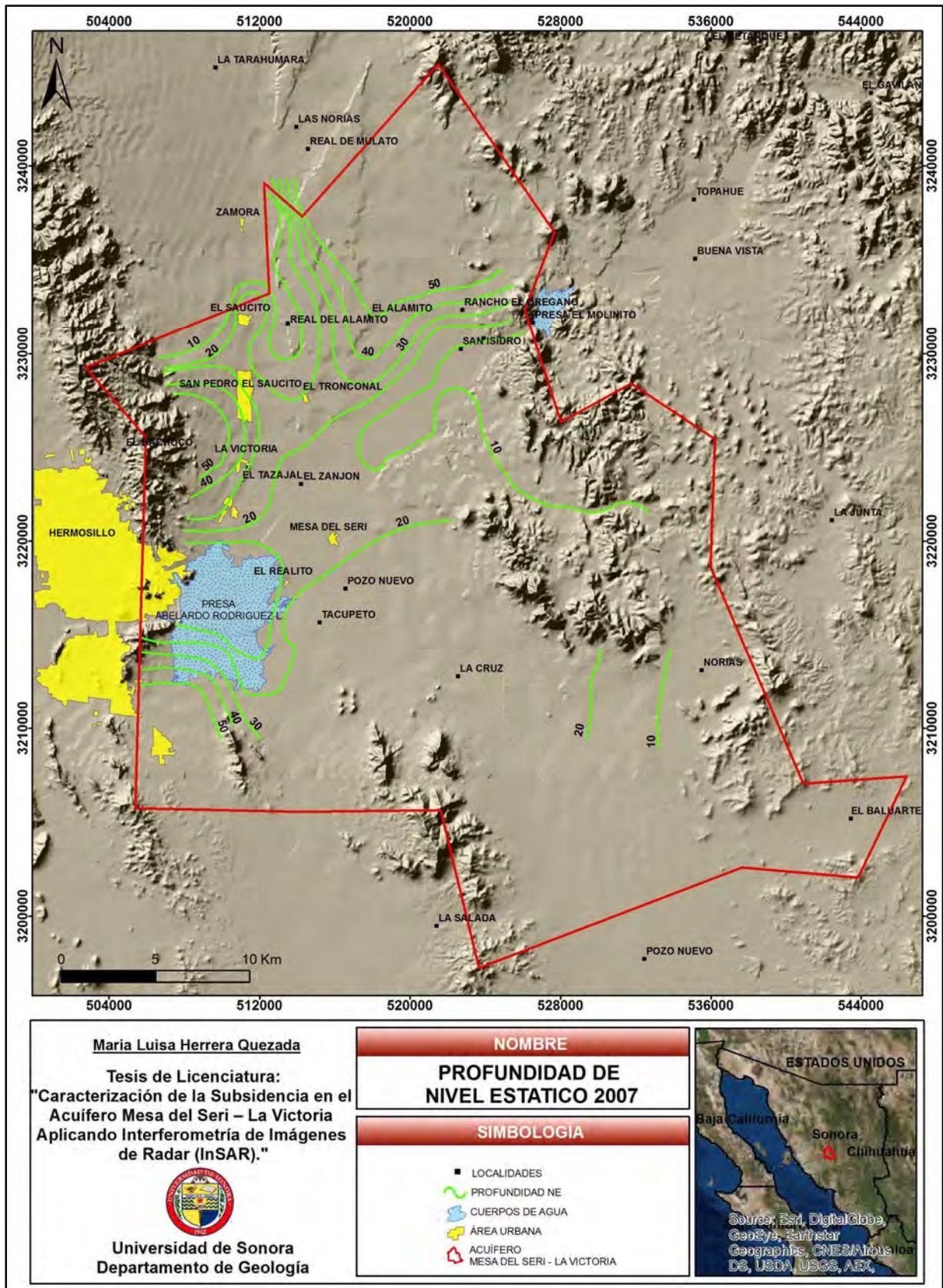


Figura 5.1.- Profundidad del nivel estático (tomado de IDEAS, 2007).

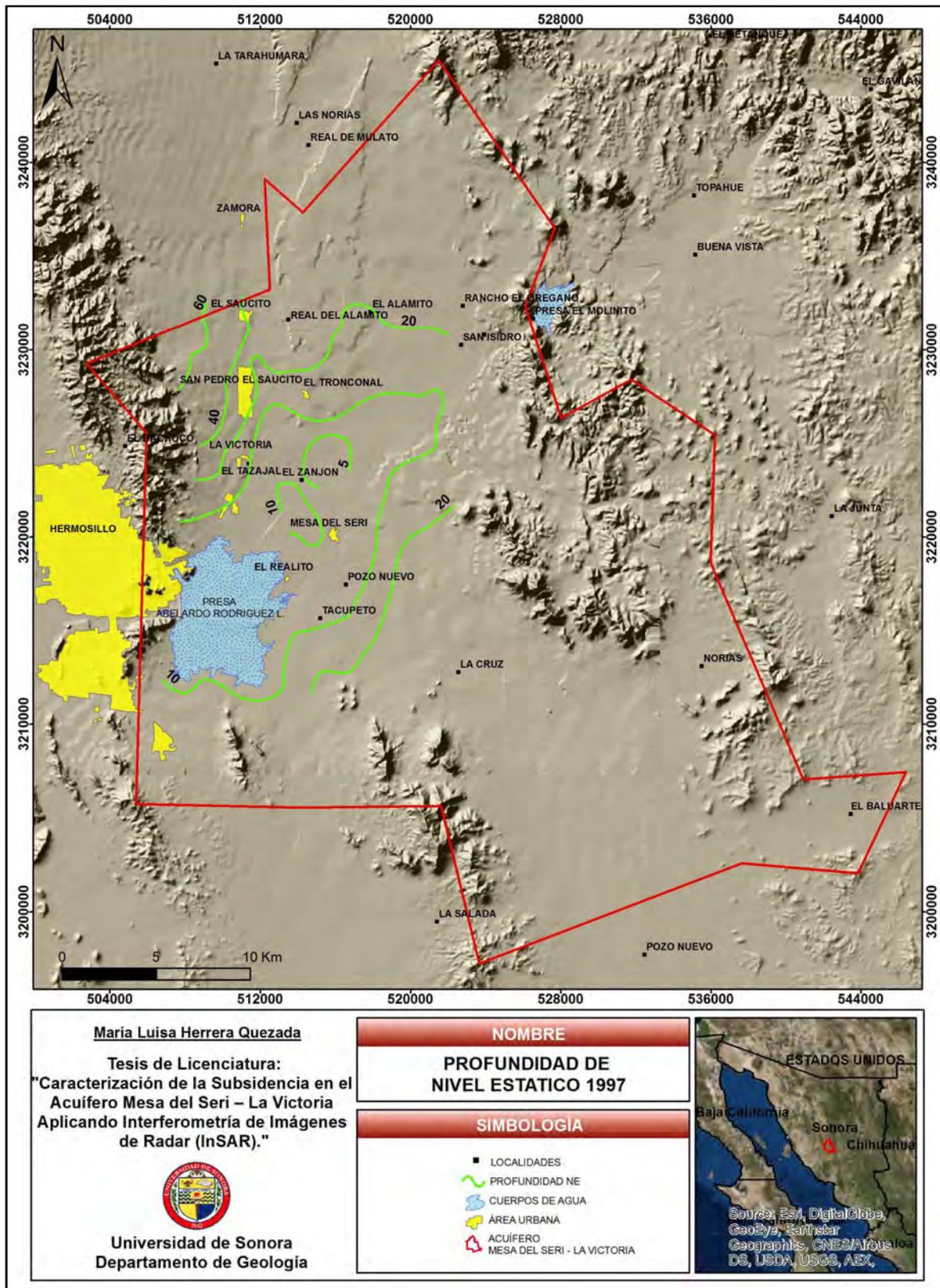


Figura 5.2.- Profundidad del nivel estático (tomado de CONAGUA, 1997).

Se consultó información adicional donde se observó que en la parte sur del acuífero Río Zanjón el cual colinda al norte con el acuífero en estudio, se tienen niveles más profundos a partir del año 2007, (CONAGUA 2007, 2010, 2012) figuras 5.3, 5.4 y 5.5, lo cual nos indica una sobre explotación de los aprovechamientos, y por consiguiente una alta probabilidad de subsidencia en dicha zona.

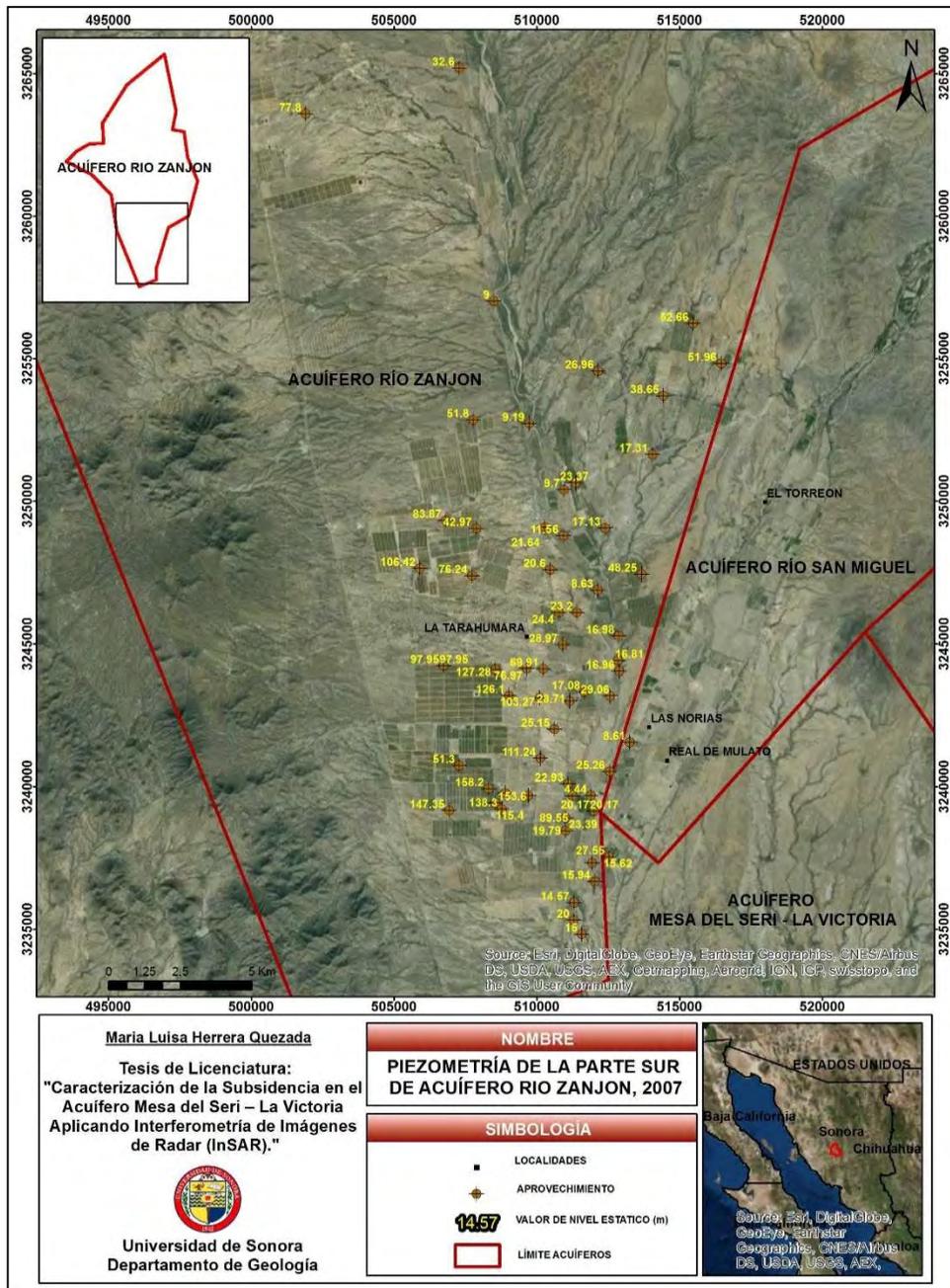


Figura 5.3.- Piezometría de la parte sur del acuífero Río Zanjón, (tomado de CONAGUA, 2007).

En la figura 5.4 se observa que los valores de la profundidad de nivel estático en la parte sur del acuífero Río Zanjón ya presentan cambios con respecto a la piezometría del año 2007, piezometría del año 2010 realizada por CONAGUA.

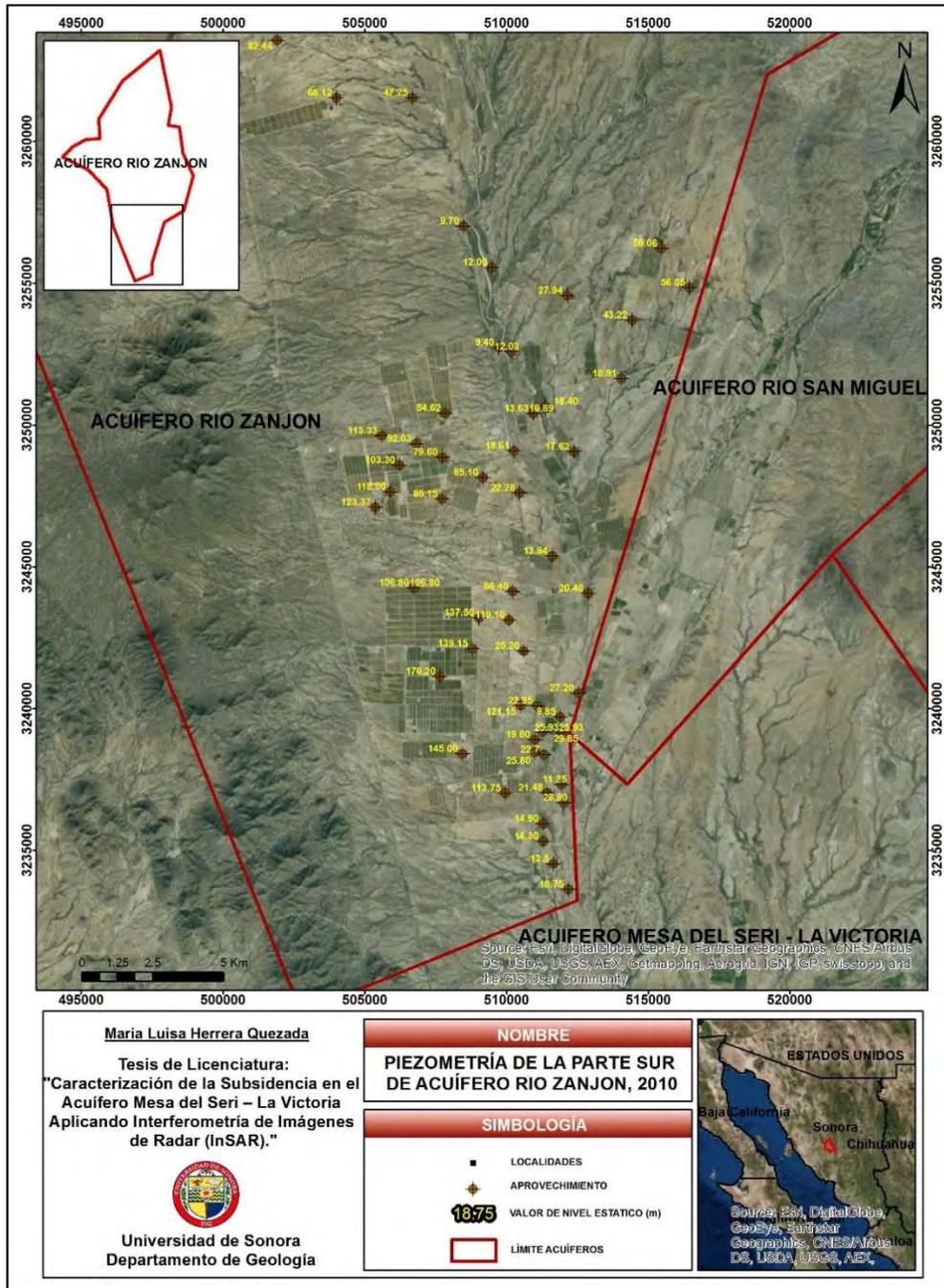


Figura 5.4.- Piezometría en la parte sur del acuífero Río Zanjón, (modificado de CONAGUA, 2010).

Para el año 2010, en la figura 5.5, se encontró una diferencia muy marcada entre los niveles de profundidad de nivel estático del año 2007 al 2010, se puede ver claramente niveles más profundos.

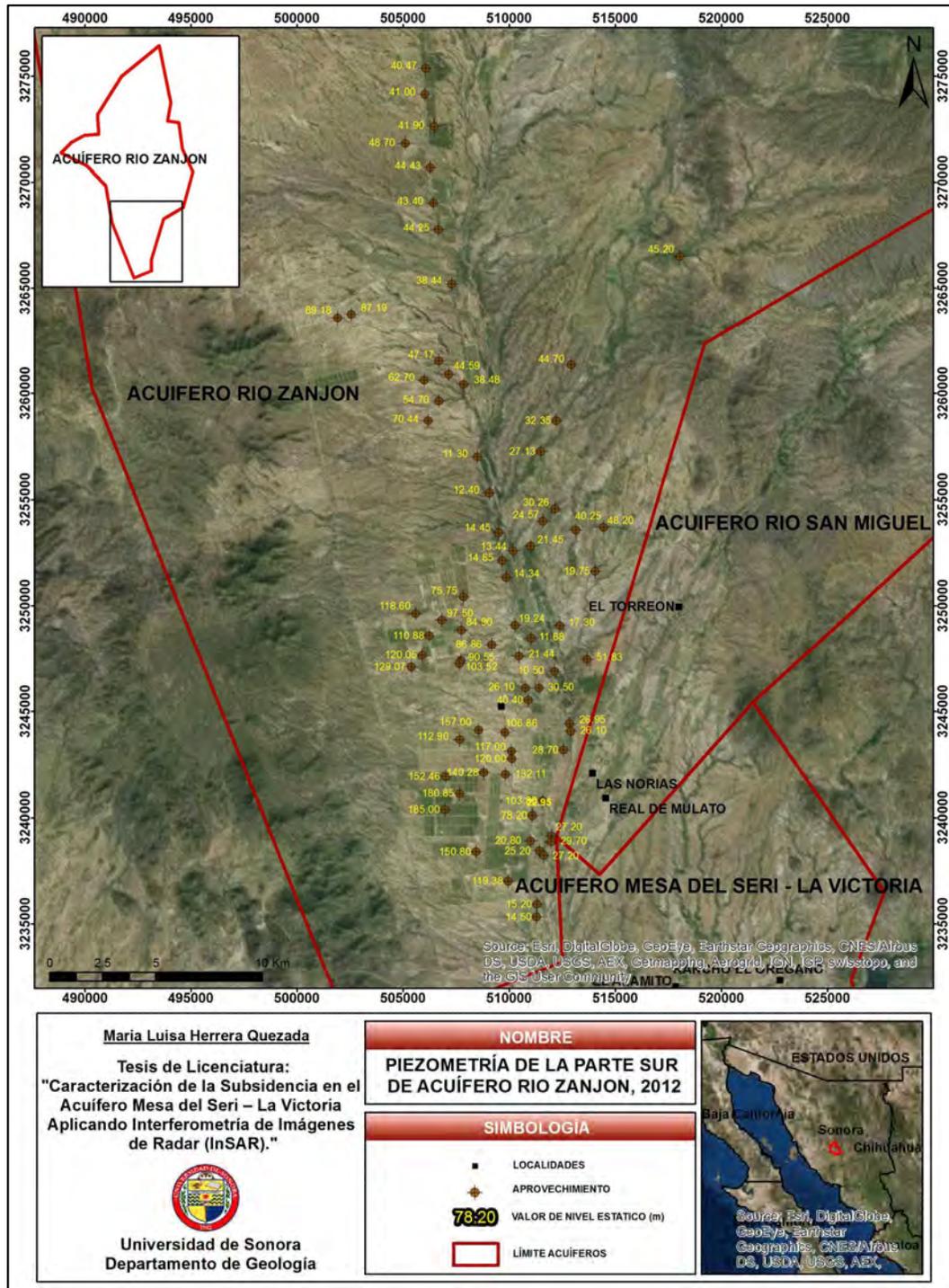


Figura 5.5.- Piezometría en la parte sur del Acuífero Río Zanjón, (modificado de CONAGUA, 2012).

