

## Factores que dan origen al minado de acuíferos en ambientes áridos: caso Valle de San Luis Potosí

**María Cristina Noyola-Medrano<sup>1,2,\*</sup>, José Alfredo Ramos-Leal<sup>1</sup>, Eloisa Domínguez-Mariani<sup>1</sup>,  
Luis Felipe Pineda-Martínez<sup>1</sup>, Héctor López-Loera<sup>1</sup> y Noel Carbajal<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. (IPICYT), C. Presa San José # 2055,  
Lomas 4<sup>a</sup>. Sección, CP 78216, San Luis Potosí, SLP, México.

<sup>2</sup> Dirección actual: Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías,  
Avenida Juárez 77, 36000 Guanajuato, Gto., México.

\* cnoyola@quijote.ugto.mx

### RESUMEN

*El análisis de datos históricos y recientes de hidrogeología, geofísica, cambio de uso del suelo, clima y las prácticas de manejo del recurso hídrico apuntan a una continua disminución de los volúmenes de agua subterránea. Esto revela que el acuífero del Valle de San Luis Potosí se comporta como un recurso minado. El sistema está formado por un acuífero somero en medio granular en depósitos aluviales, un acuífero intermedio de material sedimentario compuesto por gravas, arenas y limos semiconsolidados y un acuífero profundo en un medio fracturado de origen volcánico, denominado Latita Portezuelo. Los factores que afectan negativamente la recarga hacia el valle son: la baja permeabilidad de los materiales rocosos que bordean al valle y que inhiben la infiltración hacia el subsuelo, la baja precipitación y alta evaporación característica de regiones áridas, la erosión de suelos deforestados en las sierras aledañas que impiden la retención de agua, y la construcción de presas en materiales rocosos de baja permeabilidad que reducen drásticamente el flujo de agua a zonas de infiltración en el valle. Adicionalmente, las edades del agua en el medio granular van de 1300 a 2300 años, mientras que en el medio fracturado van de 5300 a 6300 años, indicando ritmos muy lentos de recarga. Los últimos balances hidrogeológicos anuales correspondientes a los años 1995 y 2002 indican que el déficit se incrementó de  $36.6 \times 10^6$  a  $42.5 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año. Estos balances coinciden en la existencia de un desequilibrio en la extracción que duplica a la recarga, y dadas las condiciones climáticas del área, conlleva a una condición de minado del agua subterránea en el Valle de San Luis Potosí.*

*Palabras clave: acuífero minado, hidrogeología, flujo regional, climatología, geometría subterránea, Valle de San Luis Potosí, México.*

### ABSTRACT

*The analysis of historical and recent data on hydrology, geophysics, land use change, climate and water resources management points to a continue decrease of groundwater reserves, which indicates that groundwater mining is taking place in the San Luis Potosi Valley aquifer. The system is formed by a shallow aquifer in a granular medium in alluvial depositions, a middle one of sedimentary material formed by gravels, sands and unconsolidated loams, and a deep aquifer in a volcanic fractured medium, named Latita Portezuelo. The factors negatively affecting the recharge into the valley are: a low permeability of rocky materials surrounding the valley that inhibit the water infiltration into the soil, the scarce precipitation and*

*high evaporation characteristic of arid zones, the soil erosion by deforestation in mountain ranges that prevent water retention, and water dams built on low permeability materials that restrain water runoff to infiltration zones in the valley. Additionally, the ages of the water in the granular aquifer range from 1300 to 2300 years and from 5300 to 6300 years in the fractured aquifer. Hydrogeological balances from 1995 and 2002 show that the deficit has increased from  $36.6 \times 10^6$  to  $42.5 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/year. These balances reveal a shortage, with extraction doubling the recharge. According to the climatic and geological conditions in the area, the groundwater in the San Luis Potosi Valley reached a condition of mining.*

*Key words: mining aquifer, hydrology, regional flow, climatology, subsurface geometry, San Luis Potosi Valley, Mexico.*

## INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es una componente del ciclo hidrológico que puede ser influenciada por factores naturales (clima, geología, hidrogeología) o antropogénicos (manejo del recurso hídrico, cambio de uso de suelo), de manera que la extracción intensiva de un acuífero bajo esquemas que amenazan su utilización sustentable es conocida como minado del agua subterránea (Stavric, 2004). Esto significa la pérdida efectiva de este recurso (American Meteorological Society, 2008). Si la explotación del recurso hídrico se lleva a cabo en zonas áridas y semiáridas bajo este régimen, sería equivalente a la extracción de agua fósil, juvenil o connata que se encuentra en el subsuelo y que no tiene oportunidad de renovación en decenas o centenas de años. De acuerdo con Llamas y Garrido (2007), la incertidumbre en la disponibilidad del recurso hídrico siempre ha sido parte de su manejo y está relacionada con: 1) la escasez de datos acerca de los volúmenes almacenados en un determinado acuífero, 2) procesos no lineales con respecto a la recarga de agua subterránea, 3) el escaso conocimiento científico del medio hidrogeológico, y 4) cambios en las tendencias políticas y socioeconómicas. El término sobreexplotación debe establecerse también en términos sociales, económicos y de relaciones de beneficio–costo y no sólo en términos hidrogeológicos (Llamas y Garrido, 2007).

Por otro lado, la mayoría de los problemas de disponibilidad presente y futura del agua se relacionan con la degradación de la calidad, ciclos de sequía acentuada y no sólo con la escasez relativa. Así, la sustentabilidad está definida en función de varios factores, como: hidrogeología, ecología, economía, política (Shamir, 2000 *en* Llamas y Garrido, 2007). A nivel mundial existen varios ejemplos de agotamiento de acuíferos, siendo notorio el caso de High Plains en Kansas (270 km<sup>3</sup>) que representa el 27 % del agua subterránea para uso agrícola de los Estados Unidos de Norteamérica y cuyo agotamiento es debido a la extracción intensiva para uso agrícola (Dennehy, 2000; McGuire y Fischer, 1999). En España, el acuífero de la Llanura Manchega fue declarado sobreexplotado desde 1987, debido a la extracción de agua para uso agrícola; se pasó de 30,000 a 130,000 hectáreas para uso de riego en 20 años (1970 a 1990), generándose con esto una mayor demanda de agua para este uso (Cruces de Abia *et al.* 1997).

En Pakistán, dos provincias, Balochistan y Parachinar tienen un largo historial de minado del agua subterránea debido a la escasa recarga de sus acuíferos. En el caso de Balochistan, el problema fue controlado en 1978 por medio de regulaciones sobre el uso del agua subterránea (Van Steenberg y Oliemans, 1997). En México no se tiene conocimiento profundo sobre las condiciones de explotación del agua subterránea en diversas zonas del país, debido a la falta de estudios detallados en la edad, calidad y cantidad del agua subterránea de muchos acuíferos. De acuerdo con Arreguín-Cortés y López-Pérez (2007), en el manejo del agua se debe considerar que aún si existieran grandes reservas de agua subterránea en México, éstas no tendrían una rápida renovación, debido a la influencia de factores naturales (cambio climático, rocas almacenadoras y tectónica, entre otros) y antropogénicos (cambios de uso de suelo, políticas de manejo de agua y contaminación), alcanzándose, en algunos casos, una condición de minado.

Scott y Garcés-Restrepo (2000) mencionan que algunos acuíferos del estado de Guanajuato (centro de México), pertenecientes a la cuenca del río Lerma y utilizados principalmente en agricultura, presentan descensos de cargas hidráulicas en un intervalo de 0–3.2 m/año. Esto provoca que el costo de la producción agrícola vaya en aumento debido a que los niveles de extracción del agua subterránea son cada vez más profundos y el consumo de energía eléctrica es mayor. En este caso particular se prevén problemas de escasez de agua superficial y subterránea en los próximos veinte años, por lo que se precisan políticas de manejo sustentable del agua en la irrigación para mantener al sector agrícola.

En el Valle de San Luis Potosí (VSLP) se han realizado diversas investigaciones hidrogeológicas desde 1960, principalmente para localizar fuentes de abastecimiento de agua potable (Stretta y del Arenal, 1961; SARH, 1977, 1988; Martínez-Ruiz, 1984, 1986, 1997). En algunos estudios se ha obtenido información acerca de la explotación y funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos en esta región (Cardona-Benavides, 1990, 2007; Carrillo-Rivera *et al.*, 1992, 2002), del deterioro de la calidad del agua subterránea y de las políticas de manejo del agua subterránea (CNA, 2002; Gobierno Federal *et al.*, 2002; Cardona *et al.*, 2004; INTERAPAS, 2005; Peña, 2006; Escolero-F. y Martínez, 2006). Los balances hídricos indican un déficit del volumen

de agua subterránea que refleja un agotamiento progresivo del acuífero (Carrillo-Rivera *et al.*, 2002; CNA, 2002; COTAS-CONAGUA, 2005). Además, la extracción excesiva, el cambio climático y los cambios de las propiedades hidráulicas del acuífero, como la pérdida de conductividad hidráulica, varían con el tiempo, disminuyendo el potencial de recarga (Stavric, 2004).

El objetivo del presente estudio es mostrar las condiciones hidrogeológicas actuales del acuífero del VSLP y su relación con las prácticas de manejo que apuntan a una continua disminución de los niveles del agua subterránea en el acuífero profundo. Además, se analizan los diferentes factores que causan las condiciones de minado del reservorio, poniendo en riesgo el uso sustentable a largo plazo del recurso hídrico. En este estudio se presenta un nuevo modelo conceptual de funcionamiento del acuífero con base en métodos geofísicos (sondeos eléctricos verticales, magnetometría). También se realiza una integración y análisis del cambio de uso de suelo aplicando un Sistema de Información Geográfica (SIG).

## ÁREA DE ESTUDIO

El VSLP se encuentra localizado en la cuenca del mismo nombre, en el estado de San Luis Potosí, México, entre los paralelos 22° y 22°30' de latitud norte y entre los meri-

dianos 100°40' y 101°10' de longitud oeste. El VSLP está limitado al oriente por la Sierra de Álvarez y al occidente por la Sierra de San Miguelito (Figura 1). Tradicionalmente se ha reconocido en el VSLP un acuífero somero y otro profundo (SARH, 1977; Labarthe-Hernández y Tristán, 1978; Labarthe-Hernández *et al.*, 1982; Carrillo-Rivera *et al.*, 1992). Sin embargo, y debido a que recientemente se han realizado estudios hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e isotópicos a detalle que muestran diferencias entre el medio granular y el fracturado del acuífero profundo (Cardona *et al.*, 2004; Cardona-Benavides *et al.*, 2006; Carrillo-Rivera *et al.*, 2000; Carrillo-Rivera *et al.*, 2002) y porque el acuífero somero en realidad tiene características de un acuífero colgado (IPICYT, 2006), en el presente trabajo se considera que el VSLP contiene un sistema acuífero formado por uno somero (colgado), un intermedio (granular) y otro profundo (fracturado).

