



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA

PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO EN CIENCIAS  
AMBIENTALES

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

## MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

**ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA SUBSIDENCIA EN EL ESTADO DE  
SAN LUIS POTOSÍ (MÉXICO) COMO HERRAMIENTA DE LA GESTIÓN AMBIENTAL**

PRESENTA:

**IVÁN LEONARDO HERRERA PÉREZ**

**DIRECTOR DE TESIS:**

DRA. PATRICIA JULIO MIRANDA

**ASESORES:**

DR. ÁLVARO GERARDO PALACIO APONTE

DR. RUBÉN ALFONSO LÓPEZ DONCEL

**Agosto 2012**

# **CRÉDITOS INSTITUCIONALES**

**PROYECTO REALIZADO EN:  
SAN LUIS POTOSÍ (MÉXICO)**

**CON FINANCIAMIENTO DE:  
UASLP**

**A TRAVÉS DEL PROYECTO DENOMINADO:  
EVALUACIÓN DE AMENAZAS EN SAN LUIS POTOSÍ**

**AGRADEZCO A CONACyT EL OTORGAMIENTO DE LA BECA-TESIS  
Becario No. 247920**

**LA MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES RECIBE APOYO ATRAVÉS  
DEL PROGRAMA NACIONAL DE POSGRADOS DE CALIDAD (PNPC)**

*“...El hombre se muestra precario ante las inclemencias y catástrofes, pero sólo cuando no es precavido. El riesgo que debemos prevenir, es decir, del cual debemos guardarnos es no olvidar nuestra fragilidad, la cual no se puede suplir con mejores viviendas o mejores programas de emergencia.”*

Javier Kasahara B.  
Los desastres naturales y el habitar humano:  
una reflexión antropológica del medio ambiente

X Jornadas de filosofía  
Ética y política: reconstrucción humana después de la catástrofe  
Concepción (Chile), noviembre 9 de 2010

*A mi esposa Laura Marcela,  
quien me enamora todos los días,  
sin hacer antigüedad, evitando la monotonía.*

*A mi pequeña María Paula.  
Aunque aún no sabes leer, algún día vas a aprender  
y sabrás que esta tesis es para ti.*

*A mis padres y mi hermana.  
Con su inmenso amor hicieron de mí  
lo que soy ahora.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi esposa Laura Marcela y mi hija María Paula, que dejaron su patria para ofrecerme su amor, compañía y apoyo incondicionales.

A mis padres Vicente Herrera y Leonor Pérez y mi hermana Jenny, quienes han creído en mí y me han alentado, guiado y ayudado en este y en todos los proyectos de mi vida.

A mis amigos del posgrado, por las sesiones de estudio, los ensayos de seminarios de tesis y los multidisciplinarios, y en general a todos los compañeros de quienes siempre aprendí.

A la Dra. Patricia Julio Miranda, directora de esta tesis, que depositó toda su confianza en mí para su realización. Así mismo, a los miembros del comité tutelar Dr. Álvaro Gerardo Palacio Aponte y Dr. Rubén Alfonso López Doncel, cuyas acertadas observaciones enriquecieron el resultado final; y al Dr. Guillermo Javier Castro Larragoitia, sinodal del examen, quien se tomó el tiempo para leer el texto final y realizar aportes significativos.

A los Programas Multidisciplinarios de Posgrado en Ciencias Ambientales-PMPCA de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), en cabeza del Dr. Roberto Briones Gallardo, por la oportunidad realizar mis estudios de posgrado y la colaboración para concluir con éxito esta etapa.

Al Dr. Valente Vázquez Solís, coordinador de la Licenciatura en Geografía en la Coordinación de Ciencias Sociales y Humanidades (CCSyH) de la UASLP, el cual a través del Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota (SIG-PR) muy amablemente proporcionó la información cartográfica necesaria para la realización de esta tesis.

Al Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en Morelia, Michoacán; donde tuve la oportunidad de recibir clases sobre temas relacionados con este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico a través de la asignación de beca de posgrado.

*Y por encima de todo, gracias a Dios que siempre iluminó mi camino.*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b>	<b>I</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>II</b>
PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN	II
OBJETIVOS	III
General	III
Específicos	III
<b>CAPÍTULO 1. SUBSIDENCIA DEL TERRENO, GESTIÓN DEL RIESGO Y GESTIÓN AMBIENTAL</b>	<b>1</b>
1.1 SUBSIDENCIA DEL TERRENO	1
1.1.1 Subsidencia del terreno a nivel mundial	4
1.1.2 Subsidencia del terreno en México	5
1.1.3 Subsidencia del terreno en San Luis Potosí	7
1.2 GESTIÓN DEL RIESGO Y SU RELACIÓN CON LA GESTIÓN AMBIENTAL	13
<b>CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO</b>	<b>17</b>
2.1 UBICACIÓN	17
2.2 GEOLOGÍA	17
2.2.1 Estratigrafía	17
2.2.2 Minería	23
2.3 FISIOGRAFÍA	27
2.3.1 Mesa Central	27
2.3.2 Sierra Madre Oriental	29
2.3.3 Llanura Costera del Golfo	31
2.4 HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA	31
2.4.1 Regiones Hidrológicas y cuencas	31

2.4.2 Hidrogeología	33
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA</b>	<b>45</b>
3.1 IDENTIFICACIÓN DE FACTORES CONDICIONANTES	46
3.2 PREPARACIÓN DE INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA	49
3.3 ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A LA SUBSIDENCIA DEL TERRENO	52
3.3.1 Hidrogeología	53
3.3.2 Geología y minería	58
3.3.3 Análisis de susceptibilidad total	65
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>67</b>
4.1 HIDROGEOLOGÍA	67
4.2 SUSCEPTIBILIDAD POR FACTORES HIDROGEOLÓGICOS	73
4.3 GEOLOGÍA	76
4.4 MINERÍA	80
4.5 SUSCEPTIBILIDAD POR FACTORES GEOLÓGICOS	80
4.6 SUSCEPTIBILIDAD TOTAL	80
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>87</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>92</b>
<b>FUENTES CARTOGRÁFICAS</b>	<b>99</b>
<b>ANEXO</b>	<b>101</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de subsidencia del terreno	1
Tabla 2. Notas de prensa relacionadas con fenómenos de hundimientos en el periodo 2004 – 2010	11
Tabla 3. Regiones mineras	25
Tabla 4. Regiones hidrológicas y cuencas	33
Tabla 5. Características de los acuíferos en San Luis Potosí	35
Tabla 6. Factores condicionantes de subsidencia del terreno	47
Tabla 7. Capas utilizadas	50
Tabla 8. Parámetros cartográficos utilizados	52
Tabla 9. Valores de $W$ para pozos	57
Tabla 10. Intervalos de $W_H$ para la susceptibilidad	58
Tabla 11. Grupos de rocas y valores de $W_I$	61
Tabla 12. Valores de $W_f$ para lineamientos	62
Tabla 13. Número de minas por mineral extraído	64
Tabla 14. Valores de $W_m$ para minería	64
Tabla 15. Intervalos de $W_G$ para la susceptibilidad	65
Tabla 16. Intervalos de $W_T$ para la susceptibilidad	65
Tabla 17. Intervalos para la reclasificación	66
Tabla 18. Cabeceras municipales por grado de susceptibilidad total	86

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ambientes geológicos que favorecen los agrietamientos	3
Figura 2. Formación de fallas y grietas superficiales	8
Figura 3. Mapa de amenazas de subsidencia del terreno	10
Figura 4. Modelo de gestión del riesgo	15
Figura 5. Producción y valor de producción de recursos minerales	24
Figura 6. Regiones mineras del estado	26
Figura 7. Cantidad de acuíferos explotados por estado	38
Figura 8. Relación extracción/recarga de los acuíferos en S.L.P.	39
Figura 9. Uso y gasto del agua	41
Figura 10. Proceso metodológico para la evaluación de susceptibilidad	47

## LISTA DE MAPAS

Mapa 1. Ubicación del área de estudio	18
Mapa 2. Geología. Estratigrafía y lineamientos	19
Mapa 3. Provincias fisiográficas	28
Mapa 4. Regiones y cuencas hidrográficas	32
Mapa 5. Límites de acuíferos y volúmenes de extracción	40
Mapa 6. Zonas de veda	44
Mapa 7. Cuadrícula guía	54
Mapa 8. Localización de aprovechamientos de agua subterránea	55
Mapa 9. Geología simplificada y lineamientos	59
Mapa 10. Explotaciones mineras	63
Mapa 11. Cuadrícula densidad de pozos	69
Mapa 12. Cuadrícula volumen concesionado	71
Mapa 13. Cuadrícula gasto	72
Mapa 14. Cuadrícula tipo de veda	74
Mapa 15. Cuadrícula susceptibilidad factores hidrogeológicos	75
Mapa 16. Cuadrícula litología	77
Mapa 17. Cuadrícula lineamientos	79
Mapa 18. Cuadrícula minería	82
Mapa 19. Cuadrícula susceptibilidad factores geológicos	83
Mapa 20. Cuadrícula evaluación de la susceptibilidad	84
Mapa 21. Análisis de susceptibilidad a subsidencia	85

## RESUMEN

La subsidencia del terreno es un fenómeno que se presenta en diversos lugares del mundo, y se manifiesta mediante hundimientos diferenciales de la superficie del suelo y agrietamientos en la infraestructura, asociado a diferentes factores que lo originan, básicamente la explotación de fluidos del subsuelo, presencia de rocas solubles y colapso de cavidades subterráneas. En el estado de San Luis Potosí, este fenómeno ha sido estudiado en la ciudad capital, aunque se tienen reportes de manifestaciones del fenómeno en diferentes localidades; sin embargo no se ha realizado un estudio a nivel estatal.