También se realizó una correlación de las curvas de profundidad de nivel estatico del año de 1997 y las profundidades registradas en la piezometría del año 2012 registrada por CONAGUA, donde podemos observar los cambios en las profundidades de NE y marcadas zonas de abatimiento en el área de estudio, figura (5.6).

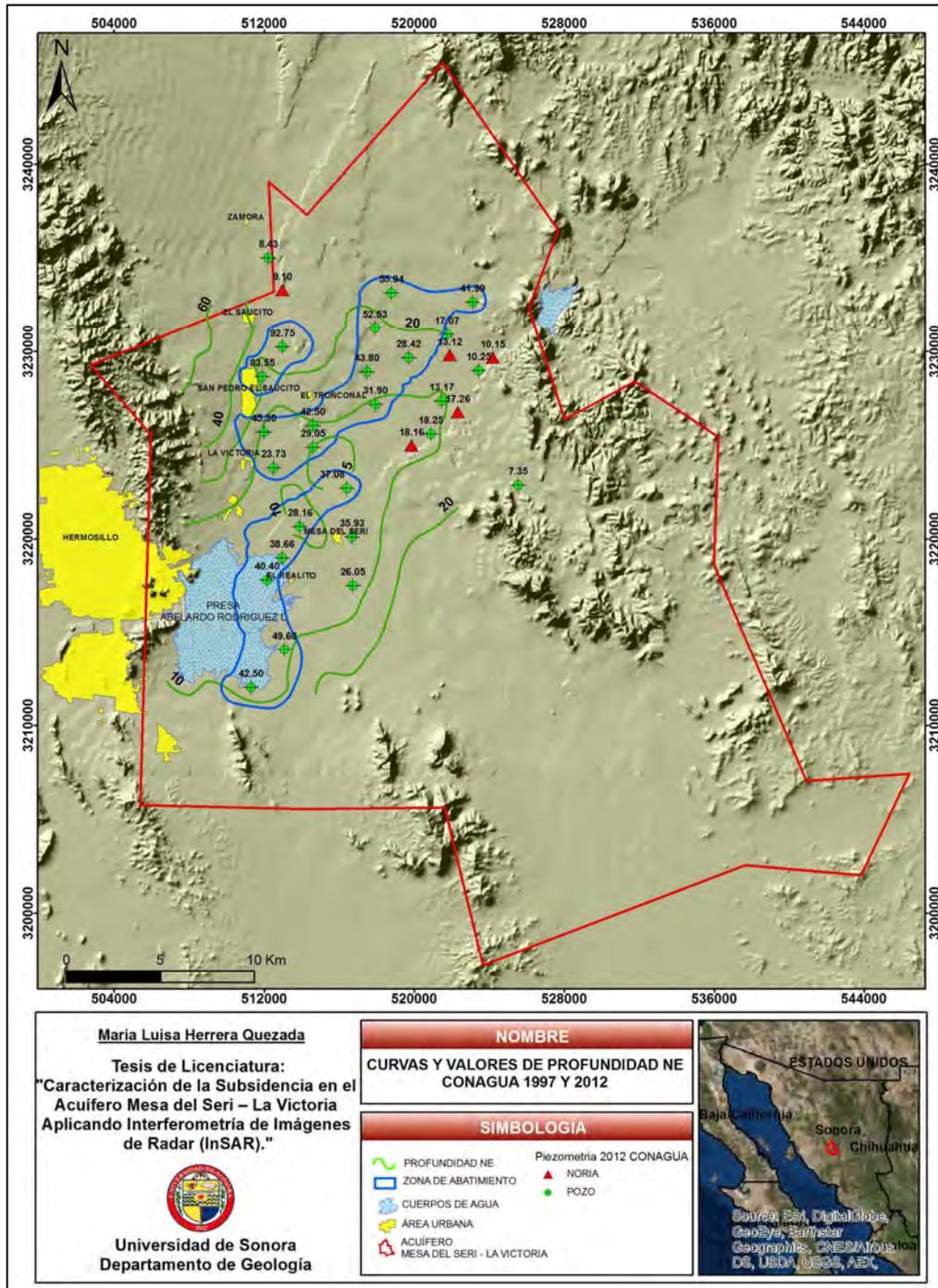


Figura 5.6.- Profundidad NE 1997, piezometría 2012 y zona de abatimiento.

Elevación del nivel estático

Según las curvas de isovalores de elevación del nivel estático (IDEAS 2007⁽¹⁶⁾, CONAGUA 1997, (Figura 5.7), se observan valores en las curvas de elevación de nivel estático más altos hacia la parte norte del acuífero y los valores van descendiendo hacia la parte suroeste del acuífero, estos valores van de 240m a 220m.

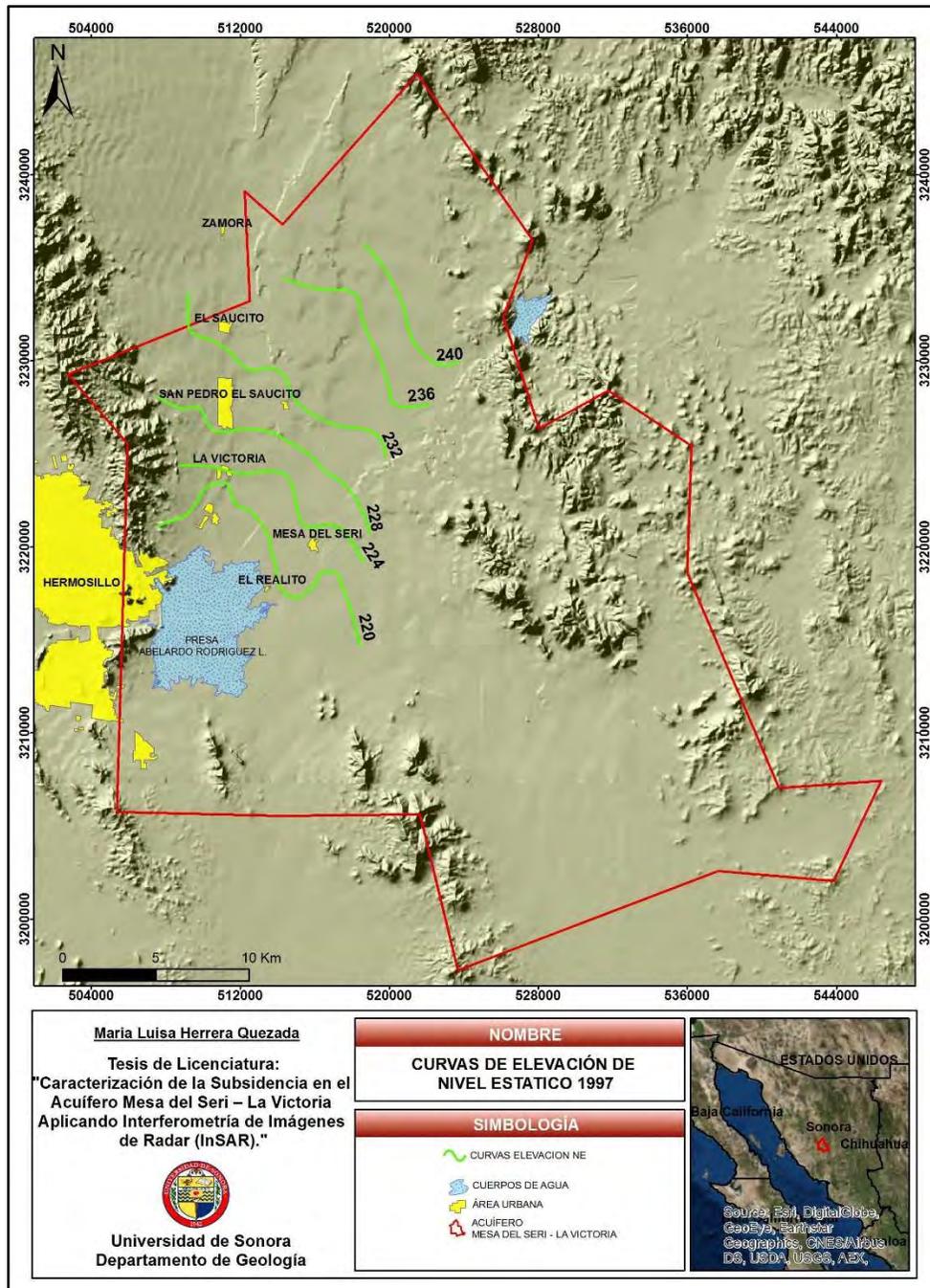


Figura 5.7.- Elevación de nivel estático, (modificado de IDEAS, 2007).

El flujo subterráneo en general va de las sierras a los valles y de los valles hacia la presa Abelardo L. Rodríguez. En la parte norte del área se observa una zona de desvío de flujo, del análisis se observa que existe un arroyo hacia el que las curvas reconocen como descarga. Al noroeste, sobre el cauce del Río Zanjón, se observan indicios de un cono de abatimiento, producido por la concentración del bombeo y menor capacidad de recarga, lo que produce una zona de sobre bombeo, figura 5.8

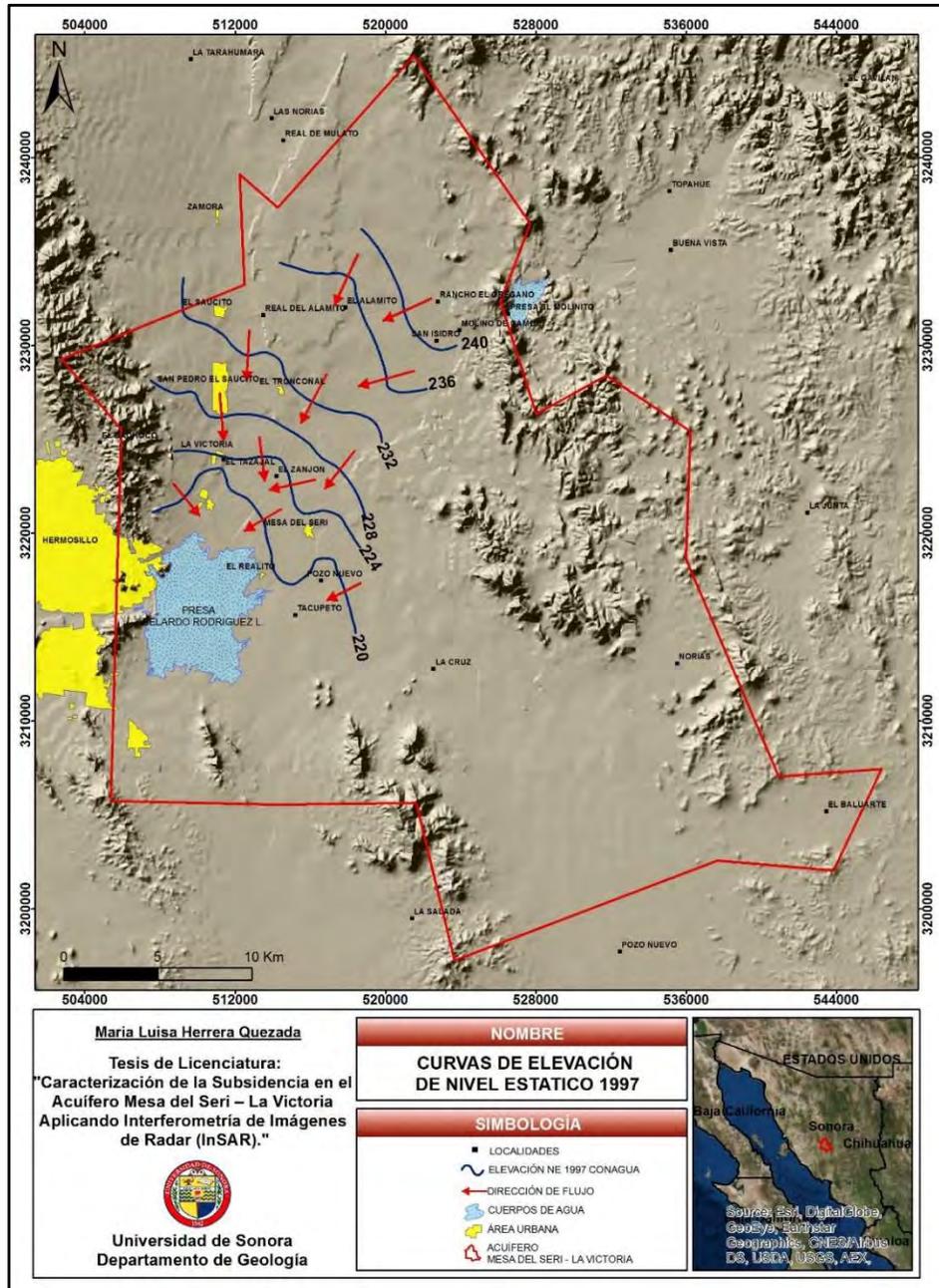


Figura 5.8.- Curvas de elevación del nivel estático (modificado de CONAGUA, 1997).

Evolución del nivel estático

Derivado de la información histórica consultada, la evolución de la profundidad del nivel estático en el período 2004-2006 (UNISON 2004-2006⁽¹⁴⁾, IDEAS 2007⁽¹⁶⁾, Figura 5.9), muestra una clara recuperación de niveles en las zonas cercanas a la presa Abelardo L. Rodríguez, donde alcanza hasta 6 m, ello se interpreta como resultado de su respuesta a la zona de influencia de la recarga por el escurrimiento del Río Sonora, y a que el año 2006 fue de alta precipitación y tuvo un buen período de escurrimiento. Sin embargo, en la porción centro-norte y en la parte noroeste (desemboque del Río Zanjón), se tienen abatimientos hasta de 2 m, motivado por el sobre bombeo, figura 5.9.

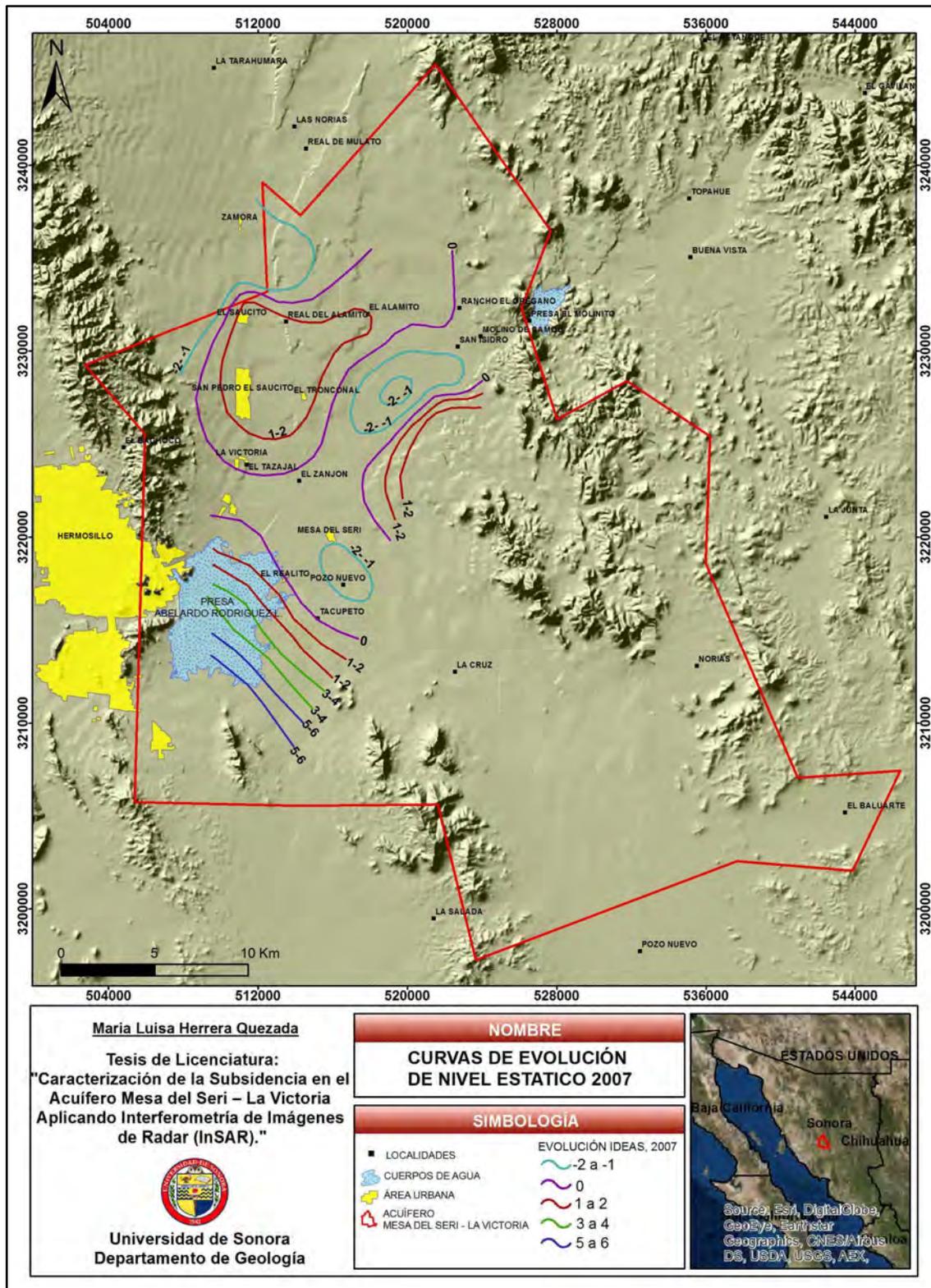


Figura 5.9.- Curvas de evolución del nivel estático (modificado de IDEAS, 2007).

De la piezometría existente se consideraron algunos aprovechamientos para realizar hidrógrafos (figuras 5.8 y 5.9) tanto de Mesa del Seri – La Victoria como de Río Zanjón, la ubicación de estos se muestra en las figuras 5.10 y 5.11 y los datos en las tablas 5.1 y 5.2, esto se hizo para ver la tendencia del nivel estático de ambos acuíferos y poder relacionar estas zonas a subsidencia, se consideraron periodos de los años 2007 a 2012 y como resultado se obtuvo claramente cómo ha ido cambiando la profundidad del nivel estático durante el tiempo antes mencionado.

CLAVE	X	Y	NE_2007	NE_2009	NE_2010	NE_2011	NE_2012
Z3-1	523139	3232689	38.45	39.7	34.21	40.57	41.99
Z3-4	521909	3229808	10.15	11.73	11.68	11.82	13.12
Z3-9	517917	3231298	47.13	51.4	53.96	48.66	52.53
Z3-5	520679	3229951	21.53	19.1	20.79	21.17	33.5
Z2-10	513390	3228608	35.45	38.45	38.63	41.35	39.85
Z2-4	512680	3235139	9.4	10.2	9.82	10.95	10.6

Tabla 5.1.- Aprovechamientos del acuífero Mesa del Seri – La victoria.

CLAVE	X	Y	NE_07	NE08	NE_09	NE_10	NE_11	NE_12
CA-67	501918	3263593	77.8	79.71	80.3	82.44	84.38	89.18
CA-01	507292	3265198	32.6	32.9	32.95	38.53	38.1	38.44
SMN-006	508501	3257029	9	9.45	11.45	9.7	10.42	11.3
SMN-036	514057	3251651	17.31	17.43	18.07	18.91	19.48	19.75
SMN-044	514442	3253716	38.65	37.76	42.27	43.22	43.75	48.2
SMN-063	510274	3249100	21.64	21.9	18.85	18.61	18.43	19.24
SMN-095	511013	3238917	19.79	20.3	19.3	19.8	20.45	20.8
SMN-126	512893	3244066	16.96	17.1	18.3	20.4	20	26.1
SMN-147	507738	3247409	76.24	79.9	83.4	85.15	82.2	90.55

Tabla 5.2.- Aprovechamientos acuífero Río Zanjón.

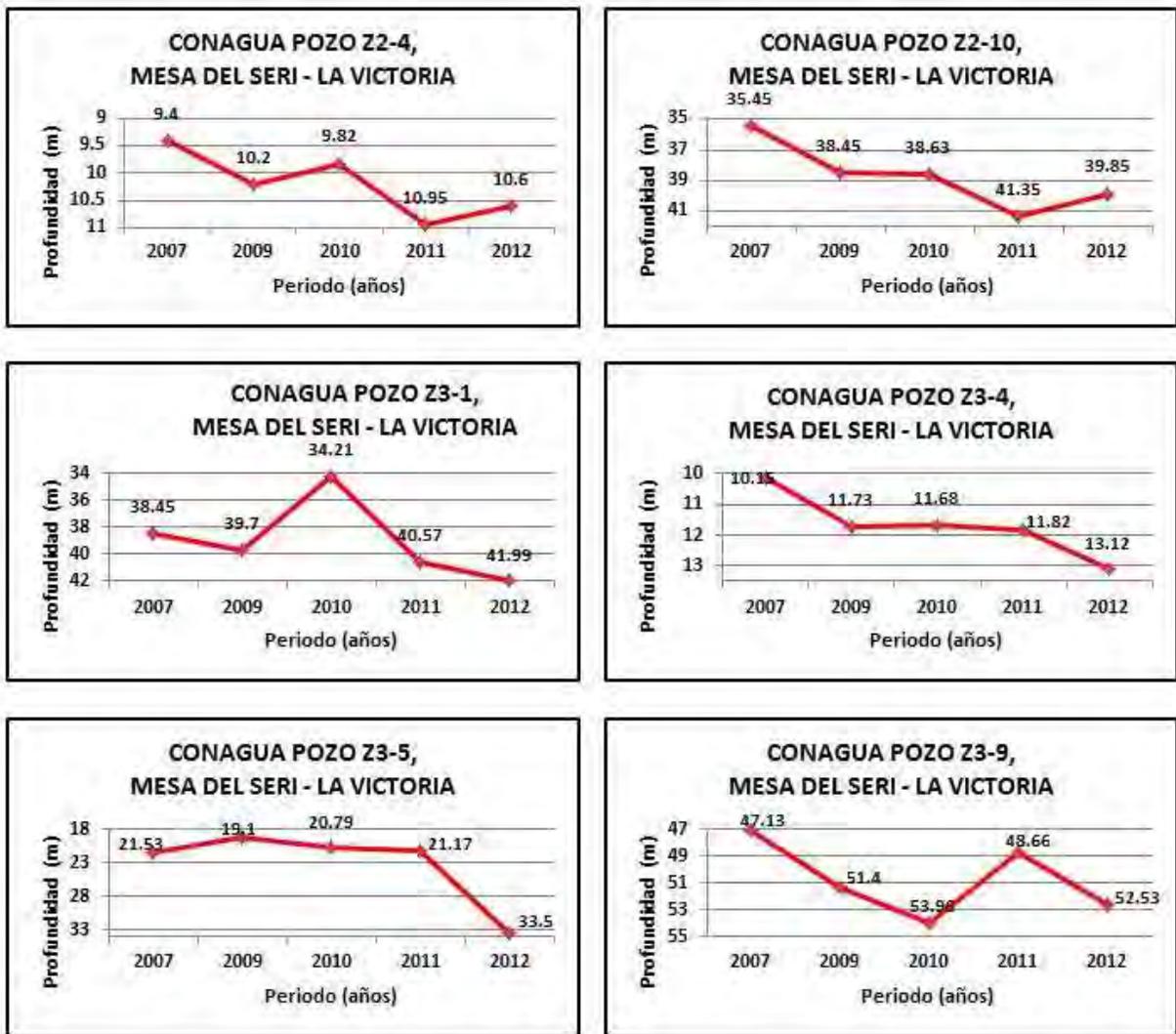


Figura 5.10.- Hidrógrafos acuífero Mesa del Seri – La Victoria.

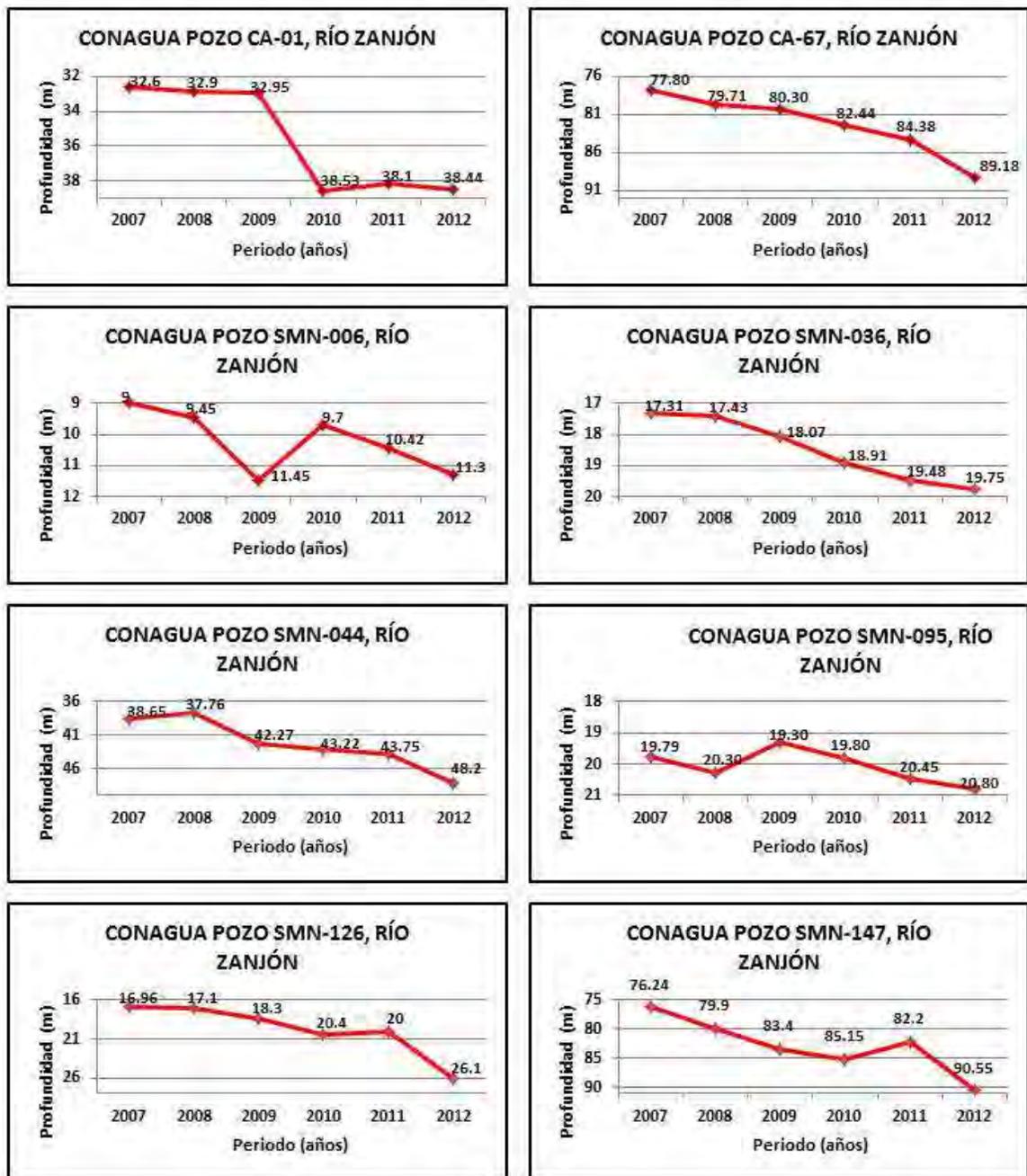


Figura 5.11.- Hidrógrafos acuífero Río Zanjón.

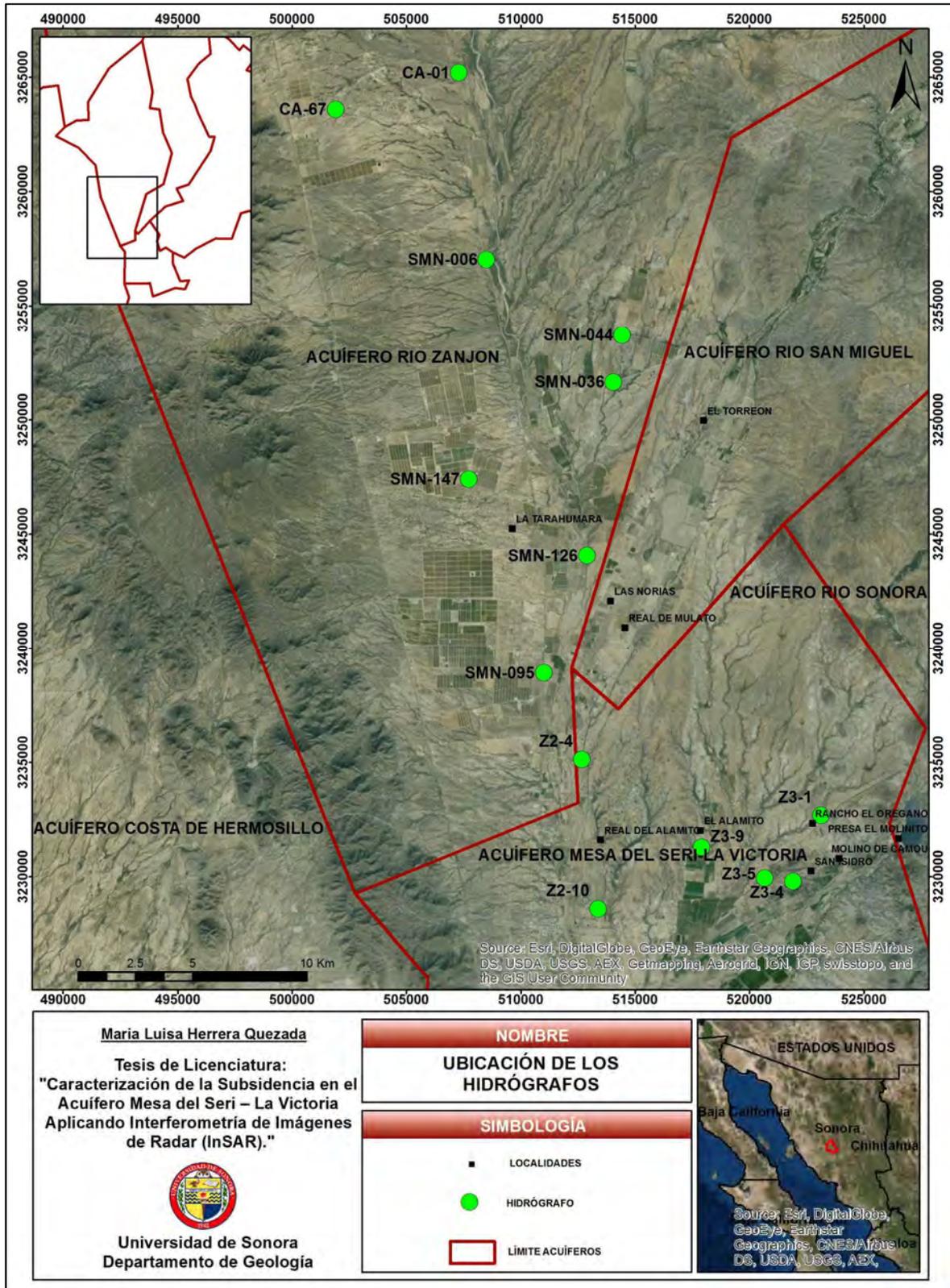


Figura 5.12.- Ubicación de hidrógrafos considerados.

6 APROVECHAMIENTOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA

6.1 Localización de los aprovechamientos del agua subterránea

Cifras del censo actualizado en octubre del 2006 (CONAGUA, 2009) ⁽²⁶⁾, existen dentro del acuífero en estudio un total de 474 aprovechamientos de agua subterránea, de los cuales 289 son pozos y 185 son norias de bajo rendimiento que abastecen las necesidades del uso doméstico-abrevadero.

Se desconoce el número de las norias que se encuentran inactivas, ya que por la prolongada sequía muchas de ellas están fuera de uso; pero debido a que el acuífero Mesa del Seri – La Victoria tiene una rápida respuesta a la recarga originada por la infiltración a lo largo de los cauces de los ríos, los escurrimientos torrenciales o al desfogue del agua proveniente de la presa El Molinito, algunas de ellas operan cuando se presenta alguna de las situaciones mencionadas.

Adicionalmente, se estima que hay un gran número de aprovechamientos que no están incluidos en este último censo. De acuerdo al uso del agua subterránea en este acuífero el 64% de los aprovechamientos se destina al uso agrícola, el 13.6 % al uso pecuario, el 11.3% para el uso público-urbano, el 7.5% para uso industrial y el 3.5% restante se destina al uso doméstico-abrevadero, la Figura 6.1 se puede observar la ubicación de éstos.

Como resultado de dicho censo se obtuvo que el volumen de extracción asciende a los 120 Mm³ anuales, de los cuales 77Mm³ (64.2%) se utiliza en la agricultura, 40 Mm³ (33.3%) para abastecimiento de agua potable a los centros de población, 1 Mm³ más (0.8%) para uso industrial y 2Mm³ restantes (1.7%) para satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero.

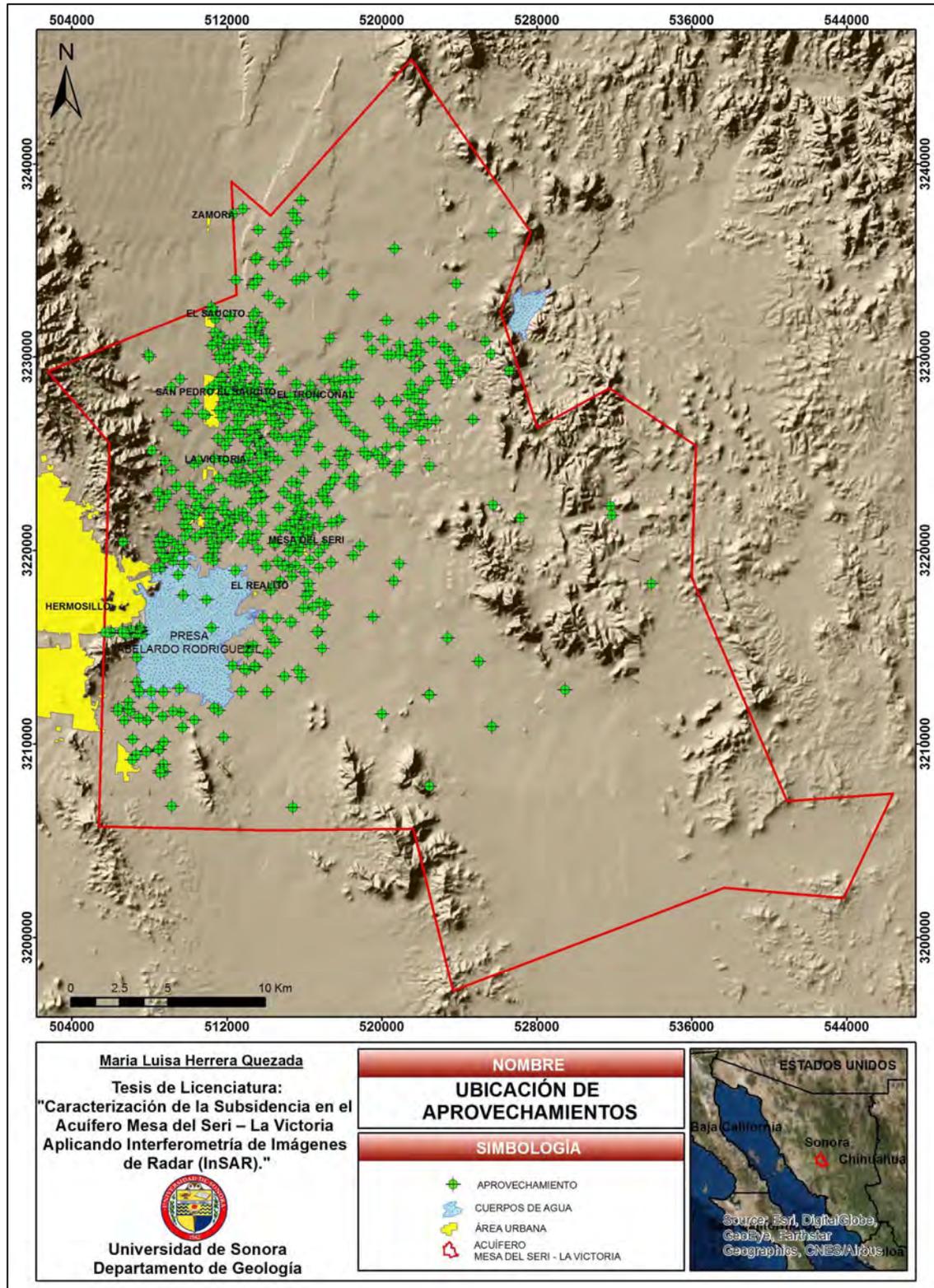


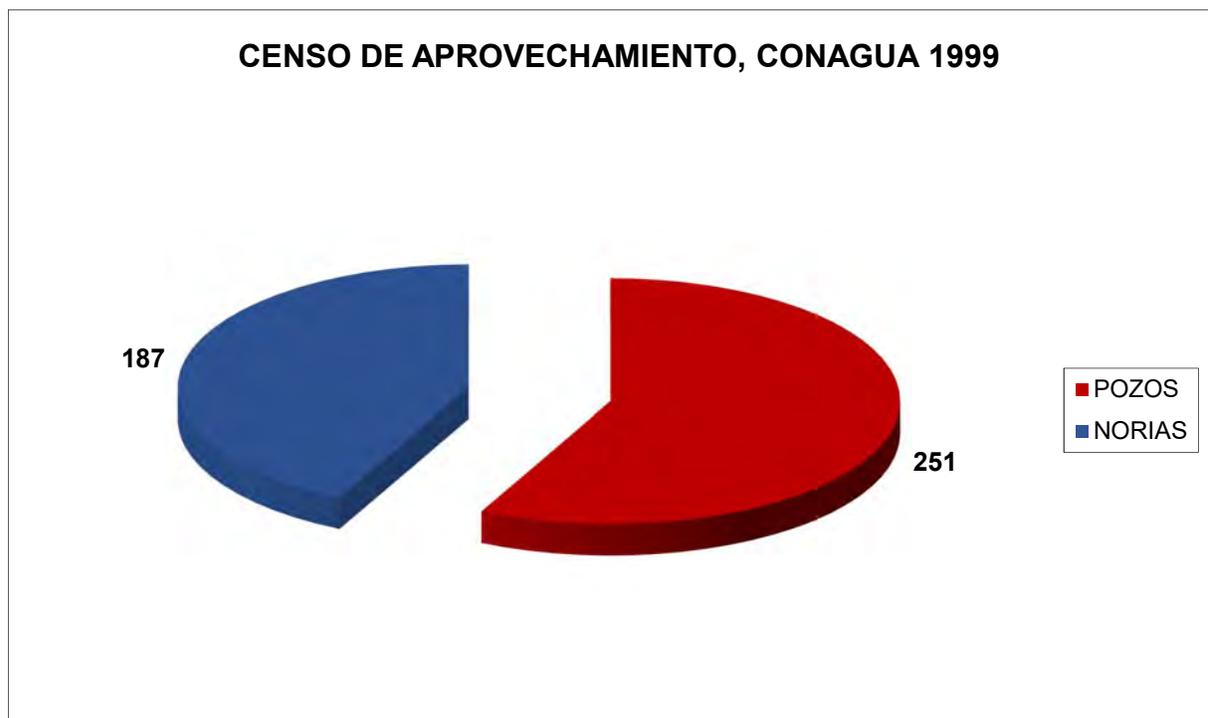
Figura 6.1.-Ubicación de aprovechamientos, (modificado de CONAGUA, 2009).

6.2 Evolución histórica del bombeo de agua subterránea

Para el desarrollo de este capítulo se tomó de estudios previos información referente al tema, como lo es, el censo y piezometría, realizados por la Universidad de Sonora (UNISON) para la zona de estudio desde el 2004-2006, el estudio de evaluación hidrogeológica del acuífero por IDEAS en el 2007 y censos realizados por CONAGUA de 1999-2012.

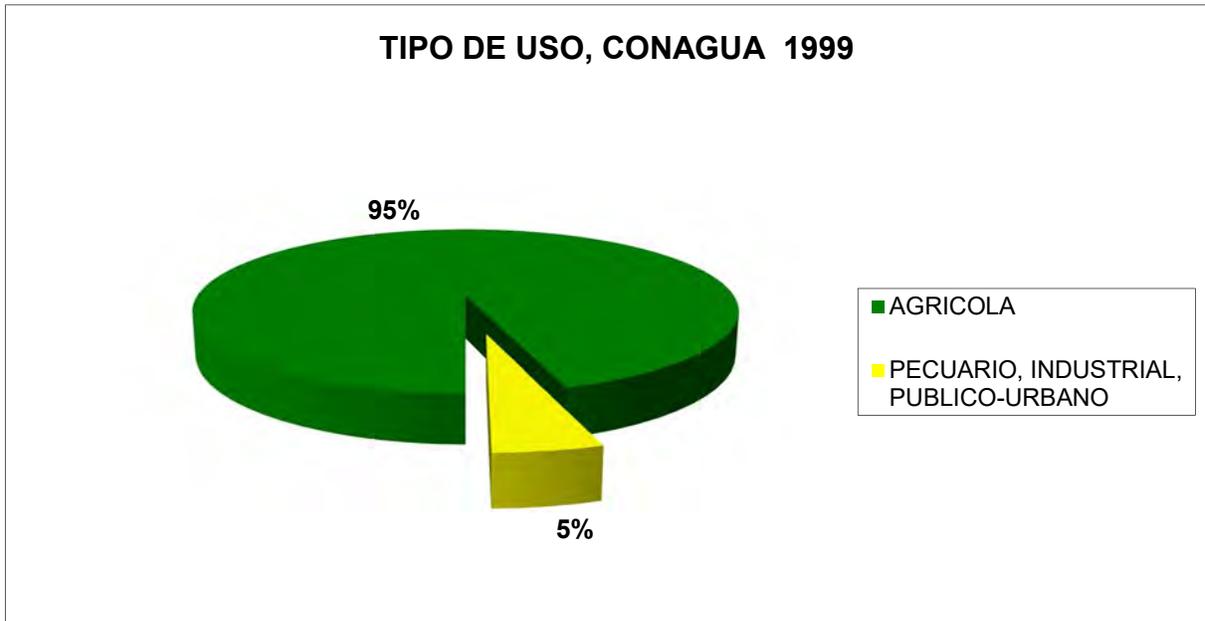
A continuación se muestran algunas gráficas donde se ilustra la información obtenida de manera más clara, por año, tipo y uso de los aprovechamientos en el Acuífero Mesa del Seri - La Victoria.

En 1999, CONAGUA censó 438 aprovechamientos, de los cuales 251 son pozos y 187 norias (Gráfica 6.1).



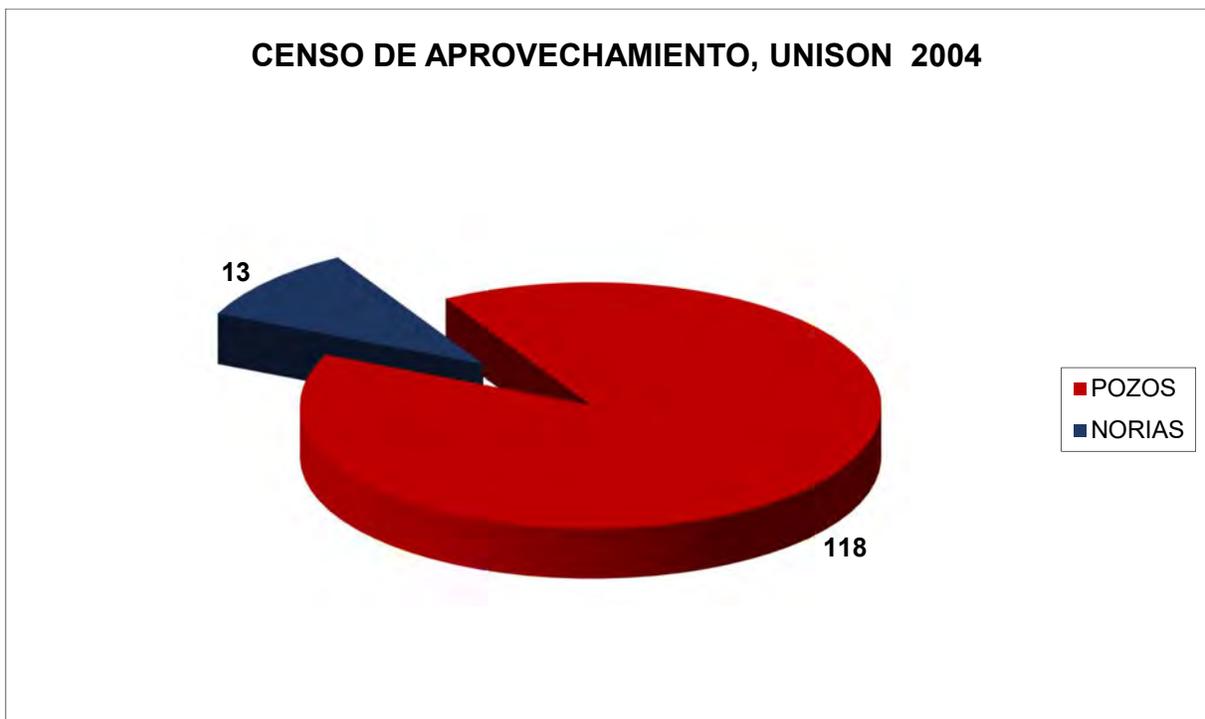
Gráfica 6.1.- Tipo de aprovechamiento censado (modificado de CONAGUA, 1999).

Para este año, se representa un 95% para uso agrícola y 5% para uso pecuario, industrial y público-urbano (Gráfica 6.2).



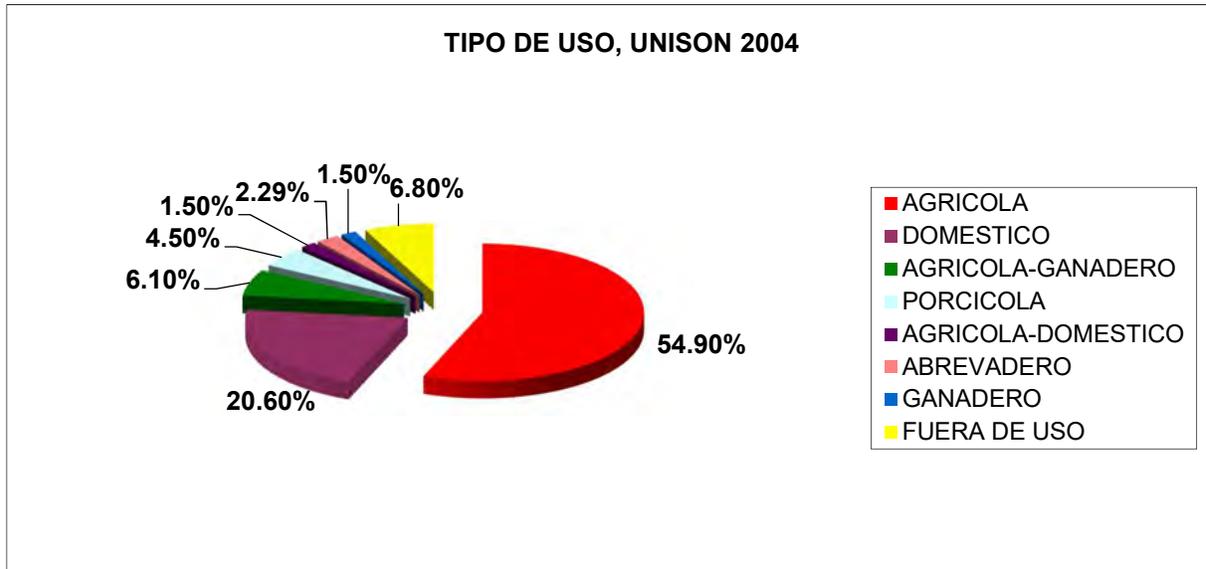
Gráfica 6.2.- Uso del agua (modificado de CONAGUA, 1999).

La Universidad de Sonora en 2004 realizó un censo donde muestra un total de 131 aprovechamientos, 118 pozos y 13 norias (Gráfica 6.3).



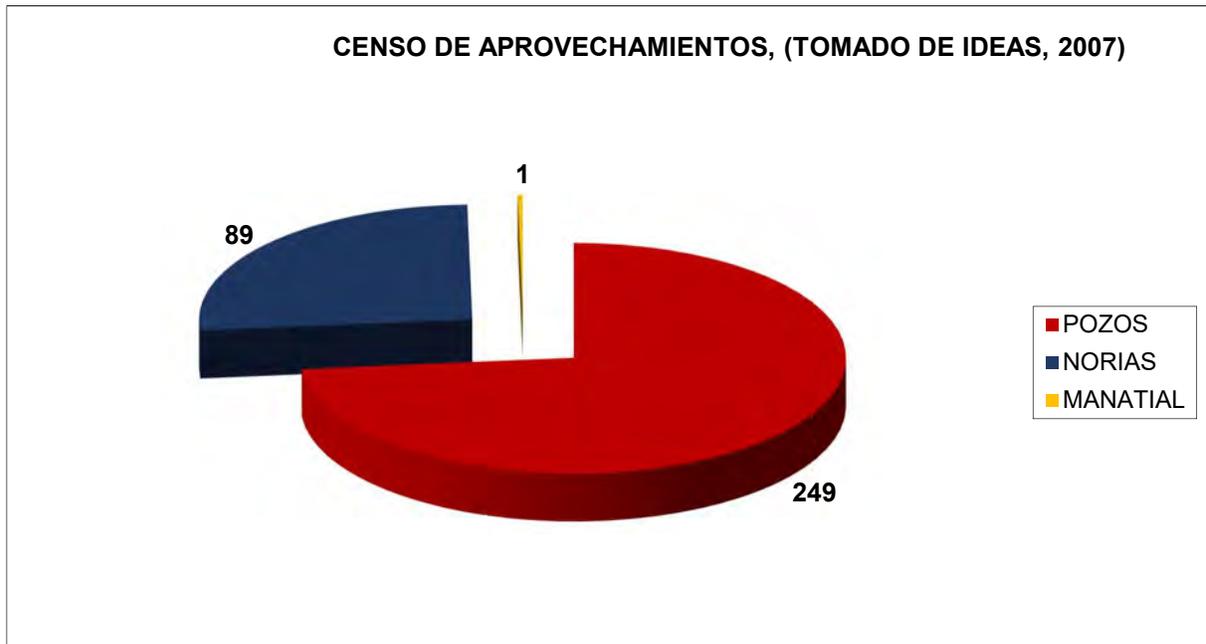
Gráfica 6.3.- Tipo de aprovechamiento (modificado de UNISON, 2004).

En el censo se detectó que el 54.9% era para agrícola y 20.6% doméstico, el resto se distribuye entre abrevaderos, ganaderos y porcícola (Gráfica 6.4).



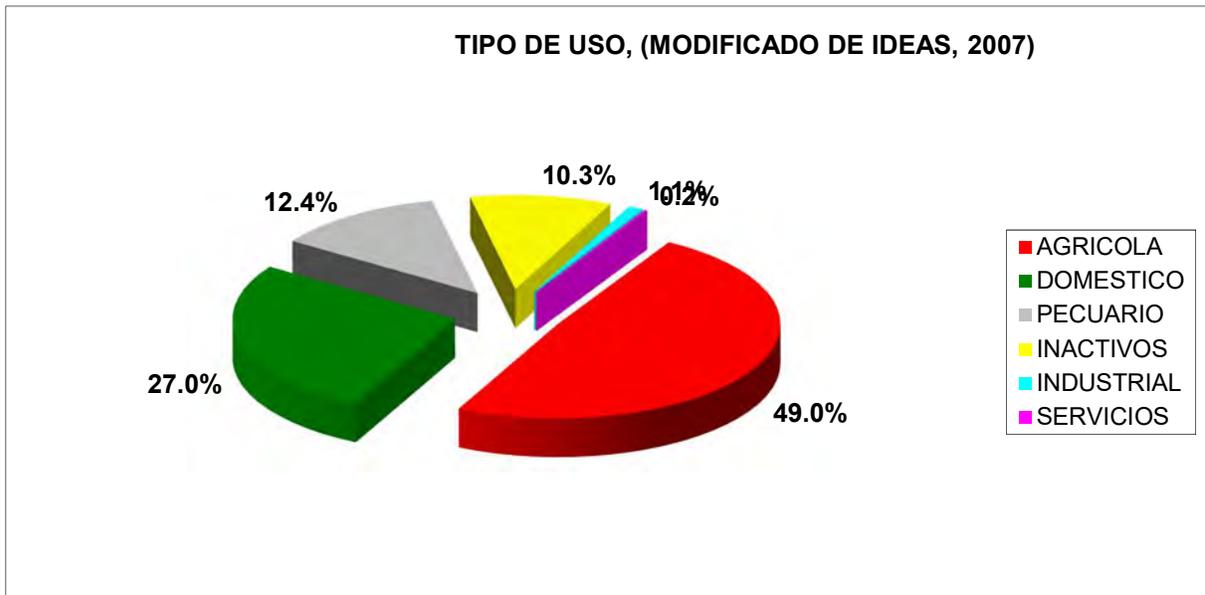
Gráfica 6.4.- Uso del agua subterránea (modificado de UNISON, 2004).

En 2007 IDEAS realizó un censo dando un total de 339 aprovechamientos, de los cuales se tiene que: 249 pozos, que equivale al 73% del total de los aprovechamientos; 89 norias, que constituyen el 26%; un manantial equivalente a menos del 1% (Gráfica 6.5).



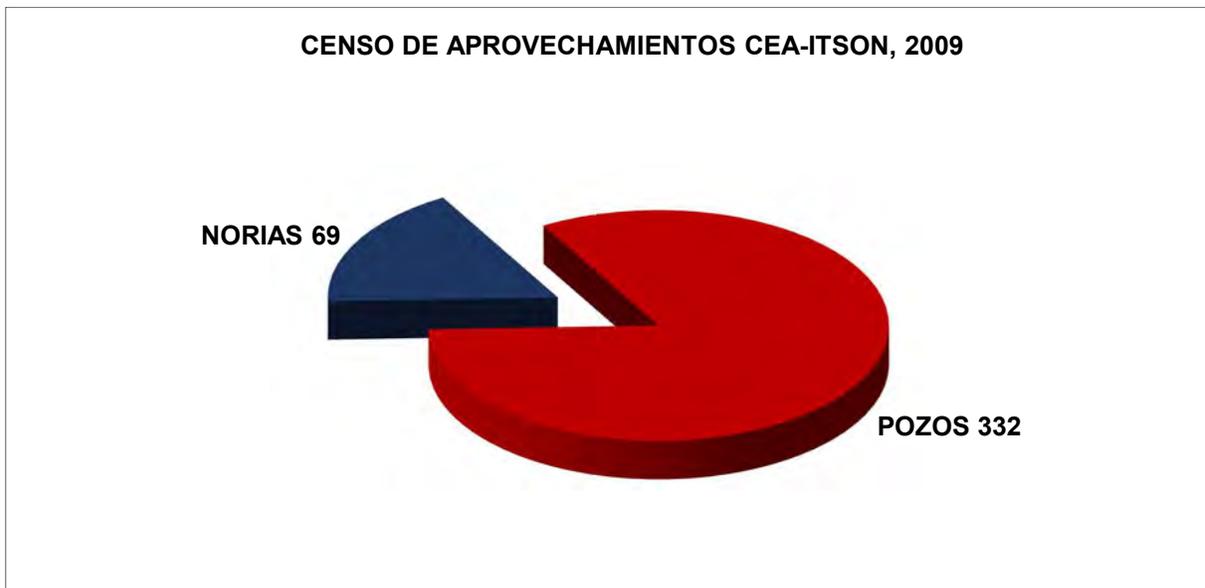
Gráfica 6.5.- Tipo de aprovechamiento.

En lo que corresponde al uso que se le da al agua subterránea, la mayoría de los aprovechamientos se destinan a la agricultura con un total de 166, lo cual equivale al 49% del total de aprovechamientos; seguido por el uso doméstico con 91 aprovechamientos (27%). Se encontraron 35 aprovechamientos inactivos y 42 que tienen uso pecuario. Se registraron 4 industriales y uno para servicios (Gráfica 6.6).



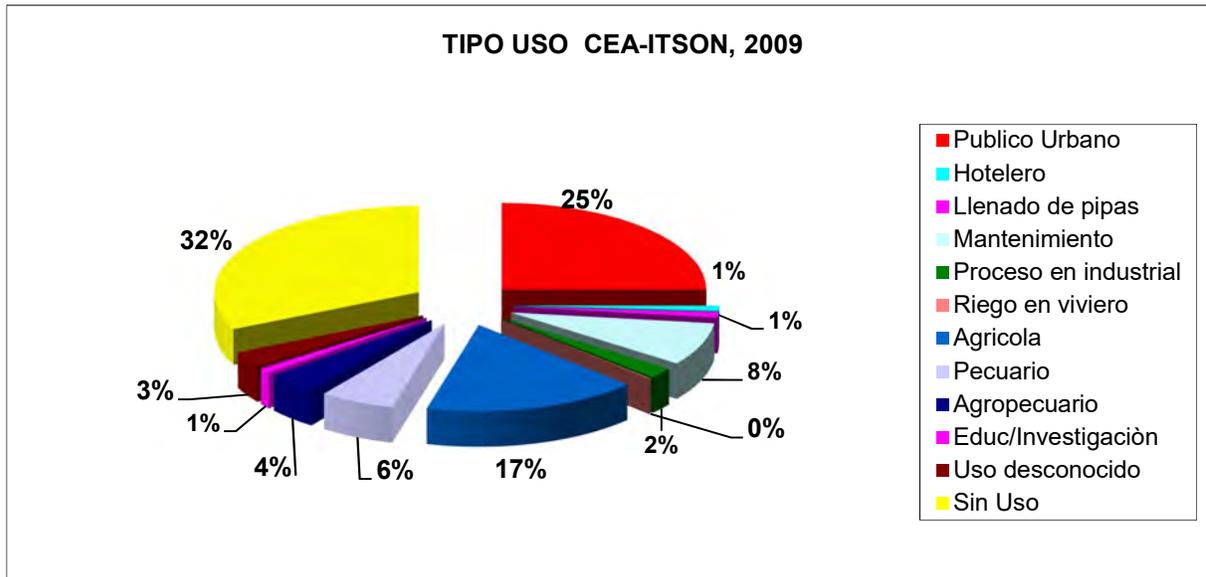
Gráfica 6.6.- Uso de agua subterránea.

De un estudio realizado en 2009 por el ITSON para la CEA, se obtuvo un censo con 401 aprovechamientos, 332 pozos y 69 norias (Gráfica 6.7).



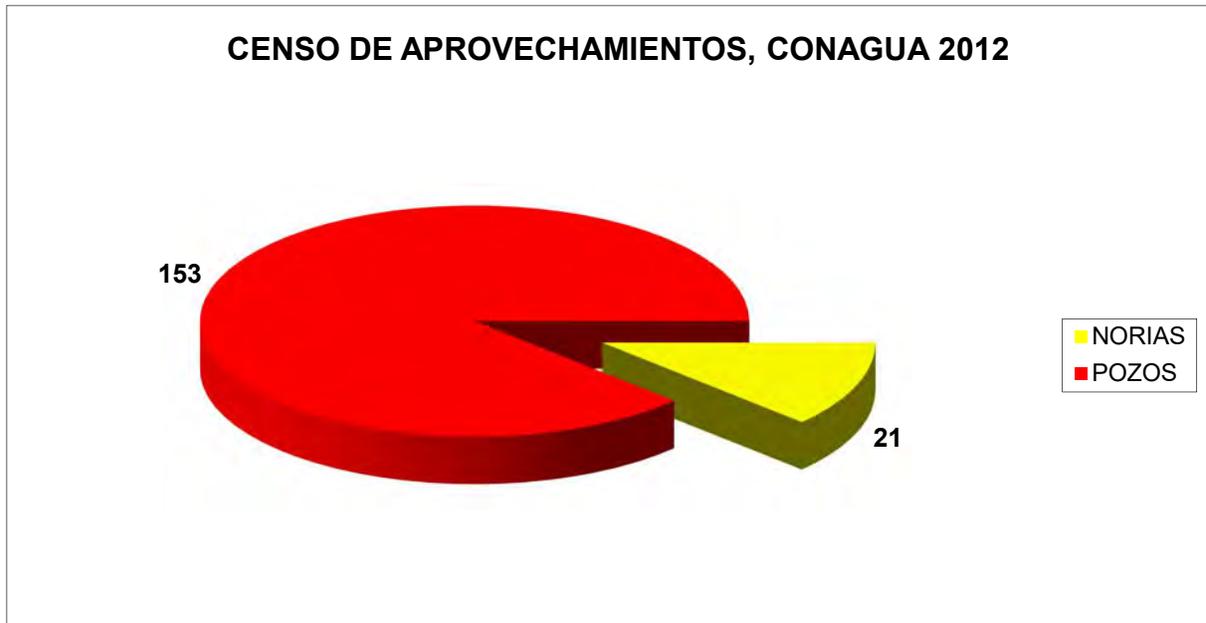
Gráfica 6.7.- Tipo de aprovechamiento (modificado de ITSON, 2009).

Respecto al censo del 2009, el ITSON obtuvo que el 32% de los aprovechamientos fueron catalogados como inactivos, el 25% se destinaba al uso urbano, el 17% al uso agrícola, mientras que el resto de los aprovechamientos se destinaba a los usos pecuarios, industrial, hotelero, entre otros (Gráfica 6.8).



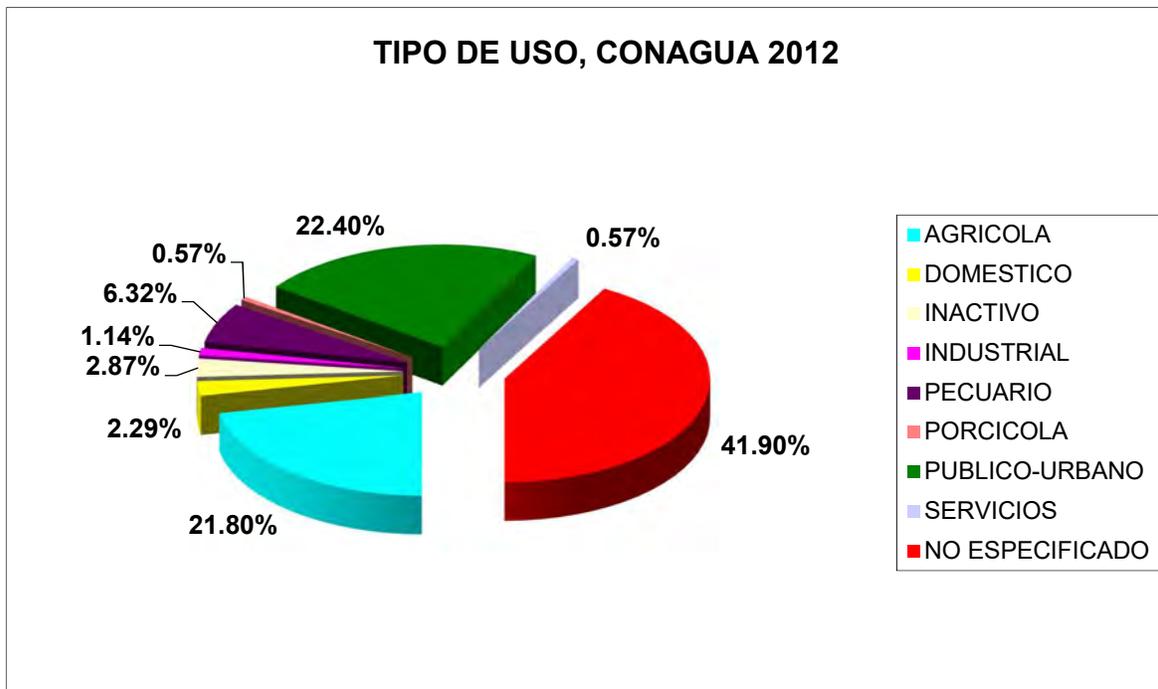
Gráfica 6.8.- Uso de aprovechamientos hidráulicos (modificado de ITSON, 2009).

Otra información consultada fue de CONAGUA (2012), donde se censaron 174 aprovechamientos, de los cuales 153 fueron pozos y 21 norias (Gráfica 6.9).



Gráfica 6.9.- Tipo de aprovechamiento censado (modificado de CONAGUA, 2012).

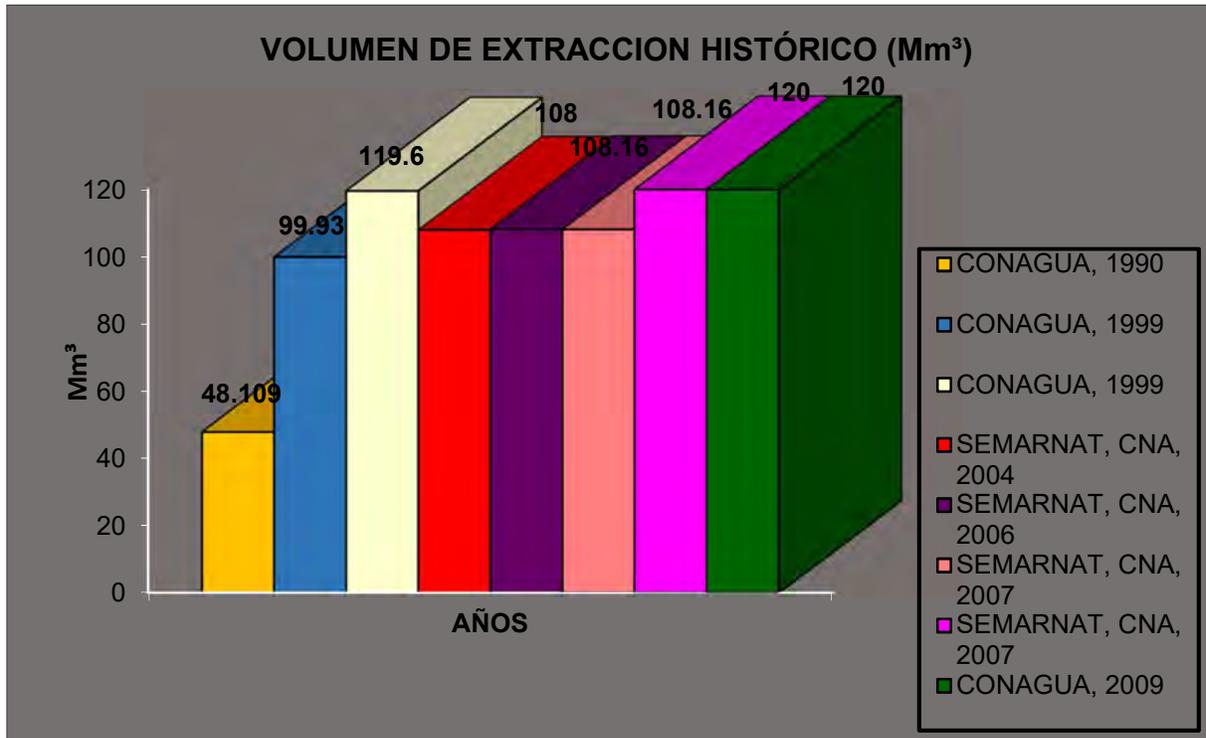
Para este año, el uso de los aprovechamientos fue de 41.9% no especificado, 21.8% agrícola, 22.4% público-urbano y el resto entre pecuario, industrial, servicios, porcícola e inactivos (Gráfica 6.10).



Grafica 6.10.-Uso de aprovechamientos hidráulicos (modificado de CONAGUA, 2012).

En cuanto a la de descarga de los aprovechamientos, la mayoría tiene un diámetro de 3 a 6 pulgadas (123 aprovechamientos), seguido por las descargas de 1-2.5 pulgadas (87 aprovechamientos), 65 tienen descarga de 8 a 10 pulgadas, mayores que 10 pulgadas se encontró uno, y el resto tiene descarga manual.

Respecto al volumen de extracción histórico, de los estudios consultados desde 1990 hasta 2008, se tiene que ha ido incrementado la extracción de manera abrupta, en los 90's (CONAGUA) era de 48.109 Mm³, en 2001 (SEMARNAT, CNA) era de 108 Mm³ y en la actualidad (CONAGUA, 2008) rebasa los 120 Mm³ (Grafica 6.11).



Gráfica 6.11.- Volúmenes de extracción históricos de 1990-2008.

Una vez que se revisó información previa de la bombeo de extracción de agua subterránea, se determinaron zonas de mayor volumen de extracción, figura 6.12, zonas que coinciden con los resultados que arroja la Interferometría desarrollada para este estudio, estos resultados se muestran en el siguiente capítulo.

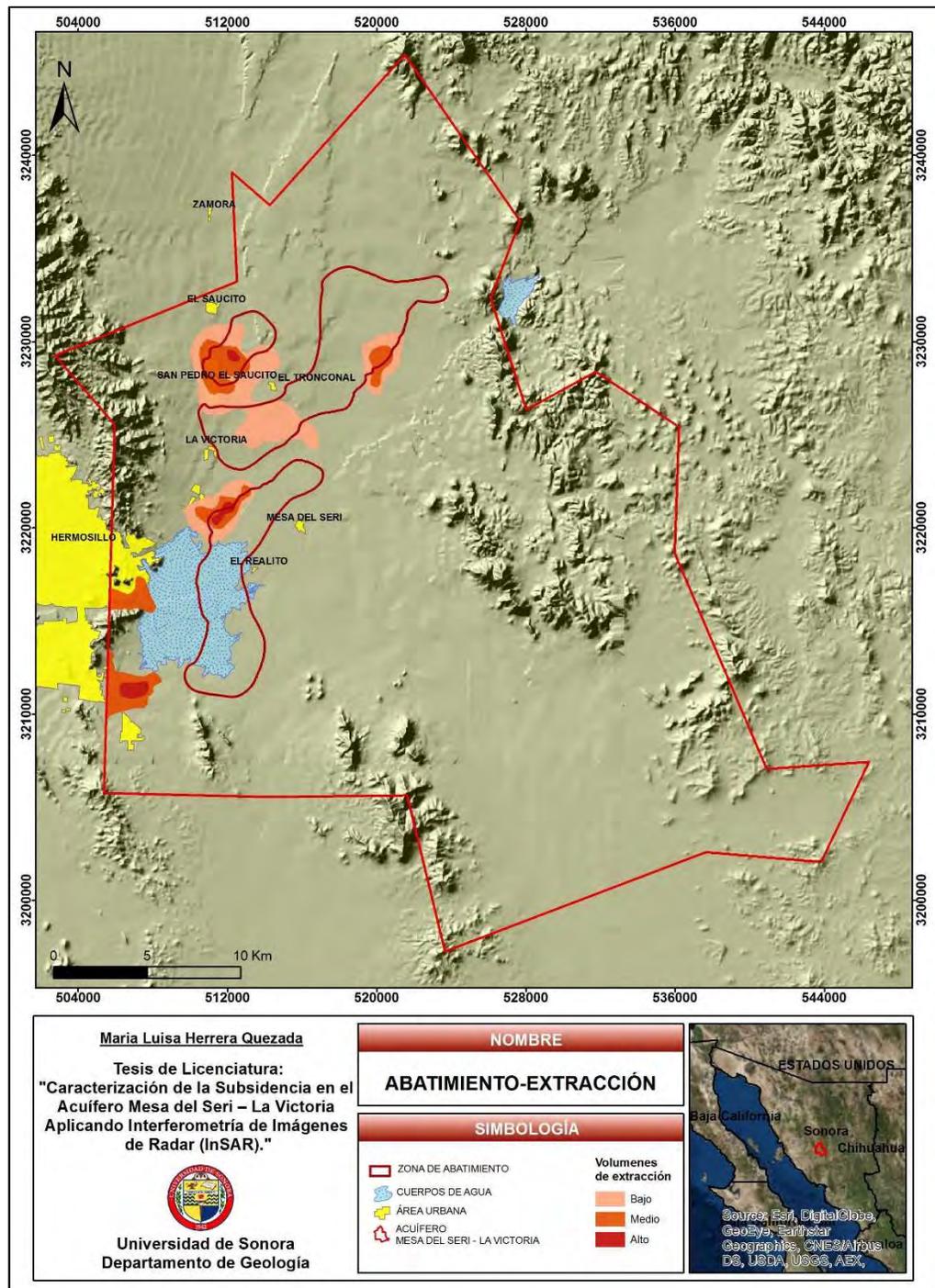


Figura 6.12.- zonas de abatimiento y zonas de mayores volúmenes concesionados.

7 SUBSIDENCIA DEL SISTEMA ACUÍFERO

7.1 Aplicación del método InSAR

De acuerdo a Scott (1979), la subsidencia se clasifica en función de los mecanismos que la desencadenan. Las actividades extractivas de mineral en galerías subterráneas, la construcción de túneles, la extracción de fluidos (agua, petróleo o gas) acumulados en reservorios subterráneos, el descenso de nivel freático por estiajes prolongados, la disolución natural del terreno y lavado de materiales por efecto del agua, los procesos morfotectónicos y de sedimentación o los procesos de consolidación de suelos blandos u orgánicos, son algunas de las causas de los procesos de subsidencia.

En forma general Corapcioglu (1984), refiere que la subsidencia implica el asentamiento de la superficie terrestre en un área extensa debido a varios factores, que pueden ser naturales o causados por el impacto de una gran variedad de actividades humanas.

Es importante considerar que la sobreexplotación de una cuenca sedimentaria reciente, que contiene rellenos granulares que pueden consolidarse, tiene como consecuencia la generación de hundimientos graduales del suelo. Este fenómeno es conocido en la literatura como subsidencia por extracción de agua subterránea. El abatimiento del nivel estático de un acuífero provoca subsidencia (hundimiento) y el agrietamiento del terreno. Anualmente el hundimiento del subsuelo por subsidencia puede ser del orden de centímetros, entonces no perceptible a simple vista, pero en el transcurso del tiempo ocasiona consecuencias en el drenaje del suelo y da lugar a la aparición de agrietamientos. La geología y la ubicación del acuífero son los principales factores que determinan que tan severo es el problema de la subsidencia.

Tomás, *et al.*, (2010), en su estudio “Monitorización de la Subsistencia del Terreno de la Vega Media del Río Segura Mediante Interferometría SAR Diferencial Avanzada”, refieren que los métodos de medida de las deformaciones del terreno pueden servir para estimar distintas magnitudes de la deformación como los desplazamientos

relativos entre dos cuerpos, los movimientos absolutos, las inclinaciones, los desplazamientos en una dirección, los movimientos en profundidad, etc. Exponen también que la interferometría SAR diferencial es un método de teledetección utilizado para determinar subsidencia relacionada a la extracción de agua subterránea, cuyo uso y tratamiento se conoce comúnmente bajo el término de interferograma.

El documento refiere que se ha optado por englobar dentro del término amplio de teledetección a aquellas técnicas no fotogramétricas que, montadas sobre plataforma espacial, aérea o terrestre, permiten estudiar el medio sin establecer contacto físico con él. Estos métodos se pueden dividir en dos grupos: métodos láser y radar. El primer grupo engloba el Scanner Laser, montado sobre plataforma terrestre (Terrestrial Laser Scanner) o aérea (LIDAR, ALS o ALTM). El segundo grupo se subdivide, de forma similar, según el tipo de plataforma empleada para la adquisición de las imágenes SAR en: terrestre (Ground Based Synthetic Aperture Radar, GB-SAR), aerotransportado (Airborne Radar) y satélite (Spaceborne Radar). Este último caso corresponde al que se aplicará para caracterizar el fenómeno de subsidencia en el Acuífero Mesa del Seri – La Victoria, en el estado de Sonora.

El análisis de la fenomenología del proceso de subsidencia permite establecer una relación para calcular el incremento del esfuerzo efectivo que produce las deformaciones verticales de los rellenos sedimentarios, que se manifiestan como hundimientos en la superficie del terreno. Al generar un abatimiento del nivel piezométrico, el suelo experimentará la pérdida del efecto ascensorial del agua sobre los sólidos, lo que se traduce en un aumento del esfuerzo efectivo que variará de cero en la superficie a un valor máximo a la profundidad del nuevo nivel piezométrico. Entonces ocurre un aumento del esfuerzo efectivo por una variación de presión entre el agua subterránea y el agua del medio permeable que la contiene, incrementándose la presión sobre el material litológico por el efecto de la pérdida de sustentación hidráulica en el material drenado.

El incremento de esfuerzos que se produce tanto en el material permeable como en aquellos de mejor permeabilidad, ocasionará deformaciones verticales que se manifestarán en hundimientos en la superficie. La deformación aportada por cada material dependerá de la relación esfuerzo-deformación que posea y de las dimensiones del espesor total del estrato analizado.

Autores como Auvinet y Bouvard (1983), demostraron que algunas propiedades físicas de los suelos, tales como la relación de vacíos, porosidad, peso volumétrico y porcentaje granulométrico, varían dentro de un rango de acuerdo al tamaño de la muestra usada para su determinación y concluyen que la dispersión para suelos gruesos es mayor. Sus conclusiones sugieren que la consideración de homogeneidad en una masa de suelo depende de la escala en que se examine.

En zonas áridas y semiáridas donde la principal fuente de agua es la subterránea y donde los abatimientos de niveles piezométricos son constantes, es probable que se genere el fenómeno de subsidencia y por ende el crecimiento de los agrietamientos hasta que se alcance un equilibrio después de que el acuífero quede drenado por completo.

Por lo anteriormente expuesto, resulta entonces de interés predecir “dónde” se presentarán los agrietamientos, debido a que el “cuándo” pareciera inevitable. Para la predicción espacial del fenómeno es más importante calcular la magnitud final del incremento de los esfuerzos efectivos que deformarán al acuífero, más que el tiempo en que se alcanzarán dichos niveles del incremento en los esfuerzos efectivos.

Esta simplificación se cumple en gran medida en los estratos permeables del acuífero, donde el incremento de esfuerzos efectivos se produce al tiempo que el nivel piezométrico desciende y se genera una zona parcialmente saturada. En los estratos permeables no se produce el acoplamiento agua-suelo y los esfuerzos efectivos dependen sólo de la pérdida de la sustentación hidráulica.

La consideración de que el incremento de esfuerzos se genera en forma instantánea, al presentarse el abatimiento del nivel de agua, permite reducir el problema a un análisis estático de las deformaciones que produce el incremento de esfuerzos efectivos.

De acuerdo a Poland (1984), existen dos conceptos de gran importancia en un problema de subsidencia: el concepto de esfuerzos efectivos y el de presiones en una masa de rellenos sedimentarios por peso propio. El concepto de esfuerzo efectivo fue formulado para entender y explicar la consolidación de un estrato de rellenos finos, considerando que la disminución del volumen de la masa del relleno granular es igual al volumen de agua que es drenada por efecto de un gradiente de presiones. Dicho gradiente es provocado por una carga impuesta con la suficiente rapidez sobre la masa de sedimentos, de tal manera que la permeabilidad del relleno granular o la característica de confinamiento del mismo no permite la salida del agua, y esta puede desarrollar una presión en exceso de las características hidrostáticas del sistema.

Por otro lado, el concepto de esfuerzos efectivos describe de forma satisfactoria el proceso de la transferencia de la presión del agua a la parte sólida del material granular, en una capa arcillosa (acuitardo) intercalada en un acuífero permeable, cuando se origina un descenso en el nivel piezométrico de éste. De acuerdo a Skempton (1961), otro concepto de importancia en problemas de subsidencia es el de las presiones en una masa de rellenos granulares por peso propio.

En geotecnia la presión o esfuerzo intergranular se define como el cociente de la fuerza que soporta el suelo y el área total de la masa de suelo. Tradicionalmente se ha considerado a esta presión como el esfuerzo efectivo para cálculos y análisis teóricos en suelos dando resultados satisfactorios. El autor comenta que existen expresiones que permiten calcular las deformaciones verticales de una columna de sedimentos granulares, por efecto de una disminución del nivel piezométrico, mismas que consideran el incremento de esfuerzos en las zonas del material permeable. Además se puede implementar el análisis de esfuerzos y deformaciones con el

método de elementos finitos, ya que el cálculo de deformaciones y esfuerzos se reduce a un análisis por el efecto de la gravedad terrestre. Las expresiones permiten también el cálculo de deformaciones, tanto en la zona drenada como en la que aún permanece bajo el nivel piezométrico, facilitando la implementación del análisis de un sistema con estratos de diferentes materiales.

Por otra parte autores como Rodríguez *et al.*, (2006), exponen que los fuertes regímenes de extracción en sistemas acuíferos pueden producir hundimientos diferenciales del terreno. Estos causan fracturas y fallamiento por subsidencia en el terreno dañando la infraestructura urbana y particular. Exponen también que en México no existen programas oficiales de ayuda a los afectados a ningún nivel, dado que la subsidencia no es considerada como desastre.

Rodríguez *et al.*, (2006) refieren que entre un 60 al 65% del agua utilizada en México proviene de sistemas acuíferos, muchos de ellos en sobreexplotación, donde el sector agrícola utiliza alrededor del 80% del volumen total. A su vez comentan que la alta dependencia al uso de recursos hídricos subterráneos provoca que la extracción despresurice las zonas no saturadas de los acuíferos, y genere la compactación de los terrenos, proceso que va acompañado de la aparición en superficie de fracturas. Por otro lado, comentan que los primeros reportes que relacionan los hundimientos del terreno con la extracción de agua fueron realizados por R. Fuller en 1908 (Poland e Ireland, 1984).

El primero en tratar de explicar científicamente el fenómeno de la subsidencia asociada a la extracción de agua subterránea fue Erzaghi (1925), quien propone una ecuación de consolidación unidimensional. Dicho trabajo fue retomado por Meinzer, (1928), quien reconoció que la extracción de agua del almacenamiento de un acuífero se debe a la compresión del mismo y que la disminución del almacenamiento puede ser permanente (inelástica) o recuperable (elástica). Las primeras observaciones son realizadas por Rappley y Tibbets en 1933 (citados en Poland e Ireland, 1988) en el Valle de Santa Clara en California. Posteriormente, T. Althouse asoció la extracción

de agua con hundimientos en el Valle de San Joaquín en California en 1935 (en Evans, 1986). En México, Nabor Carrillo, desde la década de 1950, reconoció que la subsidencia está asociada a la extracción de agua subterránea del gran paquete arcilloso de origen lacustre de la cuenca de México.

Con la finalidad de llevar a cabo el proceso InSAR que evalúe la subsidencia en la zona de estudio por efectos de la extracción de agua subterránea, se generó un Sistema de Información Geográfica que considera las siguientes capas: geología, estratigrafía, hidrografía, Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), tipos de suelos, datos de profundidad, elevación y evolución de nivel estático, además de volúmenes de extracción, uso del agua, entre otros datos de interés (Figura 7.1).

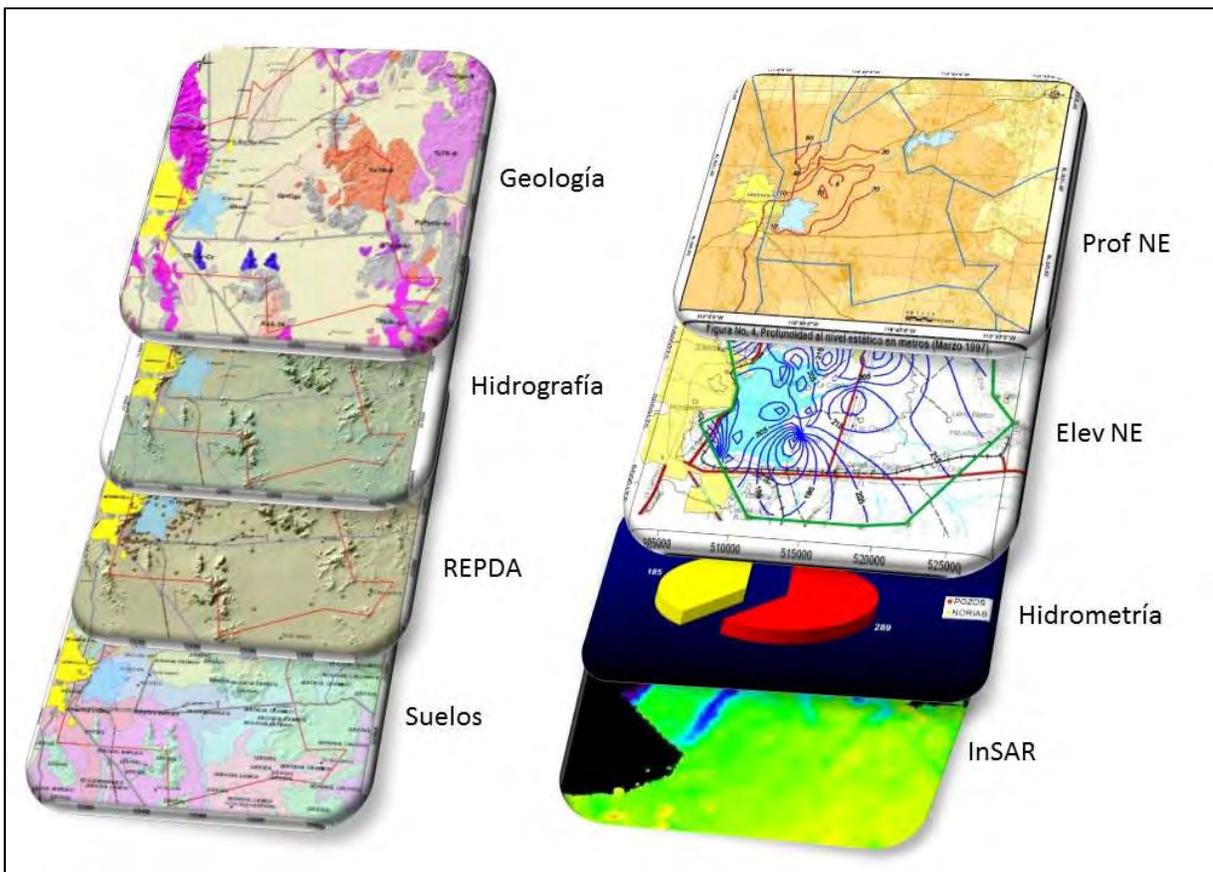


Figura 7.1.- Esquema del Sistema de Información Geográfica diseñado para el presente estudio. La interferometría SAR (Synthetic Aperture Radar), InSAR, es una técnica de teledetección usada para el monitoreo de deformaciones de superficie, basada en imágenes de sensores remotos tipo radar (SAR).

El radar de apertura sintética (SAR) es una forma de teledetección activa. La antena del sensor (satélite o aerotransportado) transmite radiación "iluminante" que luego es reflejada desde el blanco, a diferencia de la detección pasiva, donde se detecta el reflejo de la radiación lumínica ambiente.

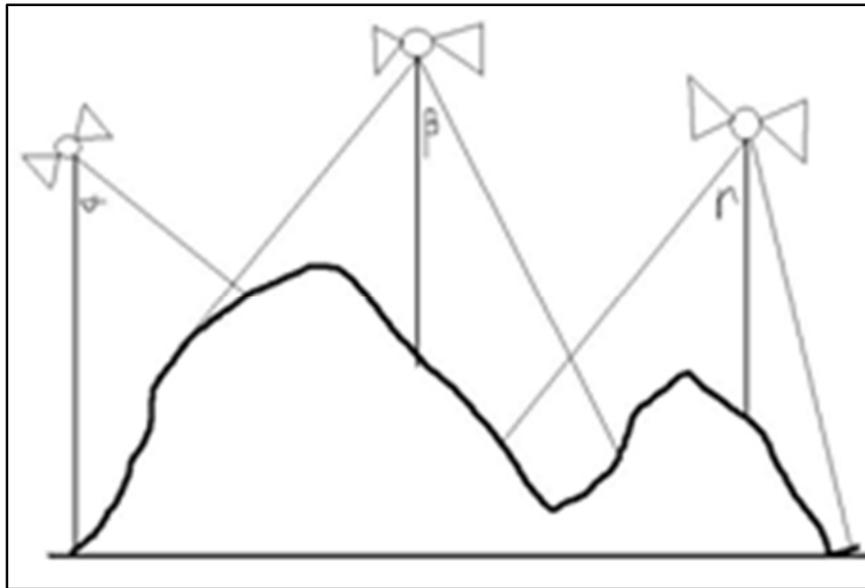
Los Synthetic Aperture Radar (SAR), son sistemas de radares coherentes que generan imágenes de alta resolución. Una apertura sintética o antena virtual, consiste en un extenso arreglo de sucesivas y coherentes señales de radar que son transmitidas y recibidas por una pequeña antena que se mueve a lo largo de un determinado recorrido de vuelo u órbita. El procesamiento de la señal usa las magnitudes y fases de la señal recibida sobre sucesivos pulsos para crear una imagen.

La transmisión de las ondas electromagnéticas por un medio es directamente proporcional a la longitud de onda, de esta forma cuanto menor es la frecuencia del radar mayor será su penetración. Esta facilidad permite la obtención de imágenes donde los sistemas que operan en la región del visible y del infrarrojo se muestran ineficientes, principalmente en situaciones de extensa cobertura de nubes como es la región amazónica.

La extensión de la penetración depende de la humedad, de la densidad de la vegetación, bien como de la longitud de onda. De esta manera, longitudes de onda menores interactúan con los estratos superficiales de la vegetación y las longitudes de onda más largas con los estratos inferiores de la vegetación, pudiendo en algunos casos hasta interactuar con el suelo o inclusive con el subsuelo.

Los radares, al tener distintos de imagen, forman diferentes ángulos con la superficie, lo cual hace que tengamos que transformar matemáticamente la imagen formada. Estas transformaciones generalmente son muy tediosas, por esta razón, trabajar con estas imágenes es dificultoso para muchos.

Para llevar a cabo una interferometría, se utilizan imágenes de radar de apertura sintética (SAR) en diferentes tiempos pero con el mismo ángulo. La intersección de estas dos imágenes se llama interferograma.



Esquema de un interferograma

Las imágenes de radar de apertura sintética (SAR), tipo multitemporal, pueden ser utilizadas para detectar pequeñas deformaciones, proporcionando así subsidencia de milímetros a centímetros por año en zonas donde se presenta dicho fenómeno.

Existen dos algoritmos para llevar a cabo la interpretación InSAR: Small Baselines Interferometry (SBAS) y Persistent Scatter InSAR (PSI).

Los resultados de ambos métodos han mejorado la relación señal-ruido (**SNR: signal-to-noise ratio**) en comparación con trabajos convencionales InSAR que miden solamente el desplazamiento entre dos períodos de tiempo (es decir período intermedio entre dos adquisiciones de imágenes SAR distintas).

El método SBAS se basa en un mecanismo de dispersión distribuida (distributed scattering) sobre una zona de interés, filtrando y promediando los interferogramas

para mejorar el SNR. Este método se basa también en la redundancia involucrada con la inversión de un gran número de interferogramas para calcular el desplazamiento a través del tiempo para cada píxel coherente de la zona.

El método PSI se basa en la identificación de píxeles en el interferograma que presentan un mecanismo de dispersión estable y puntual. Con PSI, los interferogramas se generan en referencia a un único interferograma maestro (dispersores persistentes “persistent scatterers” que son observables en todos los interferogramas que se analizan).

Satélites radar con sensor SAR:

ERS-1 (1991 a 2000)

Envisat (2002 a 2012)

Radarsat-1 (1995 a 2013)

Alos (2006 a 2011)

Radarsat-2 (2007 -)

TerraSAR-X (2007 -)

Referente a la selección del tipo de imagen, fue seleccionado el satélite Alos Palsar en vez de Envisat, lo anterior debido a que evaluaciones anteriores de imágenes SAR con la banda C del satélite Envisat frente a la banda L del satélite ALOS, mostraron que la coherencia interferométrica de la banda C sufre una correlación temporal en la zona de interés más importante que la banda L. Por esta razón decidimos elegir las imágenes Alos Palsar que proporcionarán una medición óptima obtenida con el InSAR, ALOS fue lanzado el 24 de Enero del año 2006, comunicación perdida el 22 de Abril del 2011.



Imagen de Radar ALOS.

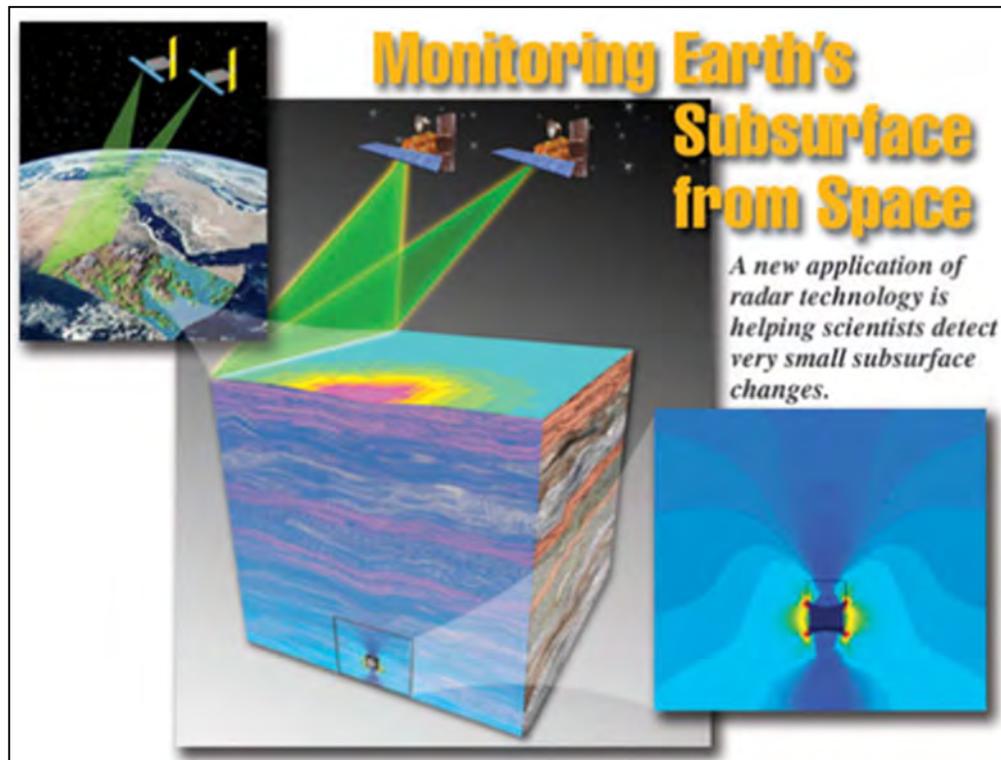


Figura 7.2.- Procesamiento InSAR con imágenes Alos Palsar.

Aplicaciones de las imágenes de Radar:

Geología

- Análisis de estructuras geológicas (fracturas, fallas, pliegues y foliaciones); litotipos, geomorfología (relieve y suelos) e hidrografía para investigación de recursos minerales;
- Evaluación del potencial de los recursos hídricos superficiales y subterráneos;
- Identificación de áreas para prospección mineral.

Agricultura

- Planeamiento y monitoreo agrícola;
- Identificación, mapeo y fiscalización de cultivos agrícolas;
- Determinación relativa de la humedad de los suelos; eficiencia de sistemas de irrigación.
- Cartografía
- Levantamiento planimétrico (escalas 1:20.000 a 1:50.000);
- Levantamiento altimétrico (interferometría).

Bosques

- Gerencia y planeamiento de bosques;
- Determinación de grandes clases de bosques;
- Identificación de la acción de determinadas enfermedades;
- Elaboración de cartografía referente a deforestación;
- Identificación de áreas de corte selectivo;
- Estimativa de biomasa.

Hielo y nieve

- Mapeo/clasificación de hielo;
- Monitoreo del deshielo-inundaciones.

Hidrología

- Gerencia y planeamiento de los recursos hídricos;
- Detección de la humedad del suelo;
- Interpretación de parámetros hidrológicos: transmisividad, dirección de flujo, permeabilidad, entre otros.

Medio Ambiente

- Planeamiento y monitoreo ambiental;
- Identificación, evaluación y monitoreo de recursos hídricos y de los procesos físicos del medio ambiente (intemperismo, erosión, deslizamientos, entre otros);
- Identificación y análisis de la degradación causadas por mineralizaciones, deposición de residuos, acción antrópica, entre otros;
- Identificación, análisis y monitoreo de riesgos ambientales.

Oceanografía

- Monitoreo del estado del mar, corrientes, frentes de viento;
- Espectro de ondas para modelos numéricos de previsión;
- Mapeo de la topografía submarina (condiciones específicas);
- Polución marina causada por derrames de petróleo;
- Detección de barcos - pesca ilegal;
- Apoyo para el establecimiento de rutas marítimas.

Uso de la Tierra

- Planeamiento del uso de la tierra;
- Clasificación de suelos;
- Clasificación del uso de la tierra;
- Inventario, monitoreo (detección de cambios), planeamiento;
- Patrones de irrigación/déficit hídrico;
- Salinización de suelos.

Para llevar a cabo el procesamiento InSAR en este estudio fueron adquiridas 13 imágenes históricas cuyos datos se presentan a continuación, tabla 7.1:

Referencia Imagen Alos PALSAR	Fecha de adquisición	Path	Frame	Absolute Orbit
ALPSRP268280570	06/02/2011	204	570	26828
ALPSRP261570570	22/12/2010	204	570	26157
ALPSRP254860570	06/11/2010	204	570	25486
ALPSRP248150570	21/09/2010	204	570	24815
ALPSRP234730570	21/06/2010	205	570	23473
ALPSRP228020570	06/05/2010	204	570	22802
ALPSRP221310570	21/03/2010	204	570	22131
ALPSRP207890570	19/12/2009	204	570	20789
ALPSRP120660570	30/04/2008	204	570	12066
ALPSRP113950570	15/03/2008	204	570	11395
ALPSRP100530570	14/12/2007	204	570	10053
ALPSRP093820570	29/10/2007	204	570	9382
ALPSRP087110570	13/09/2007	204	570	8711

Tabla 7.1.- Listado de imágenes adquiridas.

En la Figura 7.2 se observa el área que cubren las imágenes referidas en el párrafo anterior:

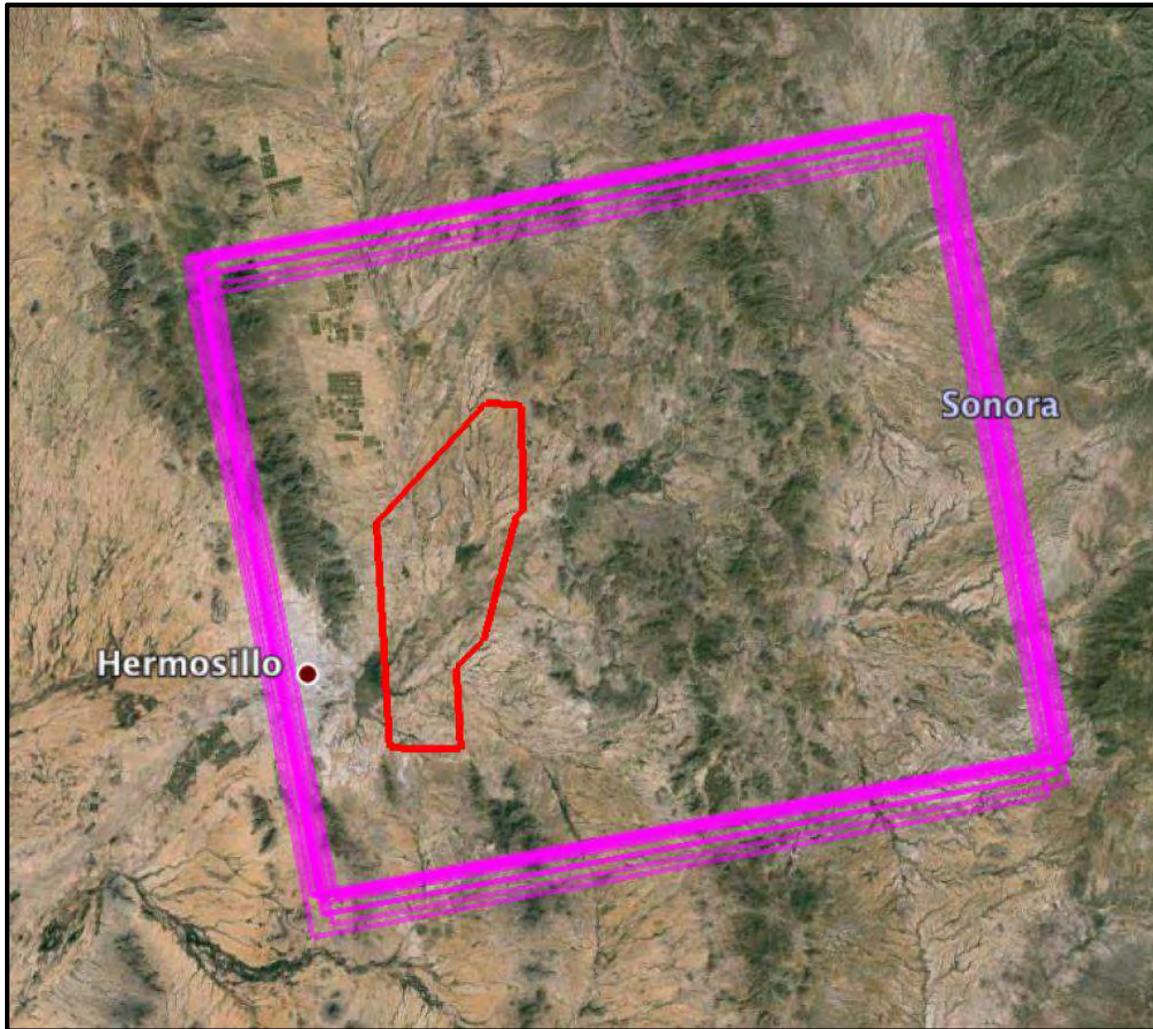


Figura 7.2. Ubicación de los límites de las imágenes seleccionadas

7.2. Descripción de los datos utilizados

Evaluaciones anteriores de imágenes radar SAR con la banda C (del sensor remoto Envisat) frente a la banda L (del sensor remoto ALOS PALSAR), mostraron que la coherencia interferométrica de la banda C sufre una correlación negativa temporal (temporal decorrelation en inglés) en la zona de interés más importante que la banda L. Por esta razón, fueron elegidas las imágenes Alos Palsar, que proporcionan una medición óptima para este estudio. Específicamente fueron seleccionadas 13 imágenes Alos Palsar (Path 204, Frame 570), adecuadas para realizar la serie de tiempo InSAR (Tabla 7.2).

7.3. Método de análisis y resultados

Los interferogramas utilizados en el análisis InSAR fueron generados a partir de una versión modificada de GMTSAR, un software especializado en procesamiento SAR desarrollado por la University of California San Diego, Scripps Institute Of Oceanography [*Sandwell et al.*, 2011].

Debido a que el proceso InSAR suele ser oportuno en términos de datos aceptables, todos los posibles pares InSAR fueron generados (78 interferogramas) y evaluados por un analista para determinar la idoneidad para la generación de la serie de tiempo.

La inversión de series de tiempo requiere interferogramas con una alta coherencia, y a partir de los 78 pares posibles, la serie de tiempo InSAR definitiva se generó de los interferogramas de mejor calidad (Tabla 7.3).

Los interferogramas fueron abiertos (unwrapped en inglés) con el software y algoritmo “Statistical-cost Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping (SNAPHU) [*Chen and Zebker*, 2001].

Master Date	Slave Date	Span (days)	Perpendicular Baseline (m)
13/09/2007	19/12/2009	828	260
29/10/2007	14/10/2007	46	100
29/10/2007	21/03/2010	874	71
29/10/2007	21/06/2010	966	26
14/12/2007	21/03/2010	828	171
14/12/2007	06/05/2010	874	95
14/12/2007	21/06/2010	920	126
30/04/2008	06/02/2011	1012	109
21/03/2010	06/05/2010	46	77
21/03/2010	21/06/2010	92	45
21/03/2010	06/11/2010	230	94
06/05/2010	21/06/2010	46	32
06/05/2010	21/09/2010	138	290
06/05/2010	06/11/2010	184	18
21/06/2010	06/11/2010	138	49
21/09/2010	06/11/2010	46	272
21/09/2010	22/12/2010	92	287

Tabla 7.3.- Lista de los interferogramas utilizados en la inversión de series de tiempo.

Durante la creación de los interferogramas, el componente de la fase topográfica se remueve utilizando un Modelo Digital de Elevación (MDE). En este estudio se usaron los datos del MDE Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) [Farr et al., 2007].

Un nuevo enfoque de corrección de MDE de *Fattahi and Amelung* [2013], resuelve los artefactos topográficos en las series de tiempo utilizando un modelo de deformación de dominio temporal para los efectos de errores del MDE.

Se usó el método Small Baseline Subset (SBAS) para generar las series de tiempo InSAR [Berardino et al., 2002; Lanari et al., 2004]. Para remediar los errores de fase (Orbital Phase Error), se hizo un ajuste y corrección de cada interferograma antes de la inversión de serie de tiempo.

La serie de tiempo de desplazamiento (LOS) se generó a partir de una inversión racional de pixel de la pila de interferogramas, para derivar un desplazamiento a través del tiempo para cada pixel de la línea de visión del radar, “radar line-of-sight” en inglés (LOS) (Figura 7.3). La Figura 7.3 muestra la serie de tiempo de desplazamiento para cada fecha de adquisición de las escenas radar del estudio, dentro de la zona de valle del acuífero Mesa del Seri - La Victoria.

Los colores azules indican un movimiento en sentido opuesto al satélite y los colores rojos un movimiento hacia el satélite. Debido a la extracción de agua subterránea en la zona de interés, es factible suponer que los colores azules en las Figuras 7.3 y 7.4 representan una subsidencia vertical en la zona estudiada.

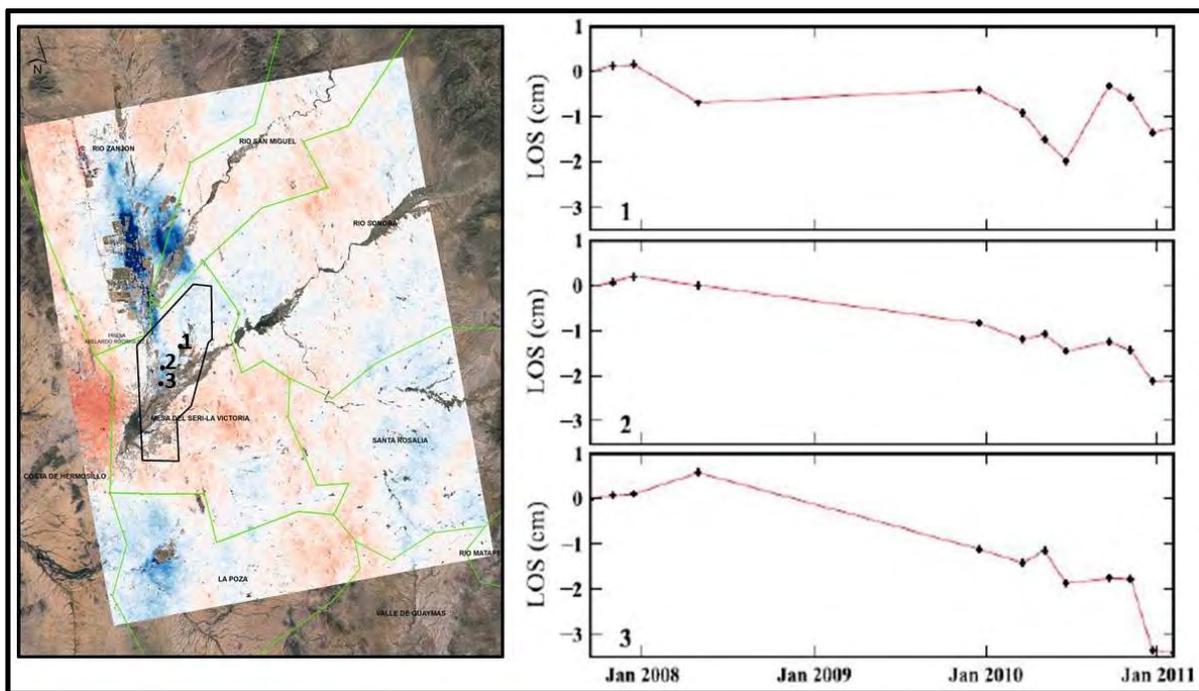


Figura 7.3. En la parte izquierda se representa el mapa de velocidad calculado a partir de la serie de tiempo InSAR. Los puntos negros 1, 2 y 3, representan la geolocalización de la serie de tiempo de desplazamiento (LOS) en la parte izquierda.

La Figura 7.4 representa una serie de tiempo de desplazamiento, es decir, en el área de mayor interés se observa la evolución de la subsidencia del terreno desde el año 2007 (2007-09-13) hasta el año 2011 (2011-02-06).

Desde el año 2007 al año 2009 no se observa evidencia de subsidencia, sin embargo, para los meses de marzo, mayo, junio, noviembre y diciembre de 2010 se observa cómo se incrementan constantemente las zonas con subsidencia (color azul).

Para febrero de 2011 ya se observa bien delimitada la zona de subsidencia en la parte central del acuífero Mesa del Seri-La Victoria, sin embargo y como lo refiere la Figura 7.5, la problemática más fuerte se concentra en la parte sur del acuífero Río Zanjón.

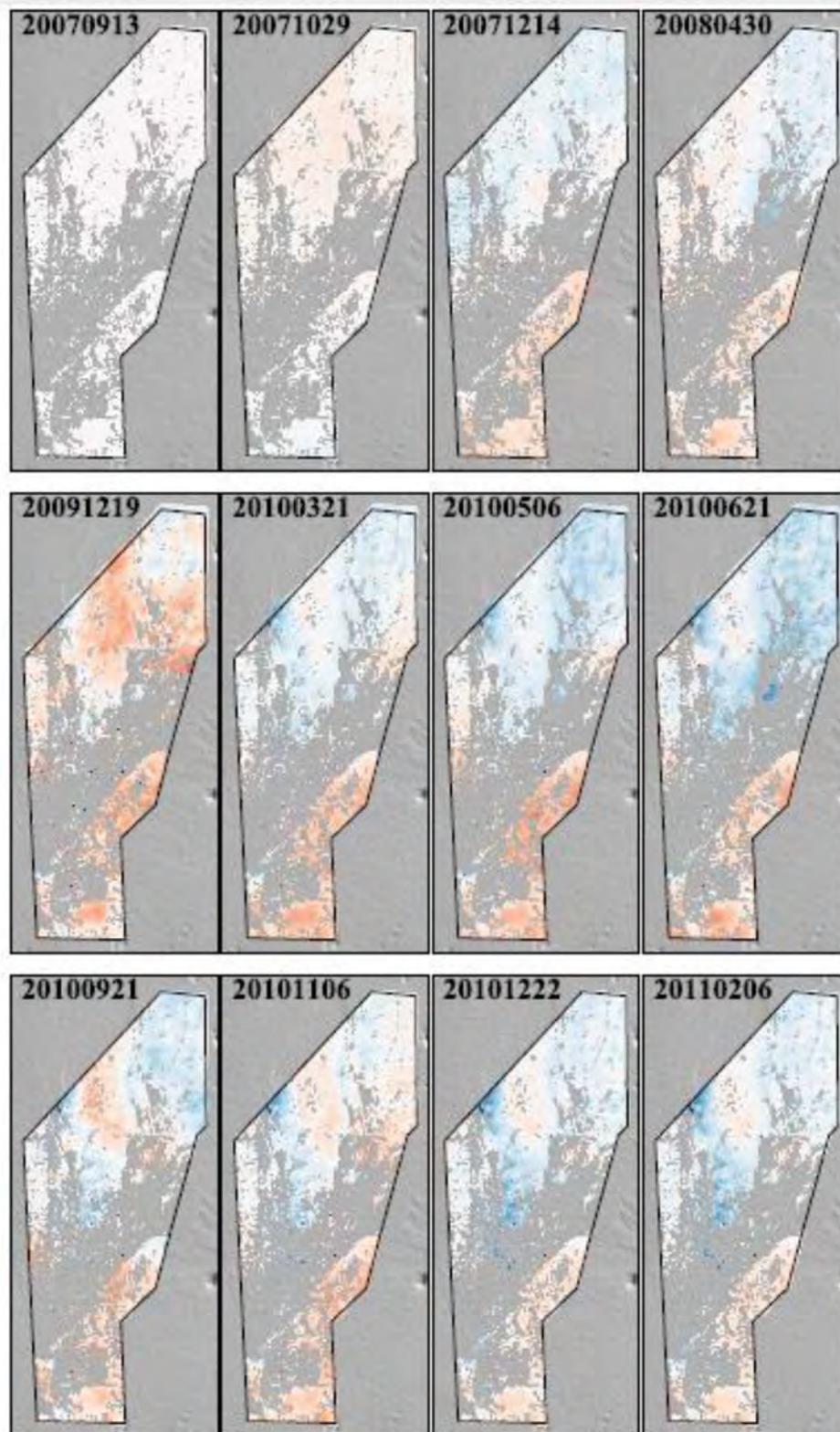


Figura 7.4 Serie de tiempo de desplazamiento (LOS) (SBAS).

En la Figura 7.5 se observa como el mayor grado de subsidencia se localiza al norte del acuífero Mesa del Seri – La Victoria, específicamente al sur del Acuífero Zanjón, con velocidades de descenso entre 0.1 y 2 centímetros por año.

Se observa el comportamiento regional de la subsidencia, tanto en la zona de estudio como en la parte sur del acuífero del Río Zanjón, claramente se visualiza que para el año 2011 el fenómeno de subsidencia ya estaba plenamente marcado en el acuífero Mesa del Seri – La Victoria, sin embargo y como ya lo hemos mencionando, la problemática se concentra en la zona noroeste del acuífero en estudio, observándose en esa zona la mayor tasa de descenso (2 centímetros por año).

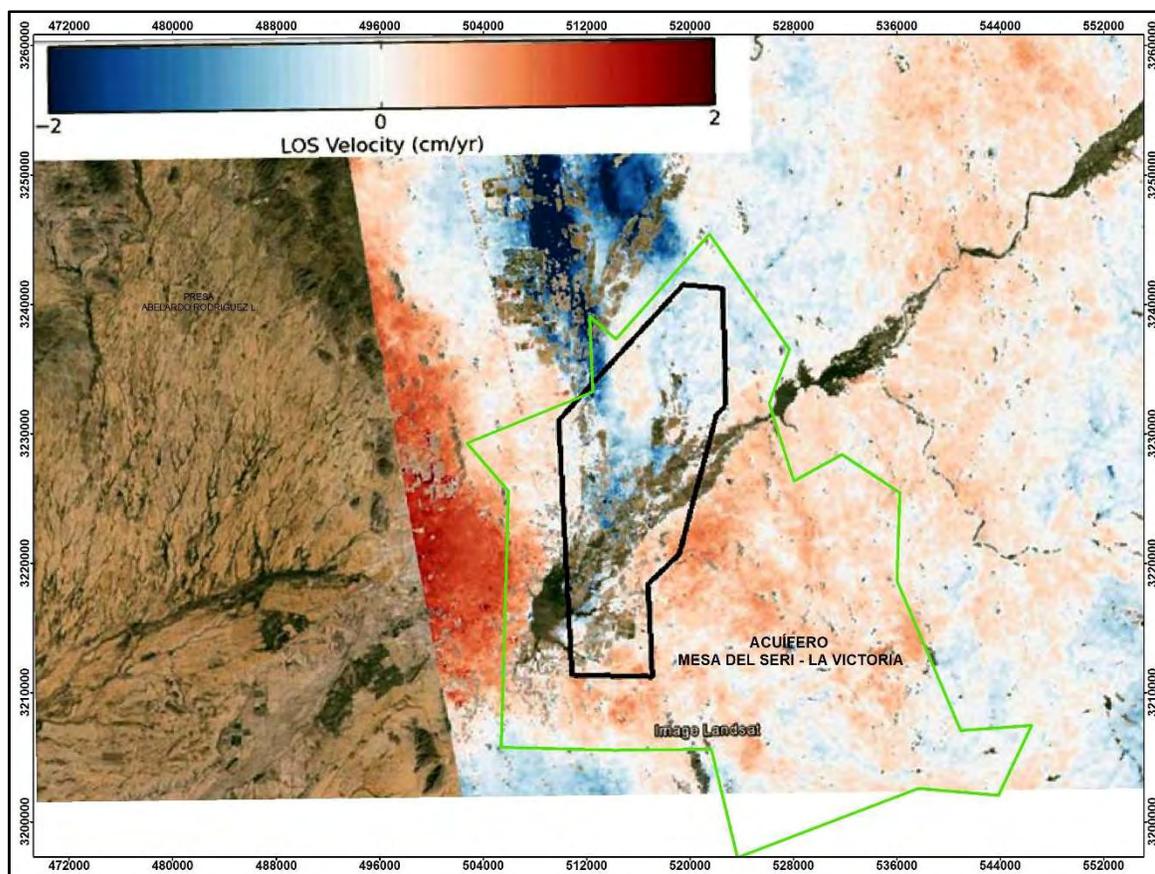


Figura 7.5. Distribución de velocidades de subsidencia.

Se realizó un vuelo en helicóptero en la zona de estudio, con el fin de encontrar evidencia de subsidencia, a continuación se muestran algunas fotografías que se tomaron durante el vuelo;



Fotografía 1.- Una evidencia que muestra subsidencia son grietas que van en sentido perpendicular al drenaje natural.



Fotografía 2.- Las grietas que cortan el drenaje natural y la vegetación.



Fotografía 3.- Otra Grieta que corta el drenaje natural y la vegetación.



Fotografía 4.- Una evidencia muy importante que se encontró fueron una especie de hoyos o hundimientos que van paralelos a las grietas que cortan el drenaje.

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se establece que el método InSAR para determinar la subsidencia es un procedimiento aceptable y que refleja las condiciones de subsidencia en la zona de valles del acuífero Mesa del Seri - La Victoria.
- El mayor grado de subsidencia se localiza al norte del acuífero Mesa del Seri - La Victoria, en particular al sur del acuífero Río Zanjón, con velocidades de descenso de 0.1 a 2 centímetros por año.
- La subsidencia es un fenómeno que recién inicia en el acuífero Mesa del Seri - La Victoria, por lo cual es posible tomar medidas con la finalidad de frenar su avance.

Recomendaciones

- Aplicar el método InSAR en el acuífero Río Zanjón, con la finalidad de caracterizar el fenómeno de subsidencia en todos los límites del acuífero.
- Tomar medidas necesarias para reducir los efectos de la subsidencia en el acuífero Mesa del Seri-La Victoria.
- Promover el desarrollo de la aplicación InSAR en acuíferos donde esté presente el fenómeno de la subsidencia a causa de la sobreexplotación de agua subterránea.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Alencaster G., 1961**, Estratigrafía del Triásico superior de la parte central del estado de Sonora: Univ. Nal. Aut. México, Int. Geología, Paleontología Mexicana V. 11, 18 p.
- **Arnaud A., Granda J., Banwell M. J.**; Monitorización de campos de hidrocarburos con imágenes de satélite radar, Introducción a la tecnología ya sus aplicaciones en el sector del petróleo, el gas y otros. Hi hidrocarburos, Artículo No. 471, Ingeniería Química.
- **Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti (2002)**, A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40(11), 2375-2383, doi:10.1109/TGRS.2002.803792.
- **Cabral E., Díaz O., Delgado H.** Subsistencia y sus mapas de peligro: Un ejemplo en el área nororiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen 63, Numero 2011, p. 53-60.
- **Chen Beibei (2011)**. Análisis de correlación entre extracción de aguas subterráneas y hundimientos de tierra en la Planicie de Beijing, China. *Base of the State Key Laboratory of Urban Environmental Process and Digital Modeling, Capital Normal University, Beijing, China.*
- **Chen, C. W., and H. Zebker (2001)**, Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization, *J. Opt. Soc. Am. And Opt. Image Sci. Vis.*, 18, 338-351, doi:10.1364/JOSAA.18.000338.
- **Cochemé, J.J., 1985**. Le magmatisme cezoique dans le NW du Mexique, Cartographie de la Región Yecora Maicoba, Mulatos Illustration Magmatique de la Fin d' un Regime en Subduction Type Cordillerain et du Passage a un Regime Distonsif. These d' etat. Univ. D' Aix Maseille III, 209 p.
- **Cochemé, J.J., Demant, A., 1991**. Geology of the Yecora area, northern Sierra Madre Occidental, Mexico; studies of Sonoran geology; G.S.A.Special paper 254, p. 81-94.

- **Comisión Estatal del Agua (2004).** Estudio geohidrológico de las subcuencas de los Ríos Sonora, San Miguel, Mesa del Seri – La Victoria y Cuenca Bacoachito.
- **Comisión Estatal del Agua (2006).** Caracterización Geológica y Geofísica del acuífero de la Mesa del Seri – La Victoria.
- **Comisión Estatal del Agua (2009).** Actualización del inventario hidráulico y conformación de un sistema de información geográfica para el manejo del acuífero de la Mesa del Seri – La Victoria.
- **Comisión Nacional del agua (1990).** Determinación del potencial de explotación del Acuífero la Victoria.
- **Comisión Nacional del Agua (1999).** Modelo de simulación hidrodinámica del acuífero Mesa del Seri – La Victoria.
- **Comisión Nacional del agua (2009).** Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea acuífero (2621), Mesa del Seri-La Victoria, estado de Sonora.
- **Corapcioglu, M.Y. (1984).** Land subsidence a state of the art review. Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media. En: Bear and M. Y. Corapcioglu (Ed.), NATO ASI Series E.82, Martinus Nijhoff Publishers, 369-444.
- **Damon, P.E., Shafiquillah, M. Roldán, Q.J. Cocheme, J.J., 1983.** El Batolito Larámide (90-40 M.a) de Sonora: XV Conv. Nac. Ing. Minas Metal Geol. de México p. 63-96.
- **Dumble, E.T., 1900.** Triassic coal and coke in Sonora, México. Geological Society of America Bulletin. Vol. 11, pp. 10-14.
- **Eells, J.L., 1972.** The geology of the Sierra de la Berruga (Precambrian-Paleozoic), northwestern Sonora, Mexico, tesis.
- **Evans, R. S., 1986.** A Regional Groundwater model for Open Cut Coal Winning in the Latrobe Valley, Victoria. AWRC Conference, Groundwater Systems Under Stress, Brisbane.
- **Farr, T. G., et al. (2007),** The Shuttle Radar Topography Mission, *Rev. Geophys.*, 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.

- **Fattahi, H. and F. Amelung (2013)**, DEM Error Correction in InSAR Time Series, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 51(7), doi:10.1109/TGRS.2012.2227761.
- **Gans, P.B., 1997.** Large magnitude Oligo-Mioceno extensión in southern Sonora, implications of the tectonic evolution of northwest Mexico. Department of geological Sciences University of California, Santa Barbara Tectonics, Vol.16, N° 3, p. 388-408.
- **García, E., 1964.** Modificación al sistema climático de Köppen (para adaptarlo al área de estudio).
- **Gastil, G.R., Krummenacher, D., 1977,** Reconnaissance geology of coastal Sonora between Puerto Lobos and Bahía Kino, Geological Society of America Bulletin, v.88. p. 189-198.
- **Giordano N., 2010;** Estudio con georadar (GPR) de la geometría de los procesos de Subsistencia-Creep-Falla (PSCF), en la ciudad de Celaya, Guanajuato, México. Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas.
- **Grijalva-Noriega, F.J. y Roldán-Quintana, J., 1998,** An overview of the cenozoic tectonic and magmatic evolution of Sonora, northwestern Mexico: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, V.15, No. 2, p. 145-156.
- **GYMSA, CNA. (1990).** Determinación del Potencial de Exploración del Acuífero “La Victoria” Como Fuente de Abastecimiento a la Ciudad de Hermosillo Sonora.
- **Herman Valenzuela, Coronado Cruz (1999).** Estudio hidrogeológico comprendido entre las presas Abelardo Rodríguez L. y Rodolfo Félix V. (El Molinito). Tesis de Licenciatura, Dpto de Geología. UNISON.
- **INEGI y Gobierno del Estado. (1993).** Estudio Hidrológico del Estado de Sonora.
- **Instituto Nacional de Estadística Geográfica e informática (INEGI 2010).** Población y actividad económica de la ciudad de Hermosillo.

- **Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente (2007)**. Estudio de evaluación hidrogeológica del acuífero Mesa del Seri- La Victoria, Sonora (obtención de la sustentabilidad del abastecimiento de agua subterránea del acuífero).
- **King, E.R., 1939**. Geological reconnaissance in northern Sierra Madre Occidental of Mexico. Geological Society of America Bulletin. Vol. 50 No.1, pp. 1625-1722.
- **Lanari, R., O. Mora, M. Manunta, J.J. Mallorqui, P. Berardino, and E. Sansosti (2004)**, A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 42, 1377-1386, doi:10.1109/TGRS.2004.828196.
- **Longoria, J.F., González, y Pérez, V. A., 1978**, Bosquejo geológico de los Cerros Chinos y Rajón, Cuadrángulo Pitiquito-La Primavera, NW de Sonora. Boletín del Departamento de la UNI-SON. Vol. 1, No. 2, pp. 119-114.
- **M. Yacuz Corapcioglu (1984)**, Land Subsidence a state of the art. Review. Fundamentals of transport Phenomena in Porous Media. Ed. NA-TO ASI series E. 82, vol. 82, p. 369-444.
- **Marsal R. J. y Mazari M., 1959**. El subsuelo de la Cd. de México: México, D. F. UNAM, Fac. de Ingeniería, Vol I y II, 505 pp.
- **McDowell, F.W., Roldán, Q.J., Amaya, M.R., 1997**, Interrelationship of sedimentary and volcanic deposits associated with Tertiary extension in Sonora, Mexico. Geological Society of America Bulletin. Vol. 109, No. 10, pp. 1349-1360.
- **Meinzer O. E., 1928**. Compressibility and elasticity of artesian aquifers Econ. Geol. Vol. 23, Num 3. 263-291 pp.
- **Menicucci, S., 1975**, Reconnaissance Géologique el Minere de la Región entre Hermosillo et le Río Yaqui (Sonora Central Mexique). These 3eme. Cycle, Grenoble, Francia. 211 p.
- **Miranda, G.M.A., De Jong, K.A., 1992**, The Magdalena mid-tertiary extensional basin. In Clark.K.F., et al., ed. Geology and Mineral Resources of

Northern Sierra Madre Occidental, México. Guidebook for the 1992 field trip. El Paso, Geol. Society, p. 377-384.

- **Mora, A.G., 1993**, Relaciones estratigráficas y geocronológicas entre las unidades volcánicas de la sierra Santa Ursula, en Sonora, y el magmatismo de la región del Golfo de California. Contribuciones a la Tectónica del Occidente de México, Monografía No. 1 Unión Geofísica Mexicana. P. 123-146.
- **Noll, J., 1981**, Geology of the Picacho Colorado area, northern Sierra de Cobachi, central Sonora. M. S. thesis, Flagstaff, Arizona; Northern Arizona University, 165 p.
- **Pacheco J., 2007**; Modelo de Subsistencia del Valle de Querétaro y Predicción de Agrietamientos Superficiales.
- **Poland, J. F., 1984**. Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to Groundwater Withdrawal. UNESCO Studies and Reports in Hydrology no. 40. New York; Unipublications.
- **Poland, J. F., and R. L. Ireland, 1988**. Land Subsidence in the Santa Clara valley, California, as of 1982, Mechanics of Aquifer Systems, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 497-F.
- **Rodriguez R., Armienta A., Morales P, Silva T y Hernández H., 2006**; Evaluación de Vulnerabilidad Acuífera del valle de Irapuato Gto. JAPAMI, CONCyTEG, IGF UNAM. Reporte Técnico il. 90 pp.
- **Sandwell, D., R. Mellors, X. Tong, M. Wei, and P. Wessel (2011)**, Open radar interferometry software for mapping surface deformation, *Eos Trans. AGU*, 92(28), doi:10.1029/2011EO280002.
- **Sarychikhina O., Glowacka E., Suárez Vidal F., Mellors R., Ramírez Hernández J.** Aplicación de DInSAR a los estudios de subsidencia en el Valle de Mexicali. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen 63, núm. 1, 2011, p. 1-13.
- **Scott,R.F. (1979)** Subsidence-a review in evaluation and prediction of subsidence, Ed. By Saxema, SK, Proc. Conf. ASCE, Gainesville, pp 1-25.

- **Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1986).** Informe de exploraciones Geofísicas en el área de la “La Victoria”, “La Mesa del Seri” y “San Pedro El Saucito”
- **SEISMOCONTROL (2007).** Estudio Geofísico de sensores por el método transitorio electromagnético, para determinar posibilidades acuíferas en los terrenos donde se proyecta la construcción de la planta cementera Cementera HOLCIM-APASCO, de la ciudad de Hermosillo, Sonora.
- **Stewart, J.H., McMenamin, M.A.S., Morales, R.J.M., 1984,** Upper Proterozoic and Cambrian rocks in the Caborca region, Sonora, Mexico-Physical stratigraphy, biostratigraphy, paleocurrent studies, and regional relations. United States Geological Survey Professional Paper. 1309. 36 p. 1-36.
- **Tomas R., Herrera G., López-Sánchez J. M., Mallorquí J. J., Mulas J.** Monitorización de la subsidencia del terreno de la Vega Media del río Segura mediante Interferometría SAR Diferencial Avanzada. Ingeniería Civil, Num. 158/2010, ISSN: 0213-8468.
- **Tomás, R. (2009).** Estudio de la ciudad de Murcia mediante Interferometría SAR diferencial avanzada. Tesis doctoral. Universidad de Alicante. 480 pp.
- **Wilson, I.F., Rocha, V.S., 1946,** Los Yacimientos de carbón de la región de Santa Clara, Municipio de San Javier, Estado de Sonora. Comité Directivo para la Investigación de los Recursos Minerales de México. Boletín No. 9, 108 p.
- <http://www.eweb.unex/eweb/edafo/FAO/regosol.htm>; Información de tipos de suelos.
- <http://www.ujed.mx/sigeed/glosario/archivos/x.htm>; descripción de tipos de suelos.