## METODOLOGÍA

El trabajo consistió en obtener información sobre las condiciones hidrogeológicas del valle y sobre otros factores relacionados con la disponibilidad de agua (clima, geología, cambios de uso de suelo, etc), con la finalidad de determinar cuál de estos factores originan el agotamiento del sistema acuífero del VSLP. Esta información se ha complementado

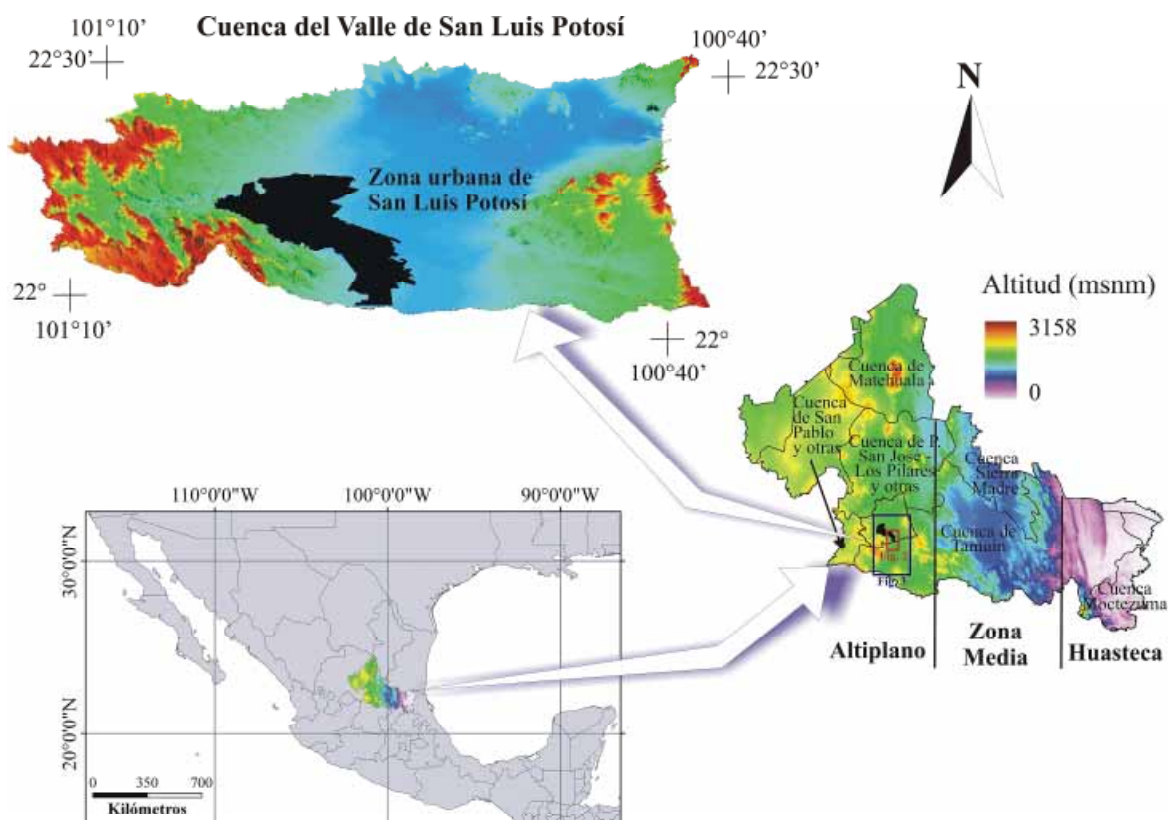


Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio en San Luis Potosí. Se muestra la elevación de terreno y el contorno del Valle de San Luis Potosí.

con un estudio geofísico del VSLP para establecer la geometría del subsuelo, con la integración de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para la evaluación del impacto del cambio de uso de suelo y con el análisis climatológico (temperatura, precipitación y humedad) de la región para el establecimiento de la influencia climática sobre el valle. Estos análisis, en conjunto con investigaciones previas, permiten comprender mejor la dinámica regional del acuífero. En una primera parte del trabajo, se describen los factores que contribuyen a la dinámica actual del acuífero del VSLP en dos principales grupos; los de origen natural y los de origen antropogénico. Posteriormente, se presentan los métodos usados en una exploración por medio de sondeos eléctricos y una discusión general incluyendo valoraciones del estado actual del agua subterránea del VSLP. Como antecedentes presentamos una revisión de los principales factores de origen natural tales como condiciones climáticas, geológicas e hidrogeológicas.

### Métodos geofísicos

Se determinó la geometría del subsuelo en el área de estudio con la conjunción de la información geológica, cortes litológicos, geofísica (sondeos eléctricos y magnetometría generada en este estudio) y gravimetría del valle. Se realizaron sondeos eléctricos verticales (SEV) de resistividad aparente ( $\rho_a$ ) y polarización inducida (PI). Por medio de los SEV, se identificaron materiales porosos y permeables susceptibles a contener agua y formar acuíferos. Se realizaron 100 SEV de resistividad aparente y polarización inducida con un dispositivo electródico tipo Schlumberger, con espaciamentos de electrodos de corriente (AB/2) de hasta 1000 m, utilizando un resistímetro marca SYCAL R-2, VIP-5000. En los SEV se utilizan cuatro electrodos alineados, teniendo un centro común. Los electrodos interiores, de potencial (MN), se mantienen fijos, mientras que los electrodos exteriores, de corriente (AB), aumentan progresivamente hasta que se alcanza la separación máxima programada. Se realizaron configuraciones horizontales de resistividad aparente,  $\rho_a$  ( $\Omega$ -m), con espaciamentos de electrodos de corriente (AB/2) a 50, 100, 200, 300, 600 y 900 m. Para el análisis de la información eléctrica se conformaron mapas de distribución aparente que muestran las variaciones horizontales y verticales de la resistividad con las diferentes separaciones electródicas utilizadas.

### Sistemas de información geográfica

Uno de los principales intereses de este trabajo es la evaluación de los diversos factores que influyen en el minado o la preservación del acuífero de la cuenca del Valle de San Luis Potosí. Por esta razón, se procedió a analizar los cambios de uso del suelo que se presentan en la zona de estudio. En otros trabajos se demuestra que la cobertura

vegetal es importante para la preservación del terreno y la infiltración de agua (Sharda *et al.*, 2006; Mende *et al.*, 2007). Para realizar este análisis se utilizó material cartográfico generado por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), por el Colegio de San Luis (Peña, 2006) y material generado durante este estudio. Estos datos fueron integrados en un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS 9.2). Los datos fueron georreferidos al DATUM WGS84 y el sistema de proyección UTM. La nomenclatura utilizada para las diferentes coberturas es tomada de la cartografía del INEGI e incluye las siguientes clases: bosque de coníferas, bosque de latifoliadas, matorral xerófilo, mezquital, pastizal natural, pastizal inducido, agricultura de temporal, agricultura de riego y otro tipo de vegetación.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Configuración del subsuelo del VSLP

En la configuración horizontal de  $\rho_a$  con AB/2 de 50 m, se observa una mayor resistividad aparente hacia los límites laterales del valle (25 – 80  $\Omega$ -m) y en la parte central del valle se registran resistividades aparentes menores a 25  $\Omega$ -m (Figura 2). Algunos cuerpos resistivos en el centro del valle se asocian a la presencia de caliche, debido a que sus  $\rho_a$  son relativamente altas (>100  $\Omega$ -m). En la parte más noreste del valle se registraron valores de resistividad altos de hasta 270  $\Omega$ -m, lo cual se relaciona con la presencia de rocas volcánicas expuestas en superficie o a poca profundidad. Con AB/2 de 100 m, se presenta una configuración de  $\rho_a$  muy similar a la observada para  $\rho_a$  a 50m. Sin embargo, las bajas resistividades en la zona central se asocian con la presencia de arcilla. Se mantienen resistividades aparentes mayores a 80  $\Omega$ -m en el extremo superior derecho, debido a la escasa profundidad de las rocas volcánicas. Con AB/2 de 200 m se muestran claramente contrastes de  $\rho_a$ , la presencia de un lineamiento con dirección N-S y otro NE-SW en la parte sur del área de estudio; las resistividades  $\rho_a$  son del orden de 10 a 25  $\Omega$ -m en la parte central del valle. Se aprecia una pequeña zona resistiva hacia el NE del valle, esta anomalía se puede relacionar con un alto estructural de uno de los escalones del graben de San Luis Potosí (Figura 2). A 300 m de AB/2 se observa la existencia de dos lineamientos N-S y NE-SW, con valores entre 10 y 25  $\Omega$ -m en el centro del valle y 25 a 50  $\Omega$ -m en el resto del valle; sin embargo, su distribución es más estrecha que con las aberturas anteriores. Se interpreta la posibilidad de fracturamiento en las unidades rocosas que existen a la profundidad alcanzada por este espaciamento. Se presentan pequeñas zonas resistivas al NE del valle relacionadas con un escalón del graben de San Luis Potosí (Figura 2). Con AB/2 = 600 m, la configuración de  $\rho_a$  muestra valores de 20 a 30  $\Omega$ -m en la parte central del valle; sin embargo, su distribución es interrumpida en la parte central del valle por resistividades de 30-40  $\Omega$ -m. El extremo NE presenta valores de 40 a



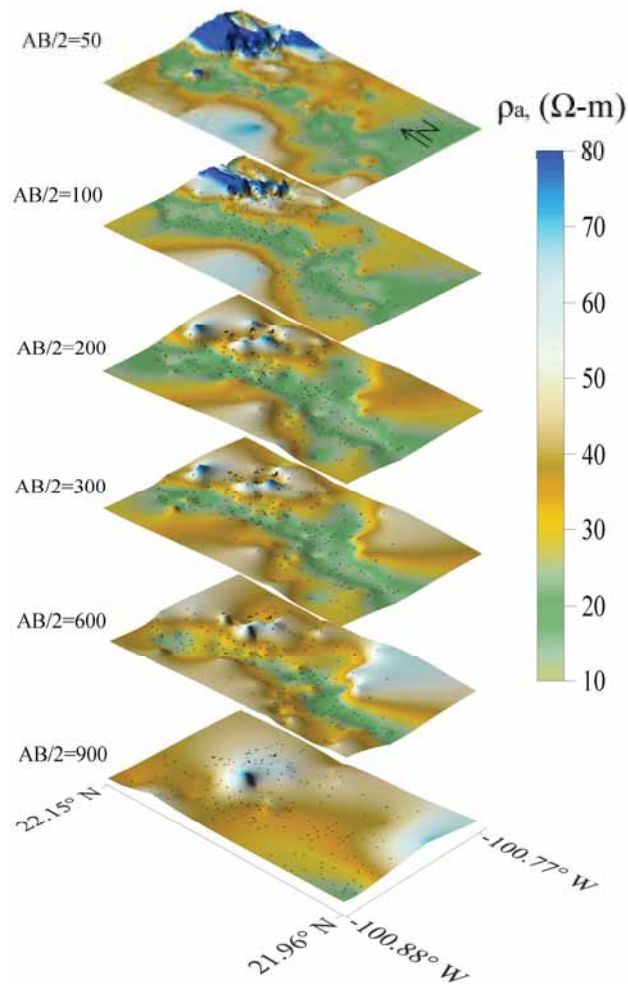


Figura 2. Configuraciones horizontales de resistividad aparente,  $\rho_a$  ( $\Omega$ -m), en el VSLP, con espaciamientos de electrodos de corriente (AB/2) de 50, 100, 200, 300, 600 y 900 metros.

60  $\Omega$ -m (Figura 2). La distribución de resistividad  $\rho_a$ , con espaciamientos de 900 m en AB/2, muestra valores de 22 a 30  $\Omega$ -m en la parte centro sur del valle y resistividades de 30 a 40  $\Omega$ -m en la parte central norte del valle. Anomalías con valores altos 40-80  $\Omega$ -m se manifiestan en el extremo NE del valle (Figura 2).

Del análisis de resistividad se concluye que el área de estudio está integrada por fosas tectónicas rellenas de material sedimentario. Se identificaron cuatro capas isoresistivas: 1) las depresiones observadas en la Figura 3 corresponden generalmente a fosas tectónicas con material arcillo-arenoso de baja resistividad. Los altos corresponden a roca fracturada y a depósitos conglomeráticos. 2) La base de las fosas está constituida por rocas volcánicas de composición latítica con resistividades verdaderas de 67 a >500  $\Omega$ m. Las rocas volcánicas se distribuyen a lo largo y ancho de todo el valle, y en la parte central del graben se ubican a profundidades de hasta 570 m (Figura 3). 3) En la parte superior se identificó una capa de caliche de poco espesor, con resistividades >100  $\Omega$ m, que se distribuye en todo el

valle. 4) Hacia el sur predominan los materiales gruesos (areniscas y conglomerados) con resistividades de 21 a 35  $\Omega$ m. Hacia el norte, estos materiales sólo se presentan en los flancos oeste y este del graben hasta que finalmente desaparecen. El relieve del piso rocoso en la zona urbana de San Luis Potosí es irregular, presentando la parte más profunda hacia el lado norte-noreste, con profundidades de 500 a 570 m (Figura 3). Al centro del VSLP se localizan algunos altos estructurales con profundidades de 100 a 250 m, en la zona termal (Figura 3a). Como se puede ver en las Figuras 3b y 3c, en el subsuelo del Valle de San Luis Potosí-Villa de Reyes se localizan importantes fosas tectónicas; siendo la de San Luis Potosí una de las más importantes y más profundas.

## Factores naturales

### Clima del VSLP

Dentro de los factores principales de origen natural que intervienen en el ciclo hidrológico de la región, y que a su vez influyen en la dinámica del sistema acuífero, están los patrones de temperatura, precipitación y la evaporación. El VSLP se localiza en la región semiárida del Altiplano Mexicano a aproximadamente 1800 m de elevación. El clima está gobernado por patrones de circulación global, pero en mayor medida por condiciones regionales de circulación (Cavazos y Hastenrath, 1990; Pineda-Martínez *et al.*, 2007). Por su orografía, la región puede ser dividida en tres principales zonas: la Huasteca en el oriente, la Zona Media en el centro y la del Altiplano al poniente (Figuras 1 y 4). La Figura 4 muestra un corte de la Huasteca al Altiplano en la cual se distingue la influencia de la orografía en los parámetros medios anuales de humedad, precipitación y temperatura. El abrupto gradiente de elevación del terreno determina predominantemente el contenido de humedad en la atmósfera, con valores altos en las tierras bajas de la Huasteca y menores en la zona del Altiplano. La temperatura y humedad relativa media anual decaen casi linealmente de la Huasteca al Altiplano. La región del VSLP presenta valores bajos de precipitación de 200 a 250 mm (Figura 5c). Estos valores se relacionan totalmente con la orografía, existiendo una influencia directa de la Sierra Madre Oriental, la cual representa una barrera que causa una disminución de la precipitación en el Altiplano (Figura 4). De esta forma, la entrada de humedad del Golfo de México está principalmente confinada a la región de la Huasteca. Por otro lado, en la zona del Altiplano, la tasa de evaporación es alta, alcanzando valores similares a los de precipitación (Figuras 5c y 5d). Es importante apuntar que aunque se presentan temperaturas medias más bajas en la región del Altiplano (12 °C) que en la Huasteca (>25 °C), la atmósfera es más seca y por lo tanto el aire siempre tiene baja saturación de vapor de agua. Las Figuras 5c y 5d reflejan claramente el contraste de precipitación y evaporación de las diferentes regiones del Estado de San Luis Potosí y particularmente

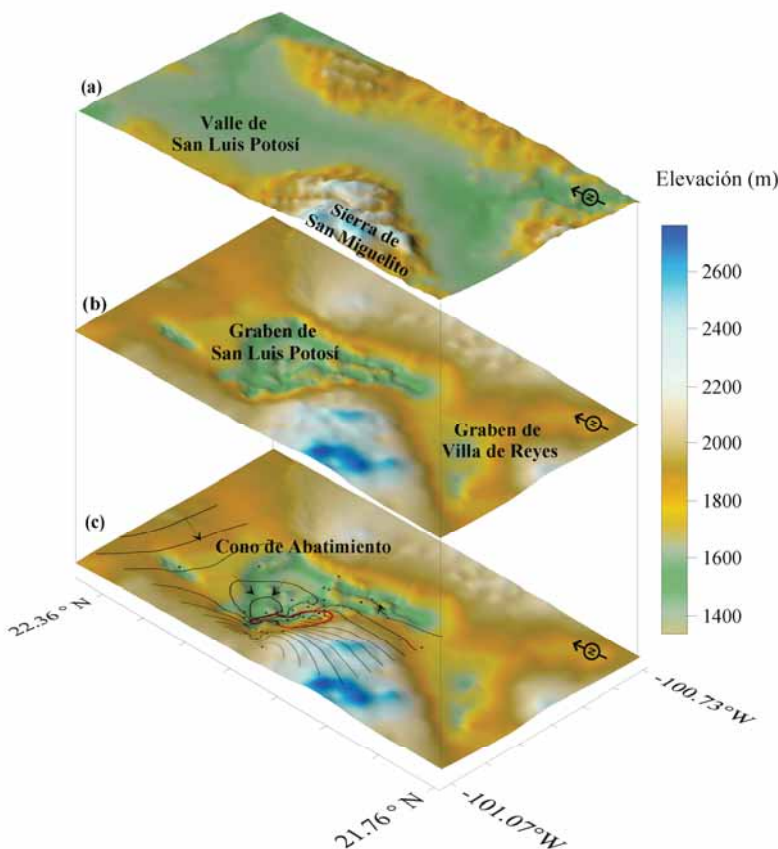


Figura 3. Geometría del subsuelo de la región del Valle de San Luis Potosí y del Valle de Villa de Reyes. a: Elevación topográfica; b: base rocosa del graben de San Luis Potosí y de Villa de Reyes; y c: base rocosa y cono de abatimiento (isopiezas); el contorno rojo indica la zona termal.

del VSLP. Esta dinámica del ciclo hidrológico en el VSLP ocasiona la escasa disponibilidad del agua para la infiltración hacia los acuíferos (García, 2004, Pineda-Martínez *et al.*, 2007).

### Geología

A nivel regional, la columna estratigráfica del Altiplano Potosino incluye rocas sedimentarias y volcánicas cuyas edades van del Cretácico al Reciente (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982; 1992; Tristán-González, 1986; Aguillón-Robles *et al.*, 1994; Nieto-Samaniego *et al.*, 1996; 1997; Aranda-Gómez *et al.*, 2000) (Tabla 1, Figura 6). En la Tabla 1 se describen algunas características hidrogeológicas de las diferentes unidades que componen la columna estratigráfica. Se han identificado rocas sedimentarias del Jurásico en regiones al oriente del área de estudio (Levresse *et al.*, 2003), por lo que se infiere también su presencia en el subsuelo del VSLP. Las rocas sedimentarias del Cretácico están constituidas principalmente por las formaciones El Abra, Tamabra, Indidura y Cuesta del Cura. Estas unidades están ampliamente expuestas en la Sierra de Álvarez y se presentan algunos afloramientos en el valle al Sur de la Sierra de San Miguelito (Tardy *et al.*, 1975; 1976; Labarthe-Hernández *et al.*, 1982; López-Doncel, 2003; Ramos-Leal *et al.*, 2007a).

En el VSLP, las calizas cretácicas fueron cortadas en el pozo Rivera a profundidades de 700 a 1200 m. Su litología está formada por calizas arcillosas de ambientes de cuenca marina. El piso rocoso está formado por la Latita Portezuelo y la Formación Cenicera, ambas del Terciario inferior, las cuales se encuentran sepultadas a diferentes profundidades dentro del valle por cenizas volcánicas y conglomerados intercalados del Terciario medio y por material aluvial y lacustre del Terciario superior y Cuaternario con algunas intercalaciones de basalto de la misma edad. En el VSLP convergen tres sistemas estructurales o grabens formados por los sistemas de fallas N-S, NE-SW y NW-SE. Al sistema NE-SW pertenece el graben de Villa de Reyes (VVR), el cual es interrumpido en el área de estudio por el sistema NW-SE de la Sierra de Álvarez (Tardy *et al.*, 1975; 1976; Tristán-González, 1986; Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001, 2002; Xu *et al.*, 2004; 2005). El sistema N-S se observa claramente hacia el norte de San Luis Potosí (Figura 6) (Ramos-Leal *et al.*, 2007b).

Desde el punto de vista hidrogeológico, las unidades del Jurásico y formaciones cretácicas como la Taraises y La Peña, Cuesta del Cura, Indidura y Soyatal, no tienen condiciones para almacenar agua debido a la presencia de capas de lutita y al contenido arcilloso en las calizas (IPICYT,

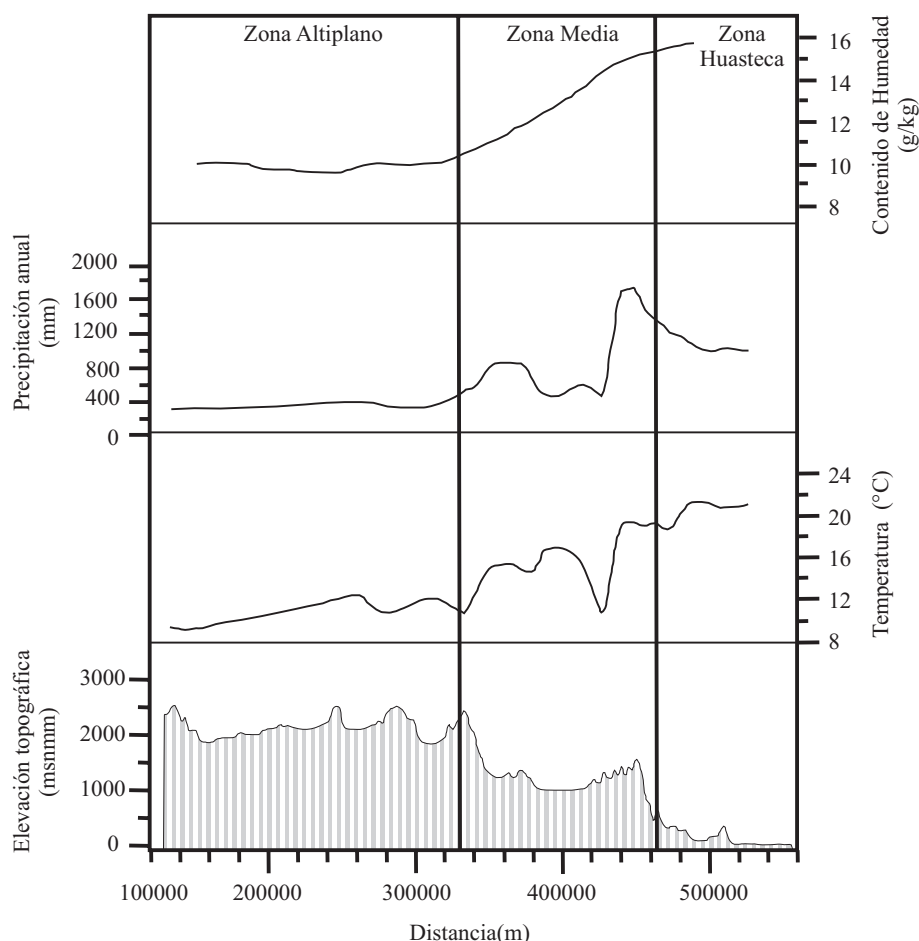


Figura 4. Sección transversal Oeste-Este (latitud norte: 22.05°) de perfiles de (a) humedad relativa media anual, (b) precipitación acumulada media anual, (c) temperatura media anual y (d) elevación de terreno. La sección muestra un corte del Altiplano hacia la zona Huasteca, en las zonas bajas costeras, en un gradiente topográfico pronunciado.

2006). Las formaciones El Abra, El Doctor, los abanicos aluviales, así como las unidades volcánicas Latita Portezuelo y San Miguelito presentan condiciones favorables para almacenar agua debido a la porosidad primaria en el caso de las rocas sedimentarias y al fracturamiento en el caso de las rocas volcánicas. De tal manera que, en el VSLP, el agua subterránea se extrae principalmente de la Latita Portezuelo y de los depósitos aluviales. Como se discutirá más adelante, tanto los cambios de facies sedimentarias en la Sierra de Álvarez, como las estructuras tectónicas que dieron origen a este valle, influyen en la hidrogeología e hidrodinámica del VLSLP (Ramos-Leal *et al.*, 2007b).

#### **Hidrogeología y modelo conceptual del sistema acuífero**

En el área de estudio, el agua subterránea fluye regionalmente a través de los valles de Villa de Reyes y San Luis Potosí con dirección SW-NE. Sin embargo, la geometría en el subsuelo de estos valles presenta muchas irregularidades debido a la presencia de fosas y pilares en su basamento, lo cual modifica localmente las direcciones del flujo regional (Figura 7).

#### **Sistema acuífero**

De los tres acuíferos que forman el sistema acuífero del VSLP, en este estudio se determinó que el somero tiene características de un importante acuífero colgado, debido a que éste es muy superficial, tiene poco espesor (menos de 40 m), presenta una extensión limitada (sólo en la zona urbana) y se origina a partir de una capa de material poco permeable. Está formado por depósitos aluviales con limo, arena y grava de aproximadamente 5 a 40 m de espesor (CNA, 1996). Los resultados de las pruebas de bombeo realizadas en el VSLP y reportados por la CNA en 1996 muestran que la conductividad hidráulica horizontal promedio para el acuífero somero es del orden de  $\sim 2 \times 10^{-4}$  m/s. Debido a la poca profundidad a la que se encuentra, este acuífero es sensible a los efectos estacionales con presencia de contaminantes y con un comportamiento muy dinámico (Carrillo-Rivera y Armienta, 1989).

Una capa de arenisca fina bien litificada, de hasta 60 m de espesor, separa el acuífero somero del acuífero medio. Éste último está compuesto por un medio granular que rellenó las fosas tectónicas y ha sido el más explotado,

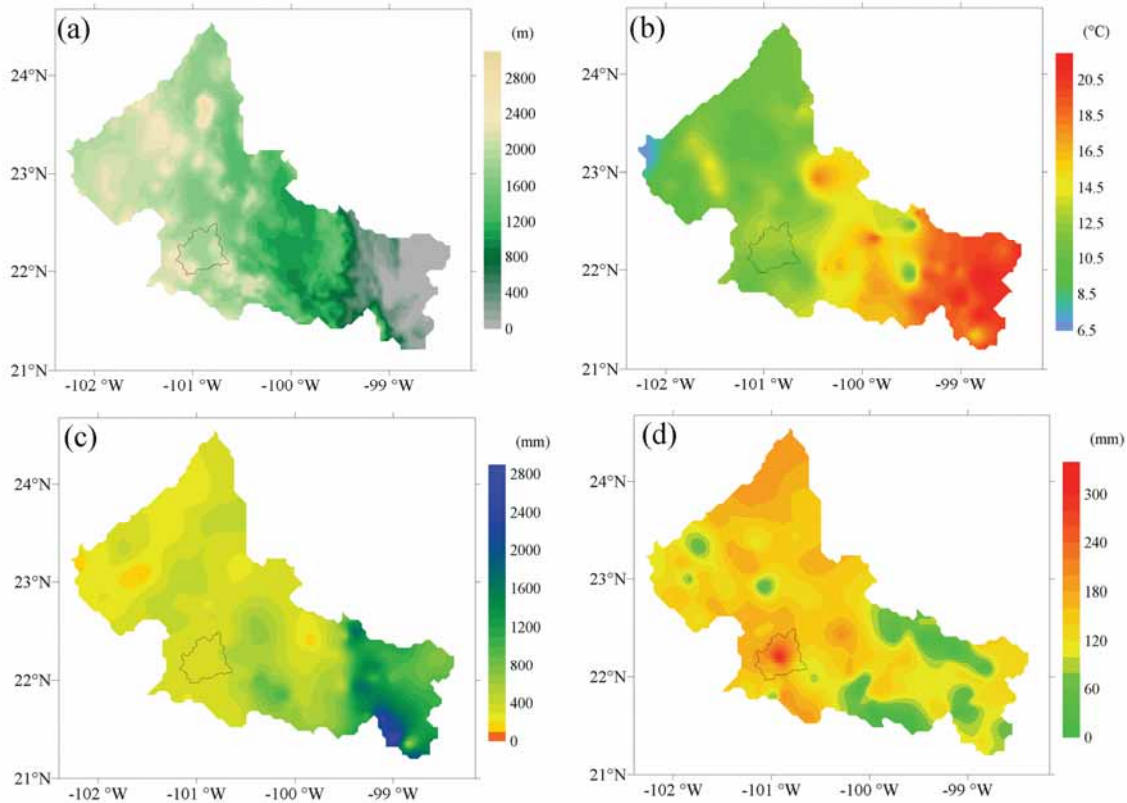


Figura 5. Distribución horizontal de (a) elevación de terreno, (b) temperatura media anual, (c) precipitación media anual y (d) evaporación media anual en el Estado de San Luis Potosí. El contorno interior indica la localización del Valle de San Luis Potosí.

con pozos que alcanzan profundidades de hasta 350 m de material sedimentario (ver Figura 7). Su límite superior se encuentra aproximadamente de 100 a 150 m de profundidad y su espesor varía de 100 a 200 m. La parte central del valle está confinada por una capa sedimentaria poco permeable (arenisca, conglomerado, limo y arcilla) con valores de conductividad hidráulica de  $\sim 1 \times 10^{-4}$  m/s; la temperatura del agua en algunos de los pozos que la penetran alcanzan entre 23 y 27 °C (Carrillo-Rivera *et al.*, 1992). Las estructuras tectónicas (fallas y fracturas) controlan la distribución y espesor del relleno sedimentario, el cual es mayor hacia la parte central de las fosas (Figuras 3 y 7).

El acuífero profundo está formado por un medio fracturado que corresponde a la Latita Portezuelo y proporciona una aportación importante del flujo subterráneo al acuífero intermedio (Figura 7). Los pozos que extraen agua de la roca volcánica fracturada (Latita Portezuelo) producen entre 0.005 y 0.055 m<sup>3</sup>/s. Los pozos más productores se localizan en la zona suroeste del VSLP en las inmediaciones de las zonas de fallas normales que limitan la fosa tectónica, en donde la temperatura del agua subterránea alcanza valores de más de 33 °C. La base del sistema acuífero del Valle de San Luis Potosí está constituida por las formaciones Cenicera e Indidura, compuesta, en el primer caso, por un conglomerado compacto poco permeable y, en el segundo caso, por una caliza arcillosa de muy baja conductividad

hidráulica. El principal flujo de agua subterránea tiene orientación N-S, como se muestra en la Figura 8. En el área de estudio, el flujo con esta orientación puede estar asociado al sistema de fallas con la misma orientación (IPICYT, 2006).

#### Recarga local

Debido a su poca profundidad, el acuífero colgado es muy dinámico y sus niveles responden rápidamente a la época de lluvias pero sus volúmenes de reserva son desconocidos. Por otro lado, las rocas volcánicas fracturadas que bordean el valle y componen la Sierra de San Miguelito están selladas por minerales de origen hidrotermal, lo que las hace impermeables, limitando la recarga local hacia el acuífero profundo (Ramos-Leal *et al.*, 2007b). Debido a la baja permeabilidad de las rocas que conforman esta sierra, la zona es propicia para la construcción de presas cuya agua almacenada es aprovechada para el abastecimiento de la zona urbana de San Luis Potosí.

La Sierra de Álvarez marca un cambio de facies litológicas con características hidrogeológicas diferentes. Hacia el Golfo de México, las rocas son de plataforma y arrecifales con buenas posibilidades de almacenar y transmitir agua. Hacia el VSLP, los sedimentos son principalmente de cuenca, lo cual les da un carácter de baja conductividad hidráulica, con capacidad reducida para transmitir y almacenar



Tabla 1. Comportamiento hidrogeológico de las diferentes unidades estratigráficas encontradas en el Valle de San Luis Potosí (modificada de CNA, 2002 y Labarthe-Hernández *et al.*, 1982).

Edad	Nombre	Descripción	Comportamiento
Q	Aluvión	Materiales heterogéneos, arenas gravas, limos con basaltos intercalados	Semipermeable
	Sedimentos lacustres	Lentes de material fino de mayor espesor en el centro del valle	Acuitardo
	Basalto Las Joyas	Aflora en la porción NE de la zona	Drenados
T E R C I A R I O	Basalto Cabras	Pequeños afloramientos al W de la zona	Drenados
	Riolita Panalillo	Incluye 3 miembros: El superior e intermedio compacto y tobáceo. El inferior es conglomerático	Impermeable los miembros superior e intermedio. Miembro inferior y en zonas fracturadas se comporta como acuífero.
	Ignimbrita Cantera	Aflora en la zona SW del valle en la Sierra San Miguelito	Impermeable. Eventualmente permeable en zonas fracturadas
	Riolita San Miguelito	Aflora en la zona meridional del valle en la Sierra San Miguelito	Impermeable
	Latita Portezuelo	Aflora en la porción suroriental del valle	Acuífero termal en zonas fracturadas. Generalmente, los primeros 100 m son impermeables (fracturas selladas).
	Formación Cenicera	Aflora en la porción suroriental del valle	Horizonte permeable de muy baja potencia
	Formación Cárdenas	Aflora en el flanco N-E del anticlinal de la Sierra de Álvarez	Forma una barrera impermeable y piso rocoso del acuífero.
C R E T Á C I O	Formación Soyatal	Aflora en el flanco N-E del anticlinal de la Sierra de Álvarez	Forma una barrera impermeable.
	Formación Indidura	Aflora en el flanco N-E del anticlinal de la Sierra de Álvarez	Forma una barrera impermeable.
	Formación Cuesta del Cura	Aflora en el núcleo del anticlinal de la Sierra de Álvarez y Cerro de San Pedro	Forma una barrera impermeable.
	Formación El Doctor-Abra	Formada por 2 facies carbonatadas, una de zona lagunar y una de zona arrecifal. Aflora en el flanco N-E del anticlinal borde y oriente de la Sierra de Álvarez.	Condiciones favorables de permeabilidad para ser considerada como zona de recarga o acuífero potencial.
	Formación Tamabra	Facie de la zona de transición entre cuenca y arrecife. Distribuida ampliamente en la Sierra de Álvarez	Buenas condiciones de permeabilidad
	Formación La Peña	Aflora en el núcleo del anticlinal de la Sierra de Álvarez y Cerro de San Pedro	Forma una barrera impermeable
Formación Taraises	Constituida principalmente por lutitas y calizas arcillosas	Baja permeabilidad	
Jurásico	Formación Las Trancas	Las unidades jurásicas están constituidas principalmente por lutitas y calizas arcillosas	Baja permeabilidad

agua. La recarga local en el valle hacia el acuíferos medio y profundo depende de las condiciones de disponibilidad de agua de lluvia, patrones de escurrimiento, cubierta vegetal y la presencia de capas de baja permeabilidad debajo del acuífero colgado por lo que la recarga es limitada, casi despreciable (IPICYT, 2006).

### Flujo regional

El modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico regional planteado en este trabajo difiere de los presentados en estudios previos (Carrillo-Rivera *et al.*, 1992; Carrillo-Rivera, 2000; Carrillo-Rivera *et al.*, 2002; Cardona *et al.*, 2004; Cardona-Benavides *et al.*, 2006). En el modelo tradicional se involucraba a los dos importantes rasgos orográficos (Sierra de Álvarez y Sierra de San Miguelito) como partes importantes en la recarga a los acuíferos profundos. Sin embargo, nuestro análisis indica que éstos no

están funcionando como tal.

A nivel regional la recarga no es favorable debido a los cambios de facies de las rocas carbonatadas de la Sierra de Álvarez perteneciente a la Sierra Madre Oriental. La presencia de rocas carbonatadas en facies arrecifales (formaciones El Doctor y Tamaulipas Inferior) y de plataforma de la Sierra de Álvarez hacia el Golfo de México favorece la recarga de esa región (Figura 7). Sin embargo, hacia el VSLP las rocas carbonatadas son de facies de cuenca (formaciones Indidura y Cuesta del Cura), con un alto contenido de arcilla (caliza arcillosa) que funciona como barrera hidrológica y no permite la recarga de los acuíferos. Por lo tanto, el flujo va de la Sierra de Álvarez hacia el Golfo de México (Figura 7). Por esta razón no se tiene un flujo regional debajo de las rocas volcánicas en el Valle de San Luis Potosí (Figura 8). Un estudio de Mählknecht *et al.* (2004) demostró mediante un modelo numérico que existen descargas hidráulicas de

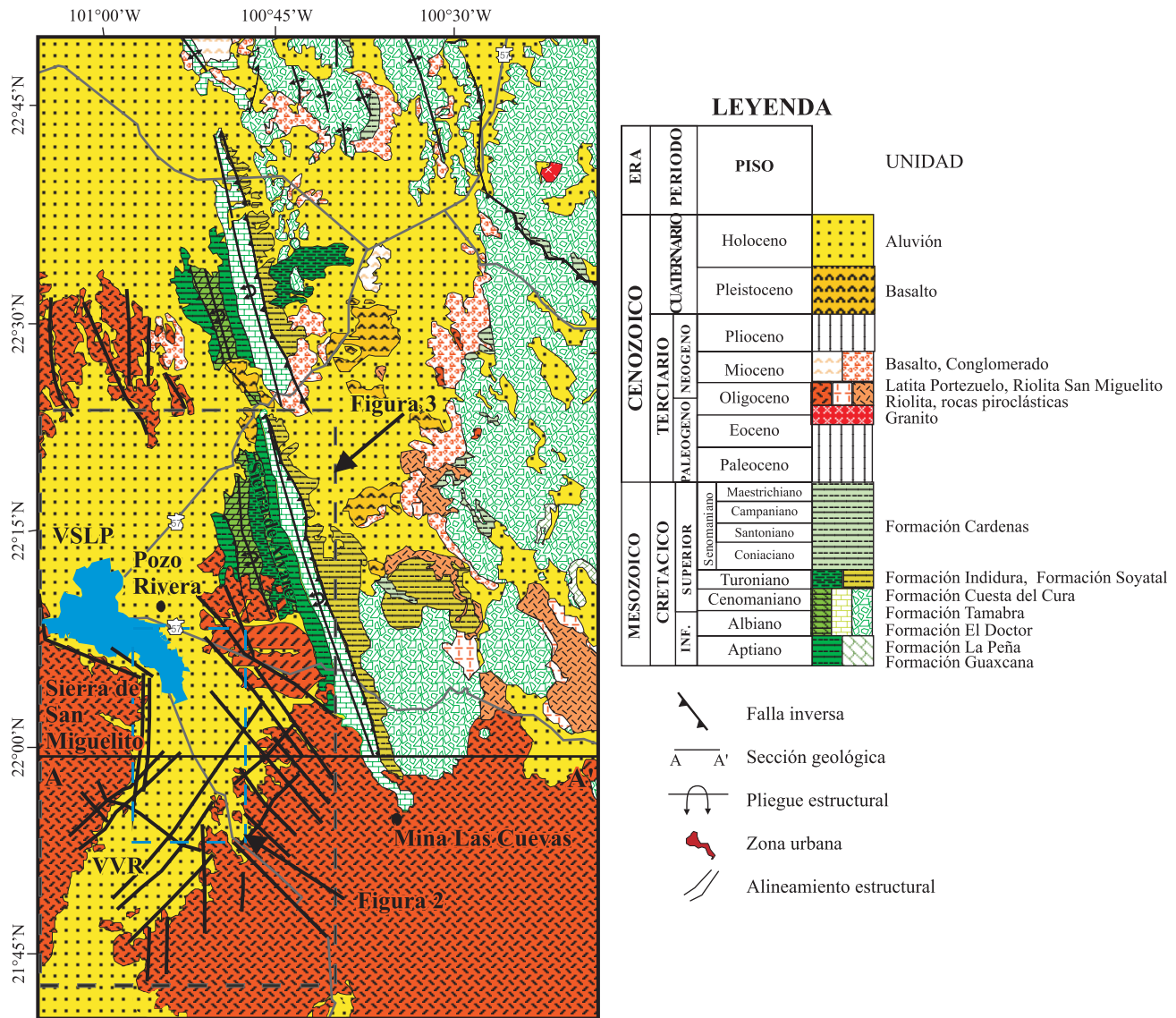


Figura 6. Mapa geol3gico de los valles de San Luis Potos3 y Villa de Reyes (modificado de Labarthe-Hern3ndez *et al.*, 1982). En la figura se muestran recuadros con l3nea discontinua que corresponden a la localizaci3n de las figuras 2 y 3 y la l3nea continua (A-A') es la secci3n mostrada en la Figura 7.

la subcuenca de San Felipe, la cual es parte de la Cuenca Alta del R3o Laja, hacia los acuíferos de Jaral de Berrios y de Villa de Reyes de la cuenca de San Luis Potos3 (Figura 8). Lo anterior explica el origen del flujo regional hacia el VSLP y tambi3n implica que existe un aporte adicional que no ha sido considerado en los balances hidrol3gicos (Carrillo-Rivera *et al.*, 1996; Carrillo-Rivera, 2000). En este contexto se ha identificado un aumento en la temperatura del acuífero medio, lo cual indica un aumento en la extracci3n de los flujos profundos, cuyos tiempos de residencia son m3s largos y presentan una circulaci3n regional. Por esta raz3n, la temperatura del agua extra3da ha aumentado en 15 °C entre 1960 y 2000 (Carrillo-Rivera, 2000) y actualmente m3s del 70% de los pozos de agua potable presentan temperaturas mayores a 30 °C, por lo cual el agua se considera como termal.

**Tiempo de residencia del agua subterr3nea**

En general, los acuíferos son explotados por el hombre en proporciones que exceden por mucho sus tiempos de renovaci3n o de recarga. Bajo estas condiciones de uso, el agua subterr3nea debe considerarse como recurso no renovable. Para determinar la "edad" o tiempo de residencia del agua en un acuífero se utilizan is3topos radioactivos como <sup>3</sup>H, <sup>36</sup>Cl y <sup>13</sup>C. La concentraci3n residual debido al decaimiento radioactivo de los is3topos en el agua subterr3nea indica la edad del agua (que es el tiempo transcurrido desde su infiltraci3n). Cualitativamente podemos suponer que las edades del agua en otras partes del acuífero depender3n de la permeabilidad del subsuelo, distancia a la zona de recarga y profundidad a la que se encuentra. Muestras colectadas en pozos profundos del valle de Villa de Reyes, a 35 kil3metros de la ciudad de San Luis Potos3, (Carrillo-

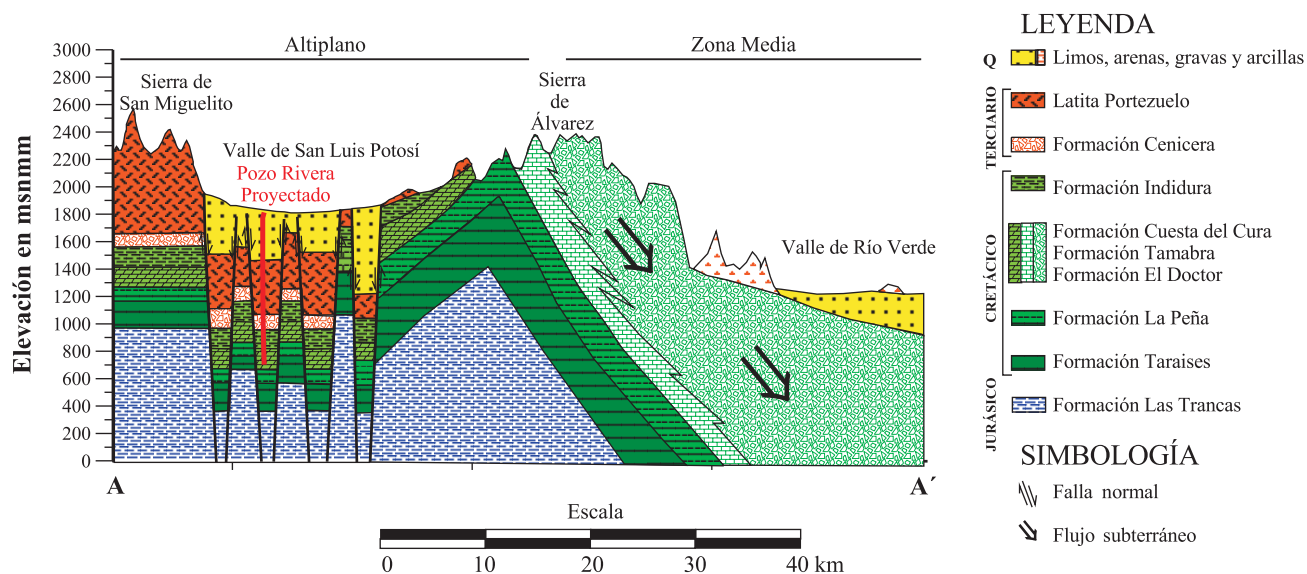


Figura 7. Sección Oeste-Este del Valle de San Luis Potosí (VSLP). La sección corresponde a un corte geológico que va de la Sierra de Álvarez a la Sierra de San Miguelito (la ubicación se muestra en la figura 6). El límite oeste del VSLP es la Sierra de San Miguelito y el límite este es la Sierra de Álvarez. En la figura se muestra la distribución de unidades carbonatadas de baja conductividad hidráulica en el graben del VSLP y rocas con mejores características hidráulicas en la zona media. Se puede observar la presencia de fallas normales formando fosas y pilares dentro del valle. A partir de la estratigrafía de la región, bajo las rocas calcáreas de las formaciones Indidura y Cuesta del Cura, pueden localizarse formaciones como la Peña, Taraises y las Trancas, cuyas característica común es la presencia de material arcilloso y en consecuencia su baja permeabilidad.

Rivera *et al.*, 1992) dieron una edad aproximada de 6000 años. Lo cual nos da una idea de lo antiguas que son las aguas del sistema profundo. En la zona del VSLP, el agua del medio granular tienen edades de 1300 a 2300 años y en el medio fracturado se han identificado edades de 5300 a 6300 años (Cardona *et al.*, 2006), lo cual es congruente con las edades reportadas por Carrillo-Rivera *et al.* (1992), dado que el sistema de flujo es regional como lo propone Mahlknecht *et al.* (2004).

En el desarrollo del cono de abatimiento, la extracción se alimenta de aguas cada vez más antiguas y estas se encuentran en el centro del cono de abatimiento, lo cual es congruente con la edad más antigua (6300 años) reportada en el medio fracturado. Entender el concepto de tiempo de residencia en el acuífero o de edad del agua subterránea nos da idea de lo limitado que es el recurso. Teniendo en cuenta que la recarga del acuífero que estamos explotando sucedió hace miles de años y a decenas de kilómetros del sitio de extracción, los efectos de la recarga mediante la lluvia actual serán experimentados en el futuro en varios miles de años. Además, el crecimiento urbano reduce las zonas de recarga naturales. Por este motivo debemos considerar al agua como un recurso no renovable.

## Factores antropogénicos

### Manejo del agua subterránea

Como parte importante de este trabajo presentamos datos que reflejan las prácticas extensivas de extracción de

agua subterránea realizadas por los organismos encargados de la administración del agua en el valle. En la primera mitad del siglo XIX, la población de San Luis Potosí se abastecía de agua por medio de norias y el uso del agua era principalmente doméstico y de irrigación de pequeños huertos (Sheridan-Prieto, 2001). Para 1960, 59% del agua para uso doméstico era superficial y 41% provenía del acuífero. En la actualidad, 92% del agua es obtenida del subsuelo y sólo el 8% es agua superficial (COTAS-CONAGUA, 2005). Por lo tanto, de acuerdo con Peña (2006) el acuífero de San Luis Potosí ha sido clasificado como un acuífero urbano con base en los siguientes aspectos: 1) la gran cantidad de agua utilizada en uso doméstico (67.2%), en relación con la de uso agrícola (19.8%), industrial (7.7%) y otros usos (4.5%); y 2) el hecho de que la mayor parte del acuífero se encuentra bajo la zona urbana, incrementando el riesgo de contaminación y de subsidencia. Así mismo, la mayor densidad de pozos de extracción se encuentra concentrada en la zona urbana, generando un gran cono de abatimiento.

Actualmente, ya se enfrentan diversas consecuencias de estas prácticas de extracción como son: el constante descenso del nivel piezométrico, el aumento de costos de extracción debido a la mayor profundidad de los niveles de bombeo, la reducción en los volúmenes de producción, la utilización y búsqueda de agua superficial en el valle y fuera de éste para uso potable. En la configuración piezométrica del año 2003 se observa que predomina el cono de abatimiento bajo la ciudad de San Luis Potosí. Los gradientes hidráulicos convergen hacia el cono de abatimiento regional (Figura 8). El cono se ha profundizado 60 m de 1971 a 1995



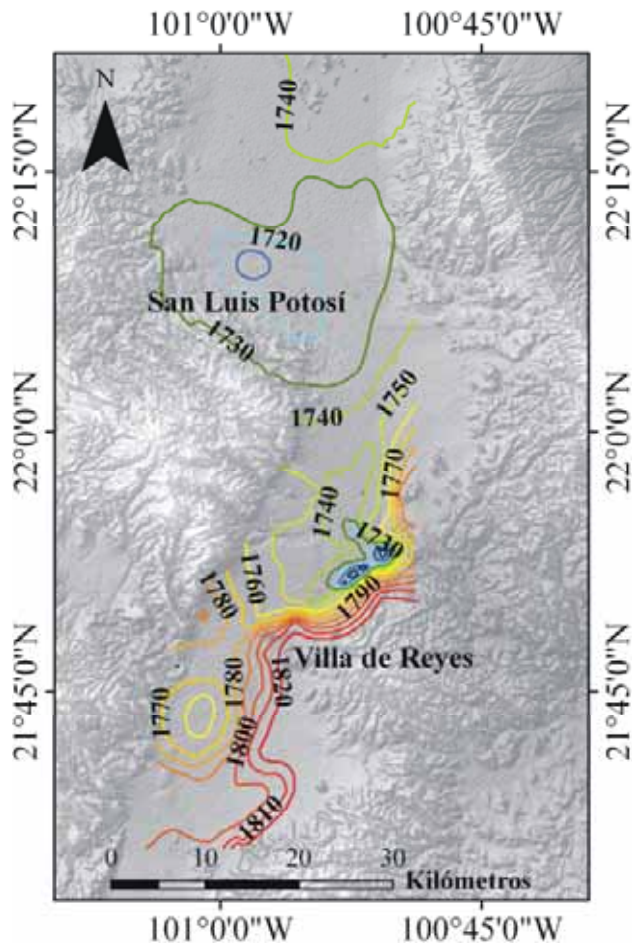


Figura 8. Líneas piezométricas de los valles de San Luis Potosí (VSLP) y de Villa de Reyes. Se observa un mayor abatimiento en la zona del centro del VSLP, donde se localiza la zona urbana de la ciudad de San Luis Potosí. La base de este mapa corresponde al modelo digital de elevación de la zona mostrado en tonos de gris.

(CNA, 1996). Considerando la evolución del nivel estático para el periodo de 1995 a 2001, se observa que durante ese lapso de 6 años la profundidad del nivel estático aumentó hasta 25 m en el centro del cono de abatimiento (Figura 3). Los últimos balances hidrogeológicos de 1995 y 2002 (CNA, 1996, 2002) indican que el volumen de extracción se ha incrementado de  $110.27 \times 10^6$  a  $120.60 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año y el déficit también se incrementó de  $36.66 \times 10^6$  a  $42.5 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año.

Para incrementar el volumen de agua potable se han implementado medidas de manejo del agua como la reducción en los volúmenes otorgados a usuarios y el intercambio de agua subterránea por agua residual tratada para uso agrícola. Sin embargo, estas medidas no resuelven el problema principal de agotamiento del acuífero.

#### **Cambio de uso del suelo**

La población de San Luis Potosí creció en un 30% entre 1950 y 1970 y registró un importante aumento del 50% entre 1970 y 1980. La creciente población permanece

concentrada en los municipios de San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez, causando la fusión de ambas ciudades y un aumento rápido en la demanda de servicios de agua. En el año 2000, el número total de habitantes en los dos municipios era equivalente al 38% del total de la población del estado. Entre los años 2000 y 2005, el área metropolitana de San Luis Potosí incrementó su superficie en 32%, sobrepasando el crecimiento registrado entre 1990 y 2000, el cual fue del 29% (INEGI, 1981, 1991, 2001, 2008). Este acelerado crecimiento urbano representa un fuerte impacto en el uso del suelo que afecta potencialmente a la recarga y extracción del agua subterránea (Sharda *et al.*, 2006).

Como lo muestran nuestros resultados obtenidos a partir del análisis de material cartográfico, imágenes de satélite y SIG, el cambio de superficie urbana más importante fue entre 1970 y 1993, cuando el área urbanizada cuadruplicó su superficie. En el mismo sentido, podemos afirmar que la zona conurbada de San Luis Potosí incrementó 15 veces su tamaño de 1959 a 2005 (Figura 9). Estos cambios ocasionaron el deterioro de las áreas naturales pues se observa también un incremento en la agricultura de riego y los pastizales inducidos, mientras que el pastizal natural y la agricultura de temporal disminuyó considerablemente en los últimos 40 años (Figura 10). Además, con el crecimiento urbano también se incrementan las zonas destinadas a uso industrial y otro tipo de prácticas como la quema de vegetación natural. Todos estos factores no permiten una recarga óptima y favorecen el aumento en la extracción de agua subterránea.

En síntesis, en este estudio se han identificado algunos de los factores más importantes tanto naturales como antropogénicos, que han llevado a un estado de minado del recurso hídrico en el VSLP. Si bien, el estado de fragilidad inicial del acuífero es debido a factores naturales, éste se ha agudizado por la influencia de factores antropogénicos.

## **CONCLUSIONES**

Los factores que dan origen al minado de acuíferos en ambientes áridos como el del VSLP pueden ser de origen natural y antropogénico. Los primeros factores que influyen en el minado corresponden a los componentes naturales del ciclo hidrológico que pueden ser el clima, la geología y la hidrogeología. En tanto que los factores antropogénicos, como el manejo de recurso hídrico y el cambio en el uso de suelo, alteran el ciclo natural y en ocasiones aumentan el desequilibrio del balance hídrico. Las condiciones climáticas limitan la cantidad de lluvia en el VSLP principalmente por efectos de la barrera orográfica que representan la Sierra Madre Oriental y la Sierra de Álvarez, que disminuyen la precipitación, lo cual en combinación con la alta evaporación genera condiciones de aridez en esta región. Prácticamente, la recarga puede ser considerada como nula. La rocas impermeables que constituyen el valle funcionan como barreras laterales y verticales para la recarga y flujo



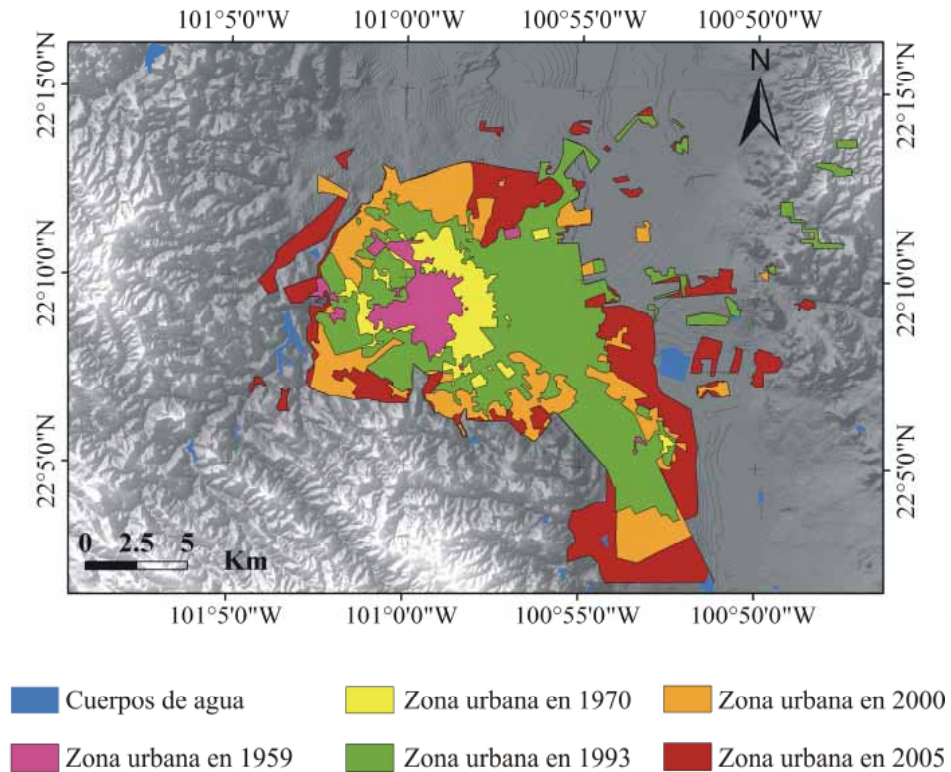


Figura 9. Crecimiento urbano registrado de 1959 a 2005 para la ciudad de San Luis Potosí y área conurbana. La imagen de base es un modelo digital de elevación en tonos de gris.

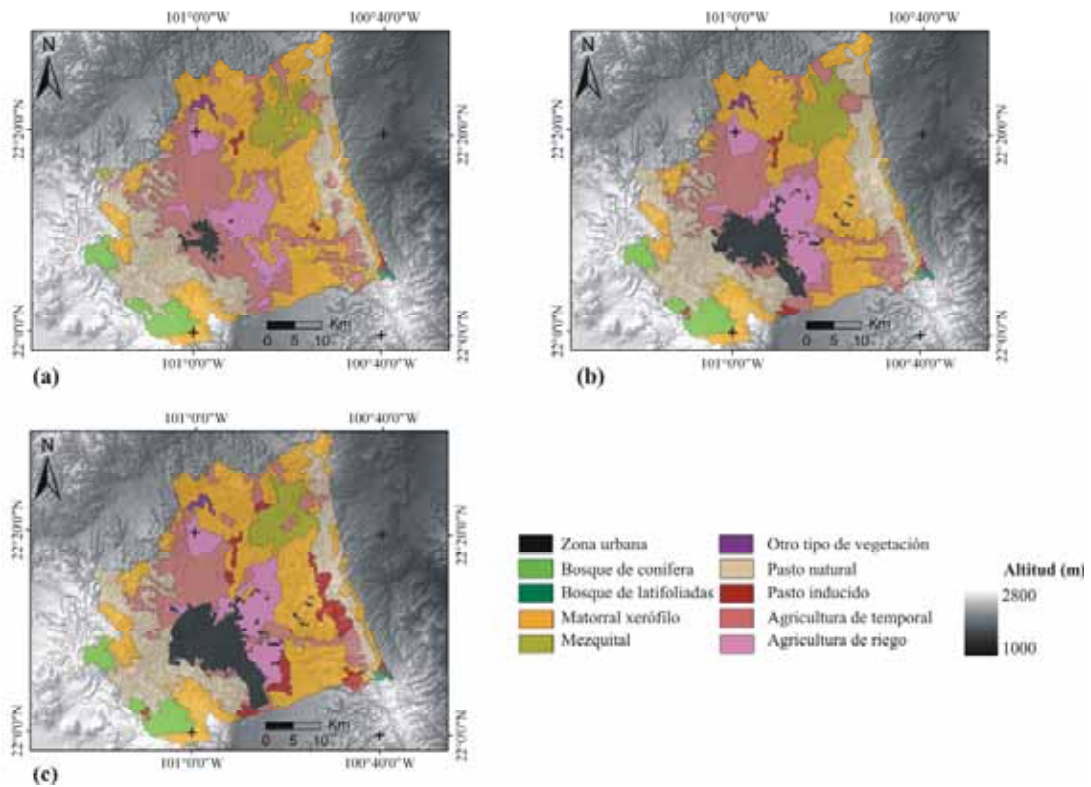


Figura 10. Mapas de uso del suelo para el Valle de San Luis Potosí para los años (a) 1976, (b) 1995 y (c) 2000. En esta figura se observa el aumento de la superficie urbana (negro), del pasto inducido (rojo) y de la agricultura de riego (rosa). Como base de este mapa se observa el modelo digital de elevación en tonos de gris.

subterráneo del acuífero. El sistema de fallas forma fosas y pilares que controlan la hidrodinámica del valle en función de la geometría del acuífero. La infraestructura hidráulica se ha concentrado principalmente dentro de la zona urbana sin considerar esta geometría. Dos zonas importantes (Sierra de Álvarez y Sierra de San Miguelito), tradicionalmente consideradas como zonas de recarga no tienen las condiciones de permeabilidad para recargar al acuífero. Debido a la escasa o nula renovación del agua de mayor tiempo de residencia en el VSLP, cada vez se extrae agua más antigua con edades en el intervalo de 3300 a 6300 años. Los balances realizados en años anteriores coinciden en un desequilibrio debido a que la extracción duplica a la recarga.

Por otra parte, los cambios de uso de suelo observados en los últimos 40 años han ocasionado el deterioro de las áreas naturales actualmente ocupadas por zonas urbanas, zonas industriales, campos de cultivo y pastizales inducidos. El uso de suelo actual en el VSLP no permite una recarga óptima del acuífero. El aumento de la actividad industrial y el crecimiento urbano han producido un incremento en la extracción y deterioro de la calidad del agua subterránea. Los resultados obtenidos del análisis de los factores naturales y antropogénicos identificados para el VSLP, indican que ambos factores afectan a la zona de estudio y han provocado un estado de minado del recurso hídrico.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ing. David Torres Gaytán por su contribución en la preparación del presente trabajo. La Dra. Noyola agradece al CONACYT por el apoyo otorgado para su estancia postdoctoral en el IPICYT. Finalmente queremos expresar nuestro agradecimiento a los revisores externos de la RMCG y al Dr. Carlos González León por sus valiosos comentarios y sugerencias para mejorar el manuscrito.

## REFERENCIAS

- Aguillón-Robles, A., Aranda-Gómez, J.J., Solorio-Munguía, J.G., 1994, Geología y tectónica de un conjunto de domos riolíticos del Oligoceno medio en el sur del estado de San Luis Potosí, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 11(1), 29-42.
- Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F., Reyes-Zaragoza, M.A., Orozco-Esquivel, M.T., Ojeda-García, A.C., Vasallo, L.F., 2001, Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18(2), 129-148.
- Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.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 posteo-cénica del centro de México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 55(1), 12-29.
- American Meteorological Society, 2008, Glossary of Meteorology (en línea): American Meteorological Society, <<http://amsglossary.allenpress.com/glossary/browse?s=g&p=38>>, consulta: 30 de enero de 2008.
- Aranda-Gómez, J.J., Torres-Hernández, R., Carrasco-Núñez, G., Aguillón-Robles, A., 2000, Contrasting styles of Laramide holding across the West-Central margin of the Cretaceous Valles-San Luis Potosí carbonate platform, Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 17(2), 97-111.
- Arreguín-Cortés, F., López-Pérez, M., 2007, An overview of Mexico's water regime and the role of groundwater, *en* Holliday, L., Marin, L., Vaux H. (eds.), *Sustainable Management of Groundwater in Mexico: Proceedings of a workshop. Strengthening science-based decision making in developing countries*: Washington, D.C., National Research Press, 13-25.
- Cardona, A., García-Rangel, A., Carrillo-Rivera, J.J., 2004, Wastewater contamination affecting local flow systems: implications on intermediate and regional systems used for water supply, San Luis Potosí, Mexico, *en* XXXIII IAH, 7° ALHUSUD Congress, *Groundwater flow understanding from local to regional scales: Zacatecas, México*, International Association Hydrogeologist, Latin-American of Underground Hydrology for Development, 4 p.
- Cardona-Benavides, A., 1990, Caracterización físico-química y origen de los sólidos disueltos en el agua subterránea en el Valle de San Luis Potosí: su relación con el sistema de flujo: México, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Maestría, 97p.
- Cardona-Benavides, A., 2007, Hidrogeoquímica de sistemas de flujo regional, intermedio y local resultado del marco geológico en la Mesa Central: Reacciones, procesos y contaminación: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Tesis de Doctorado, 238 p.
- Cardona-Benavides, A., Martínez-Hernández, J.E., Alcalde-Alderete, R., Castro-Laragoitia, J., 2006, La edad del agua subterránea que abastece la región de San Luis Potosí: *Revista Universitarios Potosinos*, Año 2 (7), 20-25.
- Carrillo-Rivera, J.J., 2000, Application of the groundwater-balance equation to indicate interbasin and vertical flow in two drainage basins, Mexico: *Hydrogeology Journal*, 8, 503-520.
- Carrillo-Rivera J.J., Armienta, M.A., 1989, Diferenciación de la contaminación inorgánica en las aguas subterráneas del valle de la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México: *Geofísica Internacional*, 28(4), 763-783.
- Carrillo-Rivera J.J., Clark, I.D., Fritz P., 1992, Investigating recharge of shallow and paleo-groundwaters in the Villa de Reyes basin, SLP, Mexico, with environmental isotopes: *Applied Hydrogeology*, 1(4), 35-48.
- Carrillo-Rivera, J.J., Cardona, B.A., Moss, D., 1996, Importance of the vertical component of groundwater flow: a hydrochemical approach in the valley of San Luis Potosí, México: *Journal of Hydrology*, 185, 23-44.
- Carrillo-Rivera, J.J., Cardona, A., Angeles-Serrano, G., Hergt, T., 2002, Is the San Luis Potosí basin a case of overexploitation?, *en* Geological Society of America, Annual Meeting, Denver, Colorado, paper 70-12.
- Cavazos, T., Hastenrath S., 1990, Convection and rainfall over Mexico and their modulation by the Southern Oscillation: *International Journal of Climatology*, 10, 377-386.
- Comisión Nacional del Agua (CNA), 1996, Actualización Geohidrológica del Valle de San Luis Potosí: México, Comisión Nacional del Agua, reporte técnico, 6 p.
- Comisión Nacional del Agua (CNA), 2002, Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero de San Luis Potosí, estado de San Luis Potosí: México, Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica, reporte, 27 p.
- Comité Técnico del Agua Subterránea (COTAS) y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2005, Estudio técnico respecto a las condiciones geohidrológicas y sociales del acuífero 2411 "San Luis Potosí" en el Estado de San Luis Potosí: San Luis Potosí, Comité Técnico de Agua Subterránea del Acuífero del Valle de San Luis Potosí, reporte, 74 p.
- Cruces de Abia, J., Casado-Sáez, M.E., Llamas-Madurga, M.R., De la Herrador-Portillo, A., Martínez-Cortina, L., 1997, El desarrollo sustentable

- de la Cuenca Alta del Río Guadiana; Aspectos hidrológicos: Revista de Obras Publicas, 144, 7-18.
- Dennehy, K.F., 2000, High Plains regional ground-water study: United States Geological Survey, Fact Sheet FS-091-00, 6 p.
- Escolero-F., O.A., Martínez, S.E., 2006, The Mexican experience with ground water management, *en* The Global Importance of Ground Water in the 21st Century, Proceedings of the International Symposium on Groundwater Sustainability: Alicante, España, National Ground Water Association Press, 24-26.
- García, E., 2004, Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: México, D.F. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Serie Libros, 5a ed., 90 p.
- Gobierno Federal, Gobierno Estatal de San Luis Potosí, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Secretaría de Desarrollo Social, 2002, Plan de Desarrollo Urbano del Estado de San Luis Potosí 2001-2020 (en línea): <[http://ambiental.uaslp.mx/desc/PDU-SLP2000-2020\\_SintesisVFFinal.pdf](http://ambiental.uaslp.mx/desc/PDU-SLP2000-2020_SintesisVFFinal.pdf)>, consulta: 1 de febrero de 2008, 152 p.
- Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI), 1981, Tabulados básicos, X Censo General de Población y Vivienda, 1980, (en cd): México, Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática.
- Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI), 1991, Tabulados básicos, XI Censo General de Población y Vivienda, 1990, (en cd): México, Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática.
- Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI), 2001, Tabulados básicos, XII Censo General de Población y Vivienda, 2000, (en cd): México, Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática.
- Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI), 2008, II Censo de Población y Vivienda 2005: México, Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática.
- Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), 2006, Estudio geológico, geofísico y geohidrológico del predio Ciudad Satélite ubicado entre el Libramiento Oriente y la carretera a Río Verde: San Luis Potosí, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, Reporte inédito para el Instituto de la Vivienda del Estado (INVIES), 60 p.
- INTERAPAS, 2005, Estudio de diagnóstico y planeación integral del 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 (INTERAPAS): San Luis Potosí, Tecnología ASSUL S.A. de C.V., 415 p.
- Labarthe-Hernández, G., Jiménez-López, L.S., 1992, Características físicas y estructura de lavas e ignimbritas riolíticas en la Sierra de San Miguelito, San Luis Potosí: San Luis Potosí, México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto Geología, Folleto Técnico 114, 31 p.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., 1978, Cartografía geológica Hoja San Luis Potosí: San Luis Potosí, México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico No. 69, 41 p.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., Aranda-Gómez, J.J., 1982, Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del estado de San Luis Potosí: San Luis Potosí, México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico 85, 208 p.
- Levresse, G., González-Partida, E., Tritlla, J., Camprubi, A., Cienfuegos-Alvarado, E., Morales-Puentes, P., 2003, Fluid characteristics of the world-class, carbonate-hosted Las Cuevas fluorite deposit (San Luis Potosí, México): Journal of Geochemical Exploration, 78-79, 537-543.
- Llamas, M.R., Garrido, A., 2007, 13 Lessons from intensive groundwater use in Spain: economic and social benefits and conflicts, *en* Giordano, M., Villholth, K.G. (eds.), The Agricultural Groundwater Revolution: opportunities and threats to development: Colombo, Sri Lanka, CAB International, 266-295.
- López-Doncel, R., 2003, La Formación Tamabra del Cretácico medio en la porción central del margen occidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, centro-noreste de México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 20(1), 1-19.
- Mahlknecht, J., Steinich, B., Navarro de León, I., 2004, Groundwater chemistry and mass transfers in the Independence aquifer, central Mexico, by using multivariate statistics and mass-balance models: Environmental Geology, 45(6), 781-795.
- Martínez-Ruiz, V.J., 1984, Control geológico estructural del agua subterránea entre San Luis Potosí, Aguascalientes y Zacatecas: San Luis Potosí, México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico 97, 12 p.
- Martínez-Ruiz, V.J., 1986, Condiciones geohidrológicas actuales del valle de San Luis Potosí: San Luis Potosí, México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico 105, 25 p.
- Martínez-Ruiz, V.J., 1997, Actualización del marco geológico del subsuelo del Valle de San Luis Potosí: San Luis Potosí, México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico 123, 19 p.
- McGuire, V.L., Fischer, B.C., 1999, Water-level changes, 1980 to 1997, and saturated thickness, 1996-1997, in the High Plains aquifer: United States Geological Survey Fact Sheet 124-99, 4 p.
- Mende, A., Astorga, A., Neumann, D., 2007, Strategy for groundwater management in developing countries: A case study in northern Costa Rica: Journal of Hydrology, 334i(1-2), 109-124.
- Nieto-Samaniego, A.F., Macías-Romo, M.C., Alanís-Álvarez, S.A., 1996, Nuevas edades isotópicas de la cubierta volcánica cenozoica de la parte meridional de la Mesa Central de México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 13(1), 117-122.
- Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Alvarez, 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(1), 13-25.
- Peña, F., 2006, Abasto de agua a la ciudad de San Luis Potosí, *en* Barkin, D. (ed.), La Gestión del Agua Urbana en México: Mexico, Universidad de Guadalajara, 249-264.
- Pineda-Martínez, L.F., Carbajal N., Medina-Roldán, E., 2007, Regionalization and classification of bioclimatic zones applying principal components analysis (PCA) in the central-northeastern region of México: Atmósfera 20(2), 133-146.
- Ramos-Leal, J.A., López-Loera, H., Martínez-Ruiz, V.J., Aranda-Gómez, J.J., 2007a, Sucesión de eventos y geometría de la parte central del acuífero del graben de Villa de Reyes (San Luis Potosí, Mexico) inferida a partir de datos geoelectrónicos: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 24(1), 31-46.
- Ramos-Leal, J.A., Martínez-Ruiz, V.J., Rangel-Méndez, J.R., Alfaro de la Torre, M.C., 2007b, Hydrogeological and mixing process of waters in aquifers in arid regions: a case study in San Luis Potosí Valley, Mexico: Environmental Geology, 53, 325-337.
- Scott, C.A., Garcés-Restrepo, C., 2000, Sustainability of groundwater trends in the Río Lerma-Chapala (en línea): <<http://www.iica.org.uy/p2-13.htm>>.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1977, Estudio geohidrológico de evaluación y censo de los Estados de San Luis Potosí y Zacatecas, 1a. parte, Zona San Luis Potosí, Contrato EIGZA-77-16G.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1988, Estudio Geofísico Geohidrológico del Valle de San Luis Potosí. Reporte, 138 p.
- Shamir, U., 2000, Sustainable management of water resources, *en* Transition to Sustainability in the 21st Century, Interacademy Panel on International Issues, Tokyo, Japan: Washington D.C., The National Academies Press, 62-66.
- Sharda, V.N., Kurothe, R.S., Sena, D R., Pande, V.C., Tjwari, S.P., 2006, Estimation of groundwater recharge from water storage structures in a semi-arid climate of India: Journal of Hydrology, 329, 224-243.
- Sheridan-Prieto, C., 2001, Indios madrineros Colonizadores tlaxcaltecas en el noroeste novohispano: Estudios de Historia Novohispana, 24, 24p

- Stavric, V., 2004, Aquifer overexploitation and groundwater mining, *en* Balwois 2004, Conference on Water Observation and Information System for Decision Support, Ohrid, República de Macedonia, 25-29 mayo: Institut de Recherche pour le Développement, 9 p.
- Stretta, E.J.P., Del Arenal, R., 1961, Carta geohidrológica provisional de la Cuenca de San Luis Potosí, S.L.P., México: Roma, Instituto de Ciencia Aplicada, Sección de Hidrología y Misión de Geohidrología de la UNESCO, Instituto de Geología, UNAM.
- Tardy, M., Longoria, J.F., Martínez-Reyes, J., Mitre, L.M., Patiño, M., Padilla y Sánchez, R.J., Ramírez-R., C., 1975, Observaciones generales sobre la estructura de la Sierra Madre Oriental; la aloctonía del conjunto Cadena Alta-Altiplano Central, entre Torreón, Coah. y San Luis Potosí, S. L. P.: Universidad Nacional Autónoma de México, Revista del Instituto de Geología, 1, 1-11.
- Tardy, M., Ramírez-R, C., Patiño-A, M., 1976, El frente de la Napa de Parras (Conjunto Cadena Alta-Altiplano Central) en el área de Aramberri, N.L., Sierra Madre Oriental, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Revista del Instituto de Geología, 2, 1-12.
- 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.
- Van Steenbergen, F., Oliemans, W., 1997, Groundwater resource management in Pakistan, *en* Schrevel, A. (ed.), IRLI workshop: Groundwater Management: sharing responsibility for an open access resource, Proceedings of the Wageningen Water Workshop 1997: The Netherlands, ILRI, 93-110.
- Xu, S.S., Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A., 2004, Tilting mechanisms in domino faults of the Sierra San Miguelito, central Mexico: *Geologica Acta*, 2(3), 189-201.
- Xu, S.S., Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A., 2005, Power-law distribution of normal fault displacement and length and estimation of extensional strain due to normal faults: A case study of the Sierra de San Miguelito, Mexico: *Acta Geologica Sinica*, 79(1), 36-42.

Manuscrito recibido: Marzo 12, 2008

Manuscrito corregido recibido: Enero 19, 2009

Manuscrito aceptado: Enero 19, 2009