El presente trabajo busca determinar las zonas y grados de susceptibilidad a fenómenos de subsidencia del terreno identificando los elementos que favorecen la ocurrencia de este fenómeno, mediante el uso de una metodología en la que a las diferentes variables se les asigna un peso de acuerdo a sus características y la suma del peso de cada variable permite realizar la zonificación y expresarla a través de un mapa.

De esta forma se obtuvieron cinco zonas, clasificadas como muy baja, baja, media, alta y muy alta susceptibilidad, las cuales indican la propensión del terreno a ser afectado por el fenómeno de subsidencia; en el que las cabeceras municipales afectadas de acuerdo a diversas fuentes, se ubican en áreas de media a muy alta susceptibilidad.

## **INTRODUCCIÓN**

### **PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN**

La subsidencia del terreno es un fenómeno natural que se caracteriza por el descenso irregular del nivel del suelo de manera paulatina y se manifiesta mediante daños y agrietamientos en inmuebles y la infraestructura en general en áreas urbanas, así como hundimientos y agrietamientos del terreno en zonas rurales. Tiene diferentes orígenes, siendo la más común la explotación de aguas subterráneas y sus consecuencias implican impactos sociales como el abandono de viviendas y deterioro de las mismas, impactos económicos representados en la inversión para restauración de edificaciones y líneas vitales e impactos ambientales que incluyen cambios en el paisaje, agotamiento de las fuentes de agua y contaminación de acuíferos.

Se consultaron trabajos técnicos que se han realizado desde el año 2004 pero que se centran en la ciudad de San Luis Potosí, mientras que desde el mismo año, diferentes diarios han reportado manifestaciones de este fenómeno en varias zonas del Estado, poniendo de manifiesto la falta de información técnica para los demás municipios de la entidad que permita una adecuada gestión del riesgo.

El análisis de la susceptibilidad a la subsidencia del terreno es el primer paso en la gestión del riesgo, que se puede enmarcar dentro del Ordenamiento Ecológico como parte del reconocimiento del territorio y sus elementos físicos, así como en las evaluaciones de impacto ambiental que permitan identificar la influencia de las actividades humanas y sus consecuencias sobre el ambiente, convirtiéndose de esta manera en un instrumento de gestión ambiental.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Determinar las zonas y grados de susceptibilidad a fenómenos de subsidencia del terreno en el estado de San Luis Potosí (México), identificando los elementos que favorecen la ocurrencia de este fenómeno.

### **Específicos**

1. Identificar las características naturales del terreno que condicionan la ocurrencia del fenómeno de subsidencia del terreno y favorecen su desarrollo.
2. Determinar los elementos de carácter natural o antrópico que actúan como detonantes del fenómeno.
3. Generar un mapa de zonificación con rangos de muy baja a muy alta susceptibilidad a fenómenos de subsidencia del terreno utilizando herramientas SIG.
4. Plantear los resultados obtenidos como una herramienta para la gestión del riesgo en relación a la gestión ambiental.

# CAPÍTULO 1. SUBSIDENCIA DEL TERRENO, GESTIÓN DEL RIESGO Y GESTIÓN AMBIENTAL

## 1.1 SUBSIDENCIA DEL TERRENO

La subsidencia del terreno es un movimiento descendente y diferencial del suelo relativo a un dátum, debido a su compactación gradual y la reducción de la presión del agua en los poros, con tasas variables de entre algunos milímetros a metros por año, causando daños en edificios, vías de comunicación, puentes e infraestructura en general, pérdida de vidas y daños ambientales tales como la disminución del agua subterránea y el deterioro de su calidad (Arzate et al., 2006; De Justo & Vázquez, 2004; Marfai & King, 2007 y Rodríguez & Rodríguez, 2006).

La subsidencia del terreno es un fenómeno asociado a diversas causas, de tipo natural como el colapso de cavernas, influenciadas por el hombre como el derrumbe de túneles mineros o la explotación intensiva de acuíferos (Bell et al., 2005; Marfai & King, 2007; Mousavi et al., 2001), como se puede apreciar en la Tabla 1, que recopila la clasificación de los tipos de subsidencia del terreno propuesta por el National Research Council (1991).

<b>Tabla 1. Tipos de subsidencia del terreno</b>	
<b>Colapso de cavidades subterráneas</b>	
Minería	Desplome de túneles, por lo general antiguos o abandonados
Hundimientos	Derrumbe de cavidades generadas por la disolución de rocas.
<b>Compactación</b>	
Extracción de fluidos subterráneos	La explotación de fluidos confinados en el subsuelo genera un descenso de la presión y el consecuente colapso de los poros, dando como resultado la compactación del suelo.
Compactación natural	Se produce por la compactación de sedimentos antiguos cubiertos por sedimentos más recientes, generando una subsidencia del terreno regional, con tasas muy bajas. Puede incrementar la posibilidad de flujos de tierra.

<b>Tabla 1. Tipos de subsidencia del terreno</b>	
Hidrocompactación	Se presenta en suelos colapsables compuestos por dos tipos de sedimentos: flujos de lodo y loess; debido a su baja densidad hay un colapso de la estructura del suelo que genera una compactación, dando lugar a una subsidencia del terreno muy localizada.
Licuefacción	La saturación del suelo, provoca que los granos que lo componen dejen de estar en contacto y el material se comporta como un líquido. <sup>1</sup>
<b>Drenaje de suelos orgánicos</b>	Los suelos orgánicos están expuestos a diferentes procesos que pueden inducir la compactación y reducción de su volumen.
<b>Derretimiento del permafrost</b>	El suelo permanentemente congelado se denomina permafrost y es característico de algunas zonas de Canadá, Alaska y Siberia. Por lo general el volumen de hielo presente rompe la unión entre las partículas del suelo. El deshielo provoca entonces que el material se transforme en barro poco resistente. <sup>1</sup>
<b>Deformación de la corteza</b>	
Vulcanismo	Estos fenómenos causan la densificación y compactación del terreno como consecuencia del reajuste de partículas debido a la vibración. <sup>2</sup>
Sismicidad	
Deformación posglacial	Durante la época glacial, el peso de las masas de hielo provocó subsidencia del terreno de hasta cientos de metros, así durante la deglaciación, la superficie se elevó nuevamente. <sup>3</sup>

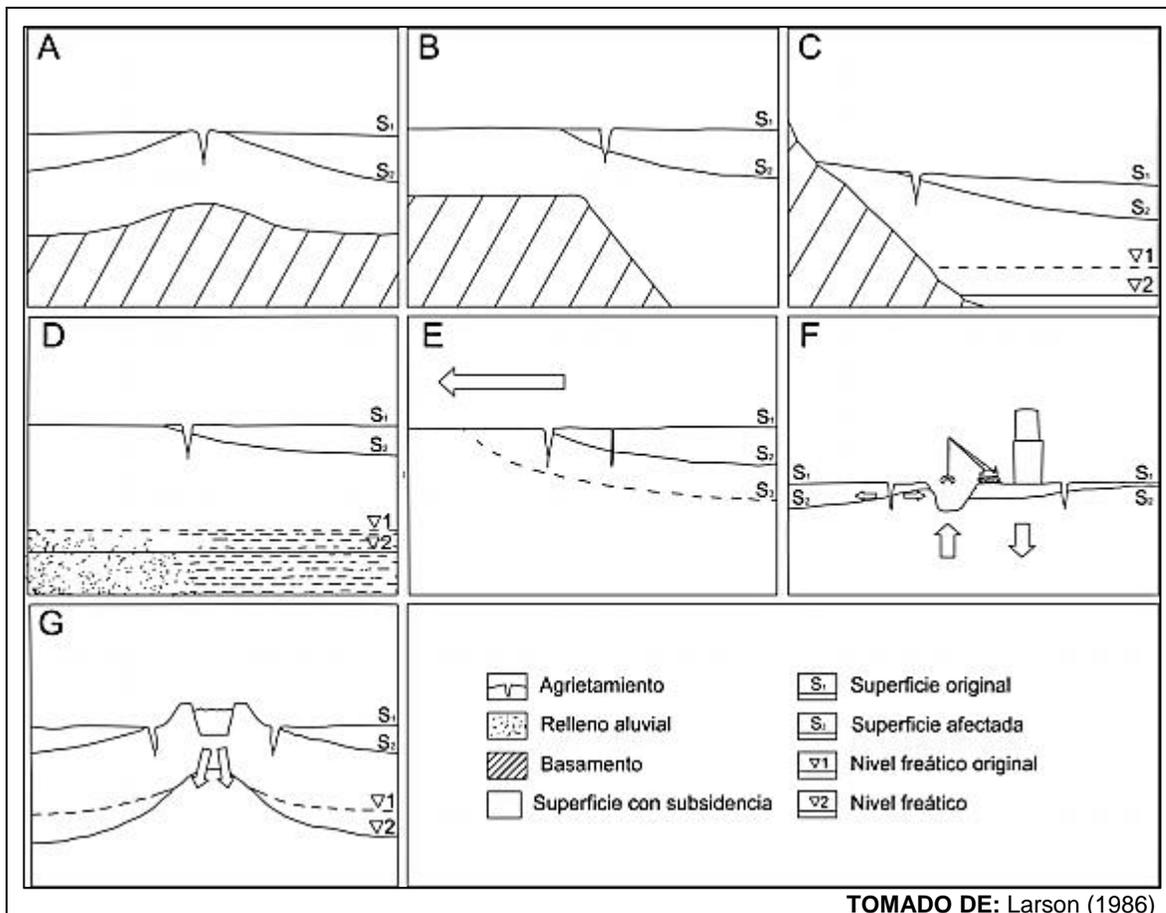
**FUENTE:** National Research Council (1991)

<sup>1</sup> González et al. (2004)

<sup>2</sup> Tomás et al. (2009)

<sup>3</sup> Protti et al. (2010)

Adicionalmente, Larson (1986) describió siete ambientes geológicos que favorecen el desarrollo de áreas de subsidencia del terreno con base en las formas del basamento y los cambios en los materiales del subsuelo, los cuales se esquematizan y describen en la Figura 1.



**Figura 1. Ambientes geológicos que favorecen los agrietamientos**

- A. Presencia de colinas enterradas pueden generar un perfil convexo con fisuras directamente sobre la cima o a cierta distancia de esta.
- B. Presencia de escarpes enterrados de origen tectónico o erosional desarrollan agrietamientos en los puntos donde se presentan cambios en la pendiente
- C. Líneas de quiebre en la pendiente del basamento, se presentan en las áreas donde la profundidad original del nivel freático es muy cercano al basamento y las grietas se forman paralelas a la línea de quiebre.
- D. Cambio en los sedimentos debido a que los de grano fino tienden a compactarse más que los de grano grueso, por lo que se generará una subsidencia del terreno diferencial formando grietas en la zona de cambio.
- E. Cambios en el frente de avance de la subsidencia del terreno, el cual irá cambiando en el tiempo generando nuevas zonas de agrietamientos.
- F. Cambios en la carga vertical del suelo que compactan el terreno como consecuencia de fuerzas artificiales.
- G. Áreas cercanas a zonas de recarga debido al movimiento de aguas subterráneas que favorecen la subsidencia del terreno.

### **1.1.1 Subsistencia del terreno a nivel mundial**

La subsidencia del terreno es un fenómeno de amplia distribución en el mundo y sobre el cual existen numerosos trabajos, de los cuales la siguiente es sólo una pequeña muestra. En la ciudad de Prato (Italia) se realizó un monitoreo mediante radar satelital, con lo que se estableció que la tasa de subsidencia del terreno es cercana a los 8.3 cm/año en el período 1993-2000, debido a la explotación de acuíferos para uso industrial (Raucoules, et al., 2003).

En China el fenómeno se presenta en varias zonas, Chai et al. (2004) reportan una subsidencia del terreno de 2-3 m en el área central de Shangai debido a la explotación neta de 113 millones de m<sup>3</sup> de agua subterránea en el periodo 1990-2001, Xue et al. (2005) identificaron las provincias en las que se presenta el fenómenos con mayor intensidad y más recientemente Shi et al. (2007), reconocieron áreas de subsidencia del terreno al E de la República en la zona de Su-Xi-Chang, alcanzando una media acumulada de 1 m con máximos cercanos a los 2 m a finales del siglo XX.

Babel et al. (2006) indican que en los últimos cuarenta años, la ciudad de Bangkok y otras seis provincias en Tailandia han sido afectadas por fenómenos de subsidencia del terreno con valores de 50-60 cm, debido principalmente a la explotación de acuíferos con fines industriales y domésticos. El valor más alto de extracción de agua se presentó en 1981 con un gasto diario de 500,000 m<sup>3</sup>, el cual ha disminuido a aproximadamente 500 m<sup>3</sup>/día, debido principalmente a la Política de Administración Sostenible del Agua (SWMP por sus siglas en inglés) encaminada al uso racional del agua en las ciudades del continente asiático.

En Taiwán, a partir de la década del 70 se inició la explotación de acuíferos con destino a la actividad acuícola principalmente, dando como resultado subsidencia del terreno del terreno, no obstante las políticas y restricciones impuestas por el gobierno (Chou & Ting, 2007).

Johnson (2005) menciona la subsidencia del terreno ocurrida naturalmente debido a la disolución de evaporitas, roca sedimentaria de precipitación química presente en cerca del 35-40% del territorio estadounidense.

En Indonesia, Abidin et al. (2001) determinaron la tasa de subsidencia del terreno de Jakarta, la ciudad capital, en 80 cm para el período 1982-1991, 160 cm durante el periodo 1991-1997 y 20 cm en el periodo 1997-1999. Marfai & King (2007) realizaron un trabajo en la ciudad de Semarang en la que se manifiesta este fenómeno con un promedio de 2-10 cm/año y una máxima de 16 cm/año; en ambos casos se identificó que las principales causas son la explotación de aguas subterráneas y la consolidación del suelo que se presenta de forma natural y se acentúa por el peso de las construcciones.

El valle de Kashmar (Irán) es una zona semiárida afectada por subsidencia del terreno con tasas que superan los 15-30 cm/año, debida principalmente a la explotación de acuíferos para la irrigación, que supera los 53 billones de m<sup>3</sup> en el período 2002-2003, con una disponibilidad *per cápita* de menos de 2,000 m<sup>3</sup> (Anderssohn et al., 2008).

### **1.1.2 Subsidencia del terreno en México**

La República Mexicana no es la excepción, en el Atlas Nacional de Riesgos (Centro Nacional de Prevención de Desastres - CENAPRED, 2001) la mayor

susceptibilidad a hundimientos y deslizamientos cubre parte de los estados de Aguascalientes, Zacatecas, Tlaxcala, Querétaro, Michoacán, México, Jalisco, Hidalgo, Guanajuato, Durango, y el Distrito Federal, la cual se considera la zona con la mayor tasa de subsidencia del terreno con valores de entre 5 y 40 cm al año (Sletto, 1995).

Esteller & Díaz-Delgado (2002) realizaron un trabajo sobre la explotación de acuíferos en la cuenca alta del río Lerma que es una de las cuencas que abastecen a la Ciudad de México y establecieron que las consecuencias del aprovechamiento de agua son el descenso del nivel piezométrico, el desarrollo de fracturas y zonas de subsidencia del terreno y la disminución del volumen del Río Lerma.

Arroyo et al. (2004) reportan que para un periodo de 18 años la zona urbana de Aguascalientes presenta un hundimiento máximo de 1.31 m, y con manifestaciones en todo el valle de Aguascalientes.

En el estado de Guanajuato, se han identificado 15 sistemas de fallas por subsidencia del terreno con una extensión total aproximada de 25 km que afectan la ciudad de Irapuato y en Salamanca la tasa es de 6 cm/año (Rodríguez & Rodríguez, 2006).

Tapia (2006) realizó una visita técnica a la Colonia Las Golondrinas de la Ciudad de México, en el que se reportaron varias calles y casas afectadas por severos hundimientos, poniendo de manifiesto la afectación social y económica del fenómeno sobre la población.

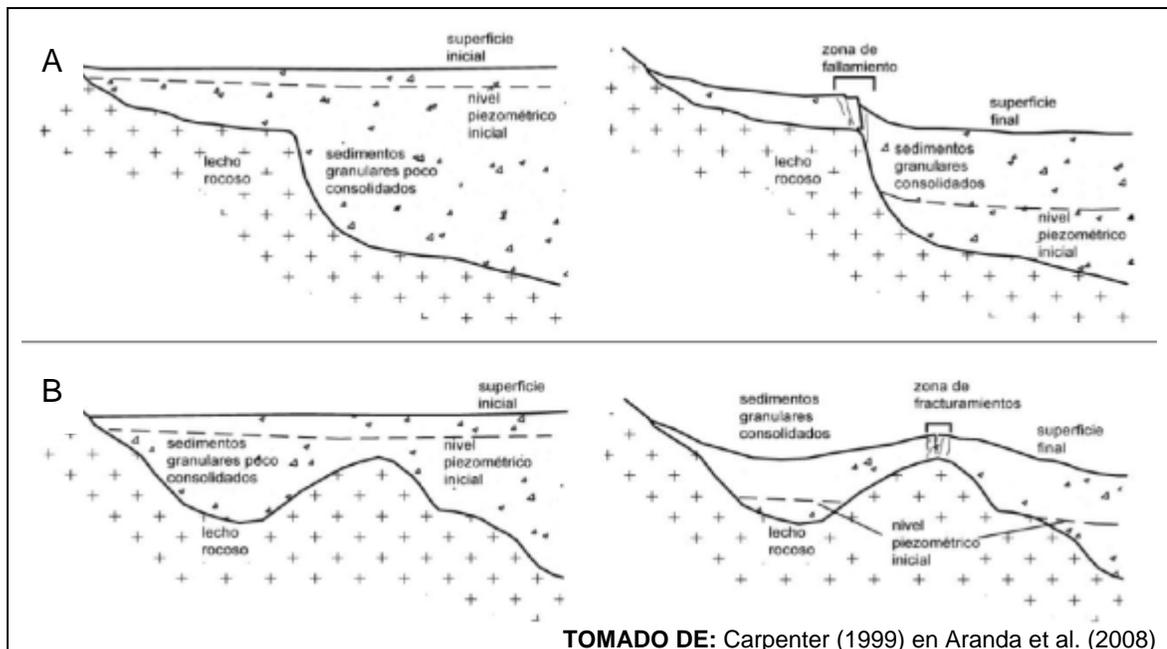
### **1.1.3 Subsistencia del terreno en San Luis Potosí**

En el Estado se han realizado estudios técnicos relacionados con el fenómeno de subsidencia del terreno, sin embargo, estos se han enfocado principalmente a la Zona Metropolitana San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez. En este sentido, existen trabajos como el de Trueba (2004) que consiste en un análisis geológico y geotécnico para identificar las causas del agrietamiento del subsuelo por subsidencia del terreno regional en los valles de San Luis Potosí, Jaral de Berríos – Villa de Reyes y Villa de Arista; igualmente determinó los efectos ambientales causados por la explotación de los acuíferos encontrando un abatimiento del nivel piezométrico, compactación del suelo y formación de grietas que afectan zonas urbanas, contaminación del agua subterránea por infiltración de aguas superficiales de mala calidad y disminución del aporte de aguas subterráneas a los ríos y corrientes superficiales.

Por otro lado, López-Doncel et al. (2006) realizaron un estudio detallado del centro histórico de la ciudad de San Luis Potosí, en el que edificios de carácter histórico se han visto afectados por agrietamientos, producto del fenómeno de subsidencia del terreno e identificaron las fallas de suelo que afectan a la ciudad: Museo de la Máscara, Museo Regional Potosino, Iglesia del Espíritu Santo-Museo Federico Silva y el Sistema de Fallas Damián Carmona.

Aranda et al. (2008) definieron que la formación de fallas y grietas superficiales presentes en el Valle de San Luis Potosí se deben a los procesos esquematizados en la Figura 2; y que se tienen dos orígenes para los fallamientos del suelo, el primero debido a la compactación del relleno

sedimentario del valle y el otro asociado a la presencia de paleo cauces rellenos con material granular poco consolidado.



**Figura 2. Formación de fallas y grietas superficiales**

- A. Formación de una zona de falla superficial por efecto del piso rocoso en forma de escalón.
- B. Formación de grietas por efecto de una protuberancia basal.

En 2008, Arzate et al. realizaron un estudio geológico-geofísico del área metropolitana con el fin de establecer los mecanismos presentes en los agrietamientos del área de estudio y un mapa de zonificación de la propensión a sufrir agrietamientos. Se concluye que se presentan tres tipos de fallamiento: vertical por esfuerzos de corte, horizontal por esfuerzos de tensión y en escalón, por esfuerzos de torsión; todos influidos por dos factores determinantes: el descenso del nivel piezométrico y la irregularidad del basamento.

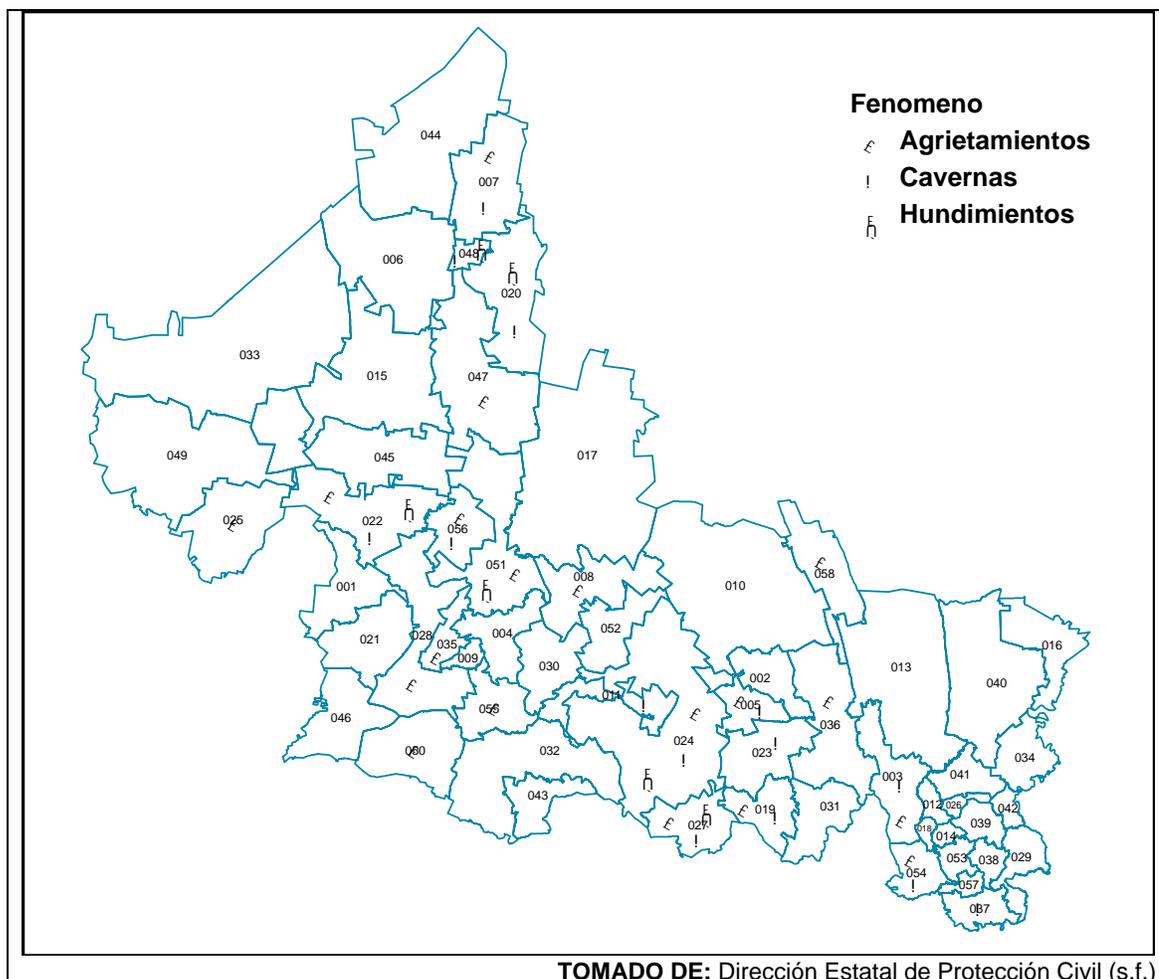
Ortíz (2010) realizó una evaluación de los efectos de la subsidencia del terreno en las viviendas en la zona para así determinar el impacto económico

ocasionado por el fenómeno en la zona metropolitana de San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez. El resultado indica que de 1,982 inmuebles en riesgo 282 presentan algún tipo de daño: bajo 27%, moderado 33%, alto 21%, severo 15% y 4% han colapsado o han sido demolidos; la afectación a dichos inmuebles equivale a cerca de 31.75 mdp.

Pacheco-Martínez et al. (2010), presentaron un mapa de zonificación del riesgo debido a la subsidencia del terreno, en el que se pueden identificar las zonas potencialmente inestables y la influencia de las fallas de suelo. Concluyen además que la probabilidad de ocurrencia de nuevas fracturas obedece a tres factores: la topografía irregular del basamento, la presencia de un sistema de acuíferos granulares y la disminución del nivel del agua subterránea.

De forma paralela a estos trabajos, la página web de la Dirección Estatal de Protección Civil presenta un atlas de riesgos para cada una de las cuatro zonas del Estado: Centro, Altiplano, Media y Huasteca; donde se agruparon los fenómenos como riesgos hidrometeorológicos, geológicos, sanitario epidemiológicos, socio organizativos y químicos. En la Figura 3 se presenta una adaptación del mapa de riesgos geológicos, en el que se tomaron en cuenta únicamente los fenómenos relacionados con la subsidencia del terreno: cavernas, hundimientos del terreno y agrietamientos. Los mapas que componen el citado atlas son bastante deficientes, pues se limitan a indicar en qué municipios se presentan los fenómenos sin establecer magnitudes o localizaciones concretas además que no representa el fenómeno de subsidencia del terreno como tal, sino sus manifestaciones, las cuales están presentes en 24 de los 58 municipios que componen el estado de S.L.P. Cabe

resaltar que en los municipios de Moctezuma, Rioverde y San Ciró se presentan los tres tipos de riesgo (agrietamientos, cavernas y hundimientos del terreno).



**Figura 3. Mapa de amenazas de subsidencia del terreno**

En el atlas estatal de riesgo se citan los municipios con algún tipo de manifestación relacionada con subsidencia del terreno. En la presente figura se condensa la información reportada.

COD	MUNICIPIO	COD	MUNICIPIO	COD	MUNICIPIO
003	Aquismón	0023	Rayón	0047	Villa de Guadalupe
005	Cárdenas	0024	Rioverde	0048	Villa de la Paz
007	Cedral	0025	Salinas	0050	Villa de Reyes
008	Cerritos	0027	San Ciró de Acosta	0051	Villa Hidalgo
0011	Ciudad Fernández	0028	San Luis Potosí	0054	Xilitla
0019	Lagunillas	0035	Soledad de Graciano Sánchez	0055	Zaragoza
0020	Matehuala	0036	Tamasopo	0056	Villa de Arista
0022	Moctezuma	0037	Tamazunchale	0058	El Naranjo

Sin embargo, mediante una búsqueda básica en los archivos Web de los principales periódicos del estado, durante el periodo 2004 – 2010 se encontraron 56 notas de prensa relacionadas con fenómenos de hundimientos en diferentes municipios del Estado y se consignan en la Tabla 2. Cabe resaltar que existe una coincidencia en los municipios señalados en las notas de prensa y en el atlas, excepto por Charcas, Cerro de San Pedro, Ciudad Valles y Catorce los cuales no fueron reportados en este último, lo que permite inferir una falta de información para la elaboración de tan importante herramienta.

<b>Tabla 2. Notas de prensa relacionadas con fenómenos de hundimientos en el periodo 2004 – 2010</b>			
<b>Municipio</b>	<b>Fuente</b>	<b>Fecha</b>	<b>Título</b>
Villa de Arista / Moctezuma	Noticieros Televisa	07/07/04	Temor en S.L.P. por aparición de grietas
S.L.P.	Universia .net	23/01/06	Formarán mapa de riesgos geológicos de zonas potenciales de hundimientos
S.L.P.	El Universal	14/03/06	Sobreexplotación afecta acuífero de San Luis Potosí
Cerro de San Pedro	La Jornada	25/07/06	El templo de CSP no tiene daños que lo pongan en riesgo, aclara Frausto Franco
S.L.P.	El Sol de San Luis	18/06/07	Peligrosa extracción de agua del subsuelo de San Luis. Prevén posibles hundimientos de tierra
S.L.P.	La Jornada	24/06/07	Lluvias afectan a viviendas que sufren por hundimientos
Ciudad Valles	OEM En Línea	02/07/07	No hay riesgo de desplome del puente "Comoca": SCT
S.L.P.	El Universal	10/07/07	Proyectan construir en S.L.P. casas sobre fallas geológicas
S.L.P.	La Jornada	30/09/07	Estará en riesgo la inversión de compradores de Cd. Satélite
Tamasopo	OEM En Línea	13/10/07	Falla geológica posible causa de temblores en Tamasopo
Rioverde	OEM En Línea	03/02/08	Piden apoyo de Gama por hundimientos en el fraccionamiento Los Frailes
S.L.P.	La Jornada	29/03/08	Vecinos protestaron por el hundimiento de la calle Tomasa Estévez
S.L.P.	La Jornada	16/05/08	El Museo Nacional de la Máscara reabrirá sus puertas en octubre
S.L.P.	Pulso	16/11/08	Por grieta, crece daño en templo
S.L.P.	Pulso	15/12/08	Complica una grieta arreglo de pavimento
Soledad	Pulso	14/01/09	Por mal drenaje se agrietan casas
S.L.P.	SDPnoticias.com	11/02/09	Registran hundimiento de tierra en zona transitada de San Luis Potosí

<b>Tabla 2. Notas de prensa relacionadas con fenómenos de hundimientos en el periodo 2004 – 2010</b>			
<b>Municipio</b>	<b>Fuente</b>	<b>Fecha</b>	<b>Título</b>
S.L.P.	OEM En Línea	12/02/09	Hoyanco a un costado de la Alameda provocó caos vial
S.L.P.	Pulso	12/02/09	Se hundió el suelo bajo el pavimento
S.L.P.	Pulso	13/02/09	Arroyo subterráneo causó el hundimiento
S.L.P.	Pulso	19/02/09	Creer hallar túneles
S.L.P.	Pulso	28/05/09	Grieta amenaza al Montecillo
S.L.P.	La Jornada	12/06/09	Vecinos de Chicosein se quejan por negligencia de autoridades en hundimiento
S.L.P.	Pulso	20/07/09	Hallan grieta de 450 metros de longitud
Ciudad Valles	Emsavalles.com	12/08/09	Se hundió la tierra en la PAS
Matehuala	Pulso	30/08/09	Denuncian obra chafa en la calle Guerrero
S.L.P.	La Jornada	02/09/09	Sobre explotación de acuíferos puede causar hundimientos: CNA
S.L.P.	Pulso	21/10/09	Se hunde suelo en el Montecillo
S.L.P.	La Jornada	09/11/09	Pedirá Protección Civil apoyo del CENAPRED si hay más hundimientos
S.L.P.	Noticieros Cuarto Enfoque	10/12/09	Iniciará ayuntamiento rehabilitación de Palacio Municipal
S.L.P.	Pulso	15/12/09	Se hunde Palacio Municipal
S.L.P.	Pulso	22/12/09	Peligran conductores en bulevar
Rioverde	Pulso	16/01/10	El mercado Cristóbal Colón es un riesgo
Rioverde	Pulso	15/02/10	Colonos sobreviven entre la insalubridad
S.L.P.	Pulso	15/03/10	Crece falla geológica en Aviación
S.L.P.	La Razón	17/05/10	Hundimiento del pavimento en Carranza a causa de las lluvias
S.L.P.	La Jornada	18/05/10	Daños en Venustiano Carranza los pagará constructora, informa Interapas
S.L.P.	Pulso	19/05/10	Grieta cruza Carranza
S.L.P.	El Mexicano	20/05/10	Fallas geológicas provocan hundimiento de camiones en S.L.P.
S.L.P.	El Universal	21/05/10	Falla Carlo Magno daña calles potosinas
Cedral	La Razón	28/06/10	Fuga de agua causó hundimiento
Real de Catorce	La Razón	06/07/10	Incomunicadas, comunidades de Catorce
Real de Catorce	La Razón	07/07/10	Trabaja el gobierno para reparar daños por lluvias
Villa de Arista	La Razón	07/07/10	Alerta: Peligrosa grieta en la carretera a Villa de Arista
El Naranjo	Pulso	03/08/10	Paraje Minas Viejas, con severos daños
S.L.P.	La Razón	06/08/10	Protección Civil vigilará la Fenapo (Río Españita permanecerá cerrado)
S.L.P.	Pulso	07/08/10	Detecta PC hundimiento en bulevar
Rioverde	Pulso	26/08/10	Alcalde se "sordea" ante quejas
Ciudad Valles	Pulso	28/08/10	Se hunde la tierra en la colonia Tetuán
S.L.P.	Pulso	05/09/10	Las grietas amenazan a la Columna de la Independencia
S.L.P.	El Exprés	11/10/10	Fallas geológicas afectan a 4 mil personas
S.L.P.	El Sol de San Luis	12/10/10	Aparecen en Bocas grietas de 3 metros de profundidad
S.L.P.	Pulso	13/10/10	Atora Municipio estudio de grietas

<b>Tabla 2. Notas de prensa relacionadas con fenómenos de hundimientos en el periodo 2004 – 2010</b>			
<b>Municipio</b>	<b>Fuente</b>	<b>Fecha</b>	<b>Título</b>
Cedral	La Razón	17/10/10	Hundimientos atrasan obras hidráulicas
S.L.P.	Pulso	18/10/10	Peligra Bocas por grietas
Charcas	La Razón	09/11/10	Sigue aumentando el peligro en la Pino Suárez

## **1.2 GESTIÓN DEL RIESGO Y SU RELACIÓN CON LA GESTIÓN AMBIENTAL**

La gestión ambiental y la gestión del riesgo son la base para la construcción social del territorio, es decir, las relaciones entre la comunidad y el medio que habitan sus integrantes; por lo tanto una adecuada gestión del riesgo es determinante en el estudio de los procesos de ocupación y desarrollo (Departamento Nacional de Planeación - DNP, 2007). La falta de planeación territorial, la marginación y los niveles de pobreza, el deterioro ambiental, la localización insegura de asentamientos, el insuficiente manejo de cuencas y la escasa operación de sistemas de alerta entre otros, son factores que aportan en la construcción del riesgo, razón por la cual la gestión es un mecanismo eficaz que permite identificar las consecuencias negativas de una actividad (Alfie, 2007; Mansilla, 2010).

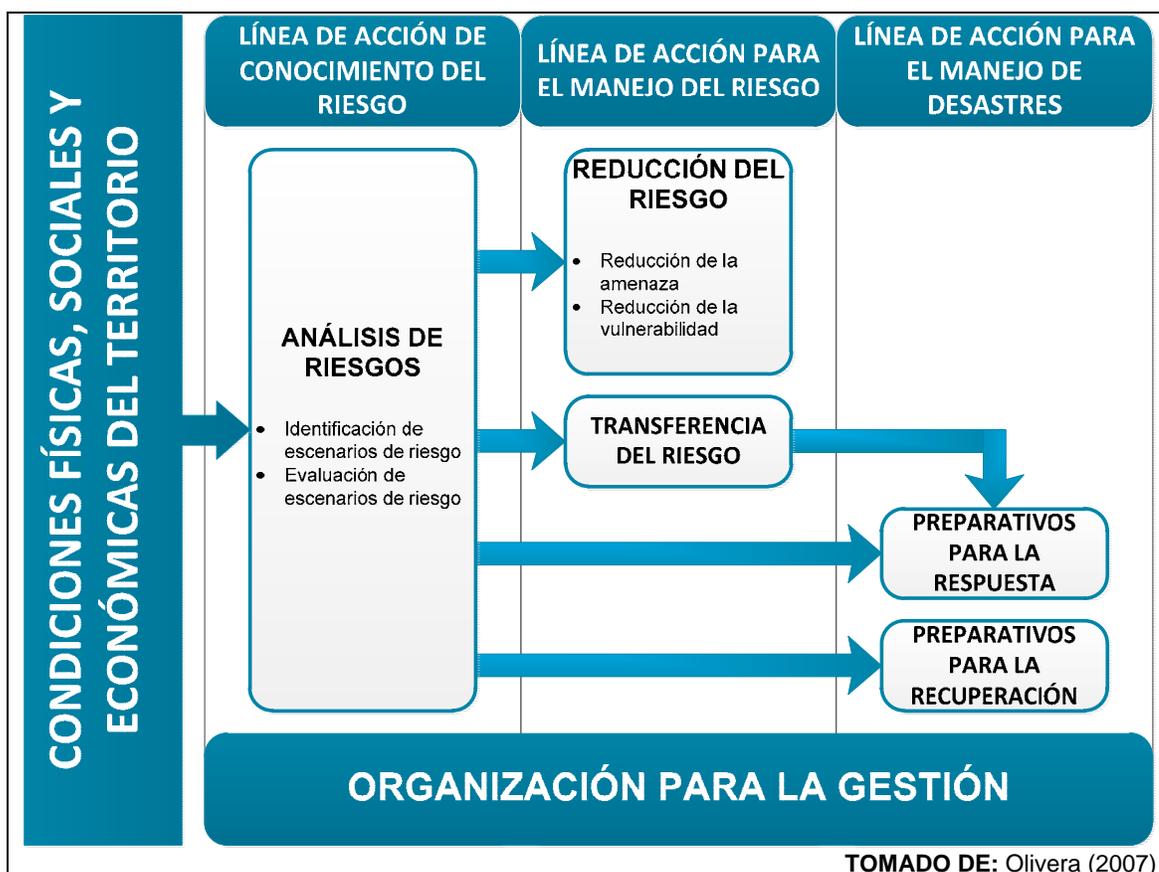
Carrera & Izurieta (2004) ponen de manifiesto que dentro de la gestión ambiental se ha incorporado el tema del riesgo pero de forma tangencial y como un aspecto inevitable que no ha sido estudiado con la profundidad necesaria y es por esta razón que se hace necesario introducir este tema como una herramienta de la gestión ambiental. Por ello establecen algunas acciones estratégicas de la gestión ambiental orientadas a la prevención de desastres y articuladas con la gestión del riesgo mediante tres procesos: el ordenamiento

del territorio, la gestión del riesgo como una variable incorporada a la gestión ambiental mediante la elaboración de evaluaciones ambientales y estudios de impacto ambiental y por último, la reducción del riesgo a través de acciones encaminadas al manejo de los factores generadores de peligro.

Estos procesos pueden incorporarse al modelo de gestión del riesgo representado en la Figura 4, el cual fue propuesto por Olivera (2007) y se compone de tres líneas de acción:

- Conocimiento del riesgo. Consiste en identificar y analizar las condiciones físicas, sociales y económicas existentes en un área determinada a partir de la evaluación de la susceptibilidad que señala los diferentes niveles de predisposición de un lugar específico a que ocurra un evento dado y con una cierta intensidad, con base en la tendencia del territorio a verse afectado. La amenaza se obtiene al representar esta predisposición en un periodo temporal definido (Bonachea, 2006; Herrera, 2007; Remondo et al., 2003; Vargas, 1999), teniendo en cuenta los escenarios del riesgo planteados por Rodríguez (2007):
  1. Transformación del medio natural debido al cambio en el uso del suelo.
  2. Presión por demanda del suelo urbano que se manifiesta por el incremento de la construcción.
  3. Mayor exposición gracias al aumento de la población en riesgo por redensificación o aparición de nuevas zonas de riesgo.
  4. Manifestación del evento o amenaza que pone al descubierto las vulnerabilidades acumuladas en tiempo y espacialmente diferenciales.

- Manejo del riesgo. Busca reducir tanto la amenaza como la vulnerabilidad ante un fenómeno natural con la consecuente reducción del riesgo. Cuando no sea posible, entonces hay que recurrir a la transferencia del riesgo, es decir, apoyos económicos para la recuperación del desastre provenientes de fondos o seguros.
- Manejo de desastres. Esta línea de acción tiene como objetivo atender el desastre una vez que ha ocurrido, de acuerdo con los preparativos para la respuesta y la recuperación que se trazaron a partir de las líneas anteriores.



**Figura 4. Modelo de gestión del riesgo**

En este trabajo se aportará a la gestión ambiental a partir de la línea de conocimiento del modelo de gestión del riesgo, con base en la evaluación de

susceptibilidad a la subsidencia del terreno. Este tipo de análisis se ha realizado con éxito para otros fenómenos como los movimientos en masa, no así para la subsidencia del terreno debido a su complejidad; por lo que fue necesario desarrollar una metodología que permitiera identificar las zonas donde las características del terreno favorezcan el desarrollo de este fenómeno. La subsidencia del terreno, como se describió en el capítulo anterior, puede ser origen natural o antrópico pero en todo caso su ocurrencia es un indicador de un desequilibrio ambiental y sus consecuencias pueden agudizar este desequilibrio.

## **CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

### **2.1 UBICACIÓN**

El estado de San Luis Potosí se ubica en la zona centro oriental de México, limita con los estados de Zacatecas, Nuevo León y Tamaulipas al norte, con Tamaulipas y Veracruz al este, con Hidalgo, Querétaro de Arteaga y Guanajuato al sur y con Zacatecas al oeste (Mapa 1). Tiene una extensión aproximada de 60,333 km<sup>2</sup>, que corresponde al 3.1% del área total de la República, ocupando el puesto 15 en extensión (Secretaría de Ecología y Gestión ambiental - SEGAM, 2008).

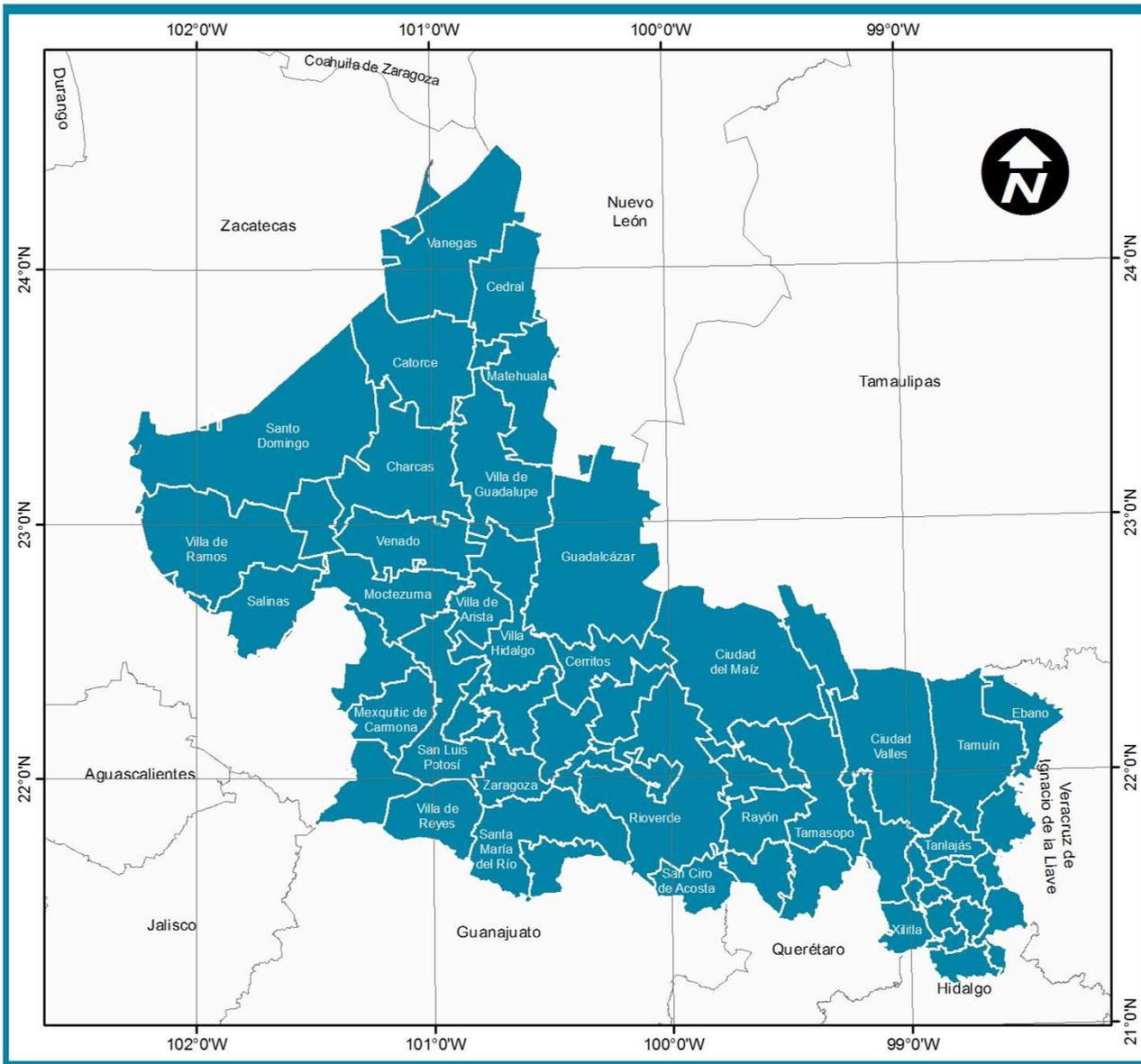
### **2.2 GEOLOGÍA**

#### **2.2.1 Estratigrafía**

Las rocas aflorantes en el área de estudio incluyen rocas sedimentarias, ígneas intrusivas y extrusivas, así como algunas rocas metamórficas de muy bajo grado y de contacto y sus edades abarcan desde el Triásico hasta el reciente. La información estratigráfica se presenta en el Mapa 2 que corresponde a la recopilación realizada por Instituto Nacional de Estadística y Geografía - INEGI (2007) para la elaboración del estudio Hidrológico de San Luis Potosí.

##### **2.2.1.1 Triásico (TR)**

Correspondientes a esta época, se presentan esquistos verde oscuro, fracturados y alterados, los cuales afloran al SE de Santo Domingo y se han denominado como la Formación Zacatecas. En la Sierra de Catorce y al W de Charcas, aflora una unidad sedimentaria que se compone de una alternancia de



ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA  
SUBSIDENCIA COMO HERRAMIENTA  
DE LA GESTIÓN AMBIENTAL  
EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

Mapa No. 1  
Ubicación del área de estudio

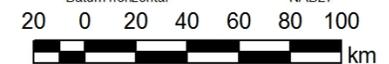
**CONVENCIONES**

-  Límites Municipales
-  Límites estatales
-  San Luis Potosí



Elaboró Iván Leonardo Herrera Pérez  
Fuente CONABIO (2004)

Proyección	Cónica conforme de Lambert
Falso este (metros)	2,000,000.00
Falso norte (metros)	0.00
Meridiano central	-102° 0' 0"
Primer paralelo base	17° 30' 0"
Segundo paralelo base	29° 30' 0"
Latitud de origen	0° 0' 0"
Unidad lineal	metros (1.000000)
Datum horizontal	NAD27





estratos de lutita y arenisca de color gris verdoso a gris oscuro. Los estratos de arenisca son de medianos a gruesos, mientras que la lutita presenta estratos delgados. Se discute aún si estas capas o sólo algunas de ellas son de edad triásica y son consideradas como rocas del grupo Huizachal.

#### **2.2.1.2 Jurásico (J)**

Las primeras rocas marinas del calloviano – oxfordiano son secuencias transgresivas y son representadas por evaporitas y calizas oolíticas de las Formaciones Minas Viejas y Zuloaga en la parte más al norte del área de trabajo. Hacia el centro de la zona de estudio se reconocen dos unidades marinas. La primera unidad es caliza gris claro con vetas de calcita y presencia de fósiles en estratos potentes que aflora al S de Huertecillas en el municipio de Vanegas y en la sierra de Catorce; se correlaciona con la Formación La Gloria. La segunda unidad se compone de una intercalación de calizas y lutitas de color gris claro a oscuro, que afloran en la sierra de Catorce y en Vanegas al N de Ignacio Zaragoza; se relaciona con la Formación La Caja.

#### **2.2.1.3 Cretácico (K)**

El Cretácico se caracteriza por un evento marino transgresivo que culmina hasta finales de esa era. En la Sierra de Catorce y en el área de Charcas afloran secuencias mixtas de calizas, lutitas y margas, que evolucionan gradualmente y de manera transicional a rocas carbonatadas de ambientes meramente marinas, iniciando con las Formaciones Taraises, Tamaulipas, Otates y / o La Peña. Al S y E de Villa Juárez afloran capas medianas y gruesas de yeso del Cretácico Inferior, con fracturamiento moderado y huellas

de disolución; se correlaciona con las Formaciones Guaxcamá, Otates y Tamaulipas Superior. En el límite Cretácico Inferior y Superior (Cretácico medio), se desarrollaron dos estructuras paleogeográficas claramente diferenciables. Al este del área de estudio hubo gran producción de carbonatos en una plataforma carbonatada somera en cuyos bordes se desarrollaron construcciones arrecifales de la Formación El Abra. En la porción central y occidental del área de trabajo, se depositaron en una cuenca marina de aguas profundas, sedimentos carbonatados pelágicos de las Formaciones Cuesta del Cura e Indidura (Agua Nueva y San Felipe al norte del área de trabajo). Entre estas estructuras se depositaron sedimentos mixtos de la Formación Tamabra. Correspondientes al Cretácico Superior hay tres unidades. La primera es una intercalación de calizas de grano fino de color gris claro a oscuro con lutitas en estratos delgados de color pardo. Aflora hacia el N y W de Matehuala, en la Sierra de Álvarez, en Tamasopo y en Tamazunchale. La segunda unidad son lutitas gris-verdoso de estratos mediano a grueso que afloran al E de Cerritos y en los flancos orientales de las sierras Tanchipa y La Colmena. Se correlaciona con la formación Cárdenas. La última unidad corresponde a una intercalación de lutita gris claro a verde en capas medianas a gruesas con areniscas de grano fino y color café amarillento en capas delgadas a medias y aflora en Matehuala, Santo Domingo, Villa de Ramos y Ahualulco, así como en los flancos de la Sierra Madre Oriental.

#### **2.2.1.4 Terciario (T)**

Son las rocas que más afloran en la entidad y comprenden rocas sedimentarias

así como rocas ígneas intrusivas y extrusivas. Las unidades de rocas sedimentarias son lutitas calcáreas gris verdoso en estratos delgados a medianos, con afloramientos importantes en la zona oriental del Estado. También se presentan lutitas calcáreas intercaladas con areniscas grises de origen marino con estratos delgados a gruesos, y afloran al oriente de la entidad, principalmente al N de Tamazunchale. Una tercera unidad son areniscas-conglomerados de color café claro poco consolidadas, donde la arenisca de grano fino cambia a conglomerado anguloso a subredondeado y mal clasificado, con afloramientos al N de Alaquines, SW de Rayón y SE de Villa de Reyes. Finalmente se presenta un conglomerado continental conformado por caliza, arenisca y basalto, bien redondeado y mal clasificado en una matriz areno-arcillosa. Tiene afloramientos importantes en Venado y en el margen derecho del río Moctezuma.

Las rocas intrusivas conforman dos unidades, la primera conformada por granito y granodiorita, con fenocristales de plagioclasa, textura holocristalina y estructura masiva y compacta. Aflora en Guadalcázar, al E de Charcas, al SE de Salinas de Hidalgo y al N y E de Tierra Nueva. La segunda unidad se compone de diorita de color pardo a gris claro y textura holocristalina con afloramientos en Villa de la Paz. Por último, se presentan rocas extrusivas ácidas y básicas. Las ácidas (riolita y toba) son de color gris rosado y café claro, con textura afanítica y porfídica de aspecto masivo y fracturamiento moderado. Afloran principalmente al S del estado y al N de Ahualulco. Las rocas básicas, son de color negro y aspecto masivo. Aflora en mesetas de la zona Altiplano y en los flancos de anticlinales de la Sierra Madre Oriental.

### **2.2.1.5 Cuaternario (Q)**

Se compone de tres unidades, rocas ígneas extrusivas, sedimentos y material de relleno. La roca ígnea es básica, de color negro, textura holocristalina y fracturamiento moderado. Aflora en forma de coladas en la zona central y occidental del Estado.

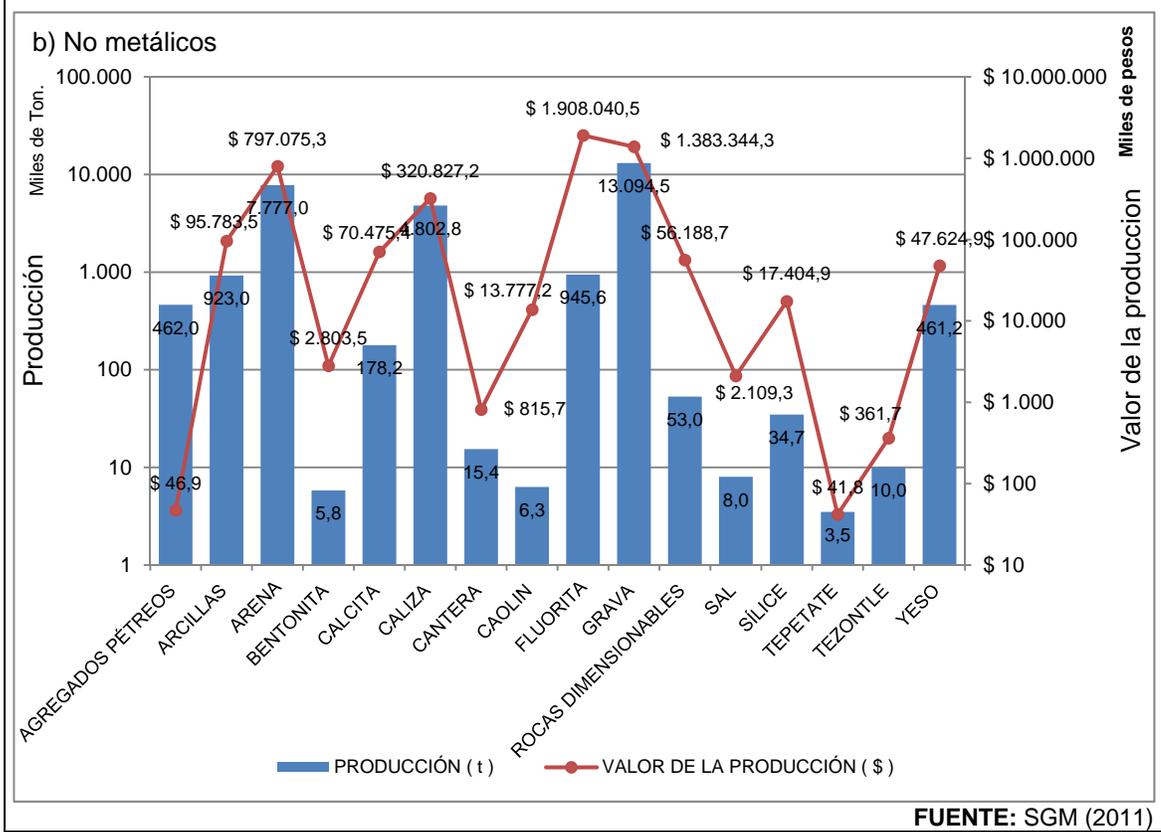
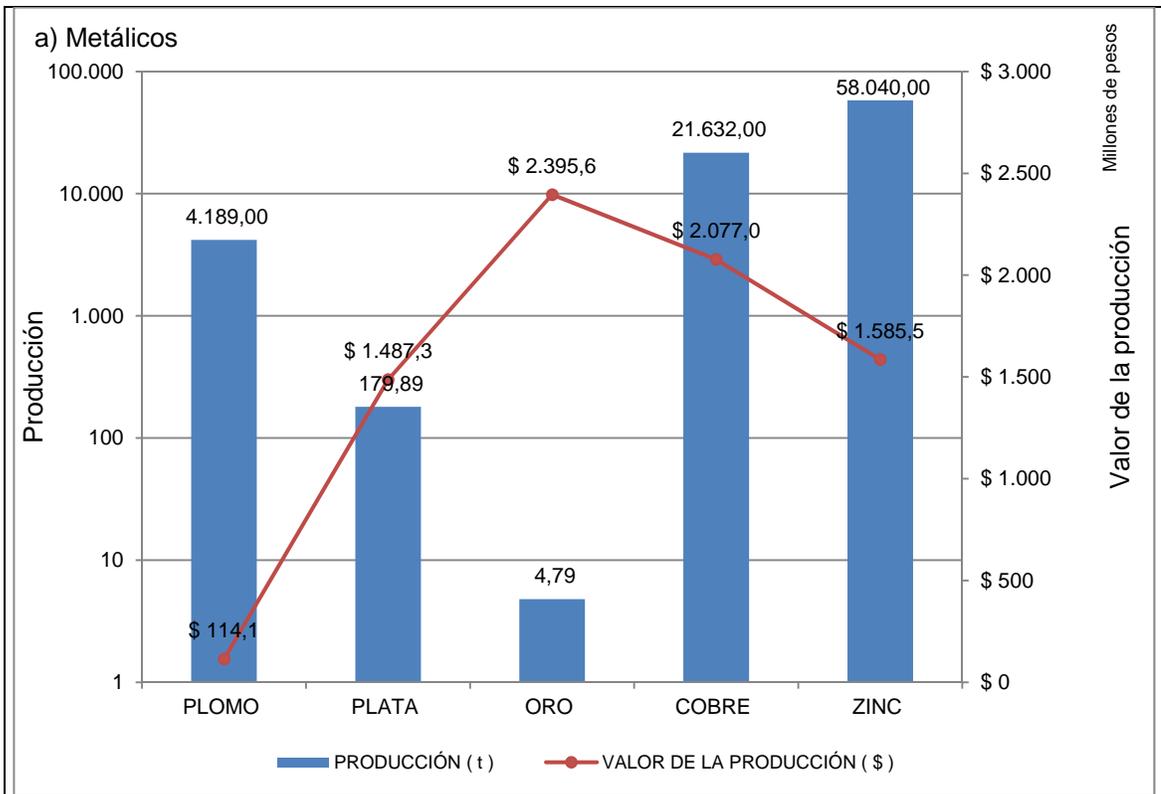
La unidad sedimentaria es de origen continental, mal clasificada y poco consolidada, con fragmentos angulosos a subredondeados en una matriz arcillosa o calcárea. Se manifiestan en la porción N del estado y en forma de abanicos aluviales y piedemonte en los flancos de las sierras.

El material de relleno se ubica en los fondos de los valles, depresiones topográficas y cauces de ríos con espesores de hasta 500 m se compone de arcillas, limos, arenas, gravas y cantos.

### **2.2.2 Minería**

El estado de San Luis Potosí se ha caracterizado por la extracción minera, según el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2011a) se tiene una importante producción de fluorita, zinc, plata, cobre, plomo, bentonita, oro, arcillas, sílice, caliza y sal con un valor de producción superior a los 12 mdp para 2010 y una participación de más de 5,700 mdp en el PIB para el mismo año (INEGI, 2011).

En la Figura 5 se puede apreciar la distribución en de la producción minera del estado; cabe destacar que San Luis Potosí tiene una participación del 93% en la extracción de fluorita a nivel nacional (SGM, 2011a) ocupando el primer lugar en extracción de fluorita y grava, y segundo en cadmio y tezontle según el Anuario Estadístico de la Minería Mexicana (SGM, 2011b).



FUENTE: SGM (2011)

Figura 5. Producción y valor de producción de recursos minerales

En el territorio se han definido 14 regiones mineras que se caracterizan por la mineralización presente. En términos generales predominan los yacimientos en forma de vetas, mantos y chimeneas y las explotaciones de zinc, plomo, cobre, oro y plata (Tabla 3 y Figura 6).

<b>Tabla 3. Regiones mineras</b>			
<b>Región</b>	<b>Mineralización</b>	<b>Forma de Yacimiento</b>	<b>Distritos Mineros Importantes</b>
San Luis Potosí	Au, Ag, Cu, Zn, Pb y Sn	Vetas, chimeneas, mantos, diseminados	DM Cerro de San Pedro ZM Villa de Reyes ZM Villa de Arriaga
Sierra de Catorce	Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Fe, Sb y Hg	Vetas, chimeneas y mantos	DM Real de Catorce DM Santa María de la Paz DM La Maroma DM San José Tierras Negras (Wadley)
Charcas	Au, Ag, Cu y Zn	Vetas, chimeneas	DM Charcas ZM San Rafael ZM Santa Gertrudis
Guadalