



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE GEOFÍSICA
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

***“MODELO DE FLUJO DEL ACUÍFERO DE
SAN LUIS POTOSÍ, SLP”***

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A
INGRID ALEJANDRA KOHN LEDESMA

DIRECTORA DE TESIS:
DRA. ELSA LETICIA FLORES MÁRQUEZ

MÉXICO D.F. 2009



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA



Ciudad Universitaria

Deleg. Coyoacán

C.P. 04510 México, D.F.

Of. No. PCT/BEMO/388/08

Asunto: Aprobación de tema, asesor de tesis y asignación de jurado para examen de grado.

INGRID KHON LEDESMA

Estudiante de Maestría
Presente,

El Comité Académico del Posgrado, reunido en sesión ordinaria el 25 de marzo del año en curso, APROBÓ como tema de tesis el titulado "Modelo de flujo del acuífero de San Luis Potosí, SLP". Así mismo ratificó a la Dra. Elsa Leticia Flores Márquez como asesora del mismo y designó a los siguientes investigadores como jurado para su examen de grado.

Dr. Oscar Escolero Fuentes
Dra. Claudia Arango Galván
Dra. Leticia Flores Márquez
Dr. Gabriel Jiménez Suárez
Dra. Eloisa Domínguez Mariani

Presidente
Vocal
Secretario *E. Leticia Flores Márquez*
Suplente
Suplente

Sin otro particular por el momento, reciba un saludo cordial.

Atentamente,
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 31 de marzo de 2008.
COORDINADORA DEL PROGRAMA

B. Mendoza Ortega
DRA. BLANCA MENDOZA ORTEGA

c.c.p. Tutor
c.c.p. Miembros del Jurado
c.c.p. Archivo

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y a mi hermana, les agradezco todo el cariño y apoyo que me han dado siempre, pero sobretodo durante toda mi maestría. Gracias a ellos me ha sido más fácil enfrentar los problemas y salir adelante. También le agradezco a Raúl Martínez Ray todo su amor, apoyo y paciencia durante todo este tiempo.

Quiero agradecer muy especialmente a mi asesora la Dra. E. Leticia Flores Márquez, en primera por aceptar ser mi tutora, por siempre darme consejos y apoyo, por preocuparse por mi bienestar, por la infinita paciencia que me tuvo durante toda la realización de esta tesis, por todas sus sugerencias y correcciones, por permitirme colaborar con ella en sus proyectos y haberme dado becas que me ayudaron mucho para poder terminar esta tesis. Espero seguir trabajando tan agradablemente con ella como hasta ahora, durante mucho tiempo.

Agradezco a mi sinodal el Dr. Oscar Escolero Fuentes por todos los acertados consejos y correcciones que me dio para esta tesis, así como su disposición para contestar y analizar mis dudas en todo momento. También le agradezco que me haya dado la oportunidad de colaborar con él en su proyecto externo en la caleta de Xel-ha y darme una beca, la cual me fue de mucha utilidad para poder continuar con esta tesis.

A mi sinodal, la Dra. Claudia Arango Galván, le agradezco todas sus acertadas y prontas correcciones, las cuales me permitieron, entre otras cosas, mejorar la calidad del análisis de resultados y las conclusiones de mi tesis.

A mi sinodal, el Dr. Gabriel Jiménez Suárez, le agradezco haber tenido la paciencia para explicarme y aclarar mis múltiples dudas, así como haberme proporcionado sugerencias para mejorar desde el estilo de escritura hasta el análisis de los resultados finales.

Quiero agradecerle a mi sinodal, la Dra. Eloísa Domínguez Mariani, todas las correcciones, sugerencias y consejos que me dio para esta tesis, gracias a las cuales, varias secciones de mi tesis quedaron mucho mejor explicadas.

A la Mtra. Sandra Edda Martínez quiero agradecerle toda la información que me proporcionó, sin la cual esta tesis no hubiera sido posible. Le agradezco al Dr. Antonio Cardona Benavides haberme proporcionado información sobre el acuífero de SLP y haberme sacado de varias dudas. Al Ing. Juan Márquez Cruz le agradezco haberme ayudado con la búsqueda de la topografía de SLP y con la conversión de archivos.

Le agradezco al Instituto de Geofísica de la UNAM, haberme aceptado como alumna de maestría y haberme permitido tener un lugar para estudiar dentro de sus instalaciones. Al CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) le agradezco haberme dado una beca de maestría durante dos años, la cual me sirvió para poder concluir con el estudio de las materias del posgrado. Le agradezco al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT (DGAPA)), haberme proporcionado una beca dentro del proyecto IN-112906, del cual mi tutora fue responsable.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

- Problemática del acuífero de San Luis Potosí.....11
- Objetivo de la Tesis.....12
- Justificación de la Tesis.....12

CAPÍTULO 1. ÁREA DE ESTUDIO

- 1.1 Descripción del área de estudio.....13
 - 1.1.1 Localización.....13
 - 1.1.2 Zona de veda.....14
 - 1.1.3 Hidrografía.....15
 - 1.1.4 Clima.....16
 - 1.1.5 Usos del suelo y vegetación.....16
 - 1.1.6 Población, vivienda y servicios.....17
 - 1.1.7 Demanda de agua.....18
- 1.2 Geología de San Luis Potosí.....20
 - 1.2.1 Geología de la Provincia Fisiográfica de la Mesa Central.....20
 - 1.2.1.1 Estratigrafía de la Mesa Central.....21
 - 1.2.1.1.1 Mesozoico.....21
 - 1.2.1.1.2 Cenozoico.....22
 - 1.2.1.2 Fallas mayores que limitan la Mesa Central.....24
 - 1.2.1.2.1 La falla del Bajío.....24
 - 1.2.1.2.2 Sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende.....24
 - 1.2.1.2.3 Sistema de fallas San Luis-Tepehuanes.....26
 - 1.2.1.2.4 Graben de Aguascalientes.....27
 - 1.2.1.3 Sistema de fallas en el interior de la Mesa Central.....27
 - 1.2.2 Geología del Valle de San Luis Potosí.....28
 - 1.2.3 Sistema de fallas en el Valle de San Luis Potosí.....37

CAPÍTULO 2. HIDROGEOLOGÍA

- 2.1 Revisión de estudios hidrogeológicos anteriores.....39
- 2.2 Potenciometría histórica del acuífero de San Luis Potosí.....43
 - 2.2.1 Información potenciométrica disponible.....43
 - 2.2.2 Potenciometría histórica del acuífero somero de San Luis Potosí.....45
 - 2.2.2.1 Sistema de flujo del acuífero somero.....47
 - 2.2.3 Potenciometría histórica del acuífero profundo de San Luis Potosí.....48
 - 2.2.3.1 Curvas de profundidad al nivel estático en 1995 y 2005.....50
 - 2.2.3.2 Curvas de elevación al nivel estático en 1995 y 2005.....52
 - 2.2.3.3 Dirección de flujo del agua subterránea.....54
- 2.3 Descripción conceptual del acuífero de San Luis Potosí.....56
 - 2.3.1 Introducción.....56

2.3.2 El acuífero de San Luis Potosí.....	56
2.3.3 Tipo de material.....	56
2.3.4 Respuesta hidráulica.....	57
2.3.5 Corrección por temperatura.....	57
2.3.6 Conductividad hidráulica.....	59
2.3.7 Transmisividad.....	59
2.3.8 Velocidad de flujo.....	60
2.3.9 Consolidación en el acuífero de San Luis Potosí.....	60
2.3.10 Sistemas de flujo.....	61
2.3.11 Calidad del agua subterránea.....	63
2.3.12 Presencia del F ⁻	65
2.3.13 Geotermómetros.....	65
• 2.4 Balance hidrológico de agua subterránea.....	67
2.4.1 Balance hidrológico de la cuenca de San Luis Potosí.....	67
2.4.2 Recarga.....	67
2.4.3 Descarga.....	68
2.4.4 Cambio de almacenamiento.....	69
CAPÍTULO 3. MODELO DE FLUJO	
• 3.0 Introducción.....	72
• 3.1 Acerca de Visual Modflow 3.1.....	72
3.1.1 Modelo matemático en Visual Modflow (Ecuaciones de flujo).....	73
3.1.2 Discretización espacial y temporal.....	74
3.1.3 Ecuación de diferencias finitas.....	75
3.1.4 Condiciones iniciales y de frontera para la solución de las ecuaciones de flujo.....	78
• 3.2 Geometría y parámetros del modelo de flujo.....	81
3.2.1 Geometría del modelo.....	81
3.2.2 Parámetros hidrogeológicos.....	83
3.2.3 Condiciones de frontera.....	84
3.2.4 Pozos de extracción.....	84
• 3.3 Modelo de flujo en estado estacionario.....	86
• 3.4 Modelo de flujo en estado transitorio.....	87
3.4.1 Modelo de flujo transitorio para el año 1995.....	88
3.4.2 Modelo de flujo transitorio para el año 2005.....	91
3.4.3 Modelo de flujo transitorio para el año 2015.....	92
• 3.5 Calibración del modelo para los años 1995 y 2005.....	94
• 3.6 Escenarios de explotación del acuífero.....	96
3.6.1 Modelos predictivos.....	96

3.6.2	Modelos de remediación.....	102
3.6.2.1	Disminución de la extracción.....	102
3.6.2.2	Reubicación de pozos.....	104
•	CONCLUSIONES.....	107
•	ANEXO (Tablas 2.3 y 2.4).....	109
•	BIBLIOGRAFÍA.....	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Localización del valle de San Luis Potosí, de la ciudad de SLP y de la zona de estudio (área dentro del cuadro) que abarca esta tesis en coordenadas UTM.....	13
Figura 1.2 Municipios existentes dentro del área de influencia del acuífero San Luis Potosí.....	14
Figura 1.3 Zonas de veda para la extracción de agua subterránea por región hidrológico-administrativa 2006.....	15
Figura 1.4 Población total y tasa de crecimiento media anual 1950-2005.....	18
Figura 1.5 Ubicación de la ciudad de SLP dentro de la Provincia Fisiográfica de la Mesa Central.....	20
Figura 1.6 Modelo de elevación digital de la República Mexicana indicando la ubicación de la Mesa Central. FVTM: Faja Volcánica Transmexicana. La línea punteada indica la división entre la parte sur y norte de la Mesa Central.....	21
Figura 1.7 Mapa que muestra la localización de las estructuras mayores de la Mesa Central. GT: graben de Tepehuanes, GR: graben de Rodeo, LS: laguna de Santiaguillo, GRCH-O: graben Río Chico-Otinapa, GA: graben de Aguascalientes, FVH: falla Villa Hidalgo, FBV: falla Buena Vista, FO: falla El Obraje, FVA: falla Villa de Arriaga, FLP: falla Los Pájaros, GC: graben El Cuarenta, FB: falla del Bajío, GS: graben de La Saucedá, GB: graben de Bledos, GVR: graben Villa de Reyes, GVA: graben Villa de Arista, GE: graben de Enramadas, DQ: depresión de La Quemada, SSM: sierra San Miguelito, SG: sierra de Guanajuato, SC: sierra de Catorce, SS: sierra de Salinas, RC: Real de Catorce, G: Guanajuato, SLP: San Luis Potosí, SMR: Santa María del Río, SLDP: San Luis de la Paz, ND: Nombre de Dios, SMA: San Miguel de Allende, Q: Querétaro.....	26
Figura 1.8 Columna estratigráfica del área de estudio.....	28
Figura 1.9 Distribución de los afloramientos de rocas en la zona de estudio y localización de las diez secciones geológicas transversales.....	29
Figura 1.10 Mapa de localización de la Ciudad de San Luis Potosí y poblados aledaños.....	30
Figura 1.11a Estratos de las secciones geológicas transversales.....	36
Figura 1.11b Estratos de las secciones geológicas transversales.....	37
Figura 2.1 Ubicación de pozos con información histórica de niveles estáticos.....	45
Figura 2.2 Profundidad al nivel freático del acuífero somero para el 2004.....	46
Figura 2.3 Elevación al nivel freático y dirección de flujo subterráneo del acuífero somero de SLP.....	47
Figura 2.4 Sistema de flujo del acuífero somero de la ciudad de San Luis Potosí.....	48
Figura 2.5 Distribución de los niveles potenciométricos del acuífero profundo para el año 1977.....	49
Figura 2.6 Distribución de los niveles potenciométricos del acuífero profundo para el año 1984.....	49
Figura 2.7 Distribución de los niveles potenciométricos del acuífero profundo para	

el año 1992.....	49
Figura 2.8 Distribución de los niveles potenciométricos del acuífero profundo para el año 1994.....	49
Figura 2.9 Distribución de los niveles potenciométricos del acuífero profundo para el año 1996.....	49
Figura 2.10 Distribución de los niveles potenciométricos del acuífero profundo para el año 1998.....	49
Figura 2.11 Distribución de los niveles potenciométricos del acuífero profundo para el año 1999.....	50
Figura 2.12 Distribución de los niveles potenciométricos del acuífero profundo para el año 2001.....	50
Figura 2.13 Distribución de los niveles potenciométricos del acuífero profundo para el año 2003.....	50
Figura 2.14 Curvas de profundidad al nivel estático en 1995.....	51
Figura 2.15 Curvas de profundidad al nivel estático en 2005.....	52
Figura 2.16 Curvas de elevación del nivel estático para el año 1995.....	53
Figura 2.17 Curvas de elevación del nivel estático para el año 2005.....	54
Figura 2.18 Dirección de flujo de agua subterránea para el año 2005.....	55
Figura 2.19 Disposición de materiales geológicos del subsuelo de la cuenca de San Luis Potosí.....	57
Figura 2.20 Distribución horizontal de la temperatura del agua subterránea en el acuífero profundo medida a la descarga de pozos.....	58
Figura 2.21 Relación Li^+ :temperatura para el agua subterránea del acuífero profundo....	62
Figura 2.22 Sistemas de flujo en la cuenca de San Luis Potosí y su relación con la geología.....	63
Figura 3.1 Esquema de discretización del acuífero.....	74
Figura 3.2 Sistema de bloque centrado (las estrellas representan los nodos).....	75
Figura 3.3 Topografía del área modelada.....	81
Figura 3.4 Mallado del área modelada.....	82
Figura 3.5 Corte transversal del modelo mostrando las capas que lo constituyen.....	83
Figura 3.6 Modelo de flujo en estado estacionario.....	86
Figura 3.7 Localización de los pozos de extracción y de observación del modelo de flujo.....	88
Figura 3.8 Configuración de la superficie potenciométrica generada por el modelo para el año 1995.....	89
Figura 3.9 Configuración de la superficie potenciométrica generada por el modelo para el año 2005.....	91
Figura 3.10 Configuración de la superficie potenciométrica generada por el modelo para el año 2015.....	92
Figura 3.11 Relación entre la carga hidráulica observada y la calculada por el modelo para el año 1995.....	94
Figura 3.12 Relación entre la carga hidráulica observada y la calculada por el modelo para el año 2005.....	95
Figura 3.13 Superficie potenciométrica para el año 2015 con un volumen de extracción extra por pozo de $383 \text{ m}^3/\text{día}$ y una tasa de crecimiento poblacional del 0.4% anual.....	98

Figura 3.14 Superficie potenciométrica para el año 2015 con un volumen de extracción extra por pozo de 574 m ³ /día y una tasa de crecimiento poblacional del 0.6% anual.....	99
Figura 3.15 Superficie potenciométrica para el año 2015 con un volumen de extracción extra por pozo de 765 m ³ /día y una tasa de crecimiento poblacional del 0.8% anual.....	100
Figura 3.16 Superficie potenciométrica para el año 2015 con un volumen de extracción extra por pozo de 957 m ³ /día y una tasa de crecimiento poblacional del 1.0% anual.....	101
Figura 3.17 Superficie potenciométrica para el año 2015 con un 30% menos de volumen de extracción en los pozos 19 al 33 y una tasa de crecimiento poblacional del 1.0% anual.....	103
Figura 3.18 Superficie potenciométrica para el año 2015 con 4 nuevos pozos que extraen el volumen del 30% que se redujo en el modelo de disminución. La tasa de crecimiento poblacional es del 1.0%.....	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Principales cultivos de riego sembrados dentro de los límites de la poligonal del acuífero de SLP.....	17
Tabla 1.2 Población total de los municipios localizados dentro del área de estudio.....	17
Tabla 1.3 Volumen concesionado para usos consuntivos para el estado de San Luis Potosí 2006.....	18
Tabla 1.4 Volumen de suministro de agua para la conurbación de San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez y Cerro de San Pedro 2001-2003.....	19
Tabla 2.1 Estudios hidrogeológicos anteriores.....	39
Tabla 2.2 Resumen de mediciones potenciométricas por año, dentro del acuífero profundo de San Luis Potosí.....	44
Tabla 2.3 Pozos con datos de profundidad al nivel estático del acuífero profundo de San Luis Potosí durante el periodo 1995-2005.....	109
Tabla 2.4 Datos del muestreo de las norias del acuífero somero de San Luis Potosí.....	111
Tabla 2.5 Concentraciones promedio de diversos elementos y compuestos en las aguas subterráneas de la cuenca de SLP (en mg/l).....	65
Tabla 2.6 Balance de agua subterránea del acuífero de SLP.....	69
Tabla 2.7 Relación del balance hidrogeológico en el valle de SLP.....	70
Tabla 3.1 Capas que conforman el modelo de flujo.....	82
Tabla 3.2 Parámetros hidrogeológicos por capa del modelo.....	83
Tabla 3.3 Total de población en 2005 y en 2015 en los municipios de Cerro de San Pedro, Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez, por tasa de crecimiento poblacional anual.....	97
Tabla 3.4 Extracción adicional por pozo por cada tasa de crecimiento poblacional.....	97

INTRODUCCIÓN

Problemática del acuífero de San Luis Potosí

En muchas regiones semiáridas de México, el agua subterránea es la principal fuente de agua potable, para riego agrícola y usos industriales. La ciudad de San Luis Potosí se localiza en una de estas zonas. Su clima es templado con verano cálido semiárido según la clasificación mundial de climas debida a Köppen (1936), la temperatura media anual es de 17.6 °C, la precipitación media anual es de 378.7 mm, donde la época normal de lluvias comprende los meses de junio a septiembre, período en el que se presenta el 65% de la precipitación anual. El mes de máxima lluvia es julio en tanto que el mes de menor pluviosidad es febrero.

Este tipo de clima en San Luis Potosí provoca que los recursos hídricos sean escasos en buena parte del año debido a las pocas lluvias y a la alta evaporación potencial media anual (1990 mm), y aunado a lo anterior, la zona de estudio no cuenta actualmente con fuentes superficiales (ríos) para abastecimiento de agua potable.

Otro problema de la zona de estudio es que el riego agrícola se realiza con agua de desecho sin previo tratamiento, lo cual produce el deterioro de la calidad del agua subterránea somera, limitando los recursos de agua para consumo humano.

Por otro lado, en el acuífero de San Luis Potosí, los efectos naturales de interacción agua-material geológico ocasionan elevadas concentraciones de flúor disuelto en el agua subterránea termal de hasta de 3.8 mg/l, siendo que el valor máximo aceptado por la norma de agua para consumo humano (NOM-127-SSA1-1994) es de 1.5 mg/l. La explotación intensiva del agua subterránea, la cual provoca un descenso progresivo de los niveles de agua, sólo empeora el problema pues se han tenido que perforar pozos más profundos que intersecan el medio termal, los cuales extraen agua con niveles elevados de flúor, que no es apta para consumo humano.

Otro problema de este acuífero, es que la ciudad de San Luis Potosí es una de las conurbaciones del país que tienen una tasa media de crecimiento anual de la población con un índice alto (0.8% del 2000 al 2005), por lo que cada vez la demanda de agua subterránea es mayor.

La combinación de todos los factores arriba mencionados crea los problemas de escasez, mala calidad y creciente abatimiento de los niveles del agua subterránea en el acuífero de San Luis Potosí.

Objetivo de la Tesis

Proporcionar alternativas de extracción que produzcan menor desequilibrio del acuífero de San Luis Potosí, con base en un modelo de flujo transitorio que integre la información geológica y geofísica del acuífero.

Justificación de la Tesis

Presentar un modelo confiable que simule el comportamiento del acuífero ante situaciones de trabajo reales, para que los organismos responsables de la administración del agua en la ciudad de San Luis Potosí, tomen decisiones adecuadas en cuanto a:

- Planear la administración del sistema acuífero bajo un marco de extracción sustentable.
- Orientar el uso del agua que se encuentra disponible, de una forma eficiente.
- Ubicar la perforación de nuevos pozos de extracción.
- Determinar los caudales máximos de extracción sin provocar un abatimiento excesivo del agua subterránea del acuífero.
- Planear un manejo apropiado y eficiente del agua subterránea junto con los planes de manejo del agua subterránea urbana.

CAPÍTULO 1

1.1 Descripción del área de estudio

1.1.1 Localización

La cuenca hidrológica de San Luis Potosí se localiza en la porción suroeste del estado del mismo nombre, en ella se ubica la capital del estado de San Luis Potosí, dentro de la Provincia Fisiográfica Mesa Central Mexicana, situada entre las dos grandes sierras Mexicanas: la Madre Oriental y la Madre Occidental. Es una cuenca endorreica superficial cerrada con una superficie aproximada de 1980 km². El valle de San Luis Potosí tiene una altitud aproximada de 1850 m sobre el nivel medio del mar (m.s.n.m.) y se localiza en la parte sureste de la entidad, entre los 22° 00' y 22° 23' de latitud norte, y entre los meridianos 100° 42' y 101° 05' de longitud oeste (INEGI, 2000). El valle de SLP limita hacia el oeste con la sierra de San Miguelito, hacia el oriente con la sierra de San Pedro, y con una serie de cerros aislados tanto por el noroeste como al suroeste. La localización del valle de San Luis Potosí, de la ciudad de SLP y de la zona de estudio que abarca esta tesis, se presentan en la Figura 1.1 en coordenadas UTM.



Figura 1.1 Localización del valle de San Luis Potosí, de la ciudad de SLP y de la zona de estudio (área dentro del cuadro) que abarca esta tesis en coordenadas UTM, (Google Maps, 2009).

De acuerdo a INEGI (2000), geopolíticamente, el acuífero de SLP comprende en su totalidad los municipios de Soledad de Graciano Sánchez (SGS) y Cerro San Pedro y parcialmente los municipios de San Luis Potosí y Mexquitic de Carmona (Figura 1.2).



Figura 1.2 Municipios existentes dentro del área de influencia del acuífero San Luis Potosí (INEGI, 2000).

1.1.2 Zona de Veda

La República Mexicana ha sido dividida por la CNA en 653 acuíferos, de los cuales 104 están sobreexplotados. A partir de la década de los setenta, ha venido aumentando el número de acuíferos sobreexplotados de 32 en 1975 a 104 en el 2006.

Para revertir el descenso del nivel del agua subterránea y aumentar el volumen de agua almacenada en los acuíferos sobreexplotados el gobierno federal ha determinado zonas de veda que prohíben o restringen las extracciones de agua en las zonas en que se ubican acuíferos sobreexplotados. Se tienen 145 zonas de veda (CONAGUA, 2007).

Mediante decreto presidencial publicado en el Diario Oficial de la Federación, de fecha 30 de Junio de 1961, se declaró Zona de Veda para parte del valle de San Luis Potosí. Posteriormente, el 18 de Octubre de 1962, se vedó la porción complementaria de los valles de San Luis Potosí y Villa de Reyes, con este decreto se cubrió prácticamente toda el área de explotación de ambos valles. Finalmente, el 3 de diciembre de 1985, se vedó, también mediante publicación en el Diario Oficial de la Federación, las porciones faltantes de los municipios de San Luis Potosí y Villa de Reyes, con lo que quedó cubierta, incluso, la zona de recarga de estos acuíferos. Dichas vedas, restringieron el alumbramiento de aguas del subsuelo para cualquier uso, excepto para fines doméstico y abrevadero (CNA, 2002).

En la Figura 1.3 se muestran las zonas de México que tienen algún tipo de veda, así como las zonas de libre alumbramiento. La zona de estudio se encuentra dentro de la región hidrológico-administrativa VII.

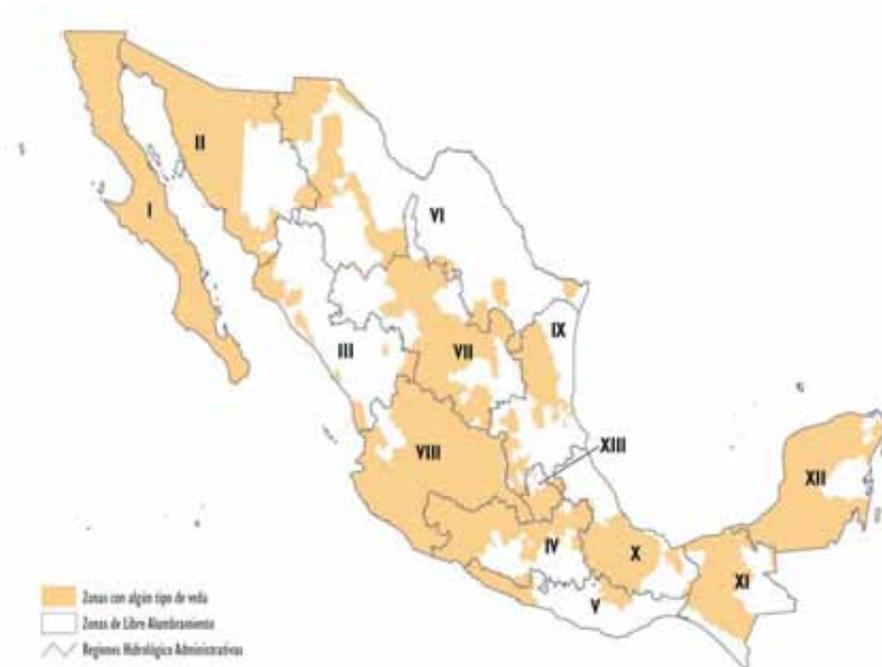


Figura 1.3 Zonas de veda para la extracción de agua subterránea por región hidrológico-administrativa 2006 (CONAGUA, 2007).

1.1.3 Hidrografía

El área de estudio comprende la cuenca endorreica de San Luis Potosí, que forma parte de la Región Hidrológica No. 37 “El Salado”. La conurbación de San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez se ubica al centro de esta cuenca hidrológica. En esta zona existen actualmente cuatro presas de almacenamiento de aguas superficiales, dos de ellas consideradas de mayor importancia ya que sus aguas son utilizadas como fuente de abastecimiento de agua potable de la conurbación de la ciudad de San Luis Potosí; estas

presas son las de “San José y “El Peaje”, con una capacidad útil de 5.1 Mm³ y 6.7 Mm³, respectivamente (Tecnología ASSUL, 2005).

Las corrientes superficiales son intermitentes y de escaso desarrollo, pues al llegar a la unidad de planicie el escurrimiento se infiltra en los materiales granulares que conforman la porción superior del acuífero; destaca el río Santiago que es el principal colector de la cuenca, por la magnitud de los escurrimientos le siguen en importancia los ríos Española, Paisanos y La Parada (COTAS, 2003). Como la planicie está ahora ocupada por la ciudad de SLP, los ríos son conducidos ya que se encuentran entubados.

1.1.4 Clima

La temperatura media anual, tomada de la estación climatológica San Luis Potosí en el período de 1979 a 2001 es de 17.6°C y la precipitación media anual en el Valle varía desde 353.0 hasta 403.7 mm, habiéndose reportado en la estación El Peaje una precipitación anual en el año más seco de 259.3 mm y en el año más lluviosos 631.1 mm y en la estación San Luis Potosí una precipitación del año más seco de 168.7 mm y en el año más lluviosos 528.1 mm, presentándose la mayor altura de lluvia en las partes altas del Valle, específicamente en las Sierras de San Miguelito y de Álvarez (INTERPAS, 2005).

El mes más caluroso es mayo, a partir del cual la temperatura desciende gradualmente hasta diciembre y enero, meses en que se presentan las temperaturas más bajas, para después volver a ascender durante los meses siguientes.

La temporada de lluvias se declara formalmente en el mes de mayo, las precipitaciones mayores ocurren en los meses de junio y septiembre, mientras que la temporada de estiaje tiene lugar entre los meses de octubre a abril.

La evaporación potencial media anual varía desde 1,950 mm en la parte oriental del valle, hasta 2,250 mm a los pies de la sierra San Miguelito, o sea un promedio del orden de 1,990 mm para todo el valle de San Luis Potosí (Sabinfosistem, 2005).

1.1.5 Usos del suelo y vegetación

En cuanto a la vegetación y uso de los suelos, en la porción central del valle de San Luis Potosí predomina el cultivo de nopaleras, también se aprecia algo de agricultura de temporal, cultivándose maíz principalmente, y pequeñas áreas donde se practica la agricultura de riego donde se cultivan maíz y frijol, gracias sobre todo a la disponibilidad de aguas residuales, y por último algo de pastizal inducido. En el resto del área predomina todavía la vegetación natural, así, al occidente de la sierra San Miguelito, se aprecian remanentes de bosques de pino y encino, así como pastizal natural y chaparral; hacia las sierras del oriente predomina matorral, matorral desértico, algo de matorral espinoso y chaparral (Ariel Consultores, 1996).

Según datos de la SAGARPA, el 62.8% de la superficie agrícola de riego del año 2002 se concentró dentro del municipio de San Luis Potosí (4380 ha), el restante 37.2% de la superficie agrícola de riego fue sembrada en los municipios de Soledad de Graciano Sánchez y Mexquitic de Carmona (Sabinfosistem, 2005). Los cultivos principales de riego que se siembran en el área de estudio se presentan en la Tabla 1.1.

Cultivos	Superficie sembrada de riego (Ha)
Café cereza	2820
Tomate rojo (jitomate)	1560
Maíz grano	1400
Avena forrajera en verde	600
Chile seco	600

Tabla 1.1 Principales cultivos de riego sembrados dentro de los límites de la poligonal del acuífero de SLP (Sabinfosistem, 2005).

1.1.6 Población, vivienda y servicios

De acuerdo con los resultados definitivos del II Censo de Población y Vivienda 2005, residían en todo el estado de San Luis Potosí un total de 2 millones 410 mil 414 personas, de las cuales 51.6% eran mujeres y 48.4% eran hombres. La población total de los municipios que se encuentran dentro del área de estudio que nos ocupa, se aprecia en la Tabla 1.2.

Municipio	Población total
San Luis Potosí	730,950
Soledad de Graciano Sánchez	226,803
Mexquitic de Carmona	48,484
Cerro de San Pedro	3,278

Tabla 1.2 Población total de los municipios localizados dentro del área de estudio (INEGI, 2005).

En el período 2000 a 2005 la tasa media de crecimiento anual de la población fue de 0.8%, mientras que en el quinquenio anterior fue de 1.0 por ciento (Figura 1.4).

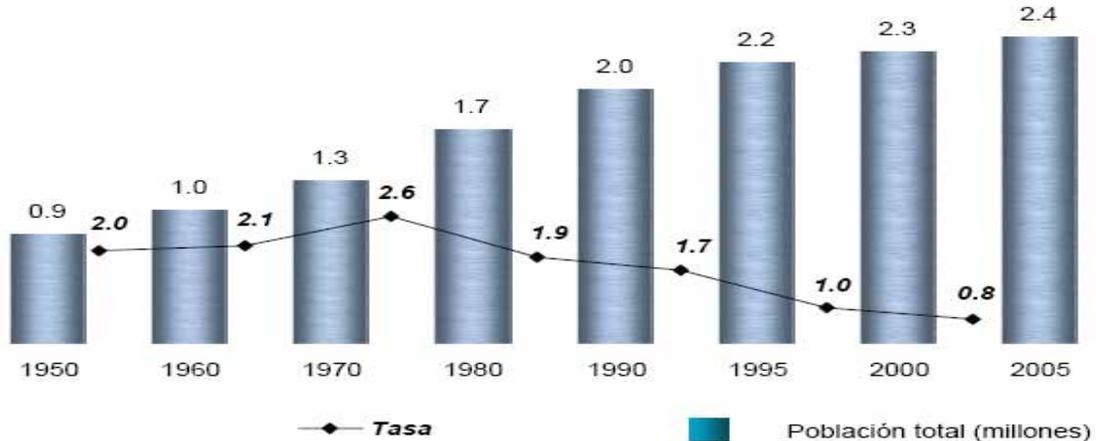


Figura 1.4 Población total y tasa media de crecimiento anual 1950-2005 (INEGI, 2005).

El estado de San Luis Potosí tenía al 17 de octubre de 2005, un total de 2 millones 410 mil 414 residentes habituales, que representan el 2.3% de los 103.3 millones que conforman la población de la República Mexicana, con lo que ocupa el lugar 17 a nivel nacional.

El proceso de envejecimiento de la población continúa en la entidad, la población de 60 años y más se incrementó de 186 mil 868 en 2000 a 221 mil 334 en 2005.

El estado de San Luis Potosí muestra un perfil predominantemente urbano; el 42.2% de su población reside en localidades de 100 mil y más habitantes, 8.0% en asentamientos de 15 mil a menos de 100 mil personas, 12.4% en las de 2,500 a menos de 15 mil habitantes y el 37.4% de su población reside en localidades de menos de 2,500 habitantes.

La disponibilidad de servicios en las viviendas se ha incrementado en los últimos cinco años. El porcentaje de viviendas que disponen de energía eléctrica pasó de 88.5 a 93.9%; las que tienen acceso a agua potable por medio de la red pública, de 76.1 a 82.0% y las que disponen de drenaje conectado a la red pública del 52.8 al 58.3% (INEGI, 2005).

1.1.7 Demanda de agua

Los volúmenes concesionados para todo el estado de San Luis Potosí, se describen en la Tabla 1.3.

Volumen total concesionado Mm ³	Agrícola Mm ³	Abastecimiento público Mm ³	Industria autoabastecida sin termoeléctricas Mm ³	Termoeléctricas Mm ³
1310.5	1060.4	168.6	40.5	41

Tabla 1.3 Volumen concesionado para usos consuntivos en el estado de SLP, 2006 (CONAGUA, 2007).

En los años 2001 a 2003, los volúmenes promedio de agua potable suministrada a la conurbación de Cerro de San Pedro, San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez, de acuerdo a información estadística proporcionada por INTERAPAS, fueron de 82.9 Mm³ anuales, con registro en el año 2003 de 90.7 Mm³; con este volumen de suministro resulta una dotación global promedio de 226.95 litros/habitante/día, en el año citado, para una población de 1,095,498 habitantes; población calculada con base en el número de contratos del tipo doméstico registrados al 31 de diciembre del 2003 en el padrón de usuarios del Organismo INTERAPAS multiplicado por el índice de hacinamiento reportado en el XII Censo de Población y Vivienda de INEGI del año 2000.

VOLUMEN DE AGUA (Mm³)			
Año	Fuentes Subterráneas	Fuentes Superficiales	Total
2001	75,545,120	935,539	76,480,659
2002	76,994,843	4,724,784	81,719,627
2003	84,363,259	6,391,872	90,755,131

Tabla 1.4 Volumen de suministro de agua para la conurbación de San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez y Cerro de San Pedro 2001-2003 (Tecnología ASSUL, 2005).

El agua es captada y suministrada a la población de la conurbación de SLP mediante la operación de 120 fuentes; 119 de ellas son pozos profundos y una fuente superficial consistente en un sistema formado por las presas de El Peaje y El Potosino, que derivan sus aguas en la presa de San José (Tecnología ASSUL, 2005).

De acuerdo a la información proporcionada por INTERAPAS, durante el año 2004 el agua de suministro proviene en un 92.6% de acuíferos subterráneos y el 7.4% restante de corrientes superficiales.

1.2 Geología de San Luis Potosí

1.2.1 Geología de la Provincia Fisiográfica de la Mesa Central

Se describe a continuación de manera general, la geología y el sistema de fallas que componen la Provincia Fisiográfica de la Mesa Central. La Figura 1.5 muestra la ubicación de la ciudad de SLP dentro de la Mesa Central.

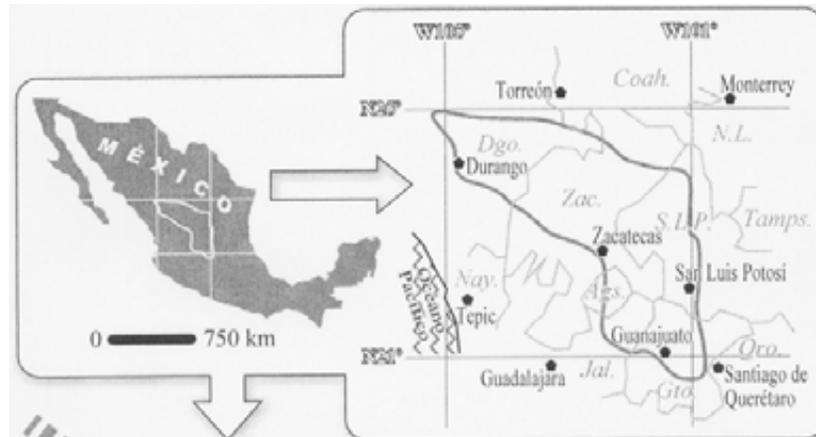


Figura 1.5 Ubicación de la ciudad de SLP dentro de la Provincia Fisiográfica de la Mesa Central, (Nieto-Samaniego et al., 2005)

La Mesa Central de México (MC) fue reconocida como provincia fisiográfica por Raisz (1959). Es una planicie elevada que se localiza en la parte central de la República Mexicana, más de la mitad de su superficie tiene una altitud superior a 2,000 msnm y las elevaciones topográficas en su interior son moderadas, la mayoría forman desniveles inferiores a los 600 m. Se encuentra limitada al norte y oriente por la Sierra Madre Oriental (SMOr), hacia el occidente por la Sierra Madre Occidental (SMOc) y al sur por la depresión conocida como El Bajío (Figura 1.6).

En la MC se pueden reconocer dos regiones debido a su diferencia de altitud. La región sur, donde se localizan las cotas más elevadas, se encuentra por encima de los 2,000 msnm con excepción del valle de Aguascalientes. La región sur es montañosa, cubierta en su mayor parte por rocas volcánicas cenozoicas (Nieto-Samaniego et al., 1999), muestra un estado de erosión mucho más activo que la región norte, con desniveles más pronunciados y los rasgos estructurales, principalmente fallas normales, se observan erosionados. En contraste, la región norte, que tiene un área mayor, muestra un estado de erosión menos activo con grandes cuencas continentales rellenas de sedimentos aluviales y lacustres, algunas de ellas endorreicas. Esa región tiene las cotas más bajas y los desniveles topográficos menores, la parte más septentrional tiene una altitud menor a 2,000 msnm.

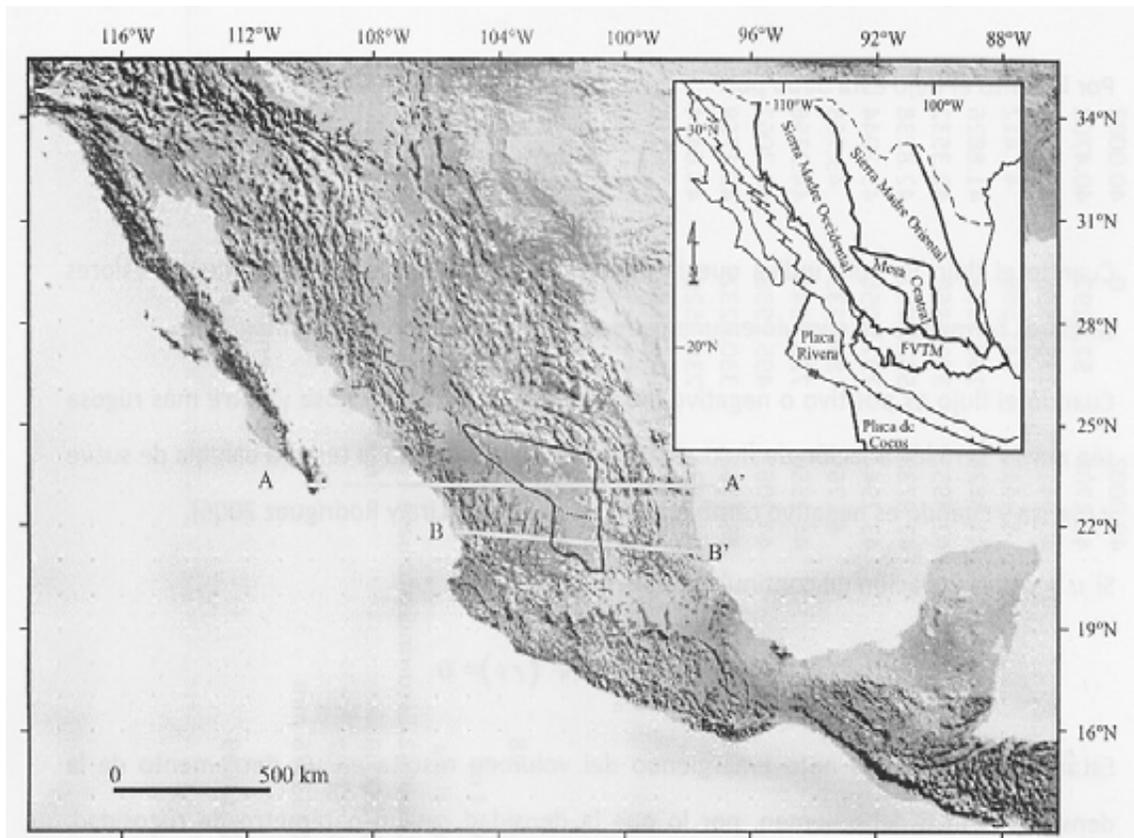


Figura 1.6 Modelo de elevación digital de la República Mexicana indicando la ubicación de la Mesa Central. FVTM: Faja Volcánica Transmexicana. La línea punteada indica la división entre la parte sur y norte de la Mesa Central (Nieto-Samaniego et al., 2005).

1.2.1.1 Estratigrafía de la Mesa Central

1.2.1.1.1 Mesozoico

Triásico

Dentro de la MC han sido registrados afloramientos de rocas del Triásico superior, cuya edad fue establecida por su contenido fósil, en la sierra de Salinas, en Charcas en S.L.P., en Zacatecas Zac. y en la Sierra de Catorce. Las rocas triásicas consisten principalmente de secuencias de arenisca y lutita.

Jurásico

El conjunto de rocas más antiguo de edad Jurásica registra una etapa en la cual la Mesa Central estuvo emergida, está constituido de rocas continentales, conglomerado y arenisca con rocas volcánicas intercaladas. El segundo conjunto litológico de edad Jurásica está formado por rocas marinas calcáreas, cuya parte inferior está compuesta de caliza, mientras que la parte superior la constituye principalmente limolita calcárea que presenta estratos de pedernal.

Cretácico

El advenimiento de un ambiente de sedimentación marina iniciado en el Jurásico tardío se manifiesta en la MC y sus alrededores en tres ambientes marinos claramente distinguibles:

1. En el borde oriental de la MC se depositaron sedimentos de la Plataforma Valles-San Luis Potosí (PVSLP), formando un depósito de espesores superiores a 4,000 m (Carrillo-Bravo, 1971). Ese depósito inició su formación en el Jurásico Tardío sobre estratos rojos continentales, y se extiende en el Cretácico con los sedimentos de la PVSLP, que consisten de evaporitas y mayormente caliza.
2. Hacia el occidente de la PVSLP y ocupando casi la totalidad de la MC se localiza un paquete muy grueso de sedimentos marinos, depositados en mar abierto y aguas profundas, en lo que se ha denominado Cuenca Mesozoica del Centro de México (Carrillo-Bravo, 1971). El registro estratigráfico indica una subsidencia rápida, con una acumulación superior a 6,000 m de sedimentos, que inicia con el depósito de la caliza de plataforma del Jurásico Superior sobre estratos rojos y rocas volcánicas continentales. Hacia el Cretácico, pasa a caliza arcillosa y a lutita calcárea, culminando hacia la cima en rocas clásticas, principalmente arenisca con numerosos clastos de rocas volcánicas (Formación Caracol), que marcan la regresión marina que puso fin a las condiciones marinas en la MC hacia el Cretácico Tardío.
3. En el occidente de la Cuenca Mesozoica del Centro de México y localizándose en el margen occidental y sur de la MC, aparece una secuencia volcansedimentaria marina, formada por un apilamiento grueso de basalto, derrames, y cuerpos intrusivos de diabasa, que se encuentran intercalados con capas de toba, pizarra, pedernal y radiolarita. El componente sedimentario más importante consiste principalmente en lutita, arenisca y algunas calizas (Ranson et al., 1982; Centeno-García y Silva-Romo, 1997, Martínez-Reyes, 1992). Es muy notable que el límite entre la Plataforma Valles-San Luis Potosí y la Cuenca Mesozoica del Centro de México coincide con el límite oriental de la MC y con la traza del sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende (Alaniz-Álvarez et al., 2002). Por otra parte, el límite entre de la Cuenca Mesozoica del Centro de México y la secuencia volcansedimentaria mesozoica, sigue burdamente la mayor parte del borde occidental de la Mesa Central y el sistema de fallas San Luis-Tepehuanes el cual se describe más adelante.

1.2.1.1.2 Cenozoico

Encima de las rocas mesozoicas se encuentran rocas continentales, sedimentarias y volcánicas que marcan el cambio del medio marino a uno continental, el cual perdurará en la MC hasta el presente. Dentro del registro estratigráfico se identifica lo siguiente:

Los sedimentos continentales afloran en zonas extensas en la parte norte y noroeste de la MC y en localidades aisladas en el centro, sur y este. Consisten principalmente de

conglomerado y arenisca, que presentan también, aunque no en todos los afloramientos, rocas volcánicas intercaladas; en algunos lugares contienen material piroclástico. Los espesores de esta unidad son muy variables pasando de decenas a cientos de metros en distancias cortas, lo que evidencia su depósito en una superficie con relieve topográfico abrupto, al parecer asociado al desarrollo de fosas tectónicas como fue documentado en Guanajuato, Gto., en donde existe uno de sus afloramientos mejor estudiados (Edwards, 1955; Aranda-Gómez y McDowell, 1998). Otras localidades donde ha sido documentada esta unidad son: León, Gto. (Martínez-Reyes, 1992), Zacatecas, Zac. (Edwards, 1955), Fresnillo, Zac. y Sombrerete, Zac. (Albinson, 1988), en distintas localidades del estado de San Luis Potosí (Labarthe-Hernández et al., 1982), en los alrededores de Durango, Dgo. (Córdoba, 1988), en la región de Rodeo, Dgo. (Aguirre-Díaz y McDowell, 1991) y en Peñón Blanco, Dgo. (Roldán-Quintana, 1968). Yaciendo sobre el conglomerado del Paleoceno-Eoceno aparecen rocas volcánicas. Las localidades donde han sido documentadas son: Guanajuato, Aguascalientes, Zacatecas, Fresnillo, San Luis Potosí (Nieto-Samaniego et al., 1996), Sombrerete-Colorada (Albinson, 1988), Durango (Swanson et al., 1978), Nazas, y se extienden fuera de la MC hacia el norte (Aguirre-Díaz y McDowell, 1991) y hacia el sur (Morán-Zenteno, et al., 2000), formando un cinturón volcánico discontinuo en el occidente de México cuyas edades abarca del Paleoceno tardío al Eoceno (Ferrari et al., 2005).

Entre las rocas del Eoceno medio y las rocas del Oligoceno se aprecia una discordancia angular que ha sido documentada en la región localizada entre Zacatecas, Fresnillo y Sombrerete, en el estado de Zacatecas (Albinson, 1988). En la Sierra de Guanajuato su presencia se hace evidente por la posición estratigráfica de la cubierta volcánica oligocénica, la cual comúnmente cubre directamente a las rocas sedimentarias del Eoceno inferior, o a las rocas mesozoicas. Esta posición también se observa comúnmente en la región comprendida entre San Luis Potosí y Salinas de Hidalgo. La discordancia marca un cambio en la composición de los magmas, ya que se pasa del volcanismo eocénico que presenta ambas composiciones, andesíticas y riolíticas, a un volcanismo preponderantemente riolítico en el Oligoceno.

Las rocas volcánicas constituyen el conjunto litológico más distintivo de las partes meridional y occidental de la MC. En la parte meridional de la MC es donde se cuenta con mejor información cartográfica y estratigráfica, teniéndose ya establecida la litoestratigrafía de este conjunto de rocas (Labarthe-Hernández et al., 1982, Nieto-Samaniego et al., 1996). Está conformado casi exclusivamente por rocas volcánicas de composición riolítica, con variaciones composicionales a latita y dacita. La parte inferior está formada mayormente de rocas de volcanismo efusivo: derrames y domos, conteniendo algunas rocas piroclásticas intercaladas. Los domos y derrames forman complejos volcánicos muy grandes que constituyen los núcleos de las sierras más elevadas de la parte sur de la MC, formando apilamientos con espesores que superan los 400 m, por ejemplo en la Sierra de San Miguelito, la Sierra de Guanajuato, la sierra de Codornices, o la sierra de San Felipe. Los fechamientos que se tienen de las riolitas en la parte sur de la MC indican que se emplazaron hacia la parte superior del Oligoceno temprano entre 32 y 29 Ma (Nieto-Samaniego et al., 1996).

Dentro de la porción sur de la MC, en el estado de San Luis Potosí, Labarthe-Henández et al. (1982) establecen una unidad litoestratigráfica denominada Basalto Cabras cuya edad desconocen, pero la asignaron al Oligoceno tardío por yacer sobre ignimbritas fechadas en 27 Ma. Sin embargo, un fechamiento en andesitas que afloran en la parte NE del estado de San Luis Potosí, y que presumiblemente corresponden al Basalto Cabras, fue reportado por Nieto-Samaniego et al., (1999), obteniendo una edad K-Ar en plagioclasas de 13.2 ± 0.6 Ma. Se han reconocido rocas volcánicas de edad Plioceno-Cuaternario en el centro de la MC, afloran principalmente en pequeños conjuntos volcánicos en el estado de San Luis Potosí (Labarthe-Hernández et al., 1982).

1.2.1.2 Fallas mayores que limitan la Mesa Central

1.2.1.2.1 La falla del Bajío

El límite sur de la Mesa Central lo constituye una falla normal que muestra dos segmentos mayores, el más oriental se extiende desde Celaya hasta Irapuato en el estado de Guanajuato, donde la zona de falla tiene dirección este-oeste (Figura 1.7). En el bloque levantado se aprecian dos grupos de fallas con direcciones NW-SE y ENE a NE, en conjunto ambos grupos de estructuras le dan en ese sector una forma aserrada al borde norte de El Bajío, que es una planicie de relleno aluvial de escala regional. El segundo segmento de la falla del Bajío forma el escarpe suroeste de la Sierra de Guanajuato, siendo ésta el bloque levantado de la falla, tiene 80 km de largo y se extiende desde Irapuato hasta León, ambos en el estado de Guanajuato.

1.2.1.2.2 Sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende

El límite oriental de la Mesa Central lo constituye un sistema de fallas normales de dirección norte-sur que se extiende desde San Miguel de Allende y Querétaro hasta más al norte de la Sierra de Catorce, formando el límite entre la Mesa Central y la Sierra Madre Oriental. Estas fallas corresponden también a la parte septentrional del sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA) (Alaniz-Álvarez et al., 2002, Alaniz-Álvarez y Nieto-Samaniego, 2005). Este sistema de fallas coincide también con el límite paleogeográfico, entre la Plataforma Valles-San Luis Potosí, localizada al este, y la Cuenca Mesozoica del Centro de México, localizada al oeste. Dentro de la MC el rasgo morfológico del SFTSMA se observa segmentado por varios lineamientos noroeste-sureste, algunos de los cuales han sido documentados como sistemas de fallas, los mayores de ellos son el sistema de fallas San Luis-Tepehuanes y la falla del Bajío (Figura 1.7). Las fallas que forman el SFTSMA han sido reconocidas en las siguientes localidades:

- En la Sierra de Catorce (Barboza-Gudiño et al., 2004), donde se reconocen fallas de dirección norte-sur que se localizan en el costado oeste de la Sierra de Catorce y buzan hacia el oeste. Al oriente de la Sierra de Catorce hay una falla normal, con el bloque oriental caído, que regionalmente se localiza sobre el lineamiento

del margen occidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí (Barboza-Gudiño et al., 2004).

- Graben de Villa de Arista (continuación norte del graben de Villa de Reyes). Se trata de una serie de fallas normales bastante erosionadas que forman un graben con relleno fluvial (Moreira-Rivera et al., 1998). En la ciudad de San Luis Potosí el desplazamiento vertical del graben es de 500 m (Tristán-González, 1986) y las fallas estuvieron activas durante el Oligoceno (Nieto-Samaniego et al., 1997).
- En la región de San Miguel de Allende y Querétaro han sido mejor estudiadas estas fallas, en ambos casos se trata de grupos de fallas normales, paralelas, con dirección de alargamiento este-oeste. En San Miguel de Allende se documentó que la zona de falla principal tiene un rechazo vertical de 450 m y dos fases de actividad ocurridas entre el Oligoceno y el Mioceno medio; en Querétaro las fallas tienen rechazos verticales cercanos a 100 m y edades de actividad del Mioceno tardío (Alaniz-Alvarez et al., 2001).

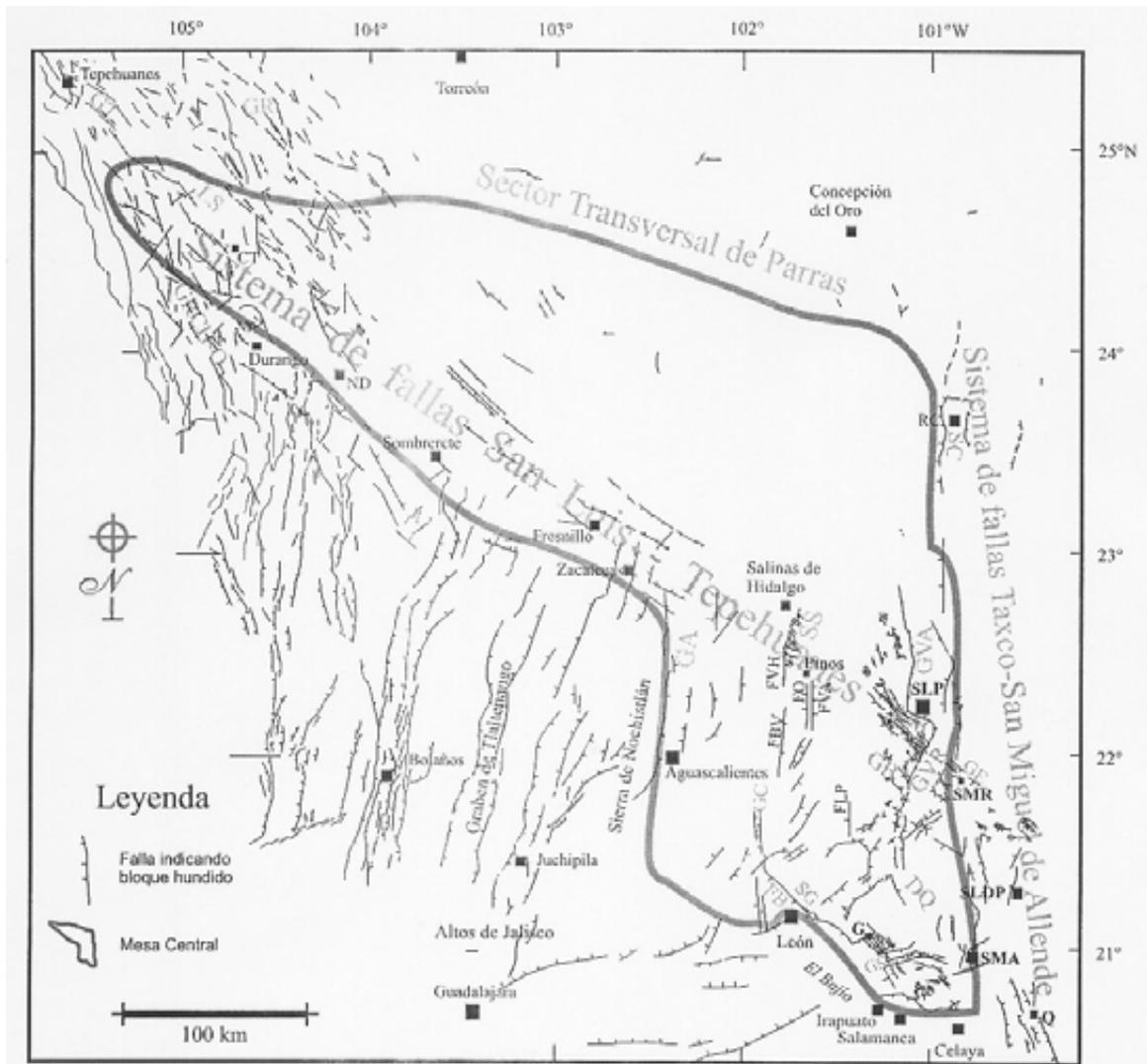


Figura 1.7 Mapa que muestra la localización de las estructuras mayores de la Mesa Central. GT: graben de Tepehuanes, GR: graben de Rodeo, LS: laguna de Santiaguillo, GRCH-O: graben Río Chico-Otinapa, GA: graben de Aguascalientes, FVH: falla Villa Hidalgo, FBV: falla Buena Vista, FO: falla El Obraje, FVA: falla Villa de Arriaga, FLP: falla Los Pájaros, GC: graben El Cuarenta, FB: falla del Bajío, GS: graben de La Saucedá, GB: graben de Bledos, GVR: graben Villa de Reyes, GVA: graben Villa de Arista, GE: graben de Enramadas, DQ: depresión de La Quemada, SSM: sierra San Miguelito, SG: sierra de Guanajuato, SC: sierra de Catorce, SS: sierra de Salinas, RC: Real de Catorce, G: Guanajuato, SLP: San Luis Potosí, SMR: Santa María del Río, SLDP: San Luis de la Paz, ND: Nombre de Dios, SMA: San Miguel de Allende, Q: Querétaro. (Nieto-Samaniego et al., 2005).

1.2.1.2.3 Sistema de fallas San Luis-Tepehuanes

Este sistema de fallas se observa en imágenes de satélite y modelos digitales de elevación como un gran lineamiento de dirección noroeste-sureste que se extiende desde San Luis de la Paz, Gto., hasta Tepehuanes, Dgo. Su traza coincide burdamente con el límite de los afloramientos de rocas volcánicas cenozoicas pertenecientes a la Sierra Madre Occidental, con los afloramientos de las secuencias volcano sedimentarias mesozoicas y

con el límite norte de los grábenes de la Sierra Madre Occidental (Figura 1.7). En el sistema de fallas San Luis-Tepehuanes (FSLT) podemos reconocer dos segmentos:

Su porción oriental se extiende de San Luis de la Paz hasta Salinas de Hidalgo y constituye el límite de las regiones meridional y septentrional de la Mesa Central. Inmediatamente al occidente del graben de Villa de Reyes, en la Sierra de San Miguelito (Figura 1.7), este sistema de fallas ha sido exhaustivamente estudiado (Labarthe-Hernández y Jiménez-López, 1992, 1993, 1994; Nieto-Samaniego et al., 1997; Xu et al., 2004), allí está formado por numerosas fallas de rumbos que varían de $N60^{\circ}W$ a $N20^{\circ}W$ y echados de 45° a 75° al suroeste, formando un arreglo tipo dominó en las capas de rocas volcánicas oligocénicas. Esa deformación produjo una extensión de 0.2 (20%) con dirección noreste-suroeste, perpendicular al rumbo de las fallas (Xu et al., 2004).

1.2.1.2.4 Graben de Aguascalientes

Este sistema de fallas limita al occidente el sector sur de la MC separándola de la Sierra Madre Occidental (Figura 1.7), consiste de un graben asimétrico (semigraben) cuya falla principal está ubicada al occidente. Esa falla se extiende con dirección norte-sur por 150 km, desde los Altos de Jalisco hasta su intersección con el FSLT, cerca de Zacatecas. El desplazamiento de la falla mayor en Aguascalientes es de aproximadamente 900 m, fue obtenido por el desnivel de 400 m entre las rocas volcánicas que afloran en el bloque levantado (occidental) y el nivel del valle, más el espesor de 500 m de los sedimentos que rellenan ese valle, dicho espesor fue estimado a partir del registro de un pozo profundo para agua (Jiménez-Nava, 1993).

1.2.1.3 Sistemas de fallas en el interior de la Mesa Central

Dentro de la Mesa Central hay numerosas fallas de edad Cenozoica que en muchos casos limitan con cuencas continentales rellenas de sedimentos fluviales y lacustres. Estas estructuras se pueden reconocer principalmente en el sector meridional de la MC, donde afectan a rocas de edad oligocénica, y se reconocen fallas de dirección norte-sur, este-oeste, noreste-suroeste y noroeste-sureste, lo que le imprime a la región una configuración estructural compleja (Figura 1.7); de ellas las más importantes son: el graben de Villa de Reyes de dirección NNE-SSW, con cerca de 100 km de longitud y rechazos verticales que alcanzan los 500 m (Tristán-González, 1986). El graben de La Saucedá de dirección ENE, longitud de 25 km y rechazo vertical que alcanza los 400 m (Nieto-Samaniego, 1992). El graben El Cuarenta, de dirección N-S, de 40 km de longitud y rechazo vertical que alcanza 1,000 m (Quintero-Legorreta, 1992).

Las fallas normales norte-sur más importantes son: El Obraje, Villa Hidalgo, Los Pájaros, Buenavista, Villa de Arriaga, y las estructuras noroeste más importantes son los grábenes de Bledos y Enramadas, así como la depresión de La Quemada (Figura 1.7).

1.2.2 Geología del Valle de San Luis Potosí

Se describe la geología del valle de SLP, de la superficie hasta el basamento. Esta información ha sido registrada a partir de los estudios de Martínez y Cuellar (1979), Labarthe et al. (1982), Cardona (1990, 2007), y Castillo (2003). En la Figura 1.8 se muestra la columna estratigráfica del área de estudio.

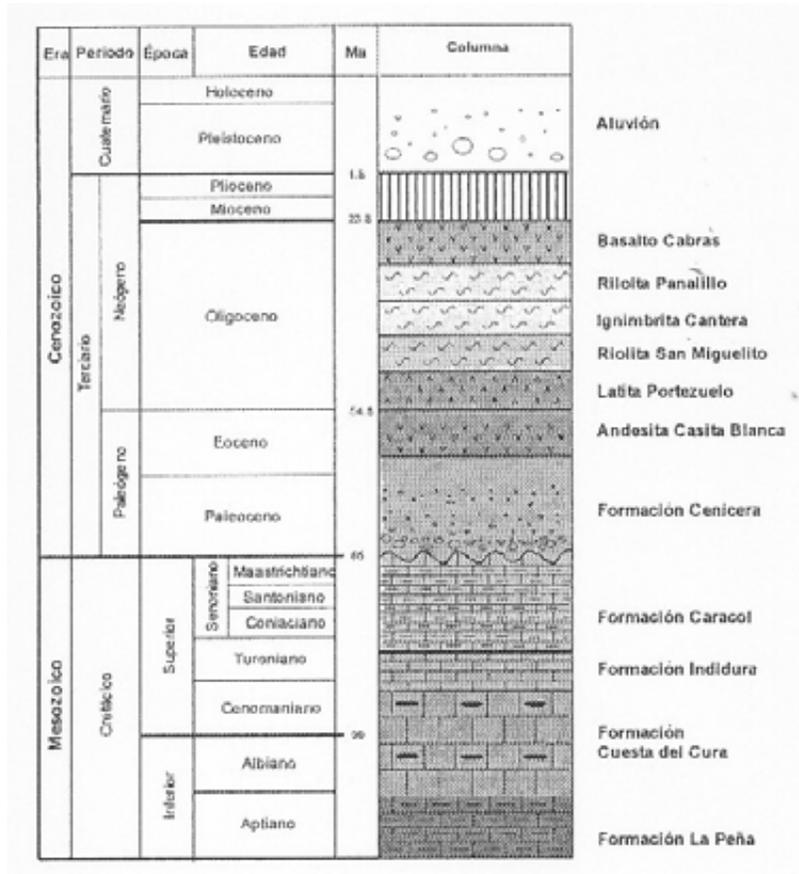


Figura 1.8 Columna estratigráfica del área de estudio (Arzate et al., 2006).

En la Figura 1.9 se muestra en planta, la distribución de los afloramientos de rocas en la zona de estudio, los cuales han sido registrados mediante estudios de campo de Pérez (1967), Labarthe y Tristán (1978), Labarthe et al. (1982), Flores (1990), Labarthe y Jiménez (1993, 1994), UASLP (1999), Castillo Cruz (2003) y Cardona (2007).

El esqueleto de estos conglomerados está formado de caliza, pedernal y rocas ígneas extrusivas, todos ellos cementados por carbonato de calcio, haciéndose más fuerte esta consolidación hasta la cima.

De acuerdo con su clasificación se les puede considerar como conglomerados de gravas de composición mixta. Esto hace suponer que su origen se debe a una erosión rápida de las sierras cercanas, sin intemperismo prolongado y depositado por corrientes de aguas turbulentas de diferentes etapas, ya que se puede observar gradación en los cortes hechos para extraer grava. Sobreyacen discordantemente a las rocas sedimentarias cretácicas y a los derrames y tobas terciarias. Se les ha asignado una edad del Cuaternario (Pleistoceno) por su posición estratigráfica.

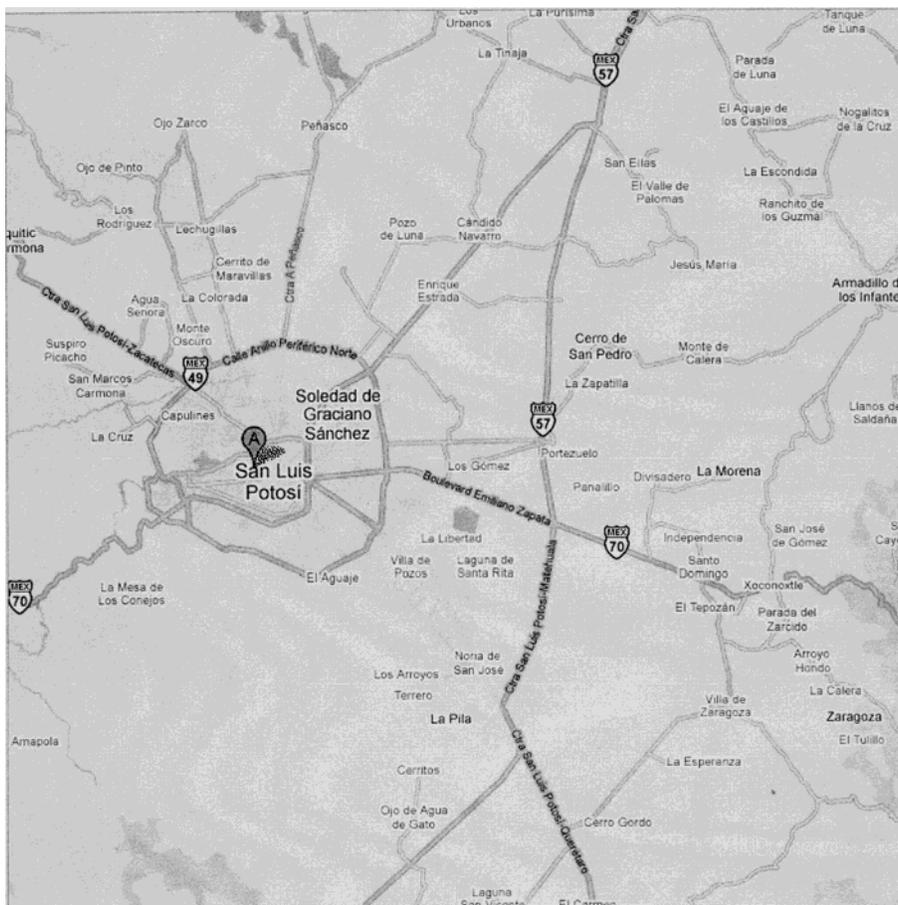


Figura 1.10 Mapa de localización de la Ciudad de San Luis Potosí y poblados aledaños, (Google Maps, 2009).

Riolita Panalillo (Trp y Tap)

Consiste de dos estratos: el estrato superior (Trp) y el inferior (Tap). En su mayor parte aflora a 14 km al oriente de la ciudad de San Luis Potosí a 0.5 km al poniente del poblado

de Panalillo. Los afloramientos dentro del área de estudio son muy aislados, siendo la parte más importante, al poniente del poblado de Panalillo (Figura 1.10).

El estrato inferior consiste de una toba de color crema a ligeramente rojiza, estratificada con capas de 5-30 cm. El estrato superior consiste de dos unidades, una ignimbrita de color rojizo café claro a rosa claro y el estrato superior es una ignimbrita de color gris rosáceo, café o gris con 10-15% de cristales de cuarzo, sanidino de 1-4 mm y algunas plagioclasas en una matriz desvitrificada. La parte inferior del estrato superior presenta un sistema de juntas horizontales y la ignimbrita formando mesetas planas. El espesor de la riolita Panalillo en el área de estudio es de 20-50 m. Esta unidad sobreyace discordantemente a la formaciones Indidura y Cenecera y a la latita Portezuelo. En general no se encuentra cubierta por otras rocas en el área de estudio. La edad asignada a esta unidad es de la época del Oligoceno.

Ignimbrita Cantera (Tic)

Aflora en una amplia zona de la parte oriental de la sierra de San Miguelito, al poniente de los poblados Arroyos y Terreros (Figura 1.10). Se trata de una roca de color rosa con 15% de cristales de 2 a 4 mm de cuarzo, ortoclasa y sandino, en una matriz cristalina con algo de vidrio. Se observaron bastantes fragmentos de pómez.

En campo se pueden distinguir tres estratos concordantes entre sí. El inferior está parcialmente soldado, observándose los fragmentos pumíticos poco deformados. El medio consiste de una toba depositada por el aire de aproximadamente 3 a 20 m de espesor, arenosa, con fragmentos de pómez, algunos líticos y cristales de cuarzo; bien estratificada. Los fragmentos más gruesos son de 5 mm y los más finos de hasta 1 a 2 mm, teniendo algunos horizontes de grano muy fino. Es de color crema e intemperiza en ocasiones en un color rojizo. El estrato superior se caracteriza por una estructura columnar, por estar más soldado, con fragmentos de pómez.

En su cima y base presenta un horizonte con un 5% de cristales de 2 a 4 mm de sandino, cuarzo y ortoclasa en una matriz vítrea. Cubre concordantemente a la riolita San Miguelito y a la toba lítica. El espesor de esta unidad incluyendo su base es alrededor de 350 m. La edad que se le asigna es el Oligoceno.

Riolita San Miguelito (Tsm)

Aflora en una extensa área de la sierra de San Miguelito. Se trata de una roca de color gris claro, de textura fluidal, con 20% de cristales de 2 a 4 mm de sandino y cuarzo en una matriz fina.

Es notable en esta roca la fluidez que presenta, llegando a tener una serie de pliegues de flujo, tratándose por lo tanto de un derrame localizado aproximadamente al suroeste, en la parte central de la sierra de San Miguelito. Las márgenes del derrame consisten de un

material brechoso, de espesor variable, de color gris claro, con la riolita presentando menos cristales, con matriz muy silicificada.

Sobreyace concordantemente a la latita y subyace concordantemente a la ignimbrita cantera. Esta unidad sólo se ha identificado en el subsuelo en un pozo ubicado al noroeste de la cuenca de San Luis Potosí, con un espesor aproximado de 212 m sin cortar su base. La edad que se le asigna a esta unidad es el Oligoceno.

Latita Portezuelo (Tlp)

Aflora en una amplia zona al oriente de la zona de estudio y en pequeñas áreas en la parte baja de la sierra de San Miguelito. Se trata de una roca de color café grisáceo, con 10% de cristales de 2 a 6 mm de pagioclasa y un poco de cuarzo en una matriz fina. Es frecuente encontrarle hematita diseminada y en vetillas, posterior a los feldespatos. En campo, en algunos lugares se le observó textura fluidal. Intemperiza en forma característica, haciéndose arenosa y de color grisáceo, con manchas café amarillentas, debidas a la oxidación de la hematita.

Esta unidad es un derrame que cubrió una extensa área y su cima llega aproximadamente a la cota de 2150 m. no se observaron fuentes y parece tratarse de derrames por fisuras. Casi al norte de monte Calera (Figura 1.10), sobreyace discordantemente a la Formación Indidura y forma por lo tanto la base de la serie volcánica en esa zona. Subyace concordantemente a la ignimbrita Cantera. Con el derrame San Miguelito, al que subyace, su contacto es también concordante. Esta formación constituye la unidad más común subyaciendo al relleno de la fosa tectónica, su espesor aproximado promedio que se detecta en los pozos que la atravesaron totalmente es de aproximadamente 425 m. La edad que se le asigna es el Oligoceno.

Ignimbrita Santa María (Tis)

La ignimbrita Santa María tiene su afloramiento en los cerros inmediatamente al norte de la ciudad de San María del Río, en donde se encuentra bien expuesta. En el área de estudio aflora sobre todo en el cerro de Chiquihuitillo, al sur del municipio de cerro de San Pedro (Figura 1.10); cerro Santo Niño, cerro del Frente al sureste del área de estudio, así como en el cerro Los Metaleros.

Esta unidad se identifica por ser una roca color gris rosáceo con 30-40% de cristales de cuarzo y sanidino de 2-5 mm. Contiene magnetita alterada generalmente a hematita como mineral accesorio en la matriz desvitrificada y en cuya parte superior del flujo presenta una estructura columnar muy notable. Su espesor en el área de estudio, en las cercanías del cerro de San Pedro es de 30 m, aunque Labarthe et al. (1982) le dan un espesor de 60 m en el arroyo de la Cenicera. Sobreyace discordantemente a la formación Cenicera y a la andesita Casita Blanca, subyace a la latita Portezuelo y a la riolita Panalillo. La edad que se le asigna a esta unidad es el Oligoceno.

Formación Casita Blanca (Tcb)

La andesita Casita Blanca tiene su afloramiento en las inmediaciones de la ranchería de Casita Blanca. Aflora de manera irregular en el área de estudio en forma de ventanas siendo su presencia más notable en el cerro los Metaleros y cerro el Picacho, los cuales se encuentran situados al noreste del área.

Consiste en una roca de color gris oscuro verdoso, con 5% de cristales de 1-2 mm de biotita y de 3% de plagioclasa de 1-2 mm. En la matriz contiene cuarzo y ferromagnesianos alterados a óxidos de hierro. Su espesor en el área de estudio es de 20 a 30 m. En el cerro de los Metaleros se le asigna un espesor de 64 m y al norte de San Martín de Abajo, un espesor de 120 m. La andesita Casita Blanca sobreyace discordantemente a las formaciones Indidura y Cenicera, subyace a la latita Portezuelo; al miembro superior de la riolita Panalillo y a la ignimbrita Santa María. La edad asignada a esta unidad es el Eoceno.

Formación Cenicera (Tc)

Depositados discordantemente sobre los sedimentos cretácicos marinos y subyaciendo también discordantemente a las rocas volcánicas terciarias, aparece en los flancos occidental y oriental del cerro Chiquihuitillo, una secuencia de brechas, conglomerados, areniscas poco consolidadas, arcillas y algunas intercalaciones de toba riolítica blanca. Presentan una variación lateral fuerte, pasando en unos cuantos cientos de metros, de brechas a arena fina.

La brecha que aflora en la mina de fosforita de La Luz, consiste de fragmentos angulosos de caliza, de 40 cm, mal consolidada, con cementante arcilloso rojizo. Hacia el flanco occidental del cerro Chiquihuitillo, los clásticos continentales consisten de lentes y horizontes delgados de conglomerado, mal consolidado, con fragmentos de 2 a 8 cm de lutitas y areniscas, intercalados con areniscas calcáreas blancas, pobremente consolidadas y arcillas de color rosa a crema.

En el flanco oriental del cerro de Chiquihuitillo, aparecen también las areniscas blancas pobremente consolidadas intercaladas con una toba lítica bien estratificada, depositada en agua, con fragmentos de 1 a 10 cm de material pumítico gris con cristales de biotita, en matriz arenosa. También interestratificada con los sedimentos arenosos, aparece un conglomerado rojizo con fragmentos de 2 a 25 cm de caliza, en matriz arenosa, mal clasificado y consolidado, con cementante calcáreo. Estos sedimentos parecen haberse depositado en algunos cuerpos de agua que cubrían esa parte de área. El espesor de esta unidad en el área de estudio es de 20 a 100 m. La edad que se le asigna es el Paleoceno-Eoceno.

Formación Cárdenas (Kcd)

Esta formación aflora sólo en el flanco nororiental de la sierra de Álvarez, sobreyaciendo concordantemente al miembro superior de la formación Soyatal. Litológicamente consiste en una secuencia de lutitas, de color gris verdoso que intemperizan en amarillo ocre, interestratificadas con capas delgadas de calcarenitas de color café amarillento.

La formación Cárdenas puede considerarse un depósito de aguas poco profundas, proviniendo los sedimentos de zonas levantadas por movimientos tectónicos. Se le asigna una edad del Cretácico superior.

Formación Soyatal (Kss)

Esta formación dentro del área de estudio se encuentra formada por dos unidades litológicas fácilmente distinguibles:

Unidad inferior-consiste de calizas arcillosas carbonosas y limolitas de color gris oscuro a negro, en estratificación de delgada a media, con algunas intercalaciones de lutitas con frecuentes vetillas de calcita.

Unidad superior-consiste de una alternancia de lutitas de color gris verdoso, que intemperizan en amarillo ocre, con calizas arcillosas y calcarenitas de color gris oscuro a negro.

Sobreyacen concordantemente a la formación Cuesta del Cura y subyace en contacto transicional a la formación Cárdenas. Debido a que se halla intensamente plegada, es difícil medir su espesor. Su edad está dada por su posición estratigráfica asignándole el Cretácico superior (Turoniano).

Formación Indidura (Ksi)

Aflora al nororiente del área de estudio sobre todo al poniente de Jesús María y Monte de Caldera (Figura 1.10). Esta formación está constituida por calizas arcillosas de color gris claro, en estratos de espesor delgado, intercaladas con lutitas calcáreas de color gris claro que intemperizan en color violáceo y rojizo. Se encuentra fuertemente plegada lo cual dificulta medir su espesor.

Estratigráficamente esta formación sobreyace en el área concordantemente y ligeramente transicional a la formación Cuesta del Cura, y subyace discordantemente a pequeños remanentes de tobas riolíticas del terciario. Se correlaciona con la formación Soyatal, que aflora en la parte oriental del área de estudio. La edad que se le asigna es el Cretácico superior (Turoniano).

Formación Cuesta del Cura (Kcc)

Esta formación consiste de calizas negras finamente laminares, de grano muy fino a fino, de color gris claro a gris oscuro, con estratificación delgada y ondulada; interestratificada con bandas de pedernal negro a gris castaño. En ocasiones presenta delgadas capas de caliza arcillosa y lutitas calcáreas con coloraciones violáceas y rojizas por intemperismo. Su espesor es difícil de medir por presentar toda la unidad un sinnúmero de pliegues, sin embargo se le estima un espesor no menor a 200 m.

Estratigráficamente, esta formación Sobreyace en el área a la formación La Peña y subyace a la formación Indidura. Por su posición estratigráfica la edad que se le asigna es el Cretácico (Albiano).

Formación La Peña (Kip)

Esta formación consiste de calizas de color gris claro a gris amarillento muy compactas, con incrustaciones esporádicas de pequeños nódulos de hematita, el espesor de sus estratos varía entre 20 y 50 cm, encontrándoseles hasta de 1 m; por lo general presentan nódulos y capas de pedernal negro a castaño. Estas calizas se encuentran interestratificadas con delgadas capas de lutitas calcáreas compactas que intemperizan en color amarillento y rojizo de 1 a 5 cm de espesor. En algunos lugares, la caliza se presenta muy arcillosa, de color violáceo alternándose con delgadas capas de lutitas del mismo color. Estas características pueden observarse al oeste del poblado Cerro de San Pedro (Figura 1.10).

Su espesor en el área no se conoce por no aflorar su base además de estar muy plegada, sin embargo se le estiman 225 m. En el área se encuentra cubierta concordantemente por la formación Cuesta del Cura; por su posición estratigráfica se le asigna una edad de Cretácico inferior (Aptiano).

En las Figuras 1.11a y 1.11b se muestra la configuración del espesor del material granular de la fosa tectónica. Esta información se divide en diez secciones geológicas transversales registradas por Cardona (2007). La localización de estas secciones se muestra en la Figura 1.9.

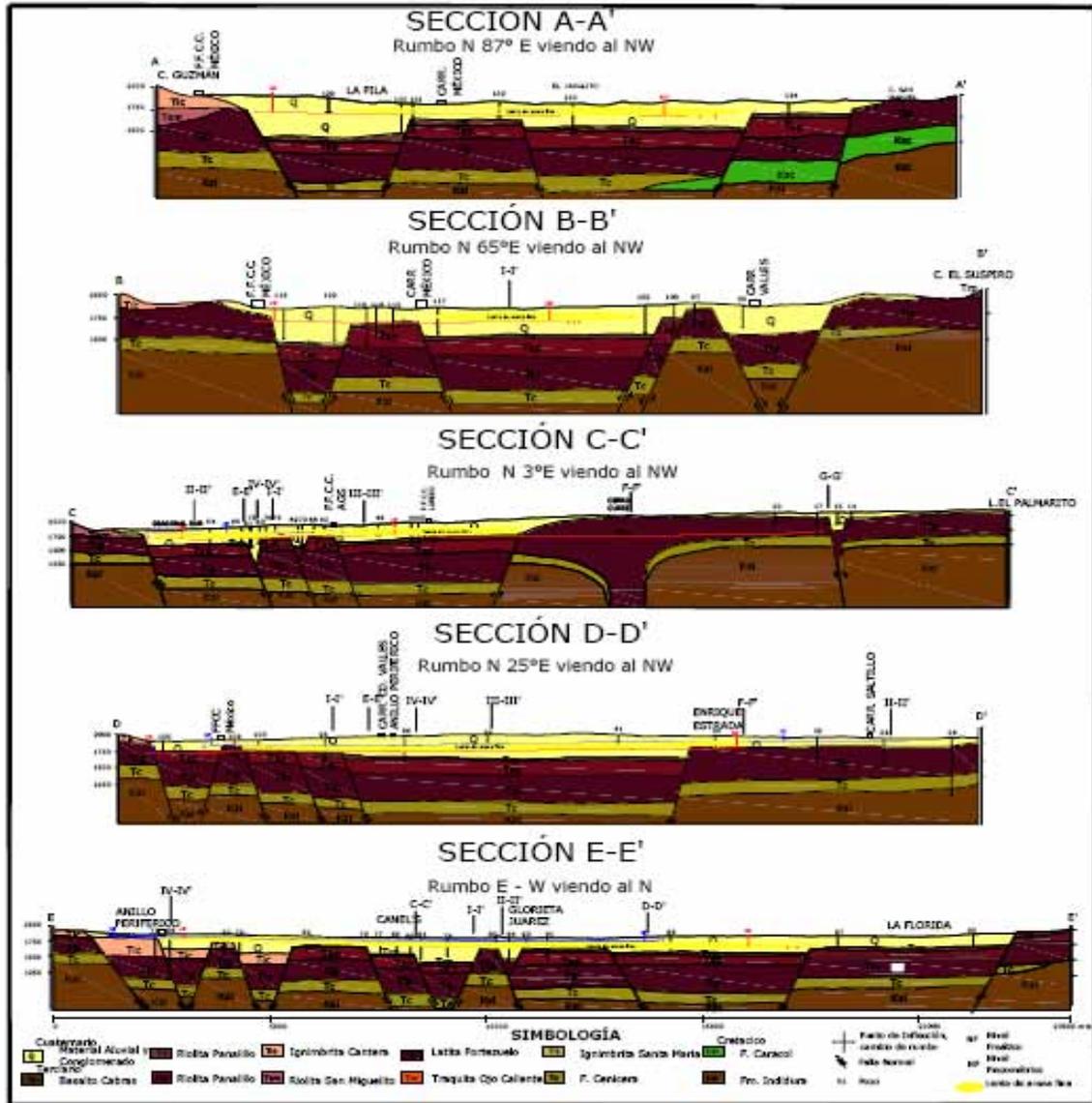


Figura 1.11a Estratos de las secciones geológicas transversales (Cardona, 2007).

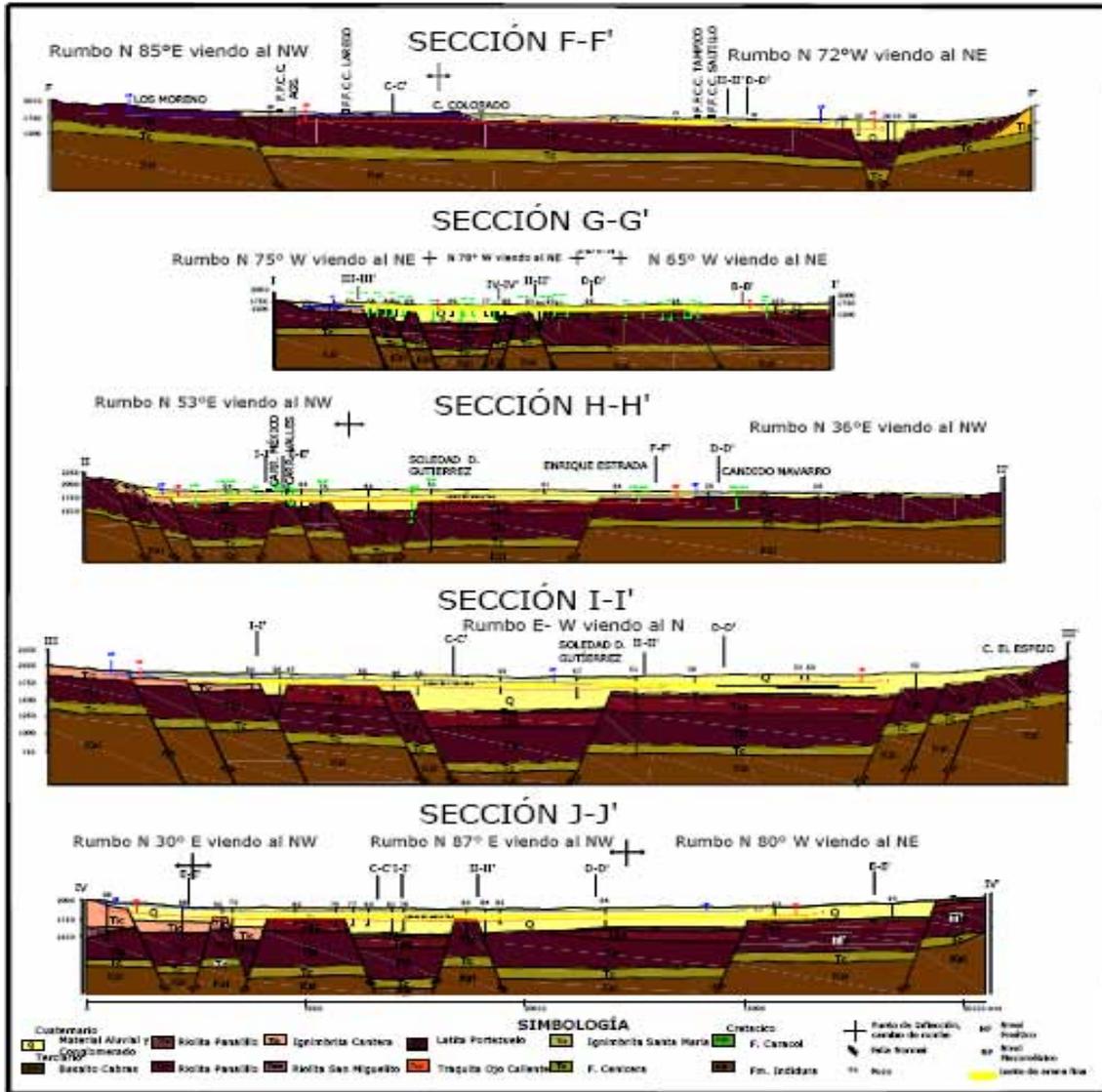


Figura 1.11b Estratos de las secciones geológicas transversales (Cardona, 2007).

1.2.3 Sistema de fallas en el Valle de San Luis Potosí

Labarthe et al., (1982) y Tristán (1986) consideran que paralelamente a la formación de la fosa tectónica (donde está asentado el valle de SLP), comenzó el proceso de sedimentación clástica continental (relleno de la fosa). El hundimiento se produjo a lo largo de fallas normales con un alto ángulo de buzamiento, donde varios bloques experimentaron descensos relativos que aumentan hacia la zona central de lo que actualmente constituye el Valle de San Luis Potosí. En este tipo de estructuras los desplazamientos generalmente ocurren a lo largo de una compleja serie de fragmentos de falla interconectados, de tal modo que el bloque que experimenta el mayor descenso relativo ocupa sólo una pequeña parte del valle actual.

Desde el punto de vista geológico, es de esperar que relacionada con la distribución de los bloques desplazados por las fallas normales en el subsuelo del valle, se presente una variación horizontal en el tamaño de los sedimentos clásticos que rellenan la fosa. En los alrededores de las elevaciones que rodean al valle de San Luis Potosí predominarán sedimentos angulosos de granulometría correspondiente con gravas y arenas, mientras que en la región que coincide con los bloques más hundidos (zona de playa) deberán existir sedimentos de grano más fino con abundante material arcilloso.

A lo largo de la historia geológica de la fosa tectónica que abarca más de 20 Ma, seguramente se produjeron movimientos diferenciales en las fallas normales que la limitan, por lo que la zona de playa se desplazó lateralmente alejándose del bloque que experimentó el mayor levantamiento relativo en un determinado periodo de tiempo geológico. De la misma manera, las cuñas de material grueso adyacente también modificaron su ubicación dentro de la cuenca; estas condiciones originaron que en el subsuelo, la geometría tridimensional de la región con material fino (acuitardo) sea variable y por lo tanto difícil de determinar con exactitud.

La configuración presentada en las Figuras 1.11a y 1.11b delimita claramente la fosa tectónica y además establece la presencia de una región más hundida en la zona central de la zona de interés; el límite norte de esa región más hundida corresponde con una falla normal de orientación noreste establecida a partir de la interpretación de imágenes de satélite (Carrillo, 1992), los límites laterales (oriente y poniente) se relacionan con las fallas normales que delimitan la fosa tectónica de Villa de Reyes. Al norte de la cuenca de SLP, en la zona de Peñasco (Figura 1.10), se localiza otra depresión con una orientación preferencial noroeste-sureste y profundidad al piso rocoso en su zona más hundida de más de 300 m, ocupando una superficie aproximada de 90 km². Aproximadamente a mitad de la depresión se presenta un alto estructural que la divide formando una estructura tectónica de tipo fosa-pilar-fosa.

Otras fallas en la zona de estudio se localizan en: el frente oeste de la sierra de San Pedro la cual es de tipo longitudinal, una falla de rumbo casi este-oeste que pasa por Divisadero y la Morena (Figura 1.10), un sistema de fallas N60°E y N30°W que afectan a los sedimentos cretácicos en cerro de San Pedro y a las rocas volcánicas terciarias de Cuesta de Campa y cerro de Chiquihuitillo, las fallas marginales del graben de Villa de Reyes, el fracturamiento de la latita Portezuelo (Tlp) que es muy notable al oriente y suroriente de Villa de Zaragoza (Figura 1.10) predominando las de rumbo N40°E y N50°W, y en la sierra de San Miguelito donde las rocas volcánicas presentan fracturamiento en diversas direcciones predominando el rumbo N40°W.

CAPÍTULO 2

2.1 Revisión de estudios hidrogeológicos anteriores

Se han llevado a cabo muchos estudios con respecto al acuífero de San Luis Potosí, desde hace varias décadas, por lo que el conocimiento que se tiene del acuífero, ha mejorado debido a que se conocen con mayor precisión sus características. Algunos de estos estudios pueden ser consultados mediante las siguientes referencias localizadas en la bibliografía de esta tesis: Gálvez (1925), Stretta y Del Arenal (1960), Medina (1967 y 1974), Hidrotec (1971), Consultores (1977), Martínez y Cuellar (1979), Villalobos (1980), Azomurrutia (1983), Tyssa (1984), Lugo (1984), Martínez (1986 y 1997), UASLP (1987), IGF (1988 y 1992), Cardona (1990), CNA (1992), Carrillo (1992), Geoingeniería Internacional (1996), entre otros.

En la Tabla 2.1, se presentan sólo los estudios hidrogeológicos del acuífero de San Luis Potosí que se estudiaron y analizaron para utilizarse como base para el desarrollo de esta tesis. En la tabla se incluyen a manera de resumen, los objetivos y resultados que tuvo cada estudio. Estos estudios me fueron proporcionados por investigadores de los Institutos de Geología y Geofísica de la UNAM, y por investigadores del Instituto de Geología de la UASLP.

Tabla 2.1 Estudios hidrogeológicos anteriores.

Título	Autor y año	Objetivos y resultados
Correlación de superficie y subsuelo de la cuenca geohidrológica de San Luis Potosí, S.L.P.	Martínez y Cuellar (1979)	Correlacionar la geología superficial con la del subsuelo para determinar espesor y actitud del acuífero libre y el control geológico del acuífero confinado. Los autores concluyen que existen dos tipos de acuíferos: uno freático o libre que se encuentra en material aluvial, tiene un gasto de 20 a 30 l/s, se recarga se corrientes que bajan de la sierra de San Miguelito y de la sierra que limita al oriente la región. El otro de tipo confinado que también se recarga de las sierras circundantes. Existe un manto confinado termal a una profundidad que varía entre 200 a 350 m, controlado lateralmente por un graben regional de rumbo casi norte-sur que dio lugar a una cuenca alargada que se prolongó desde el sur de Jaral de Berrios, pasando por Villa de Reyes, La Pila, Villa de Pozos, Valle de San Luis, Peñasco y Bocas, S.L.P., encontrándose confinado verticalmente por un derrame lávico riolítico denominado "Panalillo".
Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de las redes de observación de los acuíferos de Calera, San Luis Potosí y Toluca	Ariel Consultores (1996)	Elaboración de un modelo tridimensional de simulación del comportamiento de los acuíferos regionales, y al mismo tiempo de predicción ante cualquier demanda. Diseño de una red óptima de pozos de observación piezométrica que reduzca su número pero con un mínimo de varianza en el error. Conocer la disponibilidad del agua subterránea, determinar la magnitud de las componentes de la ecuación de balance del agua subterránea y explicar los mecanismos que controlan la dinámica del agua

		<p>subterránea.</p> <p>Concluyen que las unidades litológicas en el valle de San Luis Potosí pueden clasificarse como acuíferas y acuífugas. El acuífero establecido en medio poroso está representado por los depósitos aluviales, mientras los constituidos en medio fracturado están representados por vulcanitas antiguas.</p> <p>Los resultados de las pruebas de bombeo certifican el funcionamiento de acuíferos confinados, semiconfinados y libres con drenaje diferido. Con base en los volúmenes de extracción, indican que el uso público-urbano es el de mayor importancia con 78.33 Mm³/año (71 %), sigue el sector agrícola con 20.81 (19 %), industrial con 6.02 (5 %) y servicios con 4.94 Mm³/año (4%). Los restantes usos apenas representan el 1 % del volumen total bombeado del subsuelo. Las profundidades actuales del nivel estático alcanzan los 140 m como máximo, localizadas en el área de la ciudad de SLP, siendo la media en el valle de unos 125 m. Según la configuración actual de las elevaciones del nivel estático, el flujo subterráneo es convergente hacia el área ocupada por la ciudad capital del estado; el flujo proveniente del norte representa una inversión del rumbo original, de sur a norte.</p>
Utilización del régimen de operación y conocimiento de las condiciones hidrogeológicas para controlar las concentraciones de fluoruro en el agua subterránea: Cuenca de San Luis Potosí, México	Carrillo et al. (1999)	<p>Discutir la contaminación natural del agua subterránea profunda asociada con un sistema de flujo regional, que se extrae en la región de la ciudad de San Luis Potosí.</p> <p>Los autores concluyen que los resultados de esta investigación sugieren que, controlando la temperatura del agua a la descarga en algunos de los pozos y manteniéndola entre 28-30° C, la concentración de F en agua de mezcla obtenida sería de ≈1.5 mg/l. Este es un valor muy cercano al máximo permisible por la mayoría de los estándares de calidad del agua. Los controles de solubilidad con relación a minerales como la fluorita y calcita también pueden utilizarse para reducir la concentración de F en el agua subterránea, sobre todo cuando la construcción, diseño y operación se utiliza para regular las condiciones de flujo del agua subterránea a la zona de extracción de los pozos.</p>
Manejo integrado y sostenible del agua en la región centro de San Luis Potosí.	CNA (2004)	<p>El objetivo del proyecto es asegurar los recursos hídricos necesarios para el desarrollo socioeconómico a corto, medio y largo plazos de la Región Centro, impulsando al Estado de San Luis Potosí hacia un nuevo dinamismo industrial y de servicios. El proyecto pretende mejorar la calidad de vida de la población actual y futura, revirtiendo el proceso de deterioro acelerado de los recursos y utilizar el agua con mayor eficiencia socioeconómica y sustentabilidad ambiental. Iniciar una nueva política de manejo pragmático, integrado y sostenible del agua. Disminuir gradualmente la dependencia del abastecimiento de los pozos del casco urbano y aliviar así el deterioro ambiental, hasta restaurar la estabilidad en toda la zona urbana.</p> <p>A partir de los estudios realizados por los autores para lograr los objetivos del proyecto, concluyen que la unidad acuífera profunda consiste en un estrato de composición mixta, cuya parte superior es formada por material aluvial con un espesor medio de 200 m; y su porción más profunda es constituida por rocas ígneas (tobas arenosas riolíticas y latitas) que presentan una topografía sepultada muy compleja; la base de este acuífero es formada también por rocas ígneas impermeables. Se observa que la profundidad de niveles estáticos es dependiente en forma</p>

		<p>directa de la magnitud de la explotación local, de acuerdo con los reportes de la Comisión Nacional del Agua, en 2003 se encontraban entre 100 y 160 m de profundidad (existe un dato puntual en el pozo Jacarandas de 180 m). Los niveles más someros se registraron en los bordes oriental del valle y en la parte norte de la mancha urbana, zonas que presentan la menor densidad de pozos y constituyen áreas con un menor volumen de extracción. El abatimiento registrado en el nivel estático para el período 1971-2001 varía en el rango de 20 a 50 m. En la zona urbana el abatimiento medio anual llega a los 1.67 m, mientras que en la periferia alcanza valores de 0.67 m por año.</p>
<p>Estudio de diagnóstico y planeación integral de Interapas.</p>	<p>Tecnología ASSUL (2005)</p>	<p>Determinar del Organismo los indicadores técnicos y financieros que sirvan de base para analizar la eficiencia operacional del INTERAPAS (Organismo intermunicipal metropolitano de agua potable, alcantarillado, saneamiento y servicios conexos, de los municipios de Cerro de San Pedro, San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez), su condición financiera y capacidad institucional así como el potencial que tiene para extender e incrementar la cobertura y calidad del los servicios prestados.</p> <p>La empresa concluye que el sistema de planeación de INTERAPAS está limitado a corto plazo. La información de que se dispone está dispersa y carente de sistematización. El crecimiento en el padrón de usuarios supera las tasas de crecimiento poblacional, lo que haría suponer que la cobertura del servicio ha ido en aumento. Sin embargo, ese registro no brinda la certeza necesaria para llegar a conclusiones confiables de cobertura del servicio.</p>
<p>Identificación de la contaminación difusa en el acuífero somero de la ciudad de San Luis Potosí.</p>	<p>Martínez Banda (2005)</p>	<p>Determinar la dirección del flujo subterráneo en el acuífero somero, con la finalidad de identificar las zonas hacia donde se puede dispersar la contaminación del subsuelo. Caracterizar la composición química del agua subterránea del acuífero somero de la ciudad de San Luis Potosí. Identificar y clasificar las fuentes de contaminación difusa al agua subterránea en la región de interés. Evaluar las regiones afectadas por la contaminación difusa, estableciendo los contaminantes con mayor presencia en el agua subterránea.</p> <p>El autor concluye que en la zona conurbana San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez, el agua subterránea del sistema de flujo local manifiesta una serie de problemas de calidad que incluyen parámetros inorgánicos, orgánicos y de microorganismos. Los problemas más serios incluyen elevada salinidad y altas concentraciones de contaminantes como el NO₃, coliformes y elementos traza (Mn, Cd, Al, Y, Pb, As, U, entre otros), características que limitan en forma determinante la utilización de este recurso hídrico para consumo humano.</p> <p>Determinó que las principales fuentes de contaminación que afectan al agua subterránea del acuífero somero de la ciudad de SLP según la clasificación por categorías establecida por la Oficina de Evaluación Tecnológica de los Estados Unidos de América, son las siguientes: i) categoría IV “Fuentes que descargan sustancias como una consecuencia de otras actividades lucrativas” y son las siguientes: i) la irrigación de cultivos utilizando agua subterránea y aguas residuales, ii) aplicación de pesticidas, iii) aplicación de fertilizantes, iv) residuos de granjas, v) escurrimiento urbano y en menores</p>

		proporciones vi) la precolación de contaminantes atmosféricos; y ii) la categoría VI “ <i>Fuentes naturales cuya descarga es incrementada por la actividad humana</i> ” teniendo como principal operación i) la interacción entre agua subterránea y agua superficial; además fueron identificadas otras operaciones de menor impacto como lagunas de oxidación y tiraderos de residuos sólidos.
Actualización hidrogeológica de los acuíferos de Ceballos y Oriente Aguanaval Estado de Durango, Villa de Arista y San Luis Potosí Estado de SLP.	Sabinfosistem (2005)	Llevar a cabo la actualización hidrogeológica del acuífero de SLP. Los autores corroboran la infiltración desde el acuífero somero hacia el profundo. Mencionan que el acuífero profundo, con más de 70 m de profundidad, es semiconfinado en la periferia del valle y confinado en la parte central. Que el acuífero profundo en las calizas, a más de 400 m de profundidad, no se encuentra explotado, que el acuífero somero es libre y tiene hasta 200 m de espesor en la parte central de la cuenca y está limitado por un paquete arcilloso. Indican que la dirección de flujo subterráneo actual, es radial con dirección hacia la ciudad de SLP. Que no existen salidas por flujo subterráneo horizontal hacia otros acuíferos, que el mayor abatimiento se registra en la ciudad de SLP y la zona industrial. Mencionan una extracción de 136.6 Hm ³ /año, un abatimiento promedio anual de 1.06 m/año en el periodo de 1995-2006. Que la mayor parte de la recarga natural proviene de la sierra de San Miguelito y la sierra Madre Oriental.
Hidrogeoquímica de sistemas de flujo regional, intermedio y local resultado del marco geológico en la Mesa Central: reacciones, procesos y contaminación.	Cardona (2007)	Describir la estratigrafía y geología estructural del acuífero de SLP, para identificar los sistemas de flujo de agua subterránea y analizar el deterioro de la calidad del agua extraída con relación al Flúor. El autor explica que la extracción no controlada del acuífero profundo ha ocasionado deterioro de la calidad del agua subterránea en diversas zonas del acuífero, ya que ha inducido flujo regional (rico en F) a las zonas de producción de los pozos utilizados para abastecimiento poblacional. Que la extracción de agua subterránea se ha incrementado de 0.55 m ³ /s en 1962 a 3.8 m ³ /s en 2003. Indica que el acuífero somero está contaminado con agua residual y agua de las fugas del drenaje. Que la extracción del acuífero somero es limitada y se estima en no más de 5 Hm ³ /año, por lo que el flujo de agua no ha sido modificado por la extracción, sin embargo, la recarga inducida por retorno de riego, debe ser cuando menos, igual al volumen extraído. Indica que el acuitardo está constituido por arenas finas.

2.2 Potenciometría histórica del acuífero de San Luis Potosí

Se han efectuado varias mediciones del nivel potenciométrico del sistema acuífero de San Luis Potosí por diferentes autores, pero las mediciones utilizadas para esta tesis, fueron las realizadas por Martínez Banda (2005) para el acuífero somero, por Cardona en el año de 1990 para el acuífero profundo, y por la empresa Sabinfosistem (2005) quien además de hacer una recopilación de niveles potenciométricos del periodo de 1995 a 2005 para el acuífero profundo, realizó mediciones en campo en 2005.

2.2.1 Información potenciométrica disponible

La información disponible que utilizaron la empresa y los autores arriba mencionados (además de sus propias mediciones en campo), para establecer los niveles potenciométricos del acuífero de SLP, se enumera como sigue:

- Potenciometría histórica del acuífero de SLP proporcionada por la Gerencia Estatal de San Luis Potosí. Dicha información contempla datos potenciométricos desde 1962 hasta el 2003.
- Base de datos del REPDA en la cual existen registrados hasta el año 2003, 1273 aprovechamientos, de los cuales 785 son norias con profundidades menores a 50 m que se encuentran explotando el acuífero somero; los restantes 488 (pozos con profundidades de más de 50 metros), extraen agua del acuífero profundo. En 1995, 698 aprovechamientos se encontraban activos de los cuales 389 eran pozos profundos y 309 eran norias. Para el año 2003, no se tiene conocimiento del número de aprovechamientos activos e inactivos por no figurar en el REPDA dicho concepto.
- Censo de aprovechamientos para el acuífero de San Luis Potosí, realizado en 1988 por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, como parte de los trabajos del “Estudio Geohidrológico del Valle de San Luis Potosí y Villa de Reyes”.
- Información del censo de aprovechamientos de agua subterránea del acuífero profundo de San Luis Potosí, del año 1984, realizado por la empresa Tecnología y Sistemas S.A. como parte de los trabajos encomendados en el “Estudio Geohidrológico de Evaluación del Valle de San Luis Potosí”.

En la Tabla 2.2 se presenta un resumen de las mediciones de niveles estáticos realizadas en los diferentes años y que aparecen en el registro potenciométrico histórico del acuífero profundo de San Luis Potosí.

Tabla 2.2 Resumen de mediciones potenciométricas por año, dentro del acuífero profundo de San Luis Potosí.

Año con registro potenciométrico	Número de mediciones de nivel estático
1962	1
1971	5
1972	7
1973	4
1974	5
1975	4
1975	13
1983	1
1984	9
1985	3
1986	10
1987	11
1988	1
1990	5
1991	2
1992	23
1993	2
1994	9
1995	62
1996	45
1997	19
1998	73
1999	68
2001	53
2003	46
2005	75

De la información potenciométrica histórica recopilada y del análisis de los datos de profundidades de niveles estáticos de los 153 pozos piloto (medidos en septiembre de 2005) de que consta la red potenciométrica del acuífero profundo de San Luis Potosí, se presenta la Tabla 2.3 (ver ANEXO), la cual corresponde al periodo de 1995 al 2005.

En la Figura 2.1, se muestra la ubicación de los 153 pozos que extraen agua del acuífero profundo y en los cuales hicieron mediciones de la profundidad del nivel estático.

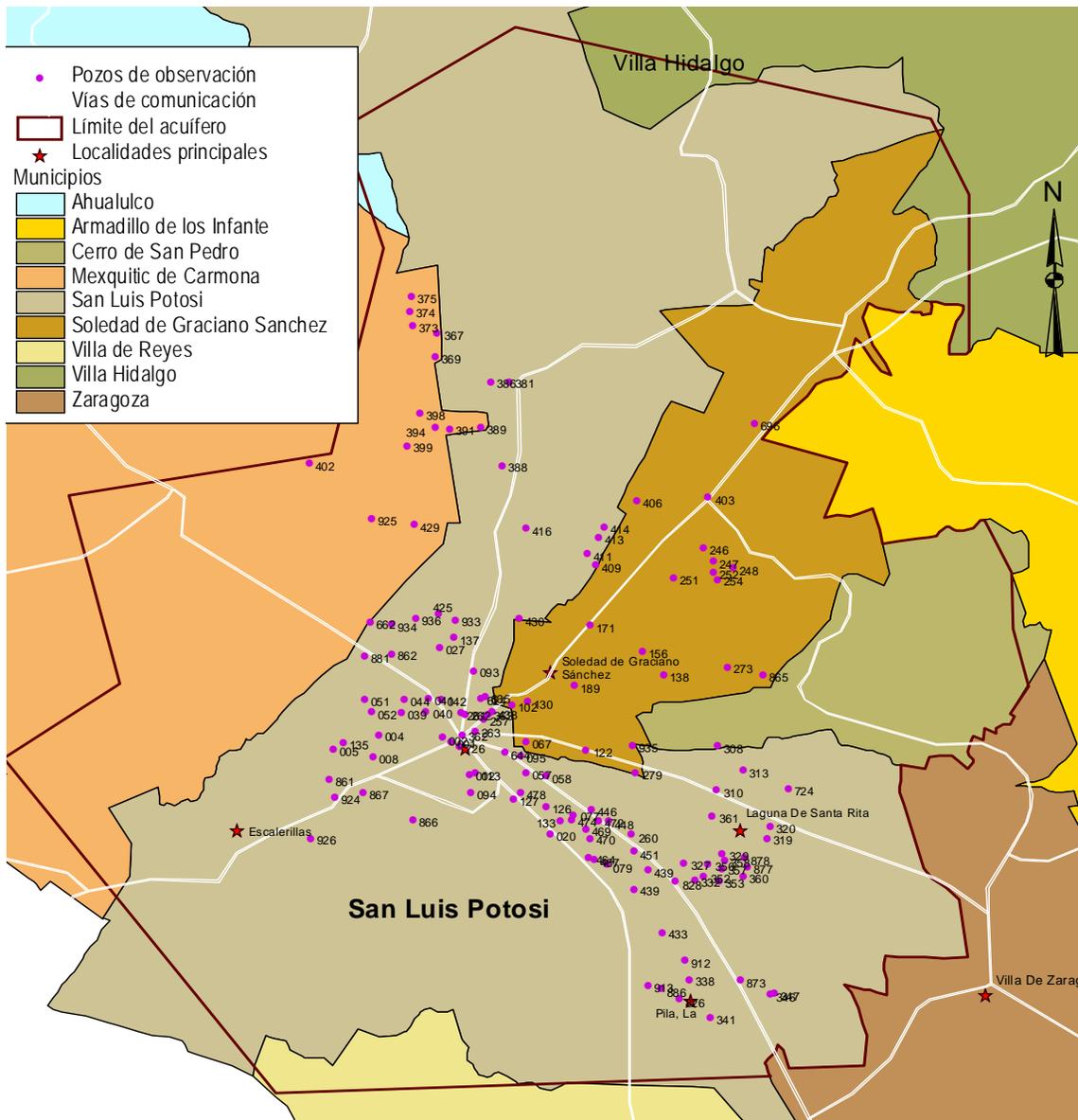


Figura 2.1 Ubicación de pozos con información histórica de niveles estáticos (CNA, Gerencia Estatal en San Luis Potosí, 2005).

2.2.2 Potenciometría histórica del acuífero somero de San Luis Potosí

La profundidad al nivel freático, obtenida a partir de los datos hidrogeológicos recabados en campo por Martínez Banda (2005), está claramente definida por la topografía del lugar. En estos datos se identifican diferencias de profundidades del nivel estático relativamente contrastantes, ya que podemos encontrar valores desde los 0.3 m de profundidad hacia la parte de la sierra de San Miguelito, y profundidades mayores a los 20 m hacia el valle, en localidades como Los Gómez (Figura 2.2).

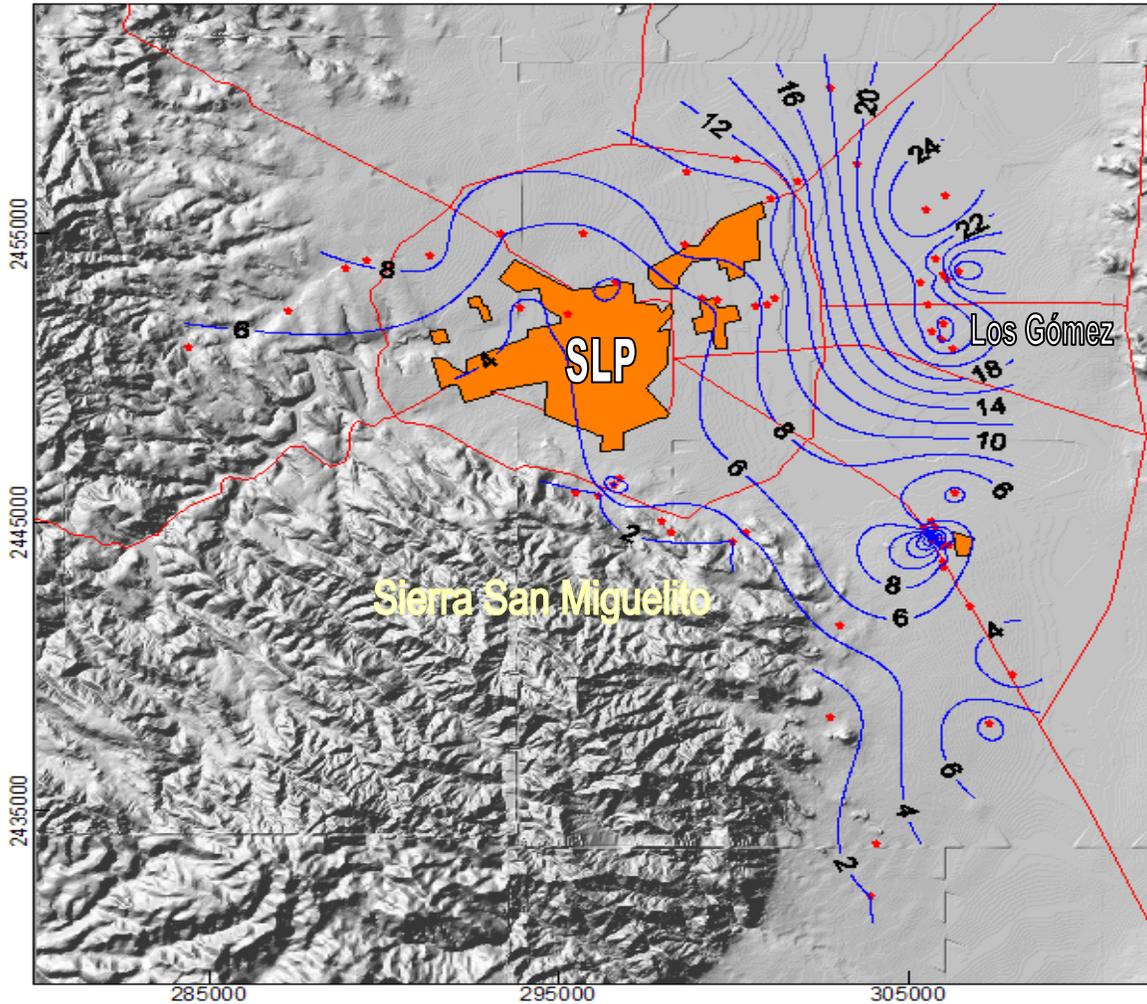


Figura 2.2 Profundidad al nivel freático del acuífero somero para el 2004 (Martínez Banda, 2005).

En la Tabla 2.4 (ver ANEXO) se presentan los datos del muestreo de las norias. Esta información fue utilizada en la determinación de la elevación al nivel freático y su configuración. En la Figura 2.3 se presenta la configuración de igual elevación del nivel freático, además de la dirección de flujo. Considerando los datos y la configuración de cargas hidráulicas obtenidas, se define la dirección de flujo del acuífero somero, en el cual se considera que el flujo del agua subterránea es controlado principalmente por la disposición de las unidades litológicas agrupadas en los medios granular y fracturado, además de las fuerzas gravitacionales y por consiguiente la topografía del terreno. Lo anterior permite establecer la zona de recarga en las laderas de la Sierra San Miguelito, donde se han identificado las mayores cargas hidráulicas. La dirección de flujo se establece desde esta parte mencionada en dirección a las partes topográficamente mas bajas del valle, en este caso identificadas en la zona oriental. En esa región, que representa la zona de descarga, el agua subterránea se incorpora al acuífero profundo, ya que las condiciones geológicas condicionan la presencia de materiales gruesos de pie de monte que permiten un flujo relativamente rápido hacia el acuífero profundo.

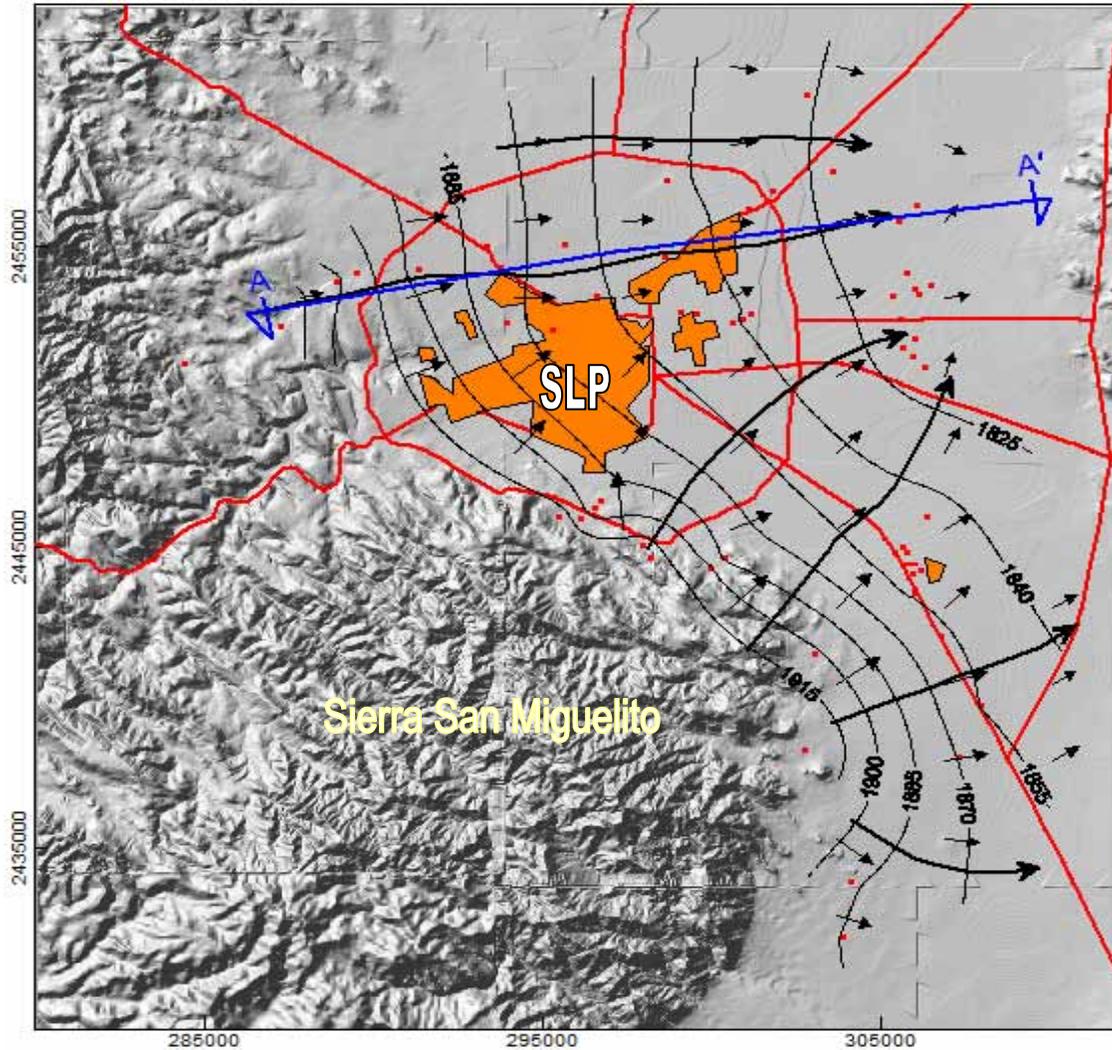


Figura 2.3 Elevación al nivel freático y dirección de flujo subterráneo del acuífero somero de SLP (Martínez Banda, 2005).

2.2.2.1 Sistema de flujo del acuífero somero

La información potenciométrica de esta zona no es suficiente como para permitir la definición tridimensional del sistema de flujo local. En este caso, para definir el sistema de flujo es necesario utilizar la topografía y la geología de la región. Es importante recordar que las fuerzas que condicionan el movimiento del agua subterránea, en este sistema, son resultado de las fuerzas gravitacionales y la litología del subsuelo, y con base en ello se establece el sistema de flujo local como se muestra en la Figura 2.4. Hay que recordar también que el acuífero somero está contenido principalmente en el material aluvial y de relleno de la fosa tectónica, aunque también forma parte de éste la roca fracturada en la zona de recarga, y tiene un espesor que se estima de 100 m aproximadamente.

SISTEMA DE FLUJO LOCAL

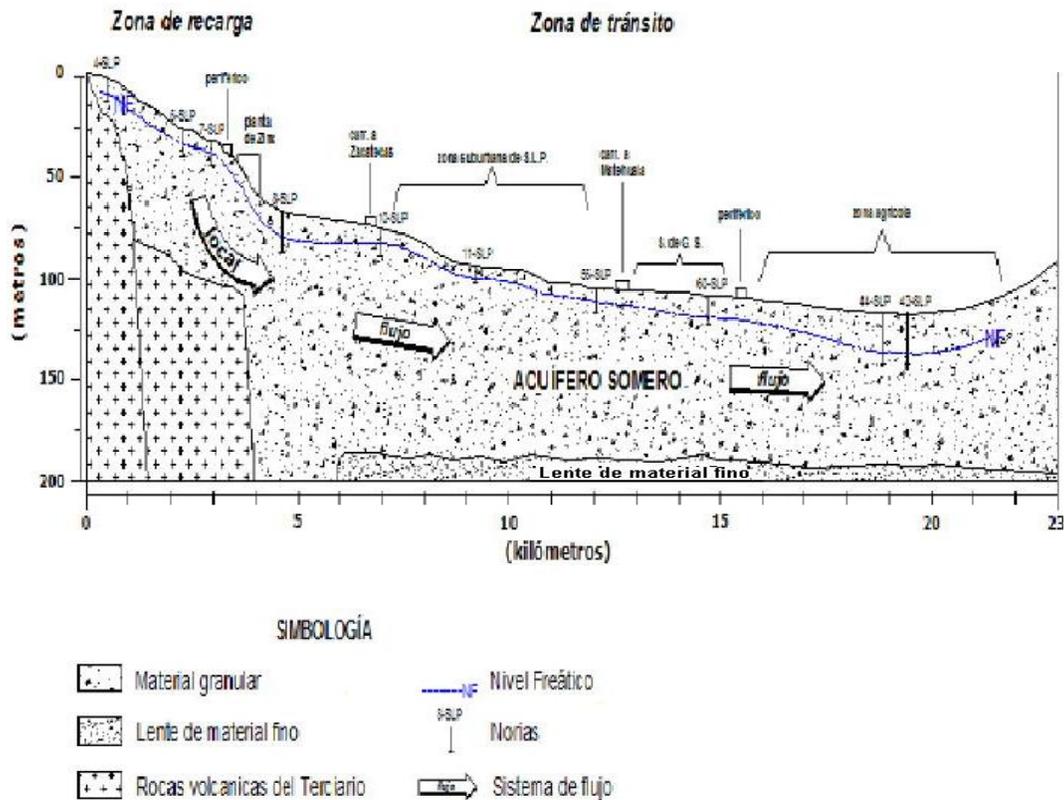


Figura 2.4 Sistema de flujo del acuífero somero de la ciudad de San Luis Potosí (Martínez Banda, 2005).

2.2.3 Potenciometría histórica del acuífero profundo del San Luis Potosí

La extracción de agua subterránea del acuífero profundo comenzó en la década de los cuarentas. La información hidrogeológica disponible para ese tiempo es escasa y de mala calidad. Las elevaciones del nivel del agua en pozos para el año de 1972 se estima que disminuyeron a un ritmo de 0.9 m por año en promedio, mientras que para 1990 el ritmo de abatimiento del nivel del agua en los pozos resultó de 1.3 m por año. La extracción de agua subterránea del acuífero profundo se incrementó en un 330% (desde 0.78 m³/s a 2.6 m³/s) para el periodo 1972 a 1990. Cabe mencionar que las mediciones de niveles estáticos para los años 1972, 1986, 1987 y 1997 son escasas, pero muestran un nivel estático medio de 1760, 1744, 1746 y 1730 msnm respectivamente.

En las Figuras 2.5 a 2.13 se muestra la potenciometría histórica del acuífero profundo para los años 1977, 1984, 1992, 1994, 1996, 1998, 1999, 2001 y 2003. Las configuraciones para los años 1995 y 2005 se tratarán más adelante con mayor detalle, pues es a partir de ellas de donde se tomará la potenciometría base para realizar el modelo de flujo y calibrarlo, debido a que en estos dos años es cuando hay registrado un mayor número de mediciones de niveles estáticos.

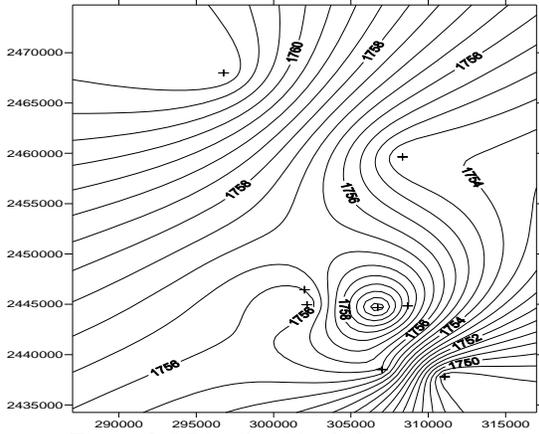


Figura 2.5 Distribución de los niveles potenciométricos del acuífero profundo para el año 1977. Las cruces representan los pozos.

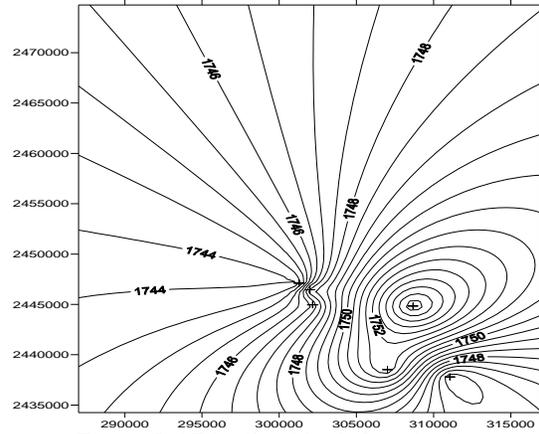


Figura 2.6 Distribución de los niveles potenciométricos del acuífero profundo para el año 1984. Las cruces representan los pozos.

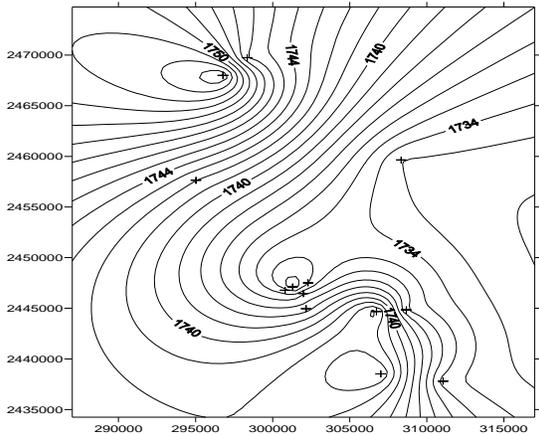


Figura 2.7 Distribución de los niveles potenciométricos del acuífero profundo para el año 1992. Las cruces representan los pozos.

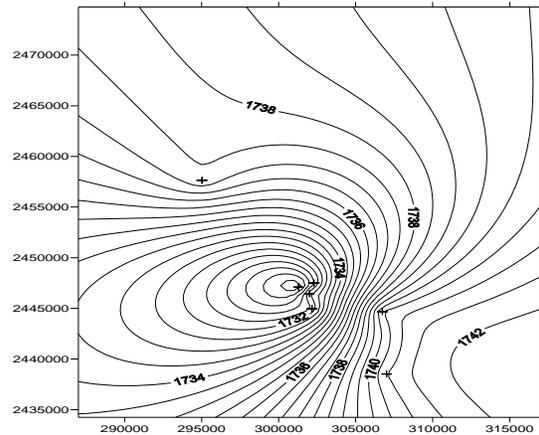


Figura 2.8 Distribución de los niveles potenciométricos del acuífero profundo para el año 1994. Las cruces representan los pozos.

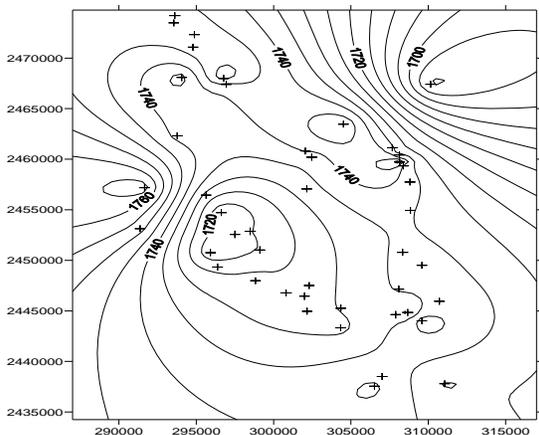


Figura 2.9 Distribución de los niveles potenciométricos del acuífero profundo para el año 1996. Las cruces representan los pozos.

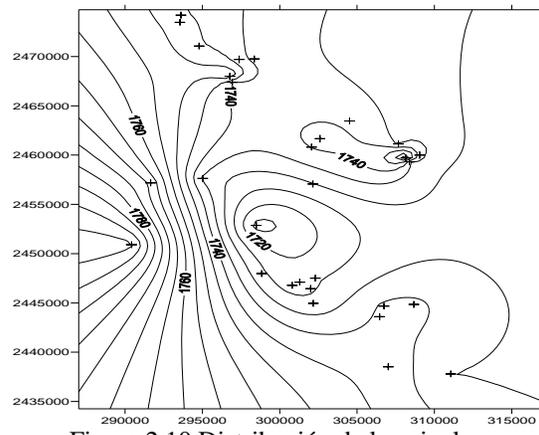


Figura 2.10 Distribución de los niveles potenciométricos del acuífero profundo para el año 1998. Las cruces representan los pozos.

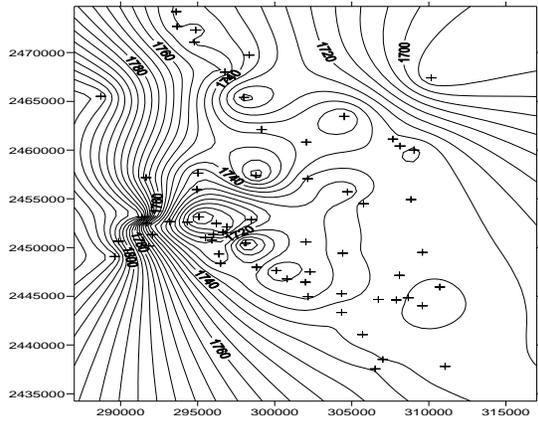


Figura 2.11 Distribución de los niveles potenciales del acuífero profundo para el año 1999. Las cruces representan los pozos.

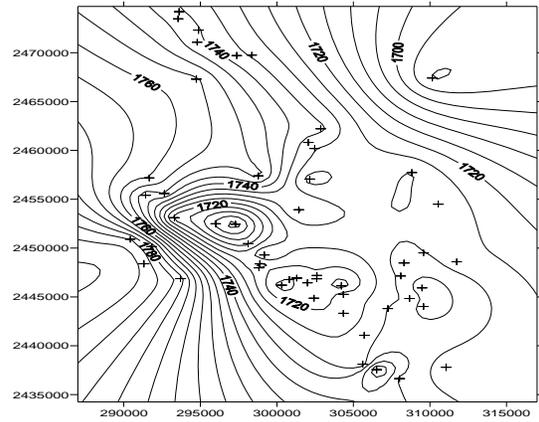


Figura 2.12 Distribución de los niveles potenciales del acuífero profundo para el año 2001. Las cruces representan los pozos.

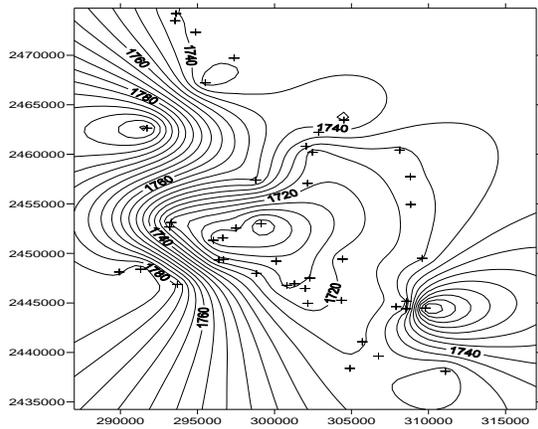


Figura 2.13 Distribución de los niveles potenciales del acuífero profundo para el año 2003. Las cruces representan los pozos.

2.2.3.1 Curvas de profundidad al nivel estático en 1995 y 2005

Las curvas de profundidad al nivel estático que se presentan en la Figura 2.14 fueron generadas en el programa Surfer a partir de las mediciones de profundidad al nivel estático recopiladas por la empresa Sabinfosistem (2005), de 68 aprovechamientos de agua subterránea en el año de 1995. Las mayores profundidades se ubican a 3 km al noroeste del centro de la ciudad de San Luis Potosí. Cabe resaltar que la profundidad máxima registrada al nivel estático para este año fue de 160 m. Para este año la superficie total que representaban las profundidades mayores a 150 m al nivel estático, era de 23.4 km².

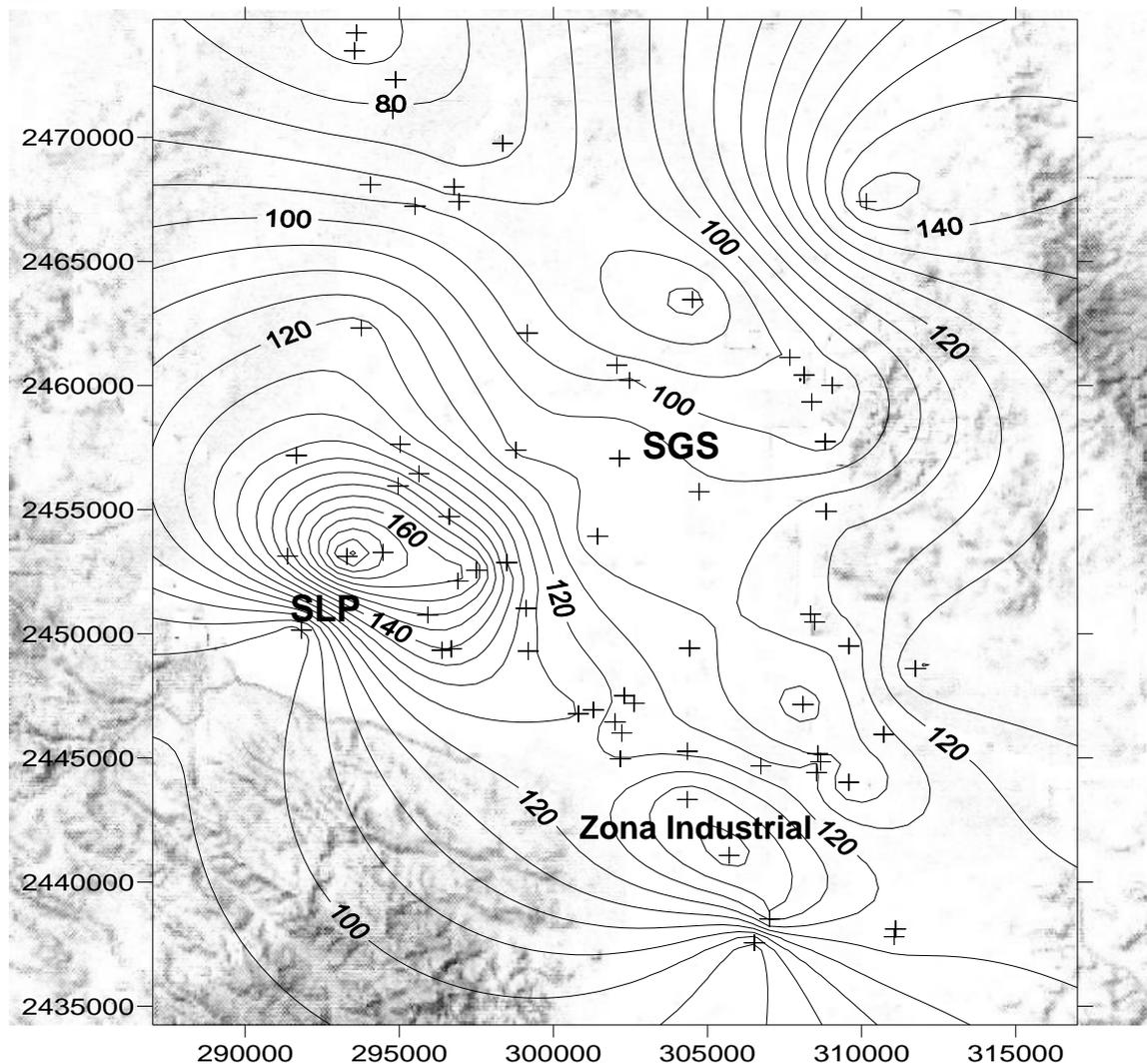


Figura 2.14 Curvas de profundidad al nivel estático en 1995.

Las curvas de profundidad al nivel estático que se presentan en la Figura 2.15 fueron generadas también en Surfer a partir de las mediciones de profundidad al nivel estático realizadas en campo por la empresa Sabinfosistem (2005), en 68 aprovechamientos de

agua subterránea. En la figura se observa que el nivel estático más somero es de 80 m, y el más profundo de 180 m.

Por otro lado, el área que representan las profundidades al nivel estático mayores a 150 m pasaron de 23.4 km² en 1995 a 70 km² en 2005. Este crecimiento ocurre básicamente en toda la zona urbana de San Luis Potosí, así como en la zona industrial.

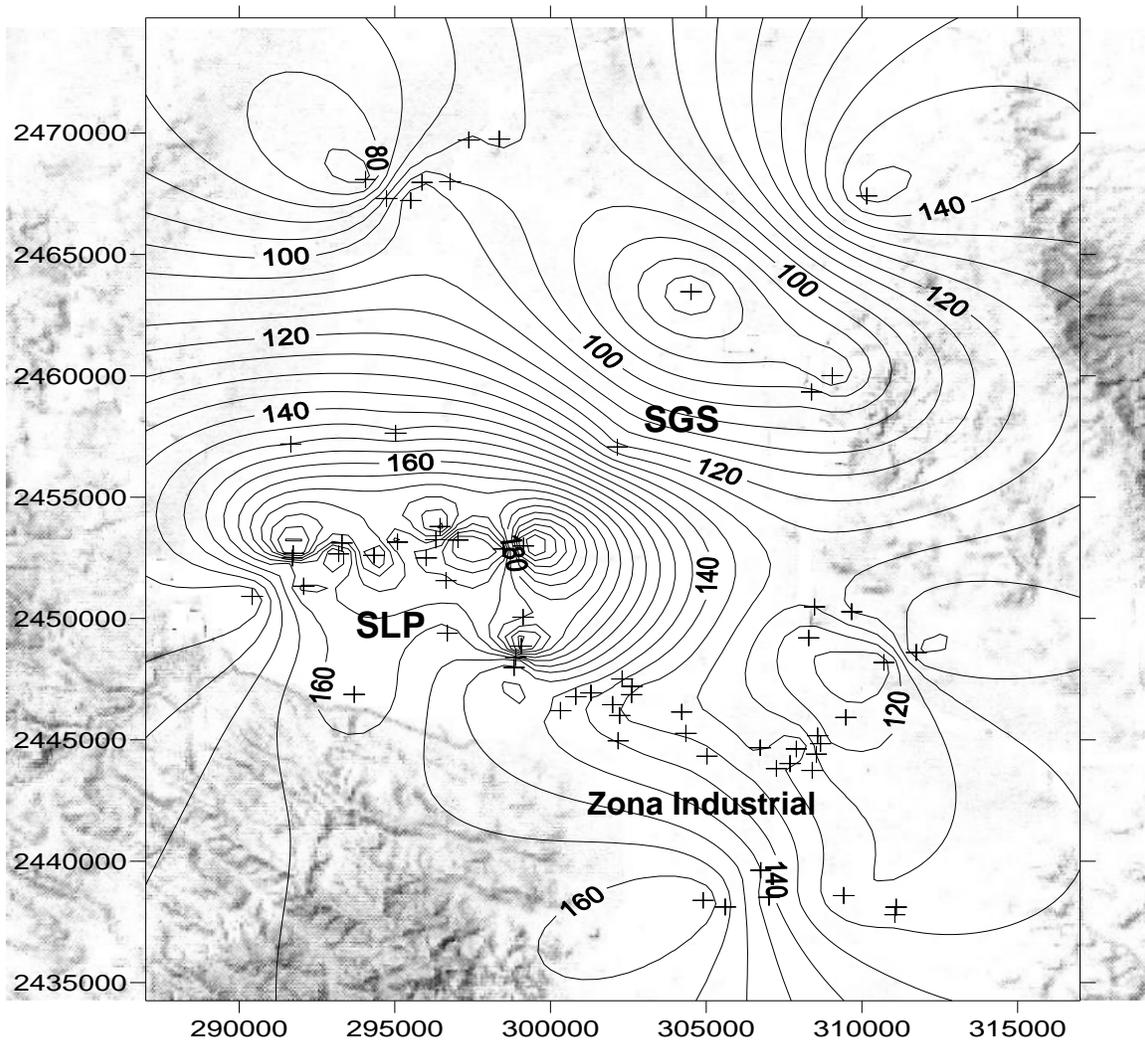


Figura 2.15 Curvas de profundidad al nivel estático en 2005.

2.2.3.2 Curvas de elevación al nivel estático en 1995 y 2005

Para calcular la elevación del nivel estático se restó a la elevación del brocal, la profundidad al nivel estático. Los datos de elevación del nivel estático fueron procesados en Surfer para obtener las curvas de igual elevación del nivel estático tanto para el año 1995 (Figura 2.16) como para el 2005 (Figura 2.17).

Al comparar las configuraciones de los años 1995 y 2005, se observa un incremento en el área de elevaciones menores a 1720 msnm, en donde el área para 1995 era de 88.6 km² y para el 2005 es de 274.2 km².

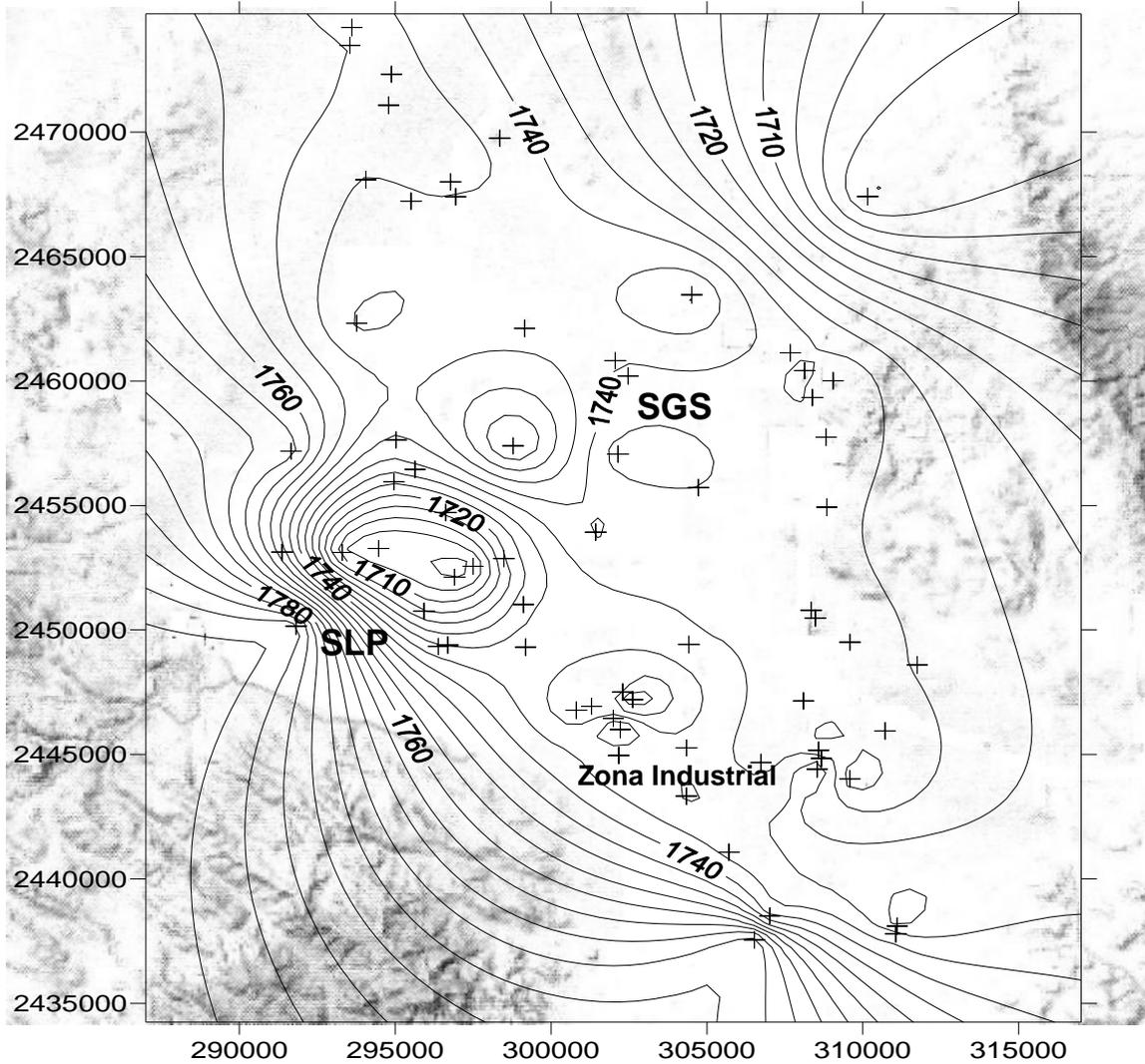


Figura 2.16 Curvas de elevación del nivel estático para el año 1995.

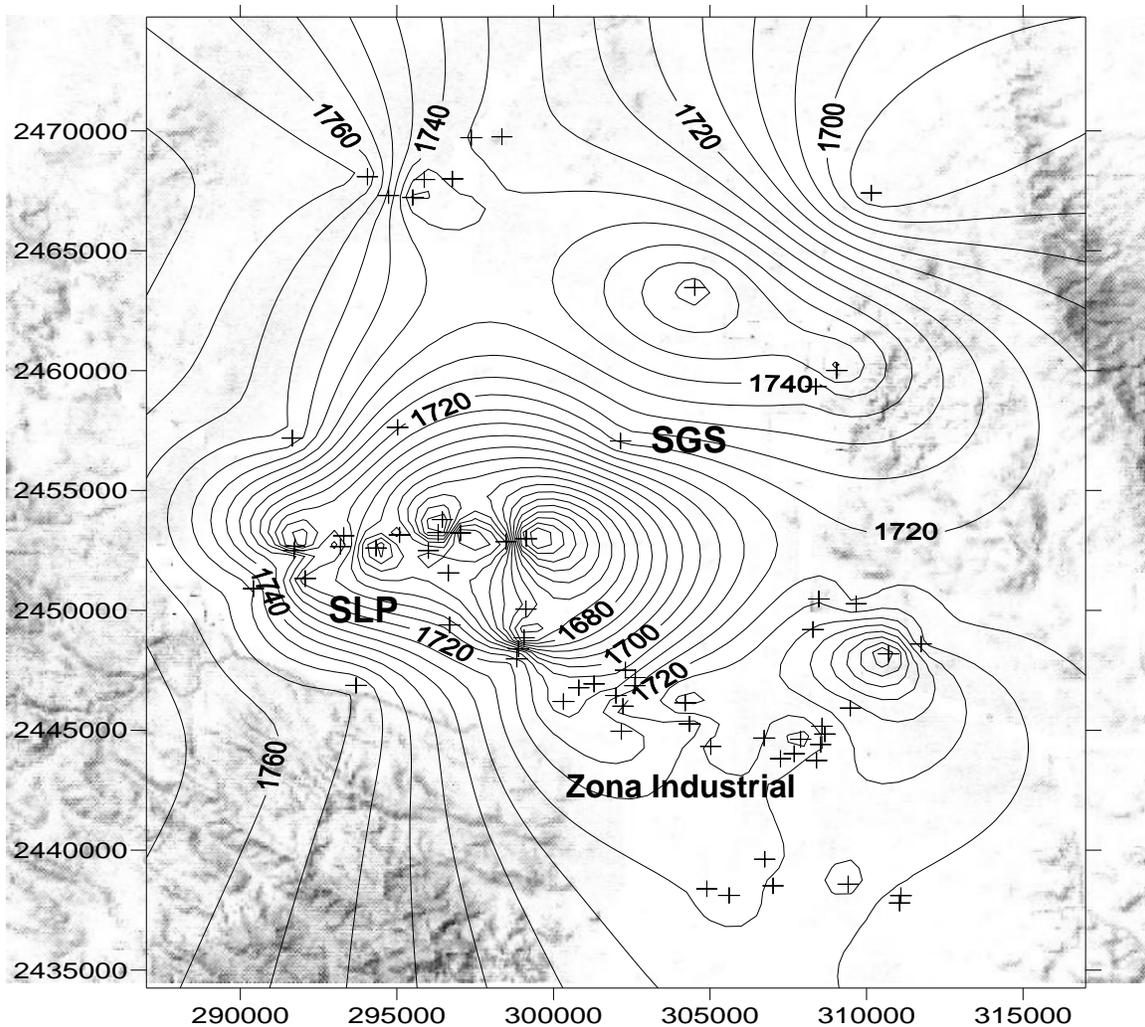


Figura 2.17 Curvas de elevación del nivel estático para el año 2005.

2.2.3.3 Dirección de flujo del agua subterránea

Procesando las mediciones potenciométricas realizadas en 2005 en toda el área de estudio, se puede inferir la dirección del flujo del agua subterránea. En el estudio de Sabinfosistem (2005), se indican diversas direcciones de flujo, sin embargo las curvas de la Figura 2.17 nos permiten inferir que el flujo es preferencialmente concéntrico, es decir, de las serranías hacia el centro del valle en donde se localiza la ciudad de San Luis Potosí (Figura 2.18), y es en esta zona también donde el abatimiento es mayor y continua incrementándose.

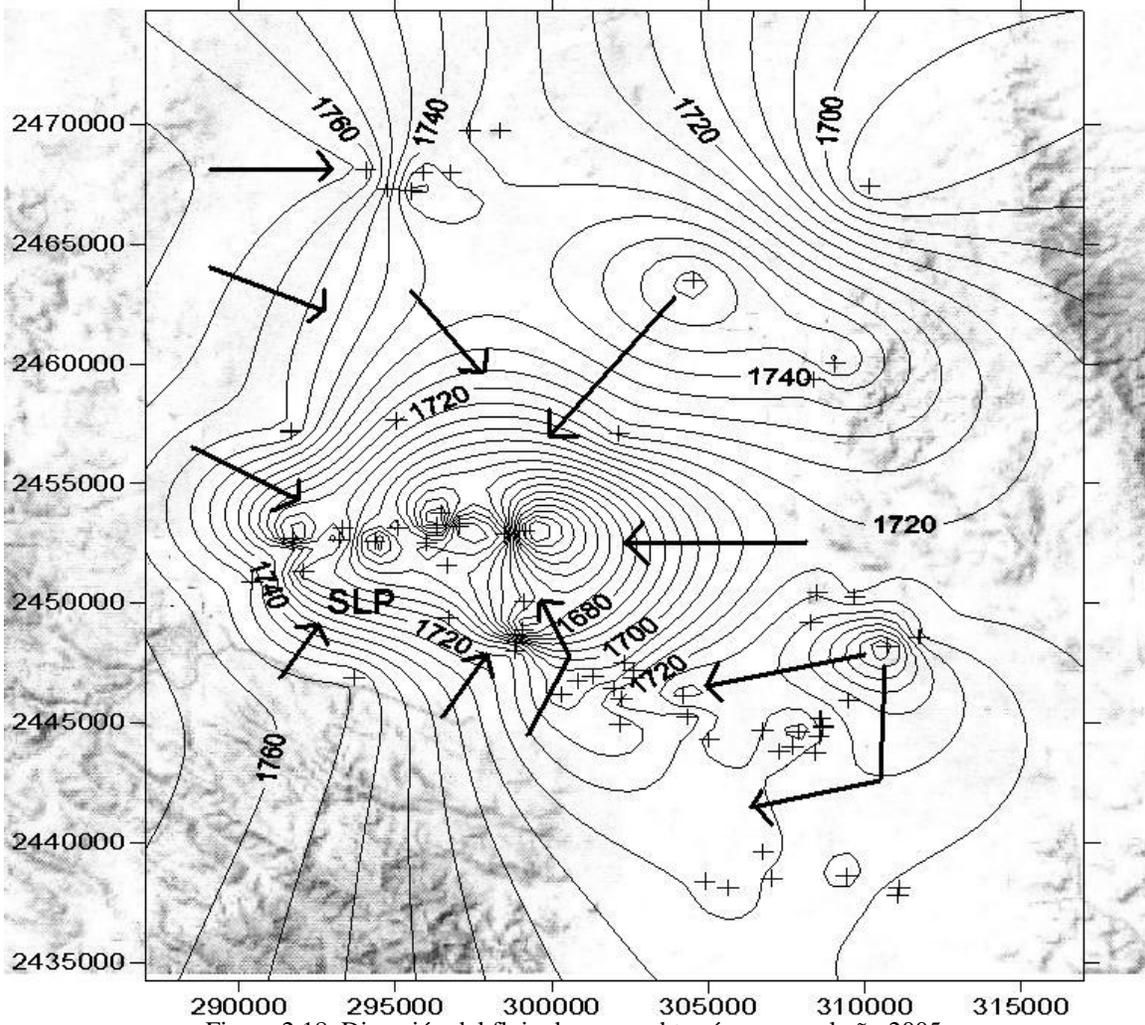


Figura 2.18 Dirección del flujo de agua subterránea para el año 2005.

2.3 Descripción conceptual del acuífero de San Luis Potosí

2.3.1 Introducción

Se presenta a continuación una descripción general del sistema acuífero de San Luis Potosí en donde se incluyen: las unidades hidrogeológicas que lo conforman, su funcionamiento hidrodinámico, los sistemas de flujo de la cuenca de SLP, la composición hidrogeoquímica y la calidad del agua subterránea.

2.3.2 El acuífero de SLP

Desde el punto de vista de la hidrología subterránea, la cuenca superficial de San Luis Potosí está incluida en la Sierra Madre Occidental, y esta última es resultado de una serie de eyecciones de lavas, ignimbritas y tobas de composición félsica durante el Terciario. Debido a efectos estructurales distensivos, se formaron sistemas de fracturas y fallas normales que afectaron regionalmente esas unidades volcánicas. Los lineamientos estructurales regionales detectados en imágenes de satélite y corroborados con trabajos de campo, indican la disposición de fosas (y pilares tectónicos) donde se ha identificado material de relleno (gravas, arenas, arcillas y piroclastos), en ocasiones con más de 500 m de espesor. En consecuencia, los materiales volcánicos fracturados de la cuenca y el relleno de la fosa tectónica en su conjunto, constituyen una unidad hidrogeológica continua, anisótropa y heterogénea.

En lo particular, la cuenca de SLP se localiza en el extremo suroriental de la Sierra Madre Occidental y está constituida por una fosa tectónica que se rellenó con material piroclástico y sedimentos en un máximo del orden de 500 m. Esta cuenca cubre unos 1950 km²; la mayor parte se encuentra en dicho acuífero y carece de corrientes superficiales perennes, por lo que el agua subterránea cubre el 95% de los 2600 l/s considerados necesarios para la ciudad (Carrillo y Cardona, 2003).

2.3.3 Tipo de material

Con base en la descripción geológica anterior, la parte del acuífero que subyace la cuenca de SLP, está constituida por dos tipos de material: uno granular y otro fracturado. El primero está formado por material de origen volcánico (tobas) y sedimentario que incluye una lente de material fino y compacto que está compuesto en volumen, mayormente por cuarzo y Sanidino, y un máximo de 10% de arcilla. Esta lente de material fino se encuentra a unos 80 m de profundidad a partir del suelo y tiene un espesor que varía entre 70 y 100 m; se localiza hacia el centro de la parte topográficamente más baja, excepto en las zonas de pie de monte, y abarca unos 250 km² de superficie. Su distribución fue definida por Carrillo y Cardona (2003) con base en registros litológicos y correlaciones apoyadas en la interpretación de registros eléctricos verticales realizados utilizando un dispositivo tetraelectrónico tipo Schlumberger. Las características geoelectricas de la lente de material fino se relacionaron con valores de resistividad

eléctrica del orden de 6-15 Ω -m. El material granular sobreyace en diversos escalones formados por unidades de las rocas volcánicas terciarias, fracturadas como se observa en la Figura 2.19. Los valores de resistividad eléctrica de las rocas volcánicas fracturadas son del orden de 25-100 Ω -m, mientras que en regiones alejadas de las principales estructuras de fallamiento se incrementan a más de 100 Ω -m, situación que ratifica su comportamiento hidrogeológico en el subsuelo.

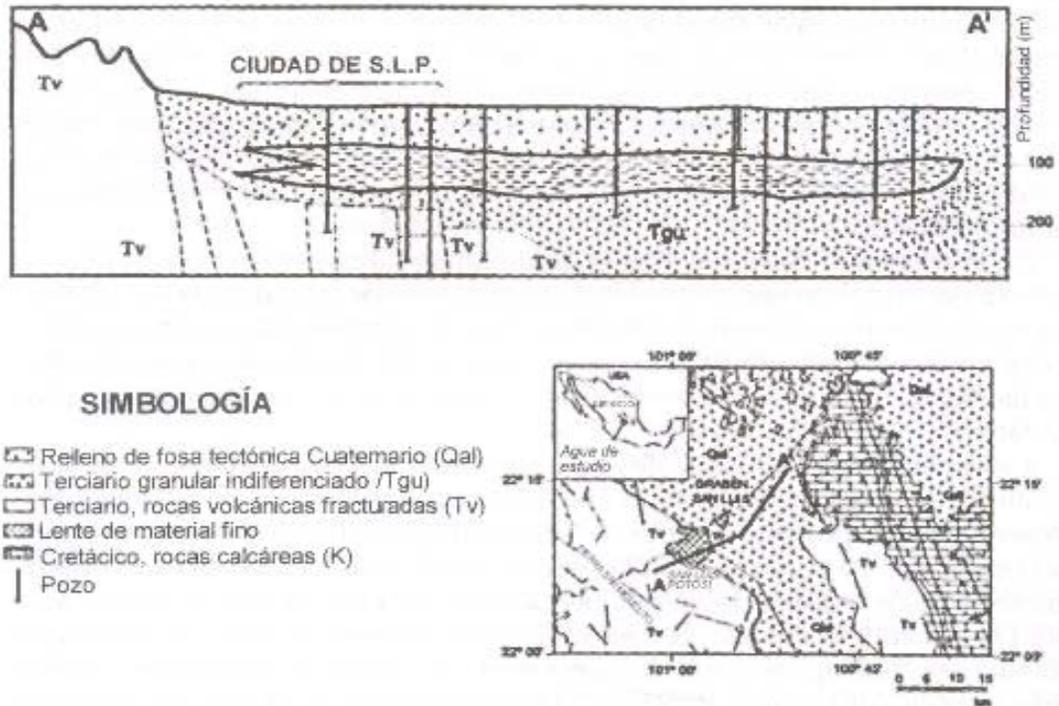


Figura 2.19 Disposición de materiales geológicos del subsuelo de la cuenca de San Luis Potosí (Carrillo y Cardona, 2003).

2.3.4 Respuesta hidráulica

Desde el punto de vista de respuesta hidrológica, los diferentes medios geológicos identificados funcionan como: poroso (material granular), fracturado (rocas volcánicas) y doble porosidad (tobas). En su conjunto constituyen un acuífero en su mayor parte de tipo libre heterogéneo, ya que incluye varios tipos de litología tanto en el sentido vertical como en el horizontal, por lo que sus características hidráulicas son variables. La relación de la elevación de la base del material granular fino con respecto a la posición del nivel piezométrico en algunas partes del acuífero profundo condiciona que el primero se comporte como un cuerpo que confina el flujo de agua subterránea en el segundo.

2.3.5 Corrección por temperatura

En el caso de las aguas subterráneas que circulan en la cuencas de San Luis Potosí, en particular las del acuífero profundo, la salinidad varía relativamente poco en relación con

un plano vertical, por lo que no se considera necesario efectuar correcciones, ya que el contenido de sólidos totales disueltos varía de 180 a 350 mg/l. Sin embargo, otro aspecto que se debe considerar, es la temperatura del agua que se encuentra circulando en la parte inferior del acuífero, agua que es obtenida en un número importante de pozos que captan el material fracturado del acuífero profundo. En la Figura 2.20 se presenta la distribución horizontal de la temperatura del agua subterránea medida a la descarga del pozo.

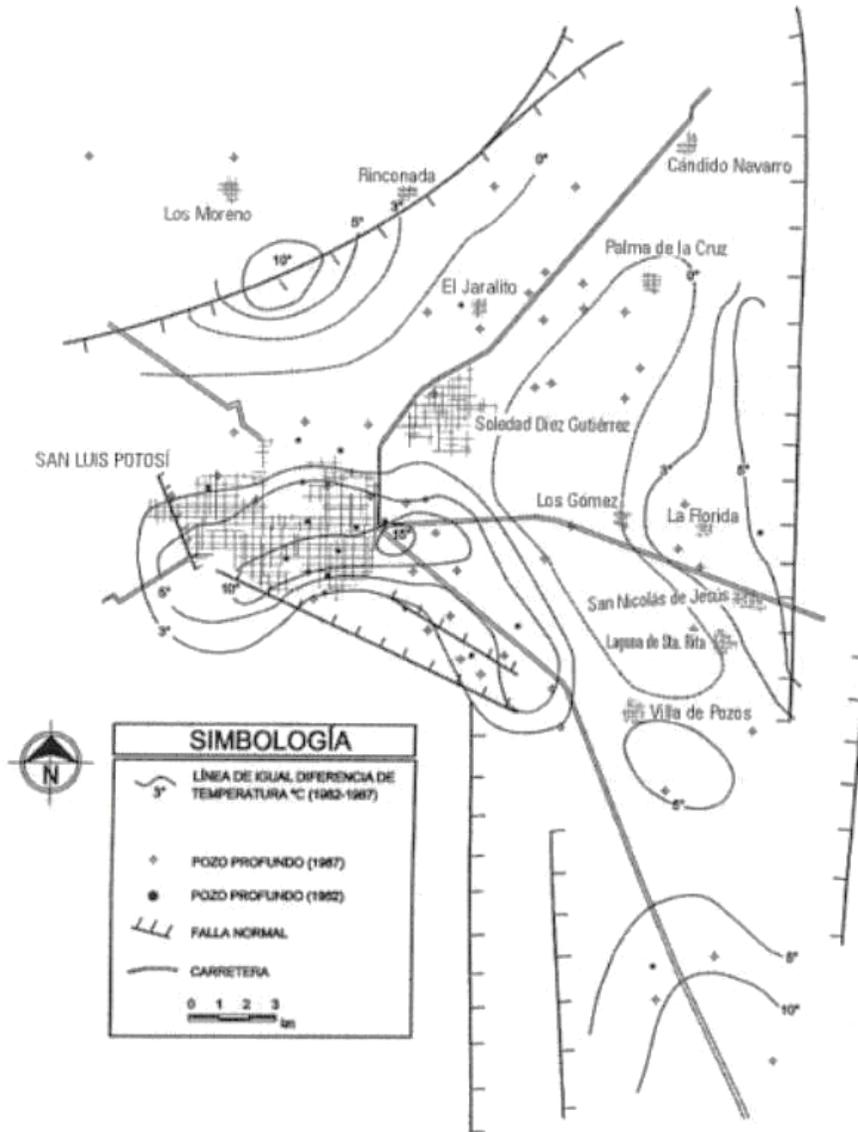


Figura 2.20 Distribución horizontal de la temperatura del agua subterránea en el acuífero profundo medida a la descarga de pozos (Carrillo y Cardona, 2003).

Como se determina en la sección de hidrogeoquímica, con base en geotermómetros, se ha estimado una temperatura mínima de 75 °C para el agua subterránea, cuya temperatura a la descarga del pozo es de 34-36 °C; esta temperatura contrasta con la medida en el agua que circula por el material granular que es de ≈ 25 °C. La temperatura del agua fría (25 °C) y la que circula a profundidad (con más de 75 °C) implica un contraste de densidades

de $0.9970 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ y de $0.9765 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, respectivamente. La diferencia de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ es significativa aunada al espesor del acuífero considerado, o la altura de la carga hidráulica hasta la base del acuífero; de este modo, la corrección para una columna de agua caliente de 1500 m es del orden de 30 m.

2.3.6 Conductividad hidráulica

Los valores mayores de conductividad hidráulica en la cuenca de SLP están asociados con las fallas que originaron las fosas tectónicas, y en especial con zonas de cruce de sistemas de fracturamiento principal (intersecciones de los sistemas NE-SW y NW-SE) donde se tienen valores de K de hasta $\approx 3.5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$. Afuera de estas zonas de fracturamiento los valores se reducen drásticamente, llegando hasta $\approx 2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$. Estos valores fueron obtenidos por Carrillo y Cardona (2003) mediante el análisis e interpretación de pruebas de bombeo (abatimiento-tiempo) estándar, por medio de la aplicación de metodología numérica como la propuesta por Rathod y Rushton, donde se consideró que no todo el espesor de la unidad acuífera atravesada por el pozo es productora.

Por otro lado, el medio granular también presenta zonas que permiten buenas condiciones para el flujo subterráneo, y corresponden predominantemente con materiales gruesos (arenas y gravas con $K = 2.3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$) que normalmente se presentan en las márgenes de las fosas. En la porción central de la fosa, las partículas de esta unidad acuífera son normalmente más finas ($K = 2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$), presentándose incluso condiciones hidráulicas de tipo confinado, aunque de distribución restringida. Estas condiciones obedecen a la distribución de la lente de material fino. Cálculos realizados por Carrillo y Cardona (2003) con el software MODFLOW indican que se filtran a través de esta lente del orden de 2 l/s por cada kilómetro cuadrado de su superficie.

2.3.7 Transmisividad

El medio de doble porosidad que existe en el acuífero de SLP, se caracteriza por la presencia de bloques de tobas; cuando aportan agua a un pozo de extracción, inicialmente el agua fluye de las fracturas que separan los bloques y, después, de aquella almacenada en los poros de los bloques.

Las fisuras de las lavas contribuyen a los pozos con la mayor parte de la producción de agua, pues la porosidad es reducida (de 6%). Los espacios intergranulares de las tobas contribuyen mayormente con su porosidad de 18 a 37% al volumen de la producción; sin embargo, esta porosidad afecta inversamente la velocidad del agua subterránea, por lo que el flujo en ésta contribuye muy poco al rendimiento específico de los pozos. La circulación de agua subterránea se realiza principalmente en los sistemas de fracturas de las rocas volcánicas; por lo tanto, en la mayoría de la cuenca el movimiento de agua es en términos efectivos en esta parte del acuífero.

2.3.8 Velocidad de flujo

Los efectos del marco geológico son definitivos sobre el control de la velocidad (V) y de la forma de desplazamiento del agua subterránea. En especial, existen dos conceptos básicos que deben considerarse: la velocidad y recorrido natural del flujo y la velocidad producida bajo influencia de la extracción por obras, preferentemente pozos.

En efecto, en la cuenca de SLP el flujo de agua subterránea en el material granular es relativamente más lento ($V = 0.017$ m/día) y con dirección preferentemente horizontal, excepto en las zonas de pie de monte donde se genera entrada de agua. El material de doble porosidad presenta velocidades de flujo subterráneo incluso mayores ($V = 0.13$ m/día), aunque se estima que debido al limitado número de pruebas disponibles, estos valores son de representatividad local. En lo que corresponde a las lavas fracturadas, el flujo presenta velocidades sensiblemente mayores ($V = 0.28$ m/día), y el movimiento natural es preponderantemente horizontal, pero vertical en las zonas de producción.

2.3.9 Consolidación en el acuífero de SLP

En el caso de la cuenca de SLP, no se han realizado investigaciones sobre las diversas propiedades de la capa del material confinante presente en el subsuelo. Esto es debido en parte a que en general no se ha presentado una respuesta de consolidación del suelo que pueda considerarse resultado de la extracción de agua subterránea. La respuesta particular a la extracción de no consolidación del material arcilloso en la cuenca de SLP se estima que es debida a que está compuesta de material esencialmente granular con un coeficiente de compresibilidad mínimo. En efecto, Cardona (2003) realizó el análisis de este material y encontró que, desde el punto de vista mineralógico, está compuesto en volumen principalmente por granos de cuarzo y Sanidino, y un máximo de 10% de arcilla. Otra razón que se considera fundamental en la insignificante respuesta observada de consolidación del suelo es que la mayor parte del agua subterránea extraída está siendo aportada por la porción fisurada del acuífero y no por el almacenamiento de dicho material arcilloso de la parte granular del acuífero profundo.

Evidentemente, el material arcilloso no es homogéneo e isótropo, por lo que su respuesta a la extracción variará de lugar en lugar dependiendo de efectos locales en la granulometría y de la fuente de aporte de agua subterránea. Sin embargo, en términos amplios, en San Luis Potosí la respuesta expuesta del sistema hidrogeológico compuesto por la lente de material fino y el acuífero corresponde con la evidencia hidrogeológica observada en campo.

2.3.10 Sistemas de flujo

Se ha establecido que la cuenca de SLP se aloja en la porción central del país y que queda incluida al sureste de la denominada Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Occidental, hacia el extremo donde limita con la Mesa Central.

La información piezométrica disponible para la cuenca de SLP no es suficiente como para permitir la definición tridimensional de los sistemas de flujo en una región. Más aun, en ocasiones los patrones naturales de flujo están muy distorsionados localmente por la extracción concentrada de agua subterránea por medio de los pozos. En este caso, para definir los sistemas de flujo es necesario utilizar herramientas adicionales como topografía, geología del subsuelo, hidrogeoquímica y análisis de manifestaciones superficiales de ausencia o presencia de agua subterránea. Es importante recordar que las fuerzas que condicionan el movimiento del agua subterránea son resultado de fuerzas gravitacionales, de temperatura y capilares.

Cuando se considera que el flujo de agua subterránea es controlado por fuerzas gravitacionales únicamente, la topografía del terreno permite suponer, en primera instancia, que debido a la fuerza de la gravedad terrestre, la dirección del flujo subterráneo se dirige de las partes topográficamente altas (zonas de recarga) a las partes topográficamente bajas (zonas de descarga). De acuerdo con la jerarquía de los sistemas de flujo, el de tipo regional es el que se inicia en los terrenos de mayor altitud y termina en la región de menor altitud. Es importante señalar que, de acuerdo con Tóth, los patrones de flujo subterráneo están controlados por la configuración del nivel freático y por la distribución de las conductividades hidráulicas del medio geológico. El flujo subterráneo también está en función de la topografía y el clima de la región.

En terrenos montañosos compuestos por rocas fracturadas como las que afloran en la cuenca de SLP, la configuración del nivel freático depende de la distribución espacial de la conductividad hidráulica y de la recarga, además de que un relieve pronunciado favorece la circulación profunda de agua subterránea. En la cuenca de SLP, la totalidad de los pozos se encuentran ubicados en la planicie, por lo que no es posible conocer la configuración del nivel freático en las sierras; la información disponible únicamente permite establecer que las elevaciones topográficas compuestas por rocas volcánicas fracturadas potencialmente pueden constituir zonas de recarga de parte del agua subterránea que se extrae en la planicie.

El conocimiento de la calidad del agua subterránea y su distribución espacial es importante desde el punto de vista de agua asequible para el abastecimiento, y por la información que puede rendir acerca de la dirección y dimensiones de los patrones de flujo subterráneo. A medida que el agua subterránea se mueve en la zona saturada, de acuerdo con el patrón de flujo subterráneo desde las zonas de recarga hasta las zonas de descarga, generalmente incrementa su contenido de sólidos totales disueltos, esto es, incrementa su salinidad. Está bien establecido que en áreas de recarga existen menores cantidades de sólidos disueltos que en agua más profunda del mismo sistema, y ésta a su

vez, posee menor cantidad de sólidos totales disueltos que el agua subterránea en las zonas de descarga.

El análisis conjunto de la temperatura y la concentración de Li^+ (Figura 2.21) confirma que el “agua termal” puede asociarse con un sistema de flujo regional que ha circulado por rocas volcánicas riolíticas fracturadas. El Li^+ es un elemento de tan alta movilidad geoquímica que al principio del ciclo hidrológico las rocas ígneas tienden a liberarlo, además indica la interacción agua-roca. De este modo, las variaciones en la concentración de Li^+ en el agua subterránea indicarán trayectorias de flujo (tiempo relativo de residencia) y litologías diferentes. Así, en el caso de las aguas de SLP, el agua fría tiene bajas concentraciones de Li^+ y se asocia con la porción del acuífero correspondiente al material granular de relleno. La componente termal presenta los mayores valores de Li^+ , lo que sugiere que ha viajado una distancia mucho mayor (vertical y horizontalmente) que la componente de agua fría.

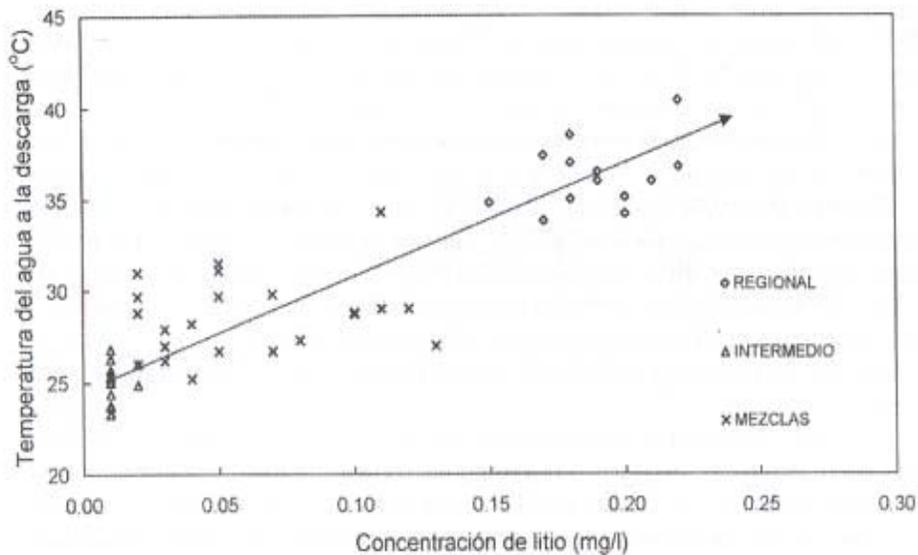


Figura 2.21 Relación Li^+ : temperatura para el agua subterránea del acuífero profundo (Carrillo y Cardona, 2003).

El estudio de las características físicas y químicas del agua subterránea de la cuenca de SLP sugiere que existe un sistema de flujo regional, que circula preferentemente por las rocas volcánicas fracturadas que afloran en la parte alta, y relativamente plana, ubicada al occidente de la Sierra de San Miguelito, aunque esto no implica que la conductividad hidráulica de dichas unidades geológicas sea similar a la de otras unidades en el subsuelo de la planicie, pues como se ha visto, esta propiedad es resultado de un comportamiento estructural particular. De acuerdo con los elementos traza presentes y su concentración en el agua subterránea, se estima que el sistema de flujo regional definido se inicia en una zona más allá de la cuenca hidrológica superficial, mientras que la componente de agua fría se origina de recarga natural en las estribaciones de la sierra dentro de la cuenca. En particular se observa que no existen zonas de descarga de las aguas que se infiltran en la

cuenca de SLP. Una descripción de los diferentes sistemas de flujo identificados en la cuenca de San Luis Potosí y su control geológico se presenta en la Figura 2.22.

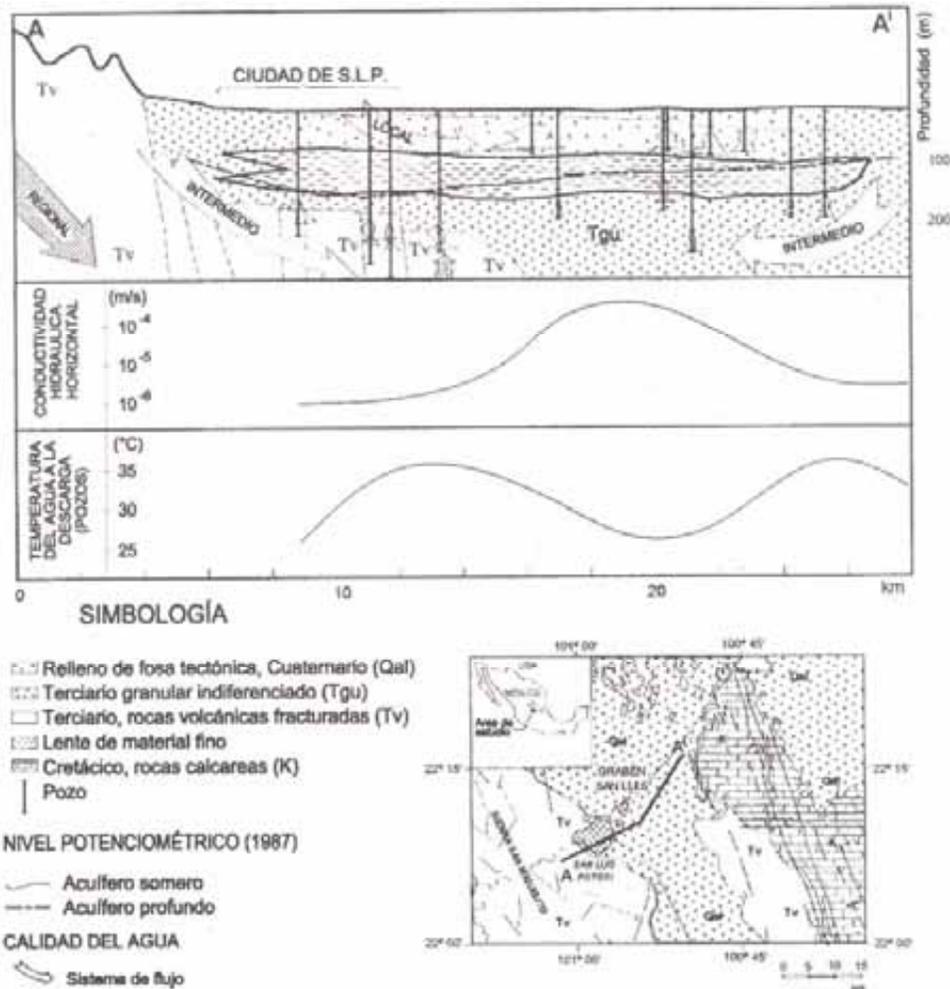


Figura 2.22 Sistemas de flujo en la cuenca de San Luis Potosí y su relación con la geología (Carrillo y Cardona, 2003).

2.3.11 Calidad del agua subterránea

La cuenca de SLP presenta condiciones muy interesantes, ya que convergen dos conceptos que limitan los volúmenes de agua asequible desde el punto de vista de su calidad para utilizarse para consumo humano: 1) efectos antropogénicos, y 2) efectos naturales de interacción agua-material geológico. El primer caso está marcado por el manejo inadecuado del agua residual generada por la población, y más recientemente por la industria, manejo que se caracteriza por su desalojo de la ciudad a través de canales sin revestir y su posterior utilización para riego, por lo que la presencia de contaminantes en el agua subterránea del acuífero somero ha sido identificada consistentemente por evaluaciones realizadas desde principios de la década de 1960. Desde el punto de vista de

inorgánicos en las aguas subterráneas de ese acuífero, se han detectado elevadas concentraciones de NO_3^- , Cl^- , HCO_3^- y Fe_{total} que indican la entrada de aguas residuales; por otro lado esta invasión se ratifica con la identificación de coliformes totales y fecales. Evidentemente la lente de material fino que delimita el acuífero somero regula el paso del agua que satura a este último, permitiendo un flujo que está condicionado por las propiedades hidrogeológicas del acuífero superior, las de la lente y las de la parte involucrada del acuífero profundo. En condiciones naturales previas a la explotación de agua subterránea, la cantidad de flujo de agua que pasaba del acuífero somero al profundo era por dos vías: a través de la lente de material fino y otra lateral, donde el agua se derrama en la región donde termina la lente. Con la perforación de pozos profundos se creó una vía adicional, ya que, de 1960 a 1980 (cuando menos), muchos eran construidos con ademe ranurado desde 60-80 m hasta la profundidad total (150-300 m); el nivel de agua en estos pozos se encuentra a más de 50 m de profundidad, por lo que al agua del acuífero somero entra al pozo por el ademe ranurado y cae hacia el acuífero profundo. Muchos de esos pozos actualmente están fuera de operación pero no han sido sellados en forma adecuada, por lo que el ingreso de agua contaminada del acuífero somero hacia el profundo es continuo.

Se han realizado algunos cálculos para tratar de determinar la cantidad de agua subterránea que pasa desde el acuífero somero por el cuerpo de la lente de material fino. Como se detalló previamente, Carrillo y Cardona utilizaron una aproximación hidráulica, con la cual determinaron que el caudal de aporte lateral es del orden de 40 l/s para todo el perímetro de la lente de material fino.

En la cuenca de San Luis Potosí los efectos naturales de interacción agua-material geológico ocasionan elevadas concentraciones de F^- disuelto en el agua subterránea termal (hasta de 3.8 mg/l), mayores al límite permisible establecido en la NOM-127-SSA1-1994, que en México señala los límites máximos permisibles en el agua destinada para consumo humano. Se ha detectado que la fuente de F^- se encuentra en las rocas volcánicas fracturadas, por lo que durante el movimiento del agua subterránea a través de las fracturas interacciona con su parte vítrea y el F^- pasa rápidamente a la solución. Sin embargo, el agua termal cuya temperatura a la descarga es mayor de 35 °C, con excepción del F^- , es de muy buena calidad, tiene baja salinidad (STD < 300 mg/l) y mínimo contenido de elementos traza (As, B, Pb, Cr), cuya ingesta podría ocasionar daños a la salud dependiendo de la dosis.

A continuación se presenta la Tabla 2.5 donde se incluyen la composición química promedio del agua termal y del agua fría del acuífero profundo, y la composición del agua fría del acuífero somero.

Tabla 2.5 Concentraciones promedio de diversos elementos y compuestos en las aguas subterráneas de la cuenca de SLP (en mg/l) (Carrillo y Cardona, 2003).

	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	Na	K	Ca	Mg
Acuífero profundo	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Agua termal	155	13.5	18.8	4.6	53.2	5.1	19.2	1.29
Agua fría	99	10.5	4.7	6	14.6	9.9	21.1	1.99
Mezcla	138	11.4	13.8	4.1	32.6	10.2	25.1	1.94
Acuífero somero								
Agua fría	212	85.4	84.8	29.2	50	23.8	87.1	13.06
	Temperatura	pH	E.C.	TDS	SiO ₂	F	Li	B
Acuífero profundo	°C		µmhos/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Agua termal	36.3	7.2	402	272	59	3.1	0.19	0.174
Agua fría	25.1	6.95	203	217	92	0.35	0.01	0.032
Mezcla	28.4	7.15	330	233	83	1	0.06	0.161
Acuífero somero								
Agua fría	21	6.22	820	609	70	0.37	0.01	0.093

2.3.12 Presencia del F⁻

El agua subterránea de los sistemas de flujo regional del valle de SLP, normalmente contiene una salinidad relativamente más elevada y mayor concentración de elementos traza, entre los cuales el F⁻ representa un peligro para la salud pública de la población de la ciudad de SLP, ya que normalmente se encuentra en valores mayores al máximo aceptado (1.5 mg/l) en la NOM-127-SSA1-1994. Evidencias geoquímicas señalan que el agua subterránea termal (regional) está saturada con relación a la fluorita, mineral que controla los valores de F⁻ disuelto; esto es, para las condiciones de presión, temperatura y pH presentes en el agua, ésta no disolverá F⁻ adicional, o si esas condiciones cambian podrá precipitarse F⁻. Lo anterior no tiene como objetivo definir el concepto de índices de saturación, sin embargo, es importante apuntar que este índice marca el riesgo de que se precipiten minerales al cambiar las condiciones físicas del agua al entrar al pozo (por cambios de presión, temperatura, pH).

2.3.13 Geotermómetros

En el acuífero profundo en la cuenca de SLP, la temperatura del agua se puede relacionar directamente con la litología atravesada por el pozo. Las temperaturas máximas a la descarga se correlacionan con pozos en zonas de admisión en rocas fracturadas, mientras que las menores temperaturas se asocian con pozos emplazados preferentemente en

material granular (Figura 2.22). Como es de esperar, este control geológico se refleja además en la química de elementos mayores y menores. La temperatura que alcanza el agua subterránea en su recorrido a profundidad generalmente no coincide con la registrada a la descarga de los pozos en superficie. El enfriamiento del agua en su ascenso se debe a efectos adiabáticos, mezcla con agua somera más fría, o una combinación de estos procesos. La geotermometría química es una herramienta que se utiliza en la exploración geotérmica para investigar, en forma indirecta, la temperatura del agua subterránea a profundidad.

Cálculos desarrollados con base en geotermómetros por Carrillo y Cardona (2003), encontraron que la temperatura del agua termal en la trayectoria más profunda del sistema de flujo es del orden de 75-90 °C. Sin embargo, debido a que los geotermómetros no están calibrados para sistemas de baja salinidad, probablemente una temperatura de equilibrio del orden de 75 °C, representa adecuadamente las condiciones en la parte más profunda del sistema. Con estos datos se espera que el sistema de flujo de agua subterránea asociado al agua “termal”, alcance una profundidad entre 2.5 y 2.1 km, lo que es congruente con el espesor total definido para la secuencia volcánica del Terciario.

2.4 Balance hidrológico de agua subterránea

2.4.1 Balance hidrológico de la cuenca de San Luis Potosí

Para obtener el balance de agua subterránea se aplicó la ecuación general de balance de acuerdo a la ley de la conservación de la masa:

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

Donde el volumen de entradas queda representado por la recarga total, las salidas por la descarga total, y la diferencia es el cambio de volumen almacenado en una unidad hidrogeológica.

2.4.2 Recarga

La recarga total del acuífero se obtuvo utilizando la siguiente expresión:

$$R_T = P + S_V + S_H + F + R_R$$

Donde:

R_T = Recarga total

P = Precipitación

S_V = Flujo subterráneo vertical

S_H = Flujo subterráneo horizontal

F = Fugas en las redes urbanas

R_R = Retorno de riego.

La recarga o entrada total del acuífero se estima en promedio en 115.14 Hm³/año, constituida por la recarga natural y la inducida. La recarga natural está constituida por el volumen de infiltración de la precipitación en el valle, con un valor de 22.38 Hm³/año, la cual es captada en su mayoría por el acuífero somero; por la infiltración vertical que existe desde el acuífero somero hacia el profundo (flujo subterráneo vertical), con un valor aproximado de 34.93 Hm³/año, y por flujo subterráneo horizontal con 22.9 Hm³/año, proveniente de las infiltraciones en las sierras circundantes y que ingresan tanto a la parte somera como a la parte profunda. La recarga inducida se constituye de las fugas en las redes urbanas con un valor de 27.24 Hm³/año y por el retorno de riego agrícola, con un valor estimado de 7.69 Hm³/año.

El valor del volumen de infiltración por precipitación se calculó a partir de los datos de precipitación medidos por Sabinfosistem en 2005 (378.7 mm/año), el coeficiente de infiltración correspondiente al tipo de material del que está constituido el acuífero somero, el cual es del 7% (Tapiador, 2000) y el área total del valle de SLP incluida en el modelo de flujo (844.4 km²).

El valor de la recarga por flujo subterráneo horizontal, se obtuvo con los valores de precipitación y coeficientes de infiltración ya mencionados, y el área total de recarga de las sierras (863.9 km²) utilizada en el modelo de flujo de esta tesis. Cabe mencionar que como la recarga horizontal, es el agua que se introduce al valle por toda el área saturada lateral, se está considerando una profundidad de 1,100 m (profundidad del modelo de flujo) la cual corresponde a todo el acuífero (somero y profundo).

Las fugas en las redes urbanas fueron calculadas por Martínez (2009), tomando en cuenta el área que abarca la zona urbana de SLP, el total de agua potable que se distribuye a través de las redes durante un año (2003 en este caso), los defectos en las tuberías, la conductividad específica del suelo que se encuentra inmediatamente en contacto con la tubería y el gradiente hidráulico.

El retorno de riego agrícola se calculó con el volumen total de agua residual empleada para riego (70 Hm³/año), el total de agua extraída desde los pozos para riego (39.8 Hm³/año) y el coeficiente de infiltración ya mencionado (CNA, 2004).

2.4.3 Descarga

La descarga total del acuífero se calculó por medio de la siguiente expresión:

$$D_T = D_N + EVT + B$$

Donde:

D_T = Descarga total

D_N = Descarga natural

EVT = Evapotranspiración real (Fórmula de Coutagne)

B = Bombeo o extracción

Las salidas del sistema acuífero (153.6 Hm³/año) están integradas por las descargas naturales más las descargas artificiales por efecto del bombeo en los pozos. Considerando que el flujo subterráneo es de manera concéntrica hacia la parte central del valle, se estima que la única descarga natural que persiste es la debida a la evapotranspiración de los niveles someros la cual es del orden de 26.85 Hm³/año. Esta evapotranspiración real se obtuvo a partir de la fórmula de Coutagne, la cual tiene la siguiente expresión:

$$ETR = P - \chi P^2 \quad \text{con} \quad \chi = \frac{1}{0.8 + 0.14T}$$

Donde:

P = Precipitación media anual (m/año)

T = Temperatura media anual (°C)

La extracción total de agua subterránea en pozos de bombeo se ha calculado en 153.6 Hm³/año, realizando la suma de la extracción hecha para cada tipo de uso según valores de CNA (2004).

2.4.4 Cambio de almacenamiento

Este cambio se calculó restando las salidas a las entradas del sistema, con lo cual se obtuvo un valor de -100.24 Hm³/año, lo cual representa el 124.9% del total de la recarga (incluyendo la natural y la inducida) del acuífero.

A manera de resumen, la Tabla 2.6 contiene el balance de agua subterránea del área del acuífero de San Luis Potosí que abarca el modelo de flujo de esta tesis.

Tabla 2.6 Balance de agua subterránea del acuífero de SLP.

ÁREAS			
	Área total del acuífero	1808.3	Km ²
	Área total de las sierras	963.9	Km ²
	Área total del valle	844.4	Km ²
	Área total de recarga de las sierras	863.9	Km ²
	Área total de recarga del valle	844.4	Km ²
	Área del acuitardo	331.03	Km ²
	Área de cultivos varios	80.2	Km ²
	Área urbana (Cd. de SLP)	120	Km ²
RECARGA			
<i>Natural</i>			
	Por precipitación	22.38	Hm ³ /año
	Por flujo subterráneo horizontal (desde las sierras)	22.9	Hm ³ /año
<i>Inducida</i>			
	Fugas en redes urbanas	27.24	Hm ³ /año
	Retorno de riego	7.69	Hm ³ /año
	Recarga total	80.21	Hm ³ /año
DESCARGA			
	Descarga natural	0	Hm ³ /año
	Evapotranspiración real (Coutagne)	26.85	Hm ³ /año
	Extracción (todos los usos)	153.6	Hm ³ /año
	Descarga total	180.45	Hm ³ /año
Cambio de almacenamiento	Entradas – Salidas	-100.24	Hm ³ /año

A manera de comparación, se muestra la Tabla 2.7 con el balance de agua subterránea realizado por la empresa Ariel Consultores en el año de 1995 para el acuífero de SLP:

Tabla 2.7 Relación del balance hidrogeológico en el valle de SLP.

Fecha		Jun-95		
Lluvia	Área	Km ²	1,150	
	Coeficiente	I ₁	0.05	
			mm/año	361.0
Publico urbano más industrial		I ₂	0.35	
			Mm ³ /año	
			84.3	
Agrícola más otros		I ₃	0.20	
			Mm ³ /año	
			26.2	
Entradas	Recarga Vertical	Lluvia	Mm ³ /año	20.8
		Público U.	Mm ³ /año	16.2
		Agrícola	Mm ³ /año	5.2
	Lateral	Mm ³ /año	20.0	
	TOTAL	Mm ³ /año	62.2	
Salidas	Bombeo	Mm ³ /año	110.5	
	Evaporación	Mm ³ /año	0.0	
	Lateral	Mm ³ /año	8.0	
	TOTAL	Mm ³ /año	118.5	
Almacenamiento		Mm ³ /año	-56.3	
S			0.05	
Volumen drenado		Mm ³ /año	-1,150	

Los coeficientes I₁, I₂ e I₃ que aparecen en la tabla anterior, corresponden a la infiltración por lluvia, a la infiltración de agua de uso urbano e industrial y a la infiltración de agua de uso agrícola respectivamente, todos calculados por Ariel Consultores (1996) y todas consideradas como infiltraciones verticales.

Comparando ambos balances (Tablas 2.8 y 2.9), puede verse que el valor que más ha aumentado desde el año de 1995, es el volumen de extracción, lo cual era de esperarse con el continuo crecimiento de la demanda de agua en la ciudad de SLP por la expansión de la misma. Los valores calculados para las recargas por precipitación, por flujo subterráneo horizontal desde las sierras y retornos de riego, continúan sin cambios significativos desde 1995 como también se observa en las tablas.

Cabe también mencionar que en su balance, la empresa Ariel Consultores, considera nulas las salidas por evapotranspiración pues explican que: “no se considera a la evapotranspiración como un factor importante en el valle de SLP, dada la profundidad del nivel estático”.

Es importante también hacer notar que el valor que la empresa mencionada asignó en su balance a la recarga por fugas en las redes urbanas, es significativamente menor al utilizado en esta tesis, calculado por Martínez (2009). Una explicación a esta diferencia de valores es que actualmente, se cuenta con mejores herramientas computacionales para obtener este tipo de cálculos de fugas en tuberías, que en 1995.

CAPÍTULO 3

3.0 Introducción

En este capítulo se analizan las características del software comercial Visual Modflow (McDonald y Harbaugh, 1988) versión 3.1, el cual se utilizó para resolver el modelo numérico de flujo del sistema acuífero del valle de San luís Potosí. Se analizan las ecuaciones de flujo de agua y las condiciones iniciales y de frontera necesarias para su solución numérica. Se analiza el método numérico que utiliza el Visual Modflow para resolver las ecuaciones diferenciales parciales.

3.1 Acerca de Visual Modflow 3.1

Visual Modflow (MODular three-dimensional finite-difference ground-water FLOW model) es un programa computacional que permite modelar un sistema acuífero en tres dimensiones. El método numérico que utiliza Modflow para resolver la ecuación de flujo uniforme o transitorio es un bloque centrado en diferencias finitas, el modelo utiliza métodos iterativos para obtener la solución del sistema de ecuaciones. Su interfase se divide en tres módulos separados: Input Module, Run Module y Output Module, asociados a las opciones de ingreso de parámetros, de correr el programa y de desplegar los resultados de simulación.

El Input Module permite el ingreso de información para la construcción del modelo. Se representa el área de interés en un arreglo de celdas rectangulares horizontales (filas y columnas) y estratos verticales (capas), pudiendo ajustar las dimensiones de filas y columnas. A cada celda, en las distintas capas, se le puede definir como activa o inactiva (permeable o impermeable), asignar valores de propiedades de flujo y/o transporte, valores y tipos de condiciones de borde (río, dren, carga constante, carga general, recarga, evapotranspiración y barreras horizontales de flujo) y condiciones iniciales (superficie piezométrica inicial, concentraciones iniciales). Considera también el ingreso de pozos de extracción, inyección y observación, y el cálculo de balances en zonas definidas por el usuario. La discretización temporal se realiza en “períodos de stress” los que a su vez se dividen en “pasos de tiempo” definidos según una progresión geométrica.

El Run Module permite escoger entre distintas estimaciones de carga inicial, definir el número de pasos de tiempo dentro de un período de stress y su razón geométrica (multiplicador de paso de tiempo), elegir entre distintos métodos numéricos de resolución y ajustar los criterios de cálculo y convergencia, definir tipos de estrato (confinado, no confinado) y distintas condiciones de anisotropía.

El Output Module permite la visualización de los resultados de simulación como series de tiempo de la carga calculada y curvas de nivel equipotenciales y de la superficie freática (altitud y/o profundidad) para distintos períodos de stress. Entrega la serie de

balances hídricos en los sectores predefinidos (Zone Budget) y dispone de distintas herramientas para controlar la calibración manual del modelo.

El programa posee una estructura modular, que consiste en un programa principal y una serie de subrutinas, independientes entre sí, llamadas módulos. Estos módulos están agrupados en paquetes (Packages) asociados a una componente específica de la hidrogeología del sistema o al algoritmo de solución con que se resolverá el sistema de ecuaciones que describe el sistema modelado.

3.1.1 Modelo matemático en Visual Modflow (Ecuaciones de flujo)

El flujo tridimensional de agua subterránea en un medio poroso saturado, considerando el agua con densidad constante se representa por medio de la siguiente ecuación en derivadas parciales:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

En donde:

- h = carga hidráulica
- K = conductividad hidráulica en sus tres componentes (K_x, K_y, K_z)
- S_s = coeficiente de almacenamiento específico
- t = tiempo
- $x, y, z,$ = coordenadas cartesianas

Si se considera un medio poroso homogéneo e isotrópico con respecto a la conductividad hidráulica la ecuación es:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots (2)$$

Denominada la ecuación de Laplace de tipo elíptico de segundo orden.

Ecuación de flujo transitorio de agua subterránea en una unidad hidrogeológica confinada considerando el medio poroso saturado y la densidad del agua constante:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots (3)$$

Donde q_s = es el volumen por unidad de tiempo (L^3T^{-1}) en que el agua es añadida por fuentes o extraída por sumideros por unidad de volumen de acuífero.

Si el medio poroso es homogéneo e isotrópico con respecto a la conductividad hidráulica, la ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots (4)$$

La ecuación anterior es conocida en hidrogeología como ecuación de difusión.

Cuando la ecuación de flujo subterráneo considera fuentes y sumideros tiene la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots (5)$$

Excepto en sistemas muy simples, obtener soluciones analíticas de las ecuaciones (1) a (5) es raramente posible, por lo cual se utilizan distintos métodos numéricos para obtener esas aproximaciones. Una de esas aproximaciones es el método de diferencias finitas, donde el sistema continuo descrito por la ecuación (1) es reemplazado por un conjunto finito de puntos discretos en el espacio y el tiempo, y las derivadas parciales son reemplazadas por términos calculados de la diferencia en valores de carga de esos puntos. El proceso lleva a sistemas simultáneos de ecuaciones lineales; su solución entrega valores de carga en puntos y tiempos específicos. Estos valores constituyen una aproximación a la distribución continua de cargas hidráulicas variando en el tiempo que entregaría una solución analítica de la ecuación diferencial parcial de flujo.

3.1.2 Discretización espacial y temporal

El sistema acuífero real es representado por medio de un arreglo de bloques llamados celdas, cuyas ubicaciones se describen en términos de renglones, columnas y capas (Figura 3.1).

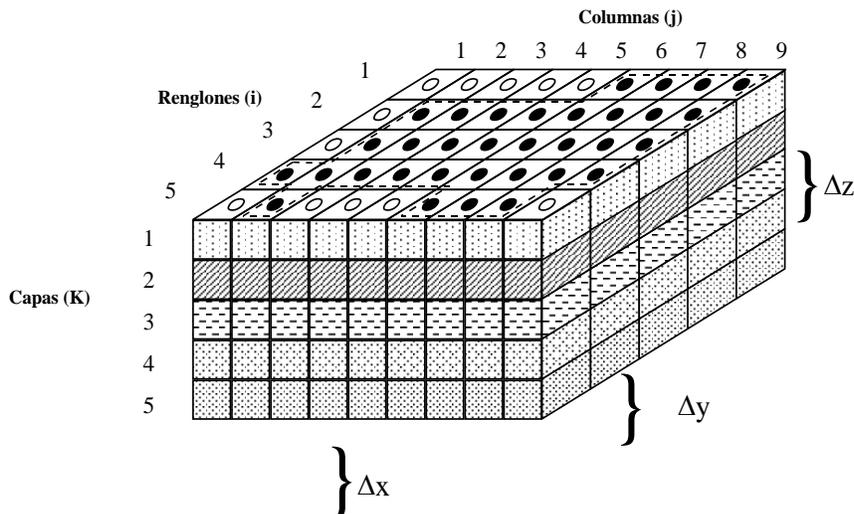


Figura 3.1 Esquema de discretización del acuífero.

Dentro de cada celda hay un punto llamado “nodo” en el cual se calcula la carga (h). Existen dos convenciones para definir la configuración de celdas respecto a la ubicación de los nodos; estas son las formulaciones de “bloque centrado” y de “punto centrado”, pero Visual Modflow utiliza la primera de estas formulaciones (Figura 3.2).

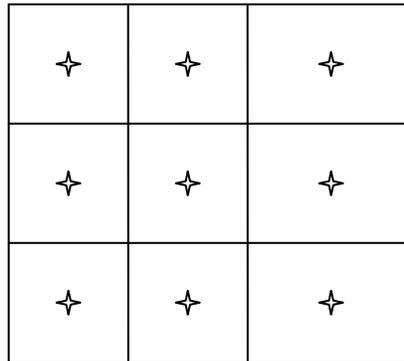


Figura 3.2 Sistema de bloque centrado (las estrellas representan los nodos).

El tiempo es discretizado en “periodos de stress” definidos por el usuario, los que a la vez se subdividen en “pasos de tiempo” de longitud creciente, definidos según una progresión geométrica en la que el usuario también define el “factor multiplicador”.

3.1.3 Ecuación de diferencias finitas

El método de diferencias finitas consiste en una aproximación de derivadas parciales por expresiones algebraicas envolviendo los valores de la variable dependiente en un limitado número de puntos seleccionados.

Como resultado de la aproximación, la ecuación diferencial parcial que representa el problema es reemplazada por un número finito de ecuaciones algebraicas, escritas en términos de los valores de la variable dependiente en puntos seleccionados. El valor de los puntos seleccionados se convierten en las incógnitas, en vez de la distribución espacial continua de la variable dependiente.

La ecuación de flujo de agua subterránea en la forma de diferencias finitas se obtiene al aplicar la ecuación de continuidad en una celda. Considerando que la densidad del agua se mantiene constante, se obtiene la ecuación (6) la cual es análoga a la ecuación (1):

$$\sum Q_i = SS \frac{\Delta h_t}{\Delta t} \Delta V_c \dots\dots\dots(6)$$

Donde:

Q_i = Tasas de flujo entrando y/o saliendo de la celda [L^3T^{-1}]

SS = Almacenamiento específico en la fórmula de diferencias finitas equivalente a S_s definido en la ecuación (1)

ΔV = Volumen de la celda [L^3]

Δh = Variación de la carga en un intervalo de tiempo Δt [L]

En el caso de flujo entrando en la celda i, j, k en la dirección de la fila, desde la celda $i, j-1, k$, éste se expresa según muestran las ecuaciones (7) y (8):

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}}{\Delta r_{j-1/2}} \dots\dots\dots (7)$$

$$q_{i,j-1/2,k} = CR_{i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) \dots\dots\dots (8)$$

$$CR_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \frac{\Delta c_i \Delta v_k}{\Delta r_{j-1/2}} \dots\dots\dots (9)$$

Donde:

$h_{i,j,k}$ = Carga hidráulica en el nodo i, j, k [L]

$q_{i,j-1/2,k}$ = Descarga volumétrica entre las caras i, j, k e $i, j-1, k$ [$L^3 T^{-1}$]

$KR_{i,j-1/2,k}$ = Permeabilidad en la dirección de la fila entre los nodos i, j, k e $i, j-1, k$ [LT^{-1}]

$\Delta c_i \Delta v_k$ = Área de la cara de la celda normal a la dirección de flujo [L^2]

$\Delta r_{j-1/2}$ = Distancia entre los nodos i, j, k e $i, j-1, k$ [L]

$CR_{i,j-1/2,k}$ = Conductancia en la fila i y el estrato k entre los nodos $i, j-1, k$ e i, j, k [L]

Ecuaciones similares a (8) pueden obtenerse para representar el flujo entre la celda i, j, k y sus vecinas restantes:

$$q_{i,j+1/2,k} = CR_{i,j+1/2,k} (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) \dots\dots\dots (10)$$

$$q_{i-1/2,j,k} = CC_{i-1/2,j,k} (h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \dots\dots\dots (11)$$

$$q_{i+1/2,j,k} = CC_{i+1/2,j,k} (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) \dots\dots\dots (12)$$

$$q_{i,j,k-1/2} = CV_{i,j,k-1/2} (h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) \dots\dots\dots (13)$$

$$q_{i,j,k+1/2} = CV_{i,j,k+1/2} (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \dots\dots\dots (14)$$

Los términos de las ecuaciones (10) a (14) tienen definiciones análogas a los términos definidos para la ecuación (8). Los términos CV y CC corresponden a las conductancias

en la dirección vertical y de las columnas, respectivamente, entre las celdas que indican sus subíndices.

Los flujos entrando o saliendo de la celda debido a procesos externos, tales como la acción de ríos, drenes, áreas de recarga, evapotranspiración o pozos de bombeo o inyección, requieren de términos adicionales. Estos flujos pueden ser dependientes o independientes de la carga en la celda que recibe el flujo. El flujo desde el exterior del acuífero puede ser representado por la ecuación (15):

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n} + q_{i,j,k,n} \dots\dots\dots(15)$$

Donde:

$a_{i,j,k,n}$ = Flujo desde la n-ésima fuente externa a la celda i, j, k [L^3T^{-1}]

$p_{i,j,k,n}$ y $q_{i,j,k,n}$ = Constantes [L^2T^{-1}] y [L^3T^{-1}] respectivamente

Si la fuente fuese un pozo de bombeo o inyección, el flujo externo se asume independiente de la carga (h) en la celda, entonces:

$$a_{i,j,k,n} = q_{i,j,k,n} \dots\dots\dots (16)$$

Considerando todas las fuentes externas, se tiene:

$$QS_{i,j,k} = \sum_{n=1}^n a_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^n p_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + \sum q_{i,j,k,n} \dots\dots\dots(17)$$

$$QS_{i,j,k} = p_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} \dots\dots\dots (18)$$

Tomando en cuenta todos los flujos de entrada entre la celda i, j, k y sus seis vecinas (ecuaciones 8, 10 y 14) así como los flujos desde fuentes (o sumideros) externos (ecuación 18), la ecuación (6) puede escribirse según muestra la ecuación (19):

$$q_{i,j-1/2,k} + q_{i,j+1/2,k} + q_{i-1/2,j,k} + q_{i+1/2,j,k} + q_{i,j,k-1/2} + q_{i,j,k+1/2} + QS_{i,j,k} = SS \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \dots\dots\dots (19)$$

La aproximación en diferencias finitas para la derivada de la carga se define según muestra la ecuación (20):

$$\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} = \frac{h^m_{i,j,k} - h^{m-1}_{i,j,k}}{t_m - t_{m-1}} \dots\dots\dots(20)$$

Donde:

$h^m_{i,j,k}$ =Carga hidráulica evaluada en el tiempo en el que se está realizando el cálculo t_m

$h^{m-1}_{i,j,k}$ =Carga hidráulica ya calculada o conocida (condición inicial) en el tiempo t_{m-1} anterior a t_m

Considerando todo lo expuesto anteriormente es posible detallar más la ecuación (19) según muestra la ecuación (21):

$$CV_{i,j,k-1/2}h^m_{i,j,k-1} + CC_{i-1/2,j,k}h^m_{i-1,j,k} + CR_{i,j-1/2,k}h^m_{i,j-1,k} + (-CV_{i,j,k-1/2} - CC_{i-1/2,j,k} - CR_{i,j-1/2,k} - CR_{i,j+1/2,k} - CC_{i+1/2,j,k} - CV_{i,j,k+1/2} + HCOF_{i,j,k})h^m_{i,j,k} + CR_{i,j+1/2,k}h^m_{i,j+1,k} + CC_{i+1/2,j,k}h^m_{i+1,j,k} + CV_{i,j,k+1/2}h^m_{i,j,k+1} = RHS_{i,j,k} \dots\dots\dots(21)$$

Donde:

$$HCOF_{i,j,k} = P_{i,j,k} - \frac{SC1_{i,j,k}}{t_m - t_{m-1}} \dots\dots\dots(22)$$

$$RHS_{i,j,k} = -Q_{i,j,k} - \frac{SC1_{i,j,k}h^{m-1}_{i,j,k}}{t_m - t_{m-1}} \dots\dots\dots(23)$$

$$SC1_{i,j,k} = SS_{i,j,k} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \dots\dots\dots(24)$$

La ecuación (21) constituye un sistema de ecuaciones simultáneas que puede ser escrito en forma matricial (ecuación 25):

$$[M] \cdot \{h\} = \{q\} \dots\dots\dots(25)$$

Conocidas las condiciones de frontera, la distribución de cargas iniciales, los parámetros hidráulicos y las cargas externas sobre el acuífero, es posible predecir las distribuciones de carga en tiempos sucesivos (simulación en régimen transitorio). Una ecuación de la forma de (25) puede ser definida para cada celda definida activa, en cada paso de tiempo de la simulación. Para el primer paso de tiempo, las condiciones iniciales de carga corresponden al término $h^{m-1}_{i,j,k}$ pudiendo calcularse las cargas h^m para la celda i, j, k y sus vecinas. Las cargas calculadas corresponderán a las cargas iniciales en el siguiente paso de tiempo.

3.1.4 Condiciones iniciales y de frontera para la solución de las ecuaciones de flujo

Las ecuaciones diferenciales parciales definidas en un dominio espacio-tiempo R tienen un número infinito de soluciones. Para obtener una solución particular es necesario agregar condiciones iniciales y condiciones de frontera. Si las soluciones existen serán únicas para una ecuación dada.

Condiciones iniciales:

Para determinar la solución particular de una ecuación diferencial se deben especificar los valores de la función incógnita para algún tiempo inicial t_0 en el dominio R o en su frontera ∂R . En la ecuación de flujo la función incógnita representa la carga hidráulica. El valor de la carga hidráulica en el interior del dominio o en su frontera es un valor medido en campo.

Condiciones de frontera:

Un dominio R puede intercambiar con su entorno, a través de su frontera ∂R (o de un segmento de ésta), masa, energía y momento. La frontera puede ser parcial o totalmente cerrada a cualquier intercambio. Las condiciones de frontera expresan matemáticamente la relación del dominio R con su entorno, y deben obtenerse interpretando las condiciones físicas del área estudiada.

Las condiciones de frontera se clasifican matemáticamente en tres tipos:

1) Condición de frontera tipo Dirichlet:

Esta condición establece que el nivel del agua subterránea sea el especificado a lo largo de la frontera. En este caso ésta se prescribe *a priori* y ya no es una incógnita. Visto de otro modo, si nuestra ecuación de flujo debe ser satisfecha en todos los puntos dentro del dominio R del acuífero, entonces en la frontera de R el nivel del agua h , debe satisfacer la condición:

$$S_1 : h = f \dots\dots\dots (26)$$

Donde S_1 y S_2 (ecuación 27) son partes complementarias de la frontera, las cuales juntas forman la frontera total de la región R .

2) Condición de frontera tipo Neumann:

En este tipo de condición, se prefijan los valores de la derivada normal de la función sobre la frontera. Si esta condición es aplicada a un nodo de una frontera impermeable, el nivel es una incógnita y la ecuación para ese nodo debe reflejar la condición de no flujo en la frontera. Esto quiere decir que debe satisfacer la condición:

$$S_2 : Q_n = -T \frac{\partial h}{\partial n} = 0 \dots\dots\dots (27)$$

Donde: n es la dirección normal externa de la frontera y Q_n es el índice volumétrico de salida [L^3/T].

3) Condición de frontera tipo Cauchy:

Este tipo de condición es una generalización de las condiciones de frontera de Dirichlet y de Neumann, debido a que las lleva implícitas. Esto quiere decir que para las ecuaciones diferenciales parciales, la condición de Cauchy impone valores específicos a la solución de una ecuación diferencial que se toma en una frontera del dominio y en la derivada normal a la frontera. Este tipo de condición también se conoce como condición de frontera mixta porque relaciona las cargas de la frontera con el flujo.

3.2 Geometría y parámetros del modelo de flujo

3.2.1 Geometría del modelo

El área y la topografía a modelar, fueron tomadas de las imágenes digitales que proporciona INEGI en su página de Internet. El área del modelo tiene 40.5 km de largo por 44.5 km de ancho y se delimitó a partir de las coordenadas UTM siguientes: 2,434,250 a 2,474,750 (eje y) y de 281,750 a 326,250 (eje x). En la Figura 3.3 se muestra la topografía del área que abarca el modelo.

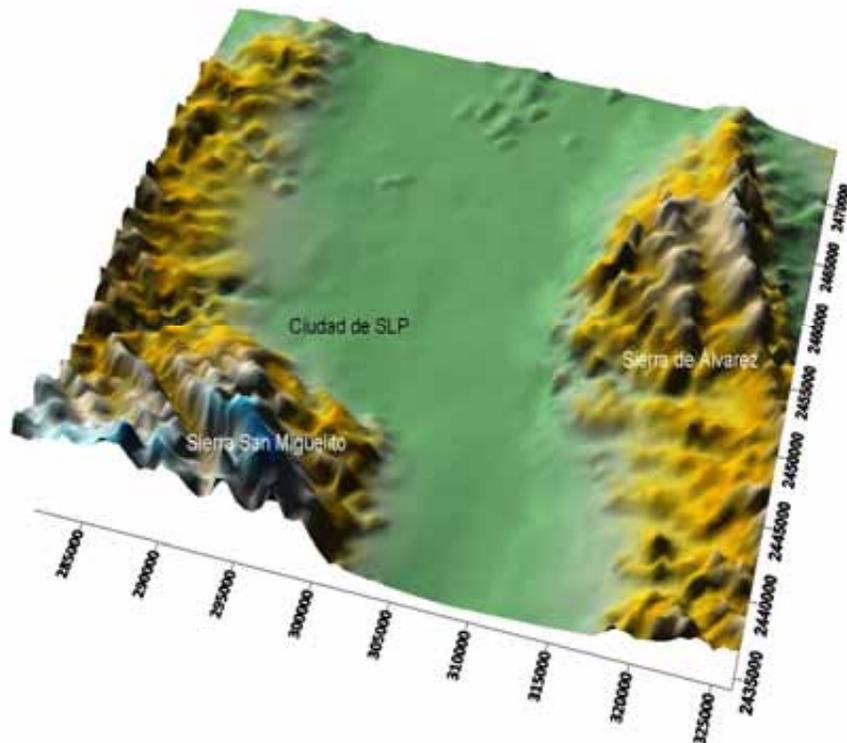


Figura 3.3 Topografía del área modelada.

El área modelada tiene un total de 1,802.3 km² y sobre ésta, se hizo un mallado de 90 columnas y 82 renglones, lo cual da un total de 7,380 celdas por capa. Como el modelo tiene 7 capas, consta entonces de 51,660 celdas en total, donde cada celda mide 500 m de largo por 500 m de ancho aproximadamente. Se tomaron ese número de columnas y renglones (90 y 82 respectivamente) para que el número de celdas no fuera demasiado grande y por lo tanto, el tiempo de procesamiento, tampoco lo fuera.

En la Figura 3.4 se muestra la malla creada sobre el área del modelo donde la zona en color verde, representa las celdas inactivas correspondientes a las sierras que rodean la planicie del valle de San Luis Potosí. Estas celdas inactivas representan las zonas que el

programa no toma en cuenta al momento de correr el modelo y resolver las ecuaciones de flujo. La zona en color blanco representa las celdas activas del modelo.



Figura 3.4 Mallado del área modelada. La línea azul es el contorno de la ciudad de SLP y al sureste la zona industrial.

Las 7 capas que conforman el modelo y sus espesores, se dividieron de acuerdo con la litología de la zona (basada en Cardona, 2007), como se muestra en la Tabla 3.1. El programa asignó colores diferentes a cada capa conforme a su litología como se ilustra en el corte transversal del modelo en la Figura 3.5.

Tabla 3.1 Capas que conforman el modelo de flujo.

Capa	Litología	Espesor (m)	Color
1	(Q) Grava, arena, limo y arcilla	50	Verde oscuro
2	Acuitardo: arcilla y arena fina	50	Verde claro
3	(Q) Grava, arena, limo y arcilla	140	Verde oscuro
4	(Trp, Tap) Toba e ignimbrita	210	Rojo
5	(Tlp) Toba e ignimbrita	340	Morado

Capa	Litología	Espesor (m)	Color
6	(Tc) Arenisca, arcilla y toba	130	Ocre
7	(Ksi) Caliza y arcilla	180	Gris

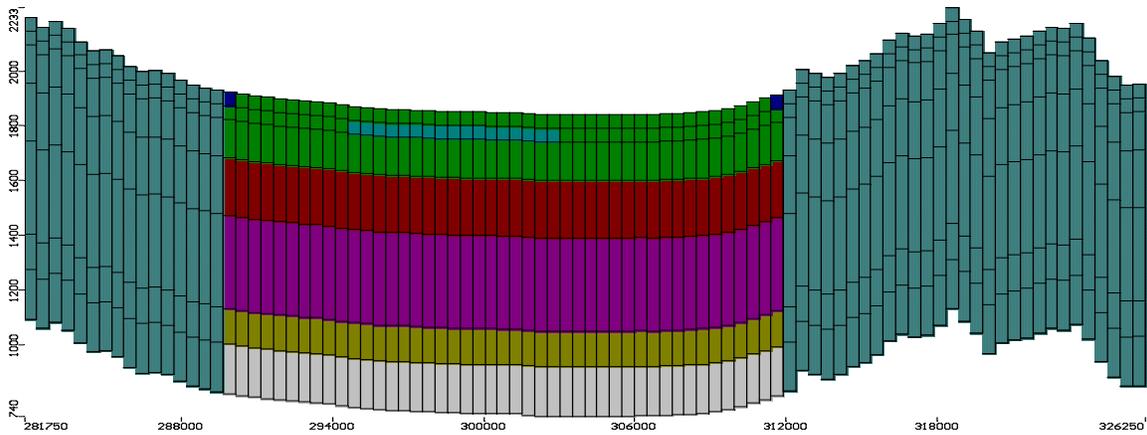


Figura 3.5 Corte transversal del modelo mostrando las capas que lo constituyen.

3.2.2 Parámetros hidrogeológicos

La conductividad hidráulica, el almacenamiento específico, el rendimiento específico y la porosidad total, fueron obtenidos de la literatura (Domenico y Schwartz, 1990), (Sanders, 1998) y (Walton, 1989), y de estudios previos como Sabinfosistem (2005), Flores-Márquez (2006) y Cardona (2007), para cada tipo de material existente en cada capa. Estos valores se ajustaron mediante el proceso de calibración del modelo. En la Tabla 3.2 se muestran los valores de estos parámetros asignados al modelo:

Tabla 3.2 Parámetros hidrogeológicos por capa del modelo.

Capa	(K_x) Conductividad hidráulica (m/d)	(K_z) Conductividad hidráulica (m/d)	(S_s) Almacenamiento específico (m^{-1})	(S_y) Rendimiento específico	(Tot-Por) Porosidad total (%)
1	3	3	2×10^{-5}	0.085	0.278
2	0.154	0.154	8×10^{-5}	0.113	0.33
3	3	3	2×10^{-5}	0.085	0.278
4	6.328	12	7×10^{-5}	0.107	0.217
5	0.68	6	9×10^{-5}	0.136	0.193
6	0.362	0.362	6×10^{-5}	0.113	0.218
7	1×10^{-5}	1×10^{-5}	7×10^{-5}	0.049	0.278

3.2.3 Condiciones de frontera

Las 3 fronteras asignadas al modelo (Este, Oeste y Norte), son artificiales pero corresponden a las zonas de recarga naturales del acuífero de acuerdo a su funcionamiento hidrogeológico. Las fronteras Este y Oeste se asignaron a lo largo de las dos sierras (San Miguelito y Álvarez) inmediatamente después de las celdas inactivas, con el fin de representar la recarga de ambas sierras. La frontera Norte se asignó en las celdas activas de todo el primer renglón de la malla del modelo, representando el intercambio de flujo de agua que existe entre el final del área que abarca el modelo y la parte del acuífero que continúa hacia el norte. No se asignó ninguna frontera al sur del modelo debido a que según el IGF (1988) y Cardona (2007), existe un cierre estructural entre las cuencas subterráneas de Villa de Reyes y SLP a la altura del poblado La Pila, localizado al sur del modelo (ver Figura 1.2).

La conductancia asignada a cada frontera corresponde a la conductividad hidráulica del material en esa zona y al área que ocupa. Las 3 fronteras son de tipo Neumann con lo que se asume un flujo constante perpendicular a las paredes del área modelada.

Con respecto a la recarga del modelo, se asignó un valor de 1×10^{-5} m/d ($3.08 \text{ Hm}^3/\text{año}$) a un área de 844 km^2 correspondientes al área total del valle. Este valor fue ajustado en el proceso de calibración y es menor al valor presentado en el balance hidrogeológico ($22.38 \text{ Hm}^3/\text{año}$). Esta diferencia de valores se debe a que lo obtenido en el balance, es un cálculo aislado, y el valor asignado en el modelo es más representativo, porque es calculado tomando en cuenta todo el conjunto de valores y variables que conforman el modelo. Además, el valor de recarga asignado es consistente con valores de recarga por precipitación, obtenidos en estudios como los de CNA (2002) y Tecnología Assul (2005).

Para la evapotranspiración se asignó un valor de 0.918×10^{-3} m/d y una profundidad de extinción de 5 m ambos ajustados en el proceso de calibración. El valor de evapotranspiración es el mismo que el calculado en el balance hidrológico. La profundidad de extinción se definió con base en los estudios de González-Medrano (2003) y SEMARNAT (2009).

3.2.4 Pozos de extracción

En el acuífero de San Luis Potosí se tienen registrados 1273 pozos (según REPDA, 2003), dentro de los municipios de Cerro de San Pedro, Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez y Zaragoza; sin que se sepa con precisión su ubicación, profundidad, altura de brocal, y si están en funcionamiento o no. De estos 1273 aprovechamientos registrados, 785 pozos explotan el acuífero somero y 488 explotan el acuífero profundo (Sabinfosistem, 2005), sin embargo, sólo se tiene la ubicación, profundidad y altura de brocal de 110 pozos (entre someros y profundos) dentro del área correspondiente al modelo.

De estos 110 pozos, sólo 48 tenían mediciones potenciométricas históricas suficientes, por lo que con base en este criterio, se les eligió para ser asignados al modelo. Estos 48 pozos extraen el volumen total concesionado a los aprovechamientos registrados en el REPDA (Registro Público de Derechos de Agua) del 2003, que se encuentran dentro de los municipios arriba mencionados y dentro del área del modelo. Cada uno de estos pozos se situó aproximadamente en su ubicación real y mediante el proceso de calibración, se ajustó el volumen de extracción total.

3.3 Modelo de flujo en estado estacionario

Es indispensable llevar a cabo primero una simulación en estado estacionario para obtener la condición inicial del acuífero sin extracción de agua, y posteriormente hacer una simulación en estado transitorio. Por lo tanto, se efectuó una simulación en estado estacionario para un tiempo de 3650 días. Los valores de los parámetros hidrogeológicos y las condiciones de frontera con los que se realizó esta simulación y que fueron introducidos en el programa Visual Modflow, son los mismos utilizados para la simulación en estado transitorio (ver capítulo 3.2), pero sin pozos de extracción. La configuración del estado inicial del acuífero se muestra en la Figura 3.6.

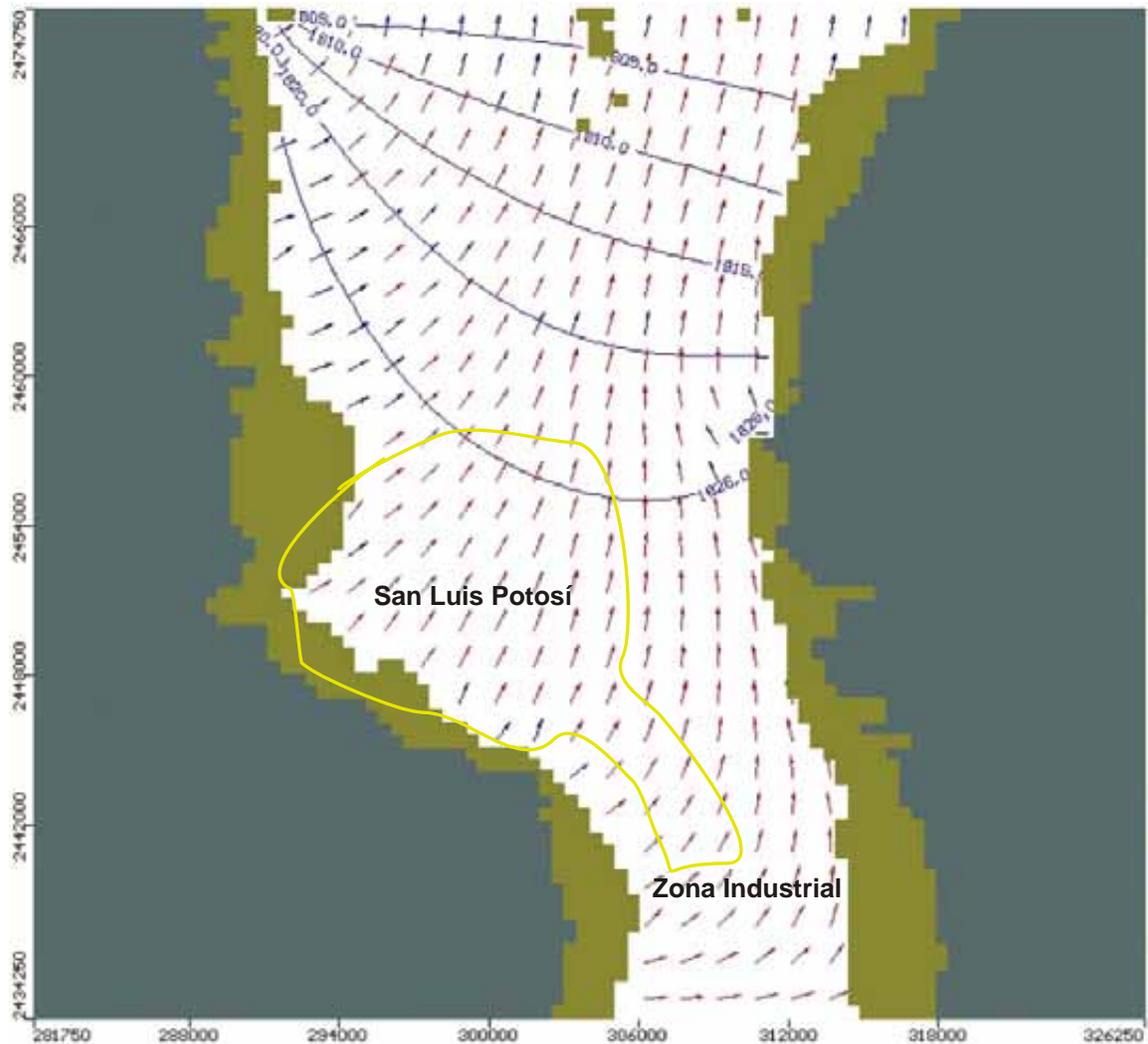


Figura 3.6 Modelo de flujo en estado estacionario. La línea amarilla es el contorno de la ciudad de SLP y al sureste la zona industrial.

La zona en color gris, muestra las zonas con celdas inactivas (no participan en el modelo de flujo), y las zonas en color ocre muestran celdas que representan zonas donde no

existe flujo de agua a través de ellas. Las curvas equipotenciales muestran la carga hidráulica del acuífero en su condición inicial sin extracción de agua. Los vectores indican la dirección del flujo subterráneo, que en este caso, ocurre de sur a norte y desde todo el flanco izquierdo hacia el norte; esto es debido a: 1) que la topografía se encuentra más elevada en el sur y a lo largo del flanco izquierdo, y desciende hacia el norte, 2) que la mayor parte de la recarga proviene de la Sierra de San Miguelito (parte izquierda), por lo que puede observarse como los vectores de dirección salen del flanco izquierdo y se dirigen hacia el norte.

Con base en los estudios de Cardona (2007), se considera que el modelo en estado estacionario es correcto al reproducir esta red de flujo subterránea local.

3.4 Modelo de flujo en estado transitorio

El objetivo de una simulación transitoria es mostrar la evolución de la carga hidráulica del acuífero a través de tiempos sucesivos, bajo un régimen de extracción de agua subterránea, dada una distribución inicial de carga, condiciones de frontera y parámetros hidráulicos. Los resultados del modelo de flujo en estado estacionario se introdujeron en el modelo en estado transitorio.

En el acuífero de San Luis Potosí se tienen registrados más de 1273 pozos, según el REPDA del 2003, sin embargo sólo se tiene información de 110 pozos que se encuentran dentro del área del modelo, de los cuales, sólo 48 fueron asignados al modelo transitorio por lo ya explicado en la sección 3.2.4. En las zonas en las que existe un mayor número de pozos, corresponde un mayor número de pozos en el modelo. También se asignaron 29 pozos de observación que servirán para realizar la calibración del modelo.

La validez del modelo con un menor número de pozos pero con un gasto de extracción equivalente al total de pozos existentes en el acuífero, ha sido probada en (Flores-Márquez et al., 2006). En la Figura 3.7 se muestra la localización de los pozos de extracción y los de observación.

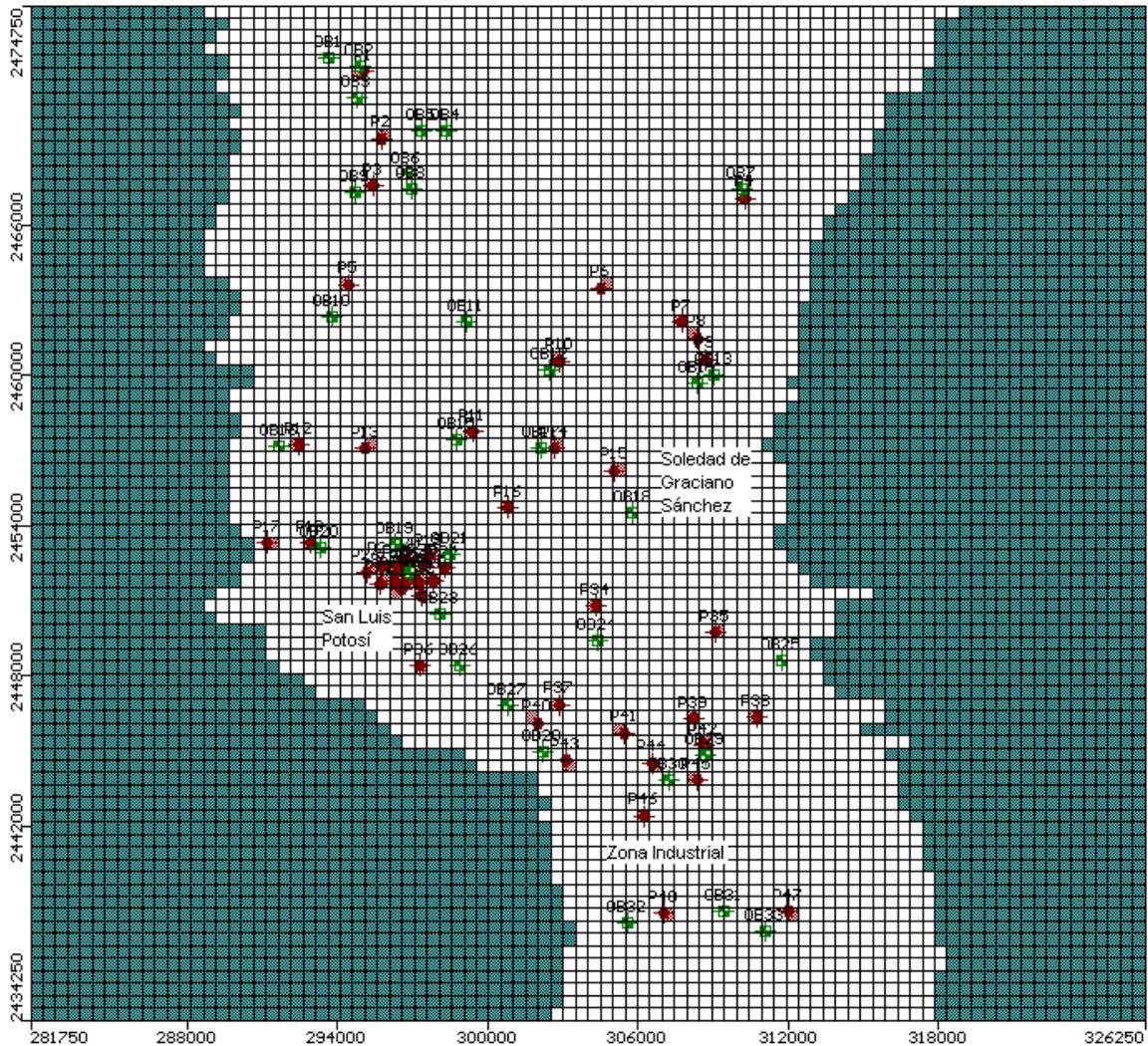


Figura 3.7 Localización de los pozos de extracción y de observación del modelo de flujo.

Los puntos rojos indican los pozos de extracción y los puntos verdes los de observación. Encima de cada pozo se encuentra su nombre asignado en el modelo.

3.4.1 Modelo de flujo transitorio para el año 1995

Se ejecutó el modelo para el año 1995, año en el que se tiene un mayor registro de los niveles potenciométricos (ver Figura 2.8 del capítulo 2 la cual muestra la superficie potenciométrica en 1995, según mediciones del nivel estático de los pozos para ese año).

Cabe mencionar que el año en el cual se inicia la simulación del acuífero en estado transitorio es 1995 y que las superficies potenciométricas de niveles estáticos para los años 1995 y 2005, difieren de las superficies potenciométricas generadas por el modelo para estos mismos años. Esto se debe a que al realizar la recopilación de los niveles estáticos medidos desde el año 1972 (ver capítulo 2 de potenciometría histórica), las

mediciones no son del todo congruentes, es decir, los valores del nivel estático en una misma zona tienen valores muy diferentes y no hay una continuidad en la toma de mediciones, ya que durante algunos años hay datos para ciertos pozos y durante otros años, hay datos de otros pozos distintos. Otro problema con la información, es que es muy difícil conocer el verdadero gasto de extracción de los pozos, y esto repercute al momento de asignar la extracción de los pozos en el modelo, ya que es necesario establecer una extracción mayor en todos los pozos, para que el modelo reproduzca aproximadamente, las superficies potenciométricas generadas con los datos de campo.

La Figura 3.8 muestra la superficie potenciométrica generada por el modelo correspondiente al año de 1995.

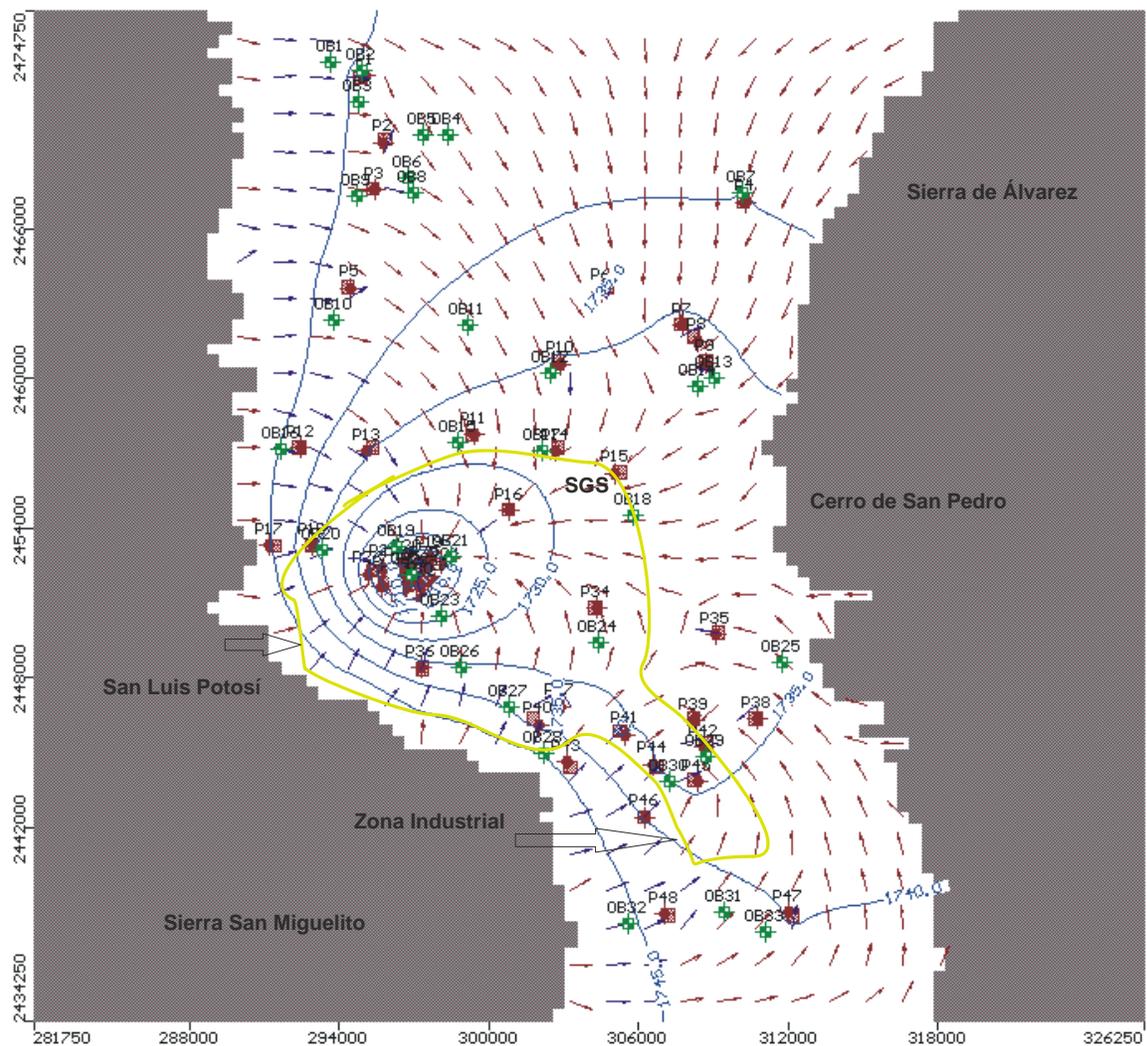


Figura 3.8 Configuración de la superficie potenciométrica generada por el modelo para el año 1995. La línea amarilla es el contorno de la ciudad de SLP, la zona industrial y SGS.

En la figura 3.8 se observa que el mayor abatimiento para el año de 1995, lo registra la equipotencial de 1710 msnm que se localiza en la ciudad de San Luis Potosí, y alrededor de esta equipotencial hay tres equipotenciales concéntricas indicando que el mayor volumen de extracción se obtiene de esta zona y por consiguiente genera también el mayor abatimiento.

El segundo lugar en abatimiento lo ocupan la zona industrial y la zona de SGS (registrado por la equipotencial con valor de 1735 msnm), resultado que es de esperarse ya que la zona industrial tiene una gran densidad de pozos por la demanda de agua que requiere, y en SGS además del agua requerida para la población, es una zona agrícola en donde existen varios pozos y norias que extraen agua para este fin.

El menor abatimiento lo registra la equipotencial con valor de 1745 msnm ubicada a todo lo largo del lado izquierdo del modelo, correspondiente a la sierra de San Miguelito. Esto se debe a la menor densidad de pozos que hay en esa área en comparación con los que hay en la ciudad o en la zona industrial, pero sobretodo porque es el área de mayor recarga de toda la zona; incluso los vectores, a lo largo de todo el lado izquierdo del modelo, nos indican que esta zona es en donde el modelo tiene asignada la mayor parte de la recarga. Esto último corresponde con la realidad pues la mayor recarga del acuífero de San Luis Potosí, proviene de la sierra de San Miguelito y en menor medida, proviene del lado Este que corresponde a la sierra de Álvarez y al municipio de Cerro de San Pedro.

3.4.2 Modelo de flujo transitorio para el año 2005

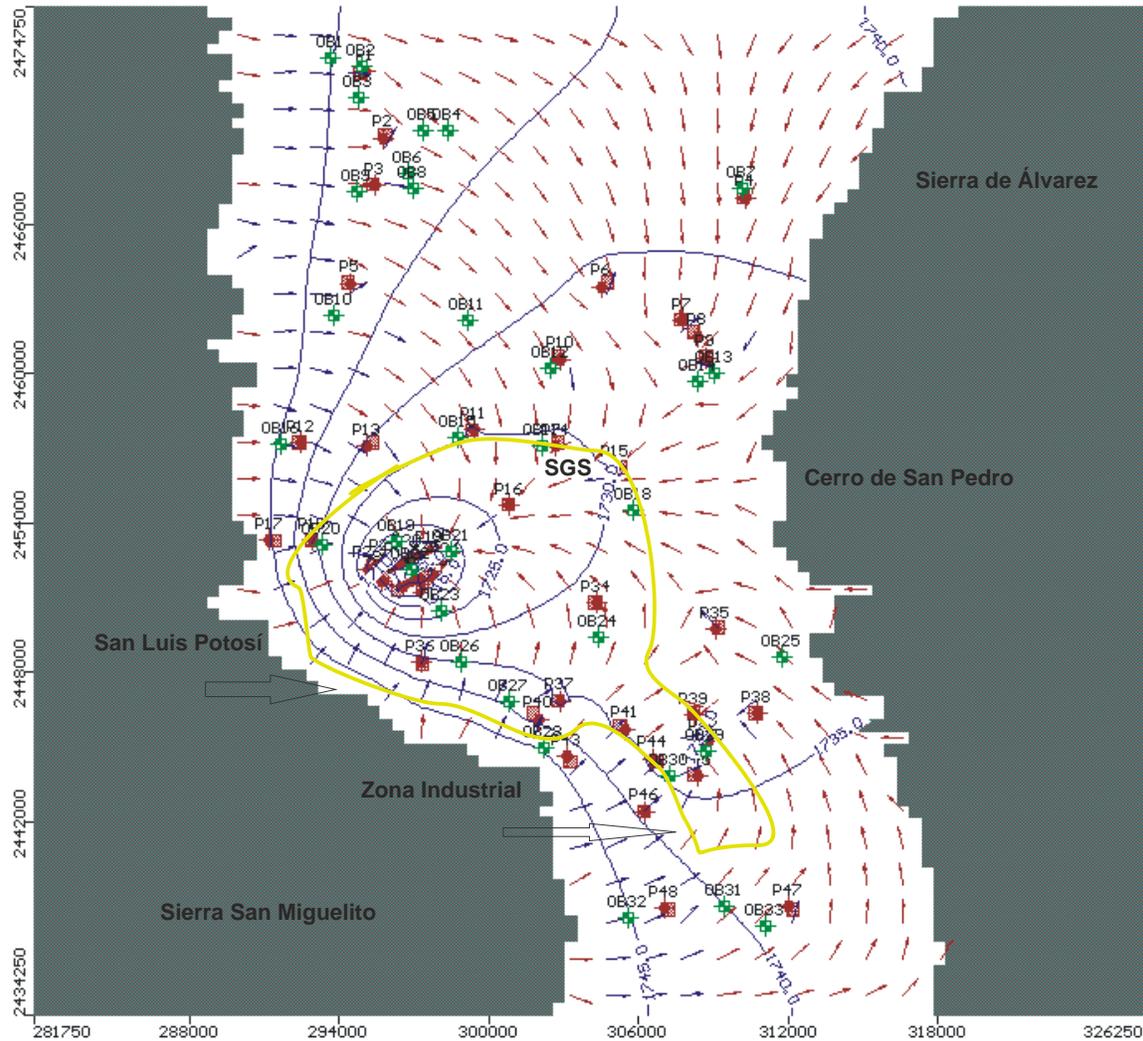


Figura 3.9 Configuración de la superficie potenciométrica generada por el modelo para el año 2005. La línea amarilla es el contorno de la ciudad de SLP, la zona industrial y SGS.

En la Figura 3.9 se observa que el mayor abatimiento (equipotencial con valor de 1705 msnm) para el año 2005, sigue estando en la zona de la ciudad de SLP, y en comparación con el año 1995, tuvo un aumento de 5 metros. La equipotencial de 1730 dejó su forma concéntrica para abarcar un área mayor con dirección hacia SGS y Cerro de San Pedro. La equipotencial de 1735 también abarca un área mayor que en 1995, y la zona de menor abatimiento continúa siendo a lo largo del flanco derecho del modelo y no presenta cambio en su valor.

misma extracción. Esta figura muestra que el mayor abatimiento (ver equipotencial con valor de 1705 msnm) sigue dándose en la ciudad de SLP, pero que no tuvo un incremento con respecto al año 2005. Sin embargo, las equipotenciales de 1730 y 1735, siguen aumentando su área de forma considerable, lo cual sólo creará en un futuro cercano, la necesidad de perforar pozos más profundos en áreas cada vez mayores. La zona de menor abatimiento (donde se encuentra la equipotencial con valor de 1745) no presenta cambios.

3.5 Calibración del modelo para los años 1995 y 2005

La calibración es un proceso por el cual los parámetros hidrogeológicos introducidos en el modelo se ajustan hasta lograr que las variables dependientes calculadas por el modelo, sean lo más aproximadas a las variables dependientes medidas en campo.

La expresión estadística que utiliza el programa Visual Modflow para evaluar la diferencia entre los resultados teóricos y los experimentales es:

$$RMS = \left[\frac{1}{N} = \sum_{i=1}^N (cal_i - obs_i)^2 \right]^{1/2}$$

Donde:

RMS = Raíz cuadrada media de los errores residuales.

N = Número total de observaciones.

cal_i = Valores calculados de las variables dependientes del modelo.

obs_i = Valores observados en campo de las variables dependientes.

La calibración del modelo del flujo transitorio se realizó con 29 pozos de observación (Figura 3.7) repartidos en toda el área para los años de 1995 y 2005. A continuación se presentan las figuras 3.11 y 3.12 correspondientes a las gráficas de calibración para los años mencionados.

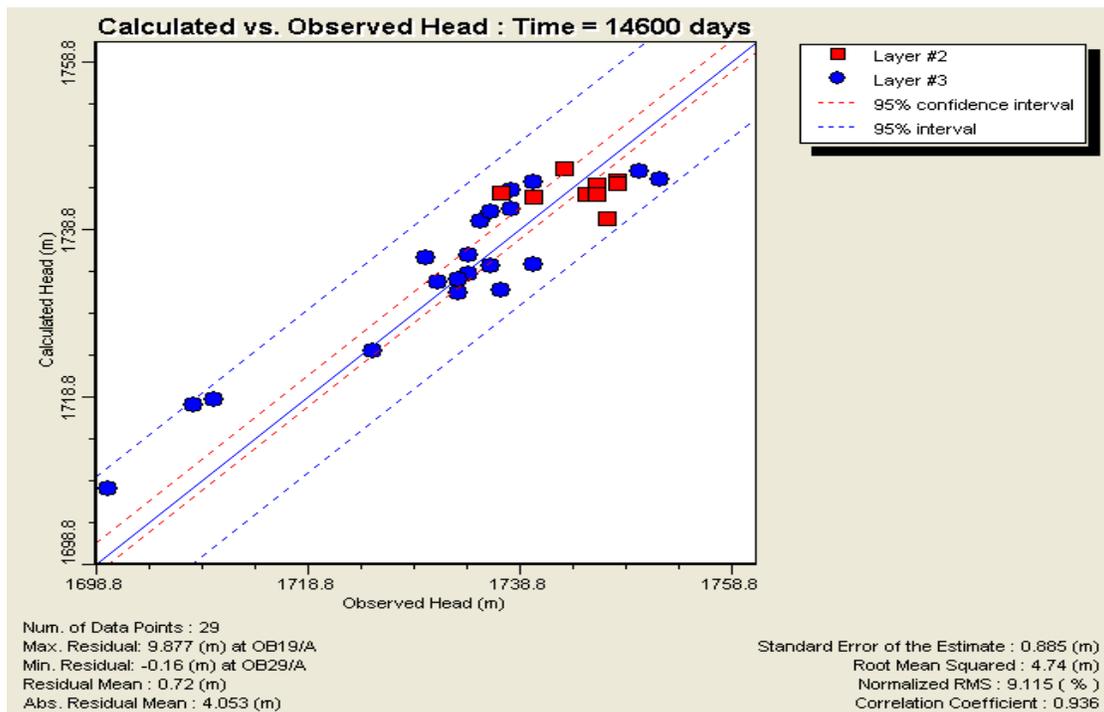


Figura 3.11 Relación entre la carga hidráulica observada y la calculada por el modelo para el año 1995.

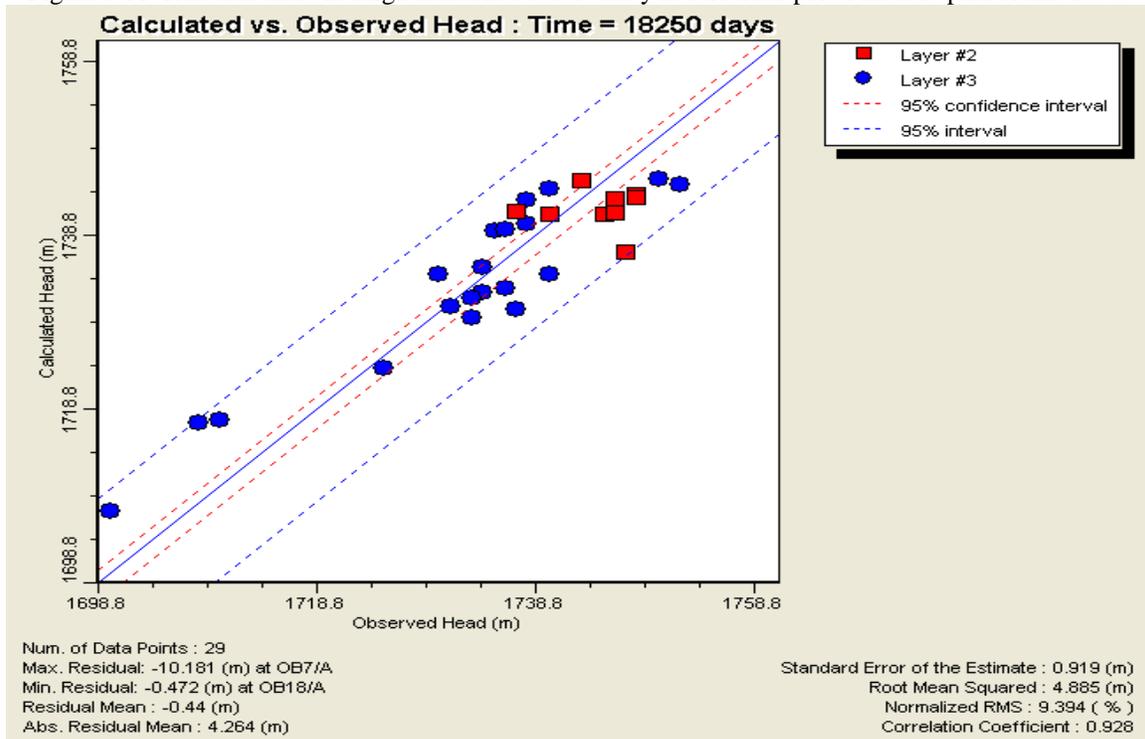


Figura 3.12 Relación entre la carga hidráulica observada y la calculada por el modelo para el año 2005.

Las gráficas de calibración anteriores muestran que el error aproximado del modelo transitorio, es de un 9%, lo cual es aceptable ya que se trata de un acuífero en explotación intensiva constante.

3.6 Escenarios de explotación del acuífero

Se simularon dos escenarios de explotación del acuífero de SLP. A la primer simulación se le dio el nombre de modelos predictivos, los cuales tienen por objetivo pronosticar el comportamiento del acuífero variando el valor del caudal de extracción en función de cuatro posibles tasas de crecimiento de la población hasta el año 2015.

A la segunda simulación se le nombró modelos de remediación, y tiene por objetivo pronosticar el comportamiento del acuífero hasta el año 2015 bajo dos medidas de remediación:

- 1) disminuyendo el caudal de extracción
- 2) reubicando pozos de extracción

En esta sección se analizan los resultados obtenidos en las seis simulaciones mencionadas arriba.

3.6.1 Modelos predictivos

Para realizar la simulación de estos modelos, primeramente se determinó el número probable de habitantes que habrá en el año 2015 aplicando cuatro tasas de crecimiento poblacional anual distintas que son 1.0, 0.8, 0.6 y 0.4%. Se escogieron estas cuatro tasas de crecimiento porque, según INEGI (2005), la tasa de crecimiento poblacional anual que hubo en todo el estado de San Luis Potosí entre el censo del año 2000 y el del 2005, fue de 0.8% (ver capítulo 1 en población, vivienda y servicios), por lo tanto se escogió una tasa mayor a ese porcentaje (1.0%), una tasa igual (0.8%), y dos tasas menores (0.6 y 0.4%) con la finalidad de tener un rango de tasas de crecimiento que sean factibles para el 2015. Hay que mencionar que estas cuatro tasas de crecimiento se aplicaron a la población que había en el 2005 en los cuatro municipios que abarca (o que abarca en parte) el área del modelo, los cuales son: Cerro de San Pedro, Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez. La Tabla 3.3 muestra la población existente en el 2005 en los cuatro municipios mencionados, y la población que habrá en el 2015 para cada tasa de crecimiento.

Además del crecimiento de la población, también hay un aumento en el número de industrias en la zona que abarca el modelo, sobretodo en la zona industrial al sureste de la ciudad de SLP. Sin embargo, según el Organismo operador del agua de SLP (INTERAPAS, 2005), el volumen de agua que se destina para uso industrial, es aproximadamente de 9.8 Hm³/año, lo cual representa sólo el 7.8% del volumen total de agua que se extrae del acuífero, el mayor porcentaje (67.2%) se destina al uso público urbano. Por esta razón, no se asignó un volumen extra de extracción debido al crecimiento industrial, en los modelos predictivos.

Tabla 3.3 Total de población en 2005 y en 2015 en los municipios de Cerro de San Pedro, Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí y SGS por tasa de crecimiento poblacional anual.

Población en 2005 (hab)	Población para 2015 (hab) con tasa del 1.0%	Población para 2015 (hab) con tasa del 0.8%	Población para 2015 (hab) con tasa del 0.6%	Población para 2015 (hab) con tasa del 0.4%
1,011,520	1,213,824	1,173,363	1,132,902	1,092,442

Con base en el número de habitantes para las cuatro tasas en el año 2015 y asignando un consumo de agua de 226.95 litros por día por habitante (Tecnología ASSUL, 2005), se obtuvo el volumen adicional de extracción que deberá bombear cada pozo para satisfacer las nuevas demandas de agua en el 2015. La Tabla 3.4 muestra la cantidad adicional de m³/día que extraerá cada uno de los 48 pozos, dependiendo de cada tasa de crecimiento poblacional, para satisfacer la demanda de agua por el aumento de habitantes.

Tabla 3.4 Extracción adicional por pozo por cada tasa de crecimiento poblacional.

Tasa de crecimiento poblacional	Extracción adicional por pozo (m³/día)
0.4%	383
0.6%	574
0.8%	765
1.0%	957

Una vez asignado el volumen extra de extracción en cada uno de los 48 pozos, se simuló los cuatro modelos predictivos, cada uno con una de las cuatro tasas de crecimiento. La Figura 3.13 muestra las equipotenciales generadas por el modelo para una tasa de crecimiento poblacional del 0.4% anual.

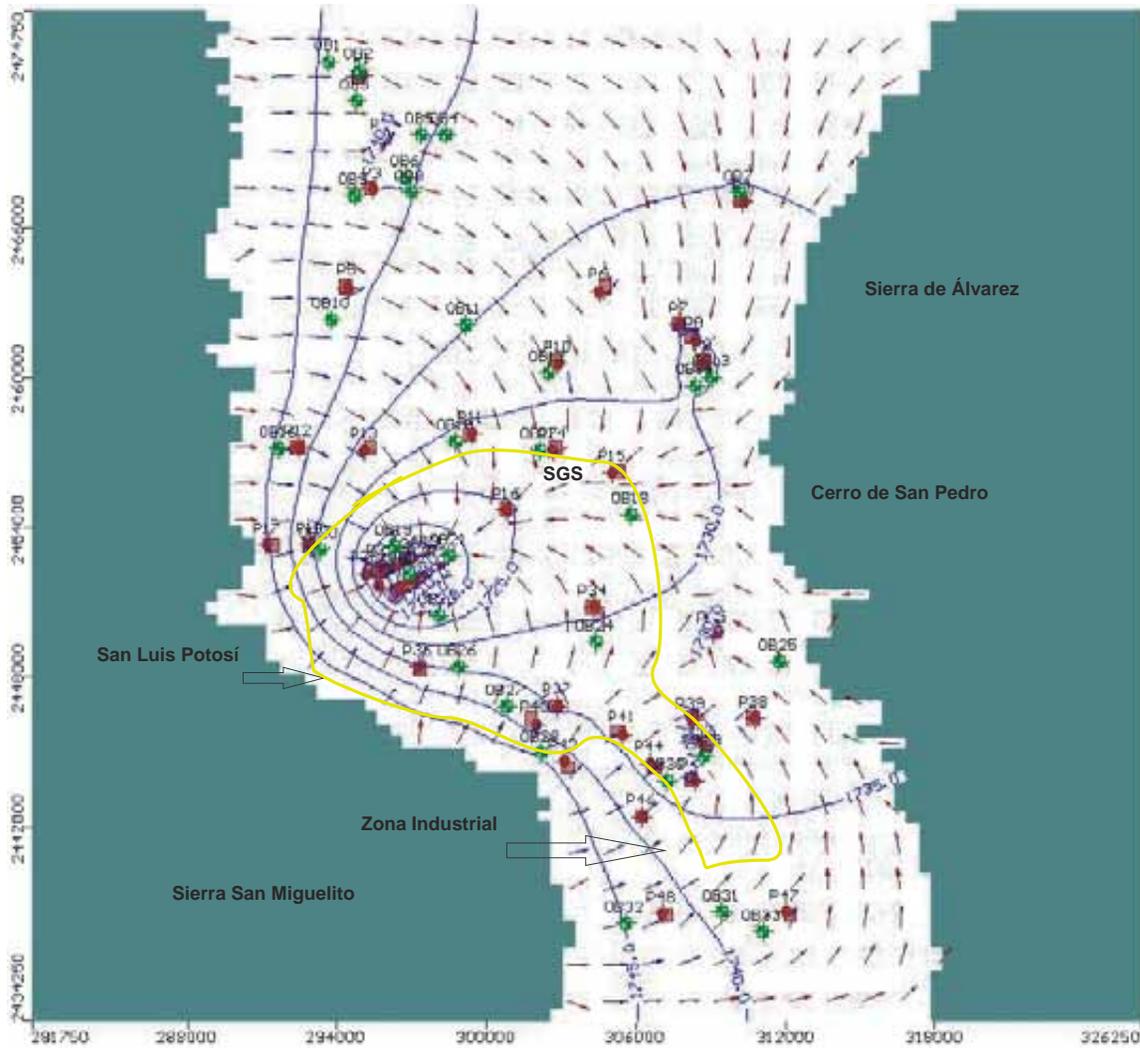


Figura 3.13 Superficie potenciométrica para el año 2015 con un volumen de extracción extra por pozo de 383 m³/día y una tasa de crecimiento poblacional del 0.4% anual. La línea amarilla igual que en figura 3.8.

Comparando la Figura 3.13 con la Figura 3.10 correspondiente también al año 2015, se observa que el mayor abatimiento es de igual magnitud en ambas figuras (equipotencial con valor de 1705 msnm) y se registra en la ciudad de SLP, sin embargo, aunque en el modelo de la Figura 3.13, se aplicó la menor tasa de crecimiento (0.4%), la equipotencial de 1730 aumenta su área hacia el lado Este, englobando los pozos 7, 8 y 9. El resto de las equipotenciales no sufren cambios.

La Figura 3.14 muestra las equipotenciales generadas por el modelo para una tasa de crecimiento poblacional del 0.6% anual.

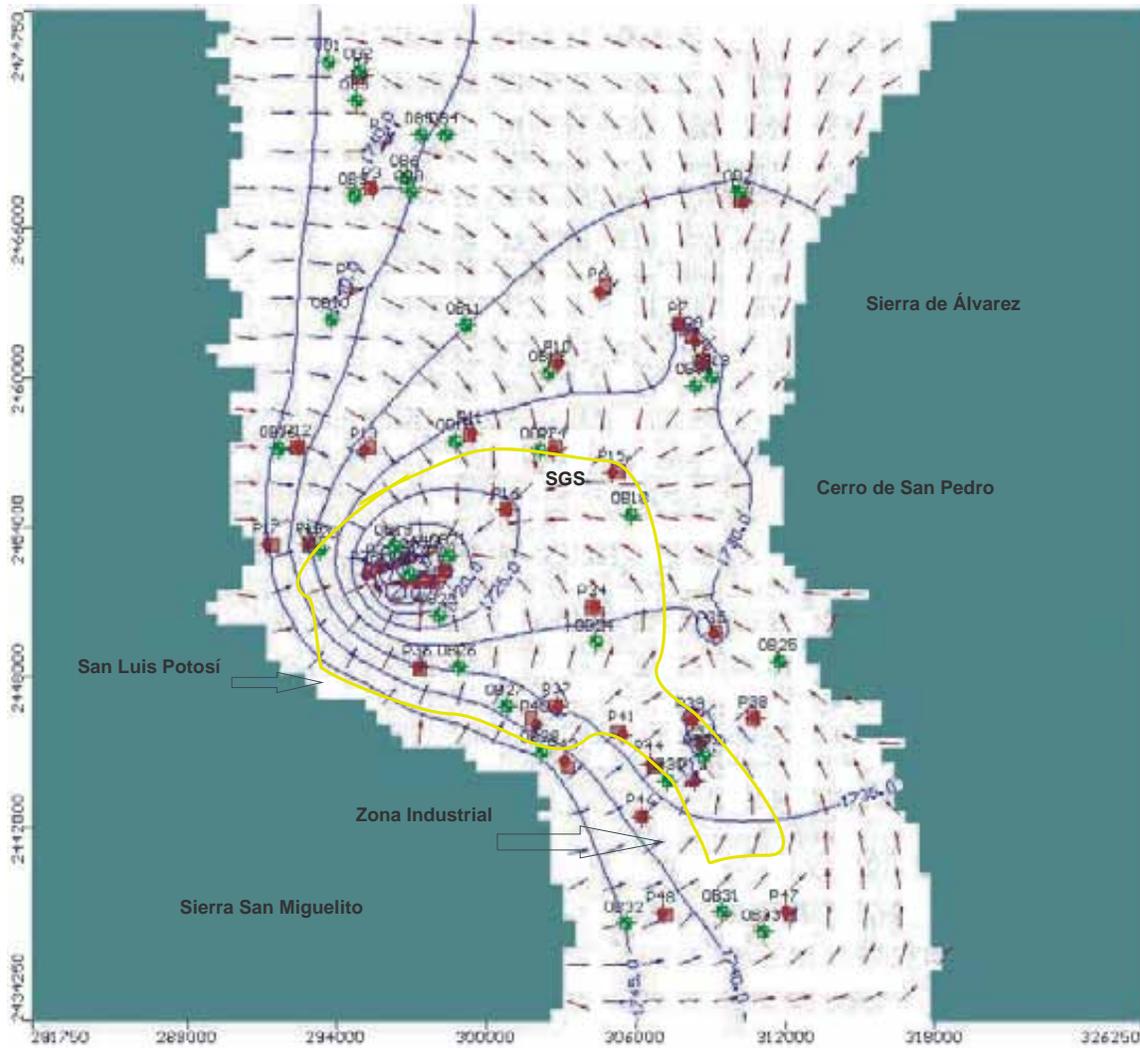


Figura 3.14 Superficie potenciométrica para el año 2015 con un volumen de extracción extra por pozo de $574 \text{ m}^3/\text{día}$ y una tasa de crecimiento poblacional del 0.6% anual. La línea amarilla igual que en figura 3.8.

Comparando las Figuras 3.10, 3.13 y 3.14, se observa que la equipotencial que tiene un cambio significativo es la que tiene un valor de 1730 m.s.n.m., pues en la Figura 3.14 esta equipotencial sigue aumentando su área y engloba ahora también al pozo 35 y continúa expandiéndose en dirección a Cerro de San Pedro.

La Figura 3.15 muestra las equipotenciales generadas por el modelo para una tasa de crecimiento poblacional del 0.8% anual.

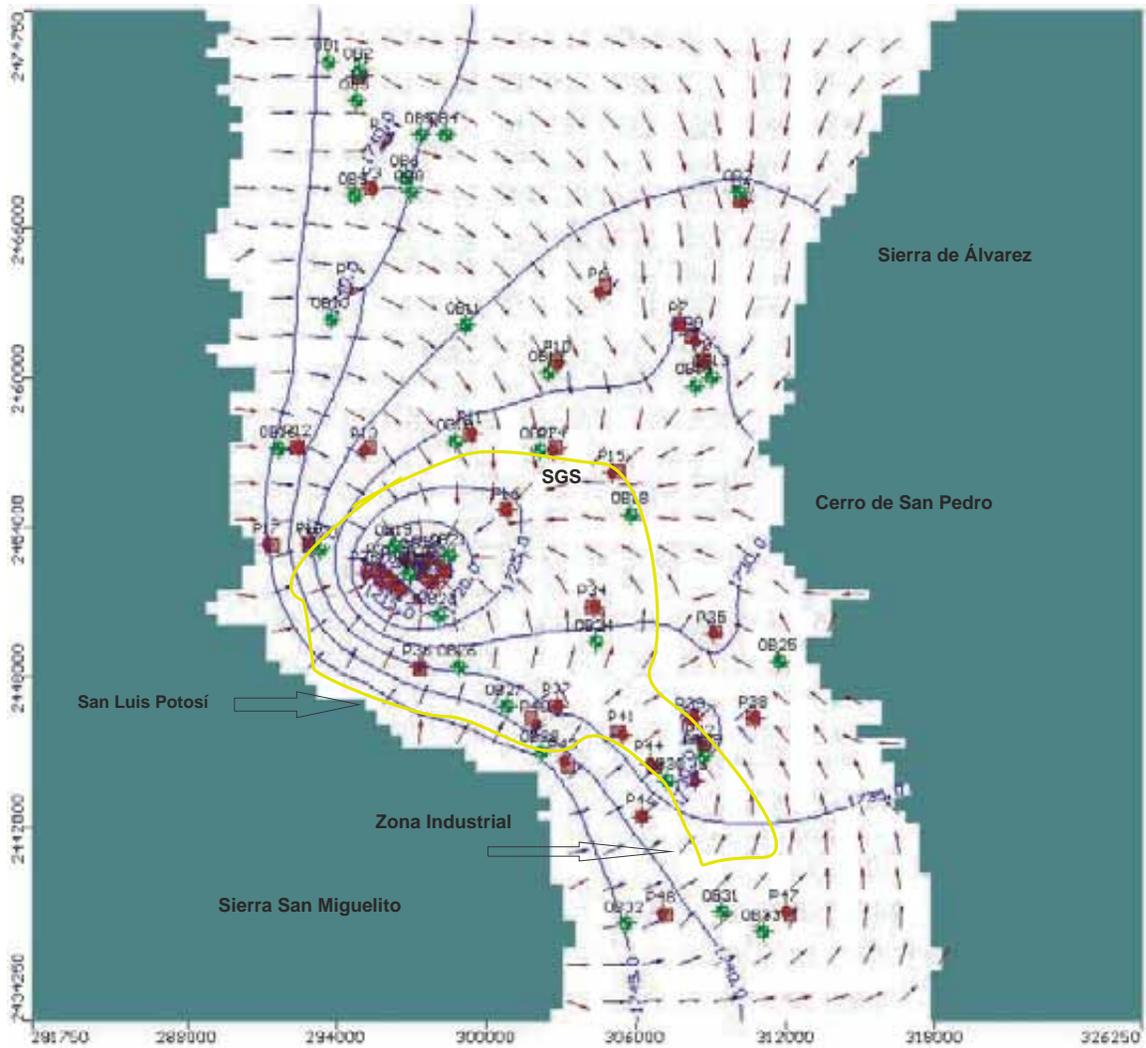


Figura 3.15 Superficie potenciométrica para el año 2015 con un volumen de extracción extra por pozo de $765 \text{ m}^3/\text{día}$ y una tasa de crecimiento poblacional del 0.8% anual. La línea amarilla es el contorno de la ciudad de SLP y la zona industrial. SGS: Soledad de Graciano Sánchez.

Observando la Figura 3.15 la cual ilustra la simulación a la que se le aplicó una tasa de crecimiento poblacional igual a la registrada en el censo del 2005 (0.8%), puede verse que el abatimiento del nivel del agua aumenta lo cual se manifiesta en que la equipotencial con un valor de 1730 m.s.n.m., encierra un área más grande y ya ha alcanzado el municipio de Cerro de San Pedro. También es más notoria ahora la equipotencial cerrada de 1730 m.s.n.m., que abarca los pozos 39 y 42 localizados en la zona industrial.

La Figura 3.16 muestra las equipotenciales generadas por el modelo para una tasa de crecimiento poblacional del 1.0% anual.

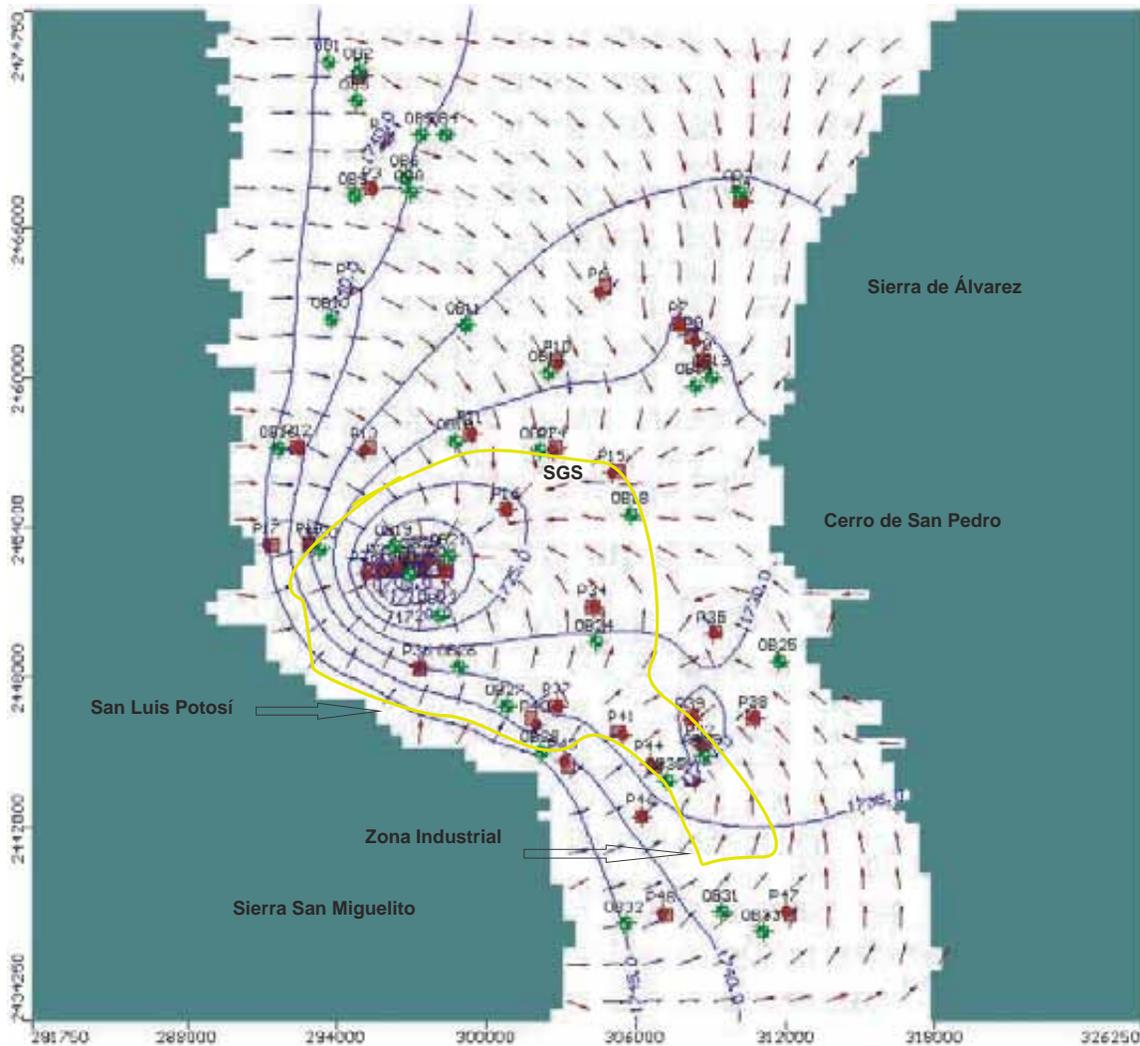


Figura 3.16 Superficie potenciométrica para el año 2015 con un volumen de extracción extra por pozo de $957 \text{ m}^3/\text{día}$ y una tasa de crecimiento poblacional del 1.0 % anual. La línea amarilla igual que en figura 3.8.

La Figura 3.16 muestra la superficie potenciométrica correspondiente a la mayor tasa de crecimiento elegida (1.0%) para simular los modelos de predicción. Puede observarse en esta figura que la equipotencial de 1730, aunque ha aumentado su área con respecto a la Figura 3.15, la diferencia en expansión es la menor registrada en los cuatro modelos de predicción. Sin embargo, la equipotencial de 1730 que rodea a los pozos 39 y 42 ubicados en la zona industrial, casi duplicó el área que abarca.

Analizando los resultados que nos muestran los cuatro modelos de predicción, puede verse que a pesar de que las tasas de crecimiento poblacional asignadas a los modelos, aunque factibles, son conservadoras, la equipotencial de 1730 siempre aumenta su área de forma significativa, abarcando dentro de ella a más pozos cada vez. Además los vectores de dirección de flujo que se encuentran dentro de la equipotencial mencionada y que tienen dirección contraria a Cerro de San Pedro, muestran que con cada aumento en el volumen de extracción, los vectores de flujo van formando una franja cada vez más

ancha, en dirección de la zona de mayor abatimiento dentro de la ciudad. Esto indica que la extracción en la ciudad es tal, que está provocando que el flujo de agua proveniente de Cerro de San Pedro, siga irremediamente una línea recta en dirección a la ciudad, pues debido al gradiente, el agua va a fluir hacia donde haya un mayor desnivel.

3.6.2 Modelos de remediación

Se simularon dos modelos de remediación para el año 2015 con la finalidad de proporcionar escenarios alternativos de explotación del acuífero. Al primer modelo se le nombró de disminución, ya que se redujo un 30% (78,120 m³/día) la extracción de los pozos en la zona de mayor abatimiento de la ciudad (pozos 19 al 33). Al segundo modelo se le nombró de reubicación, pues se le asignaron 4 pozos nuevos localizados a un costado de la sierra de San Miguelito, los cuales extraen el mismo volumen que se redujo en el modelo de disminución.

3.6.2.1 Disminución de la extracción

Este modelo de disminución de la extracción tiene el propósito de mostrar el efecto que tendría sobre el acuífero, una reducción en el bombeo de los pozos ubicados en la zona de mayor densidad de los mismos, dentro de la ciudad de SLP.

Para esta simulación de remediación, se tomó como base el modelo con la tasa de crecimiento poblacional del 1.0% anual y se redujo la extracción de los pozos 19 al 33 en un 30%, dejando el volumen de extracción del resto de los pozos sin cambios. Se utilizó a propósito el modelo con la tasa de crecimiento más alta entre las elegidas para los modelos de predicción, con el fin de pronosticar la respuesta del acuífero para un mayor volumen de extracción representativo para un incremento de la población mayor al registrado en el año 2005.

La Figura 3.17 muestra la superficie potenciométrica generada por el modelo para el año 2015 con una disminución del 30% de la extracción de los pozos 19 al 33.

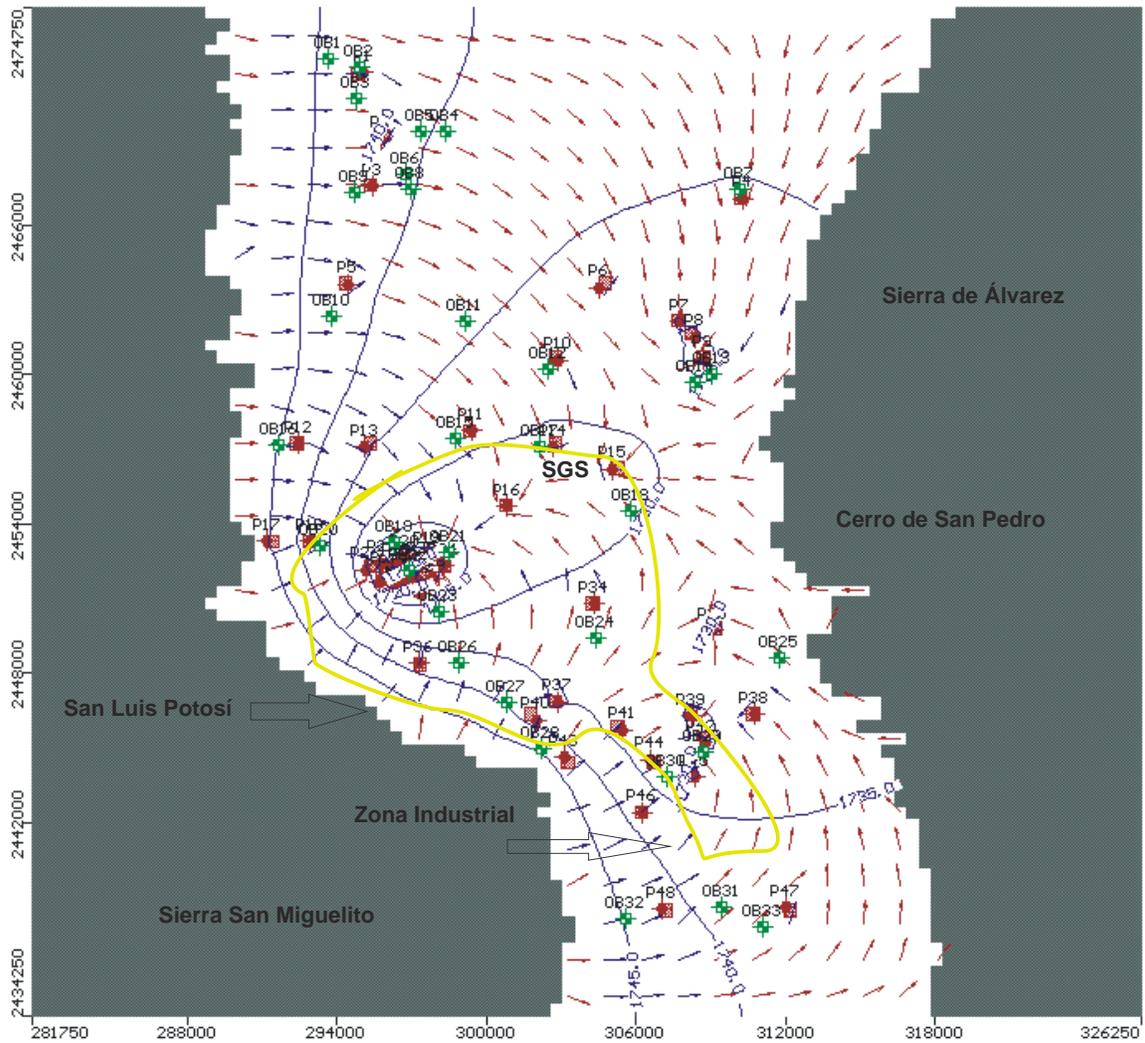


Figura 3.17 Superficie potenciométrica para el año 2015 con un 30% menos de volumen de extracción en los pozos 19 al 33 y una tasa de crecimiento poblacional del 1.0 % anual. La línea amarilla igual que en figura 3.8.

De la Figura 3.17 puede observarse que al haber disminuido la extracción en un 30% en los pozos 19 al 33, la equipotencial de 1730 reduce su área a más de la mitad al compararla con la Figura 3.16 correspondiente al modelo de predicción con la tasa de crecimiento del 1.0%. La equipotencial de 1725 también reduce su área aproximadamente a la mitad. Incluso las áreas de las dos equipotenciales mencionadas, son menores comparadas con la Figura 3.10, en la cual aun no se había asignado el crecimiento poblacional y por consiguiente no se había asignado una extracción mayor. También se presenta una reducción del área comprendida por la equipotencial cerrada de 1730 que engloba a los pozos 39 y 42.

Por otro lado, la zona de mayor abatimiento (equipotencial con valor de 1705 msnm) que se registraba en el modelo con tasa de crecimiento del 1.0% (de hecho este mismo abatimiento se registró en todos los modelos de predicción), muestra una recuperación de

10 metros, pues ahora esa misma equipotencial tiene un valor de 1715 msnm. Esta recuperación de 10 metros en el abatimiento es aun más significativa si se toma en cuenta que el tiempo transcurrido para que se diera este cambio, es de sólo 7 años, y que durante el periodo de 1995 al 2005, el abatimiento en esta misma zona aumentó 20 metros (ver capítulo 2 de potenciometría histórica), es decir, 2 metros por año. Lo que lleva a suponer que disminuyendo un 30% la extracción de esta zona, el acuífero podría recuperar parcialmente el abatimiento provocado desde el año de 1995. Visto de otra manera, con una reducción del 30% de la extracción de la zona en cuestión, el acuífero podría ir recuperando su nivel estático a razón de 1.43 m/año.

3.6.2.2 Reubicación de pozos

Este modelo de reubicación de pozos tiene la finalidad de mostrar la repercusión sobre el acuífero, que tendría la asignación de nuevos pozos de bombeo que sustituyan parte de la extracción que tiene lugar en la zona con mayor densidad de pozos dentro de la ciudad de SLP.

En este modelo se asignaron cuatro nuevos pozos de extracción llamados R1, R2, R3 y R4, ubicados en el flanco izquierdo del modelo, a un costado de la sierra San Miguelito, rodeando el contorno de la ciudad de SLP. Los 4 pozos extraen de manera equitativa, el 30% del volumen de extracción que se redujo en los pozos del 19 al 33. Como base se utilizó de nuevo el modelo con una tasa de crecimiento poblacional del 1.0% anual.

La Figura 3.18 muestra la superficie potenciométrica para el 2015, con la asignación de los cuatro nuevos pozos de extracción.

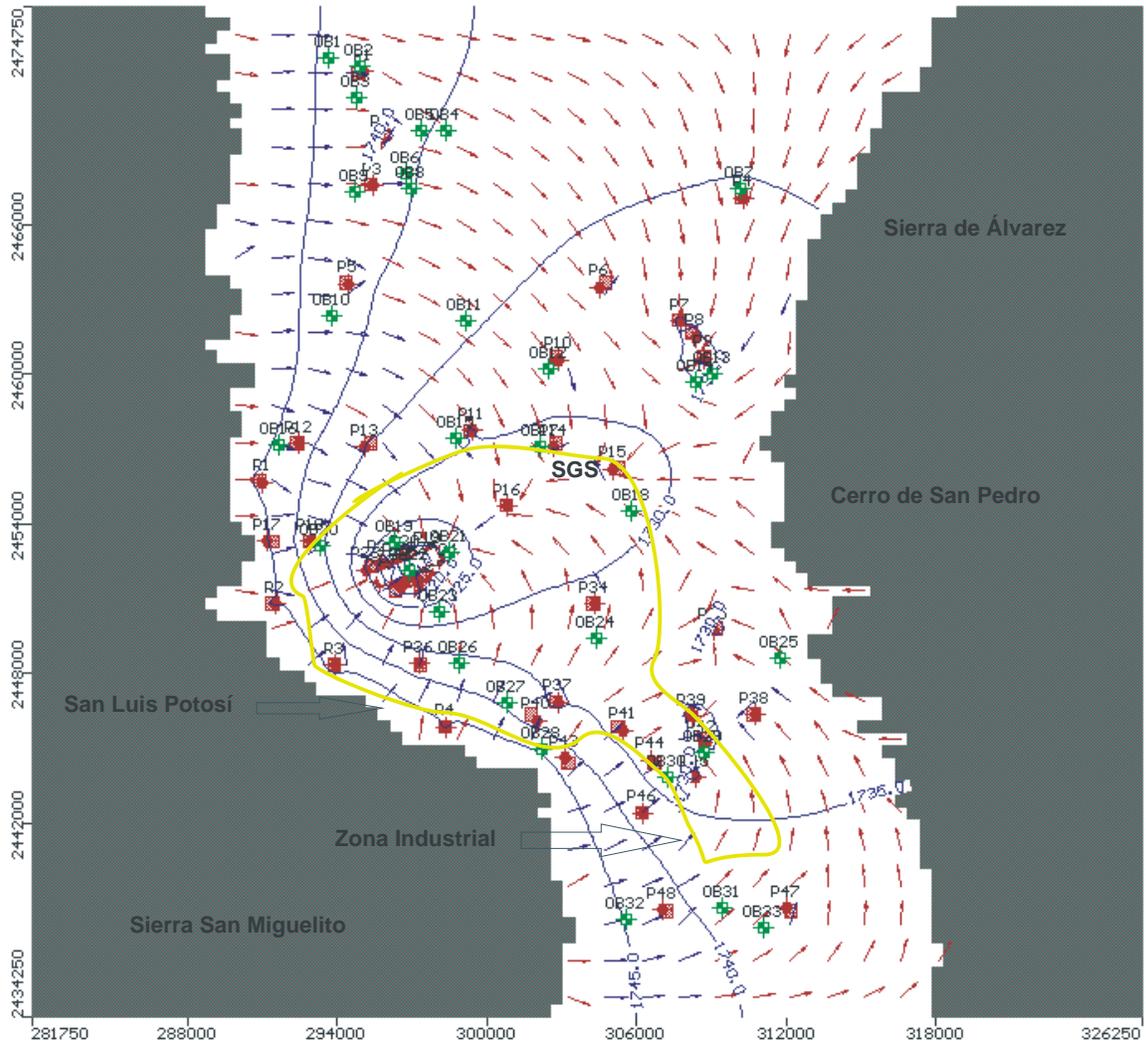


Figura 3.18 Superficie potenciométrica para el año 2015 con 4 nuevos pozos que extraen el volumen del 30% que se redujo en el modelo de disminución. La tasa de crecimiento poblacional es del 1.0%. La línea amarilla igual que en figura 3.8.

La Figura 3.18 muestra que si se le compara con la anterior (3.17), correspondiente a la disminución de extracción, ya no presenta cambios en el área de las equipotenciales de 1730 (donde están los pozos 39 y 42), ni en la de 1725.

La equipotencial de 1745, en donde se encuentran los cuatro nuevos pozos (R1, R2, R3 y R4), presenta ligeras desviaciones en las zonas donde se ubican estos últimos, pero no cambia su valor. Esto se debe a que los nuevos pozos se encuentran en la zona de mayor recarga del acuífero, la sierra de San Miguelito, por lo que su extracción no lo afecta con la misma magnitud que la extracción en los pozos más alejados a dicha zona.

Estos resultados muestran que si se disminuye la extracción en un 30% de los pozos de la zona de mayor abatimiento, trasladándola a los cuatro pozos propuestos (R1 y R4), el abatimiento en la ciudad se disminuye y no se provoca mayor abatimiento al ya

existente. Este resultado permite que se siga extrayendo la cantidad de agua necesaria incluso para una población con tasa de crecimiento del 1.0% anual (tasa mayor a la registrada en el último censo del 2005), sin provocar un mayor desequilibrio en el acuífero. Esta es una opción viable de remediación parcial del abatimiento del acuífero sin necesidad de reducir el volumen de agua que requiere la población.

CONCLUSIONES

El modelo de flujo del acuífero creado en el programa Visual Modflow a partir de la integración de la información geofísica e hidrogeológica obtenida de los estudios previos, reproduce con un error del 9% la evolución de los niveles potenciométricos del sistema acuífero durante los últimos 10 años (1995-2005), y permite pronosticar su comportamiento hasta el año 2015, aplicándole distintos caudales de extracción y asignándole nuevos pozos de bombeo.

El modelo del acuífero es muy sensible a las localizaciones de los pozos de extracción; lo cual puede observarse en cualquiera de las Figuras desde la 3.13 hasta la 3.18, puesto que las líneas equipotenciales son desviadas fácilmente por el efecto de los pozos de bombeo. Durante la evolución del acuífero desde el año 1995 hasta 2005, el modelo da como resultado un abatimiento de 20 metros en ese periodo, por lo tanto, el abatimiento promedio anual es de 2 metros en la zona donde se encuentran la ciudad de San Luis Potosí y la zona industrial.

Los posibles escenarios para el año 2015 con las distintas extracciones acordes al crecimiento poblacional, indican que aunque no aumenta el abatimiento en la zona de la ciudad de SLP ni en la zona industrial, el área correspondiente a la equipotencial de 1730 msnm, prácticamente duplica su área al asignar una tasa de crecimiento poblacional anual de 1% con respecto a la tasa del 0.4%. Es precisamente esta equipotencial la que engloba a la ciudad de SLP y que se va extendiendo hacia el este.

De continuar con el régimen de extracción de los últimos 10 años, para el 2015, aunque no aumentara el abatimiento en la ciudad de SLP y su zona industrial, sí serán mucho mayores las áreas en donde el nivel del agua continuará en descenso, lo cual también provocará que muchos pozos dejen de extraer agua, terminando su vida útil, y que se requiera perforar pozos más profundos y cada vez más alejados de la zona urbana.

Con respecto a los escenarios de remediación, se observa que si se disminuye un 30% la extracción de los pozos que se encuentran en la zona de mayor abatimiento en la ciudad, el abatimiento se reduce considerablemente (10 metros menos) en un periodo de 7 años, lo cual representa una recuperación del nivel del agua a razón de 1.43 metros por año.

Si se asignan 4 pozos nuevos en la zona de la equipotencial de 1745 msnm (pegados a la sierra de San Miguelito), que extraigan el mismo 30% del volumen que se les redujo a los pozos de la ciudad, el abatimiento permanece en el mismo valor (Figura 3.18), sin sufrir ningún cambio. Estos nuevos pozos permiten seguir extrayendo la misma cantidad de agua que demanda la población, sin crear un mayor desequilibrio al acuífero.

Debido a lo anterior es necesario disminuir la extracción de los pozos ubicados en la ciudad de San Luis Potosí y la zona industrial, para propiciar una recuperación del acuífero en esas zonas y perforar nuevos pozos de extracción en las zonas de recarga del acuífero o lo más cercano a ellas, para abastecer la ciudad y la zona industrial.

Es necesario también tratar toda el agua residual que vaya a ser usada para el riego agrícola, con la finalidad de no seguir contaminando el acuífero superior, propiciar la recuperación del mismo, para que el agua contenida en él pueda ser nuevamente utilizada en el suministro de agua potable para la ciudad. Asimismo, deben aumentarse las zonas de áreas verdes en la ciudad, con la finalidad de que la precipitación que se filtre a través de ellas recargue el acuífero, además, realizar estudios hidrogeológicos en los años subsecuentes, que sean más completos y detallados, sobre la calidad del agua tanto del acuífero somero como del profundo, así como un monitoreo constante de niveles potenciométricos de todos los pozos y norias existentes.

Los resultados obtenidos con el modelo de flujo del acuífero, en especial los resultados de los escenarios de remediación, muestran que el modelo puede contribuir de manera significativa en la gestión adecuada del agua subterránea del valle de SLP, y permitir a los organismos responsables de la administración del recurso, planear la explotación del acuífero bajo un marco sostenible y orientar el uso del agua de una forma eficiente.

ANEXO

Tabla 2.3 Pozos con datos de profundidad al nivel estático del acuífero profundo de San Luis Potosí durante el periodo 1995-2005.

No.	1995	1996	1997	1998	1999	2001	2003	2005	Longitud	Latitud	Cota brocal
001			153	153	152.9				-100.98291667	22.1535667	1868.2
004					128.1			168	-101.01627778	22.1560000	1878.4
005					112.1				-101.03743333	22.1495167	1920.5
008	96.2			109.1	126.4	116.3			-101.01855556	22.1453333	1895.2
012	140	146.9	150	150.1	151.6		154		-100.97425000	22.1385333	1870.3
013							153.3	157	-100.97133333	22.1390556	1870.3
020						138		144.9	-100.93572222	22.1106667	1850
027	147		143.3	148.5	145.8				-100.98890000	22.1981000	1872.4
039				153.7	143.5		145.9	145.6	-101.00552778	22.1681667	1870
040				165.8	162.3			192.6	-100.99451667	22.1677500	1867.4
041	170								-100.99330556	22.1738333	1870.4
042			154	154.4	173.2			160.6	-100.98730556	22.1727778	1866
044	183.6			189	190.6	171.3	171.3	172	-101.00458333	22.1722500	1888.4
051	147.1	147.2		149.2					-101.02330556	22.1721667	1899.3
052				144.9	151			158.4	-101.01991667	22.1665000	1897.2
057	126					126			-100.94711111	22.1385556	1859.2
058							139.8		-100.93810000	22.1378333	1852
065								171	-100.94780556	22.1453056	1851
067	127	135.2							-100.94798333	22.1540667	1855.4
077				126.71					-100.92444444	22.1196111	1851.4
081								202.5	-100.94822222	22.1345278	1863
091								189.4	-100.97413889	22.1787222	1859
093	143.5	143.7							-100.97263889	22.1871389	1859.5
094				143	151.1				-100.97308333	22.1298611	1875.3
095				140.5					-100.95052778	22.1475000	1862.3
102	134.7	134.1	135.3	141	143.5			152.9	-100.95430556	22.1706389	1854.7
122					124.9				-100.91966667	22.1503333	1847
126					139.5				-100.93791667	22.1236389	1854
127		136.4		137.8	136.8	141.1	142.7	144.8	-100.95036111	22.1265556	1864.3
130							155.4	219.2	-100.94805556	22.1718056	1851
133	125.4	125.4	127.6	128.2	131	134.9	137	140.9	-100.93102778	22.1159167	1850.5
135				88.8		99.4		134	-101.03225000	22.1520000	1885
137	134.7	140							-100.98238889	22.2026389	1868.4
138					109.8				-100.88391667	22.1861944	1842
156	106			113.7	119.9				-100.89416667	22.1971111	1841
161								173.7	-100.97536111	22.1738056	1837
171	110.4	109.1	109.9	112.2	113.5	119.6	120.9	120.4	-100.91936111	22.2089722	1842.5
189	105.2			116.3	65.9	110			-100.92588889	22.1805556	1846
225								25.3	-100.91927778	22.2081667	1848
246	95.2	97.5	98.3	99.4	102.6				-100.86625000	22.2463056	1833.5
245								41.7	-100.86761111	22.2395000	1840
247	101	100.1		101.3	100.3		104.2		-100.86169444	22.2399167	1833.2
248	95.2			98.9	100.2			84.6	-100.85277778	22.2363056	1836.6
251	97.7	98		100.4	74.5	105	106.5		-100.85472222	22.2158333	1835.3
252		80		75.5				43.6	-100.86144444	22.2335556	1835
254	99.7	96.1		98.6				97.3	-100.85916667	22.2301667	1834.6
257	160.1			158.9	158.9				-100.96958333	22.1637222	1859.5
260						154		131	-100.89800000	22.1106111	1865.3
261						161		161	-100.97830556	22.1670000	1865
262				156.8	156.8				-100.97625000	22.1668056	1860.4
263				153.9	160.2		162.9	168	-100.97200000	22.1586389	1863
273	113.7	113.7		113.4	114.7		122.1		-100.85413889	22.1904444	1849.4
279	111.3			114.2	116.7		122.2		-100.89638889	22.1401667	1845.4

No.	1995	1996	1997	1998	1999	2001	2003	2005	Longitud	Latitud	Cota brocal
299								131	-100.84558333	22.1485278	1849.8
307								125.1	-100.85716667	22.1501944	1850
308	113.5	114.2	115	115.5					-100.85852778	22.1530000	1849.9
309								115.7	-100.85883333	22.1386389	1846
310						112.9			-100.85858333	22.1321389	1846
313	111.6	112.8	113.5	114.2	115.8	119.5	120.2		-100.84630556	22.1415556	1849.5
317								109.3	-100.83530556	22.1297500	1873
319	113.6	114	114.4	114.6	115.8				-100.83494444	22.1095000	1851.5
320							40.9		-100.83358333	22.1155278	1849
327	116.3			118.6	122			128.5	-100.87338889	22.0976111	1854.5
329	108.2			108.8			117.8	121.2	-100.85555556	22.1022778	1848.1
332						124.7		132.3	-100.86825000	22.0898889	1855
338	129.6	129.6		129	132.3			140.9	-100.86991667	22.0420000	1867.1
341						120.3			-100.86002778	22.0251944	1854
346	117.6	119.9		119.5	118.2	122.1		128.9	-100.83069444	22.0359722	1849.6
347							127.8	126.7	-100.83030556	22.0387778	1850
350		119.7		120.1	121.3		124.5	137.7	-100.86213889	22.0972778	1853.4
352								127.9	-100.86402778	22.0918056	1849.4
353								126.7	-100.85708333	22.0893333	1855.4
357							119.1	124.6	-100.85588889	22.0953889	1848.4
358	116	119.7		111.9	112.8	117.5		121.5	-100.85463889	22.0993333	1848.5
360	104	104.8		106.2	108	110.2			-100.84569444	22.0920000	1847.5
361	102.5	105.7	106	110.5	108.3	110.3			-100.86047222	22.1201111	1841.4
362				153.9	153.3		160.7		-100.97788889	22.1563611	1864.7
363						153.2			-100.96580556	22.1667222	1850
367	76.6	77	77.3		75.6	83	85.9		-100.99175000	22.3458333	1823.5
369	81.1	81.5	82.5	82.8	85.2	87.3			-100.99247222	22.3345833	1828.9
373					80.5				-101.00350000	22.3490278	1825
374	73.6	75.1		75.8		80.8	81.5		-101.00483333	22.3561667	1823.6
375	72.3	73.5		74.8	76.8	79.8	80.4		-101.00430556	22.3626944	1820.6
381	83.5			87.3	88	91.5		93.9	-100.95769444	22.3230833	1826.4
386				88.2		93.3	94.1	95.7	-100.96719444	22.3226389	1830
388					121				-100.96055556	22.2837778	1838
389	92.5	93.3		97.5	96.1				-100.97113889	22.3016944	1835.5
391	95.5			109.1			105.6	109.7	-100.98500000	22.2998889	1838.5
392								105.9	-100.98155556	22.3066944	1836
394	87	83.7	88.3	82.5	88.1			99.6	-100.97280556	22.3070556	1838
398	91.8	103.1						71.1	-100.99916667	22.3075278	1836.4
399						91		96.4	-100.99252778	22.3005556	1847
402					106.1				-101.05055556	22.2837500	1925
404								49.4	-100.89166667	22.2673056	1832
405								21.7	-100.89777778	22.2315556	1848
406	82.4	83.2	84	94.3	87.7		86.9	74.9	-100.89716667	22.2670000	1833.3
407								70.1	-100.92019444	22.2296667	1840
409	100.6	102.3	104.3	105.5		108.8	116.8		-100.91661111	22.2373056	1839
411	96.5	96.8	98.3	97	99.1	104.4	105.5		-100.92066667	22.2428333	1837.2
413				95					-100.91547222	22.2505833	1837.4
414						99.6	98.2		-100.91300000	22.2555833	1836
416	98.7			101	102.6				-100.94900000	22.2541944	1841.5
425	127.7			132	135.1			146	-100.98847222	22.2132778	1866.5
429	122.3	122.8		126					-101.00127778	22.2554167	1861.2
430	108.8			109.7	122.4	119.7	126		-100.95200000	22.2115833	1871.7
433	137.6			140.1	138.9	143	146.7		-100.88291667	22.0649444	1870.9
438	159.9	140.6					150.9		-100.96383333	22.1677500	1858.2
439								137	-100.88988889	22.0942500	1864.3
439	135.1	135.3		136.5	134.8	143.6			-100.89638889	22.0851667	1864.3
446	118.3	118.5		121.5	125.1		131.1	141.3	-100.91669444	22.1226667	1846.2
448						127		134.8	-100.91358333	22.1199444	1847
451	118.5	119.1		121.7	123.1	126.4	128.2	134.5	-100.89658333	22.1026667	1849.8
464	120	121.7		123.3	126		131.7	140	-100.91763889	22.0996667	1849.9

No.	1995	1996	1997	1998	1999	2001	2003	2005	Longitud	Latitud	Cota brocal
467						132.3			-100.91513889	22.0989167	1850
469	116.1	119.7		123.6	124.6	128.1	129.8	136.3	-100.91950000	22.1130833	1848.2
470								134.6	-100.91727778	22.1090833	1860.5
472					23	127.2		134.6	-100.91366667	22.1168889	1847.4
474	124			127.8		135.3	135.4	141.5	-100.92633333	22.1173889	1849.6
478						147.2		154.3	-100.94988889	22.1302778	1863
624								148	-100.96847222	22.1737778	1860
635				151.4					-100.96705556	22.1749167	1856
644					111.3	147.7			-100.95758333	22.1488333	1861
662	136.4	136.3		135.1	137.2	144.1		149.9	-101.02102778	22.2088056	1904.4
696	147.9	148	147.5	148	147.3	147.7		147.8	-100.84291667	22.3032778	1837.3
724	130.6					138.1		141.4	-100.82527778	22.1335833	1865
726	149.8	148.8		148.9	144.8				-100.97888889	22.1512778	1865
826	91.5	130.8		130.1	132	119.4			-100.87458333	22.0332778	1871.9
828				57.7				56	-100.87594444	22.0878889	1860.4
861				131.7	132.4				-101.03952778	22.1353333	1960
862						151.3			-101.01127778	22.1945556	1902
865						153.1			-100.83759722	22.1867250	1881.9
866						142.2	140	165.5	-100.99997222	22.1159444	1920.4
867						133.8	132		-101.02327778	22.1294444	1922
870								203.3	-101.01969444	22.1681389	1894
873								125.4	-100.84669444	22.0428889	1857.5
877							62.3		-100.84372222	22.0961667	1846
880						110.3		116.9	-100.84688889	22.1091944	1849
881						171			-101.02313889	22.1928056	1917
886						153.4		156.9	-100.88347222	22.0382222	1879
912							140.5	145.5	-100.87261111	22.0520000	1868
913							163.4	164.5	-100.89038889	22.0406111	1889
924								178.5	-101.03666667	22.1267222	1962
925								149.8	-101.02108333	22.2580833	0.00
926							168.4		-101.04738889	22.1067778	2090

Fuente: Base de datos del registro histórico potenciométrico del acuífero profundo de SLP, proporcionada por la Gerencia Estatal de la CNA en San Luis Potosí. Contiene además las mediciones realizadas por Sabinfosistem en septiembre de 2005.

Tabla 2.4 Datos del muestreo de las norias del acuífero somero de San Luis Potosí.

No. muestra	Clave CNA	X	Y	Profundidad total (m)	N.E. (m)	N.D. (m)	Elevación brocal (msnm)	Elevación N.F. (msnm)
1	809	299981	2444316	4.6	1.92		1904	1902.08
2	810	300372	2444643	5.5	4.5		1887	1882.5
3	621	296738	2446539	7	5.23		1850	1844.77
4	775	287271	2452359	9		6.29	1970	
5	780	284440	2451080	4.5		2.32	2040	
6	713	288918	2453840	10	7.87		1940	1932.13
7		289506	2454098	9		7.92	1932	
8	654	291326	2454237	17.65	8.7		1903	1894.3
9	833	293930	2452465	3.85	3.76		1873	1869.24
10		293359	2455029	12	6.1		1887	1880.9
11		295695	2455033	6.8	5.65		1867	1861.35
12	430	298691	2457191	18.85	9.89		1852	1842.11
13	421	300071	2457619	18.35		14.95	1848	
14	618	296574	2446312	9.9	8.55		1900	1891.45

No. muestra	Clave CNA	X	Y	Profundidad total (m)	N.E. (m)	N.D. (m)	Elevación brocal (msnm)	Elevación N.F. (msnm)
15	756	295298	2452210	10.85	4.34		1866	1861.66
16		297954	2445069	3.5	3		1925	1922
17		295487	2446041	4.75	1.79		1925	1923.21
18		296125	2445941	4	1.5		1910	1908.5
19		298229	2444645				1990	
20	430	303046	2441441	8.26	4.9		1908	1903.1
21		305970	2444148	8.82	8.07		1858	1849.93
22		306193	2444218	7.05		4.95	1857	
23	690	305659	2445037	7.8	5.77		1853	1847.23
24		306796	2442067				1861	
25	680	305989	2443609	9.5	8.8		1859	1850.2
26		302789	2438270	2.67	0.3		1935	1934.7
27	311	303913	2432031	3.3	2		1886	1884
28		304118	2433880	4	3.1		1890	1886.9
29	341	307333	2438056	9.9	8.7		1863	1854.3
30		307964	2439719		2.6		1857	1854.4
31	286	306011	2451917	35.72	24.78		1842	1817.22
32	894	305661	2451621	33.3	22.58		1842	1819.42
33		305778	2444838	8.5	7.67		1864	1856.33
34		306366	2446022	5	3.5		1850	1846.5
35	848	305669	2444416	22.42	20.7		1856	1835.3
36		305998	2443460	15.22	7.22		1861	1853.78
37	892	306301	2451003	40.7		24.04	1843	
38	486	305344	2453322	29.53		24.82	1841	
39	290	305594	2452567	34.76		27.02	1841	
40	277	306479	2453727	24.1	13.82		1841	1827.18
41	275	306146	2453424	28.15		24	1841	
42	629	305987	2453584	27	21.7		1841	1819.3
43	150	306071	2456346	30.67		26.63	1839	
44	148	305540	2455847	31.65	28.45		1840	1811.55
45		305789	2454140	29.75		28.4	1841	
46		305718	2447342				1843	
47	691	305450	2444826		6.19		1854	1847.81
48		307329	2448670				1842	
49	582	301193	2452784	14.65	8.4		1848	1839.6
50		300621	2452484	12.08	6.76		1849	1842.24
51	283	305962	2451356	29	24.5		1842	1817.5
52	572	299125	2452797	12.68		6.33	1852	
53	568	299541	2452740	15.4	6.24		1851	1844.76
54		300948	2452560	14.45	9.37		1848	1838.63
55	627	296635	2453349	9.6	3.84		1861	1857.16
56		298605	2454648	13.6	8.93		1853	1844.07
57		303571	2457464	28.74		16.37	1841	
58	761	302801	2460058	29.5		25.74	1837	
59		301824	2456820	15.72	13.06		1844	1830.94
60		301091	2456257	11.2	9.23		1847	1837.77
61		288201	2450666				1960	
62		297498	2444337				1950	

BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre-Díaz, G. J., McDowell, F., 1991, The volcanic section at Nazas, Durango, Mexico, the possibility of widespread Eocene volcanism in the Sierra Madre Occidental: *Journal of Geophysical Research*, 96, 13373-13388.
- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, Á. F., Reyes-Zaragoza, M. A., Orozco-Esquivel, M. T., Ojeda-García, Á. C., Vasallo-Morales, L. F., 2001, Estratigrafía y deformación de la región San Miguel de Allende-Querétaro: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18, 129-148.
- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, Á. F., Orozco-Esquivel, M. T., Vasallo-Morales, L. F., Xu, S. S., 2002, El sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende: implicaciones en la deformación post-Eocénica del centro de México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 55(1), 12-29.
- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, Á. F., 2005, El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(1), 65-82.
- Albinson, T., 1988, Geologic reconstruction of paleosurfaces in the Sombrerete, Colorado, and Fresnillo district, Zacatecas state, Mexico: *Economic Geology*, 83, 1647-1667.
- Amozurrutia A., 1983. Estudios hidrogeoquímicos de la Cuenca de San Luis Potosí y evolución piezométrica de la misma en los últimos 10 años. Trabajo recepcional para obtener el título de Ingeniero Geólogo, Facultad de Ingeniería, UASLP.
- Aranda-Gómez, J. J., McDowell, F., 1998, Paleogene extension in the southern Basin and Range province of Mexico: syndepositional tilting of Eocene red beds and Oligocene volcanic rocks in the Guanajuato Mining District: *International Geology Review*, 40, 116-134.
- Ariel Consultores S.A., 1996. Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de las redes de observación de los acuíferos de Calera, San Luis Potosí y Toluca. Contrato No. GAS-012-PRO-96 para la Comisión Nacional del Agua (CNA).
- Arzate Jorge F., Barboza Rafael, López Rubén, Pacheco Jesús, Mata José Luis, Del-Rosal Antonio, Peña Ienisei y Olivares Carlos, 2006. Estudio geológico-geofísico para la evaluación de los hundimientos y agrietamientos en el área metropolitana San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez. Participantes: UNAM y UASLP.
- Barboza-Gudiño, J. R., Hoppe, M., Gómez-Anguiano, M., Martínez-Macías, P. R., 2004, Aportaciones para la interpretación estratigráfica y estructural de la porción noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21, 299-319.
- Cardona B.A., 1990. Caracterización físico-química y origen de los sólidos disueltos en el agua del valle de San Luis Potosí: su relación con el sistema de flujo. M.Sc. Tesis, Facultad de Ingeniería Civil, UA de Nuevo León, México, 97p.

- Cardona B.A., 2007. Hidrogeoquímica de sistemas de flujo regional, intermedio y local resultado del marco geológico en la Mesa Central: reacciones, procesos y contaminación. Tesis de doctorado, Instituto de Geofísica, UNAM.
- Carrillo-Bravo, J., 1971, La plataforma de Valles-San Luis Potosí: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 23, 110 p.
- Carrillo-Rivera, J.J., 1992, The hydrogeology of the San Luis Potosí Área, México. Ph.D. Thesis, University of London, U.K., 203 p.
- Carrillo-Rivera J.J., Cardona A.y Edmunds W.M., 1999. Utilización del régimen de operación y conocimiento de las condiciones hidrogeológicas para controlar las concentraciones de fluoruro en el agua subterránea: Cuenca de San Luis Potosí, México. Journal of Hydrogeology V.261 pp.24-47.
- Carrillo-Rivera J.J., Cardona A., 2003. Agua Subterránea, Capítulo 14: Entorno hidrogeológico de San Luis Potosí, Editorial Limusa.
- Castillo-Cruz A., 2003. Modelo hidrogeológico conceptual de la zona de San Luis Potosí-Villa de Reyes y su relación con la química del agua subterránea. Trabajo de Tesis de Licenciatura, Ingeniero Geólogo, Facultad de Ingeniería UASLP, 109p.
- Centeno-García, E., Silva-Romo, G., 1997, Petrogenesis and tectonic evolution of central Mexico during Triassic-Jurassic time: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 14, 244-260.
- CNA, 2002. (Comisión Nacional del Agua). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero San Luis Potosí, Estado de San Luis Potosí. Gerencia de aguas subterráneas.
- CNA, 2004. (Comisión Nacional del Agua). Manejo integrado y sostenible del agua en la región centro de San Luis Potosí. Informe No. 190. Estudio coordinado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de Modernización del Manejo del Agua (PROMMA).
- CONAGUA, 2007 (Comisión Nacional del Agua). Estadísticas del agua en México. Edición 2007.
- Consultores S.A., 1977. Estudio geohidrológico de evaluación y censo en los estados de San Luis Potosí y Zacatecas. Primera Parte. Zona de San Luis Potosí. Contrato No. EIGZA-77-16G. para la Subdirección de Geohidrología y de Zonas Áridas, SARH.
- COTAS, 2003. (Comité técnico de aguas subterráneas del acuífero de San Luis Potosí). Proyecto: "Plan de manejo del acuífero de San Luis Potosí". Grupo de planeación del proyecto. Ing. Ricardo Gómez Valle, Presidente del COTAS.
- Domenico P.A., Schwartz F.W., 1990. Physical and chemical hydrogeology. John Wiley and Sons, 502 pp.
- Edwards, J. D., 1955, Studies of some early Tertiary red conglomerates of Central Mexico: U. S. Geological Survey, Professional Paper, 264-H, 183 p.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., Bryan, S., 2005, Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 57(3), 343-378.
- Flores-Márquez E.L., Jiménez Suárez G., Martínez Serrano R.G., Chávez R.E., Silva Pérez D., 2006. Study of geothermal water intrusion due to groundwater

- Flores S., Alcalá A. Hernández M., 1990. Características geohidrológicas en el área de la Central Termoeléctrica de San Luis Potosí. Comisión Federal de Electricidad (CFE), Subdirección de construcción, Gerencia de Ingeniería Civil, 109p.
- Gálvez Vicente, 1925. Informe preliminar acerca de las aguas subterráneas de la parte del valle de San Luis Potosí, comprendida entre la ciudad de este mismo nombre y Jaral de Berrios. Folleto de divulgación No. 12 del Instituto Geológico de México.
- Geoingeniería Internacional S.A. de C.V., 1996. Estudio hidrogeológico de la contaminación del agua subterránea en la zona industrial de San Luis Potosí, S.L.P. Informe de avance. Para la Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. GAS. CNA.
- González-Medrano Francisco, 2003. Las comunidades vegetales de México. Estudio realizado para la SEMARNAT y el Instituto de Ecología.
- Hidrotec S.A., 1971. Informe preliminar del estudio geohidrológico de la zona de San Luis Potosí. Contrato No. EI-71-36 para la Dirección de Aguas Subterráneas. SARH.
- Hidrotec S.A., 1973, Estudio geohidrológico de las cuencas de San Luis Potosí y Villa de Reyes, S.L.P., 144 p.
- IGF, 1988 (Instituto de Geofísica) UNAM. Estudio geofísico geohidrológico del valle de San Luis Potosí. Versión preliminar.
- IGF, 1992 (Instituto de Geofísica) UNAM. Sección de Aguas Subterráneas. Modelación matemática del acuífero del valle de San Luis, para definir políticas de explotación, para abastecimiento de agua a la ciudad de San Luis Potosí, SLP. Contrato No. CC-88-318-D, para la Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial de la CNA.
- INEGI, 2000. (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). Marco geoestadístico.
- INEGI, 2005. (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). Resultados definitivos del II conteo de población y vivienda 2005 para el estado de San Luis Potosí. Comunicado No. 110/06.
- INTERAPAS, 2005 (Sistema intermunicipal metropolitano de agua potable, alcantarillado y saneamiento de SLP). Sistema integral para la recarga del acuífero de la zona sureste de la Ciudad de San Luis Potosí, S.L.P.
- Jiménez-Nava, F. J., 1993, Aportes a la estratigrafía de Aguascalientes mediante la exploración geohidrológica a profundidad, *en* Simposio sobre la geología del Centro de México, resúmenes y guía de excursión: Universidad de Guanajuato, Facultad de Minas, Metalurgia y Geología, Extensión Minera, 1, 93.
- Labarthe H.G. y Tristán G.M., 1978. Cartografía geológica hoja: “San Luis Potosí”. Folleto técnico No. 59. Instituto de Geología y Metalurgia. UASLP, 41p.
- Labarthe H.G., Tristán G.M., y Aranda G.J., 1982. Revisión estratigráfica del Cenozoico en la parte central del estado de San Luis Potosí. Folleto técnico No. 85. Instituto de Geología y Metalurgia. UASLP, 208p.

- Labarthe-Hernández, G., Jiménez-López, L. S., 1992, Características físicas y estructura de lavas e ignimbritas riolíticas en la Sierra de San Miguelito, S. L. P.: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto Geología, Folleto Técnico, 114, 31 p., 4 láminas.
- Labarthe H.G., Jiménez-López L.S., 1993. Geología del Domo Cerro Grande, sierra de San Miguelito, SLP. Folleto técnico No. 117. Instituto de Geología y Metalurgia. UASLP, 22p. 1 mapa.
- Labarthe H.G., Jiménez-López L.S., 1994. Geología de la porción sureste de la sierra de San Miguelito, SLP. Folleto técnico No. 120. Instituto de Geología y Metalurgia. UASLP, 34p. 2 mapas.
- Lugo-Velasco M., 1984. Análisis geohidrológico de la zona termal de la Cuenca de San Luis Potosí. Trabajo recepcional para obtener el título de Ingeniero Geólogo, Facultad de Ingeniería, UASLP.
- Martínez-Banda L.F., 2005. Identificación de la contaminación difusa en el acuífero somero de la ciudad de San Luis Potosí. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UASLP. 111p.
- Martínez-Reyes, J., 1992, Mapa geológico de la Sierra de Guanajuato con resumen de la geología de la Sierra de Guanajuato: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Cartas Geológicas y Mineras, 8, 1 mapa con resumen de la geología.
- Martínez-Ruíz V.J. y Cuellar G., 1979. Correlación de superficie y subsuelo de la Cuenca geohidrológica de San Luis Potosí, S.L.P. Instituto de Geología y Metalurgia de la UASLP. Folleto técnico No. 65, 25p.
- Martínez V.J., 1986. Condiciones geohidrogeológicas actuales del valle de San Luis Potosí. UASLP, Instituto de Geología y Metalurgia. Folleto técnico No. 105, 25p.
- Martínez-Ruíz, 1997. Actualización del marco geológico del subsuelo del valle de San Luis Potosí. Folleto técnico No. 123, 7p. Instituto de Geología y Metalurgia, UASLP.
- Martínez Sandra E., 2009. Gestión integrada del agua urbana: Aplicación del modelo UVQ al área metropolitana de San Luis Potosí. Tesis de Doctorado, Instituto de Geología, UNAM.
- McDonald, M.G. and A.W. Harbaugh, 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A1, U.S. Geological Survey, Denver, Colorado.
- Medina J.F., 1967. Un método de investigación geohidrológica par alas zonas áridas. UASLP, Instituto de Geología y Metalurgia. Folleto técnico No. 13, 21p.
- Medina J.F., 1974. Una solución al problema del agua en San Luis Potosí. UASLP, Instituto de Geología y Metalurgia. Folleto técnico No. 41, 13p.
- Morán-Zenteno, D. J., Martiny, B., Tolson, G., Solis-Pichardo, G., Alba-Aldave, L., Hernández-Bernal, M. S., Macías-Romo, C., Martínez-Serrano, R., Schaaf, P., Silva-Romo, G., 2000, Geocronología y características geoquímicas de las rocas magmáticas terciarias de la Sierra Madre del Sur: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 53, 27-58.
- Moreira-Rivera, F., Flores-Aguillón, G., Martínez-Rodríguez, L., Palacios-García, R., Chiapa-García, R., Olvera-Campos, A., Pérez-Benavidez, A., González-

- Nieto-Samaniego, Á. F., 1992, Fallamiento y estratigrafía cenozoicos en la porción sudoriental de la Sierra de Guanajuato: universidad Nacional Autónoma de México, Revista del Instituto de Geología, 9, 146-155.
- Nieto-Samaniego A.F., Macías Romo M.C., Alaníz Álvarez S.A., 1996. Nuevas edades isotópicas de la cubierta volcánica cenozoica de la parte meridional de la Mesa Central, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 13p, 117-122.
- Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Ivarez, S. A., Labarthe-Hernández, G., 1997, La deformación cenozoica poslaramídica en la parte meridional de la Mesa Central, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 14, 13-25.
- Nieto-Samaniego, Á. F., Ferrari, L., Alaniz-Álvarez, S. A., Labarthe-Hernández, G., Rosas-Elguera, J., 1999, Variation of Cenozoic extension and volcanism across the southern Sierra Madre Occidental volcanic province, Mexico: Geological Society of America Bulletin, 111, 347-363.
- Nieto-Samaniego, L., Alaniz-Álvarez, S. A. y Camprubí-Cano, A., 2005. La Mesa Central: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario. Temas selectos de la Geología Mexicana. Tomo LVII, Núm.3, 2005, P. 285-318.
- Pérez-Ibargüengoitia J.M., 1967. Estudio geológico del área de San Felipe en el estado de Guanajuato. Facultad de Ingeniería, Tesis profesional, Ingeniero Geólogo, UNAM, 71p.
- Quintero-Legorreta, O., 1992, Geología de la región de Comanja, estados de Guanajuato y Jalisco: Universidad Nacional Autónoma de México, Revista del Instituto de Geología, 10, 6-25.
- Raisz, E., 1959, Landforms of Mexico, scale ca. 1:3 000 000: Cambridge, Massachusetts, U. S. Office of Naval Research, Geography Branch, 1 mapa.
- Ranson, W. A., Fernández, L. A., Simmons, W. B., Enciso-de la Vega, S., 1982, Petrology of the metamorphic rocks of Zacatecas, Mexico: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 41, 37-59.
- Roldán-Quintana, J., 1968, Estudio geológico de reconocimiento de la región de Peñón Blanco, estado de Durango: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 31, 79-105.
- Sabinfosistem S.A. de C.V. 2005. Actualización hidrogeológica de los acuíferos de Ceballos y Oriente Aguanaval Estado de Durango, Villa de Arista y San Luis Potosí Estado de SLP. Contrato No. SGT-GRCCN-05-008-RF-I3 para la CNA. Coordinación a cargo de la Subdirección General Técnica a través de la Gerencia Regional Cuencas Centrales del Norte (GRCCN).
- Sanders L., 1998. A manual of field hydrogeology. Prentice Hall, 381 pp.
- SEMARNAT, 2009. (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). Estudios sobre la vegetación de las zonas áridas y semiáridas de México (matorral, mezquite, gobernadora, lechuguilla, nopal y palma china).
- Stretta E.S.P. y Del Arenal R., 1960. Estudio para el abastecimiento de agua potable para la ciudad de San Luis Potosí. Sección de Hidrología del Instituto de Ciencia Aplicada para el Ayuntamiento de San Luis Potosí.

- Swanson, E. R., Keizer, R. P., Lyons, J. I., Clabaugh, S. E., 1978, Tertiary volcanism and caldera development near Durango City, Sierra Madre Occidental, Mexico: Geological Society of America Bulletin, 89, 1000-1012.
- Tapiador Francisco J., 2000. Metodología de cálculo de la escorrentía potencial mediante teledetección. Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, España.
- Tecnología ASSUL S.A. de C.V., 2005. Estudio de diagnóstico y planeación integral de Interapas (Organismo intermunicipal metropolitano de agua potable, alcantarillado, saneamiento y servicios conexos, de los municipios de Cerro de San Pedro, San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez).
- Tristán-González, M., 1986, Estratigrafía y tectónica del graben de Villa de Reyes en los estados de San Luis Potosí y Guanajuato, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico, 107, 91 p.
- Tyssa, 1984 (Tecnología y Sistemas S.A.). Ampliación del estudio geohidrológico de evaluación en el valle de San Luis Potosí, para el abastecimiento de agua en bloque para la ciudad de San Luis Potosí. Contrato CC-83-305-D Tomos I y II. Para la Dirección General de Captaciones y Conducciones de Agua SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos). Informe interno.
- UASLP, 1987 (Universidad Autónoma de San Luis Potosí). Facultad de Ingeniería. Estudio geohidrológico del valle de San Luis Potosí. Reporte técnico interno 156p.
- Villalobos C., 1980. Agua potable y aguas de desecho en el futuro de la ciudad de San Luis Potosí y áreas circunvecinas. UASLP, Instituto de Geología y Metalurgia. Folleto técnico No. 70, 29p.
- Walton W.C., 1989. Groundwater dumping tests: design and analysis. Lewis Publishers.
- Xu, S. S., Nieto-Samaniego, Á.F., Alaniz-Álvarez, S. A., 2004, Vertical shear mechanism of faulting and estimation of strain in the Sierra de San Miguelito, Mesa Central, Mexico: Geological Acta, 2, 189-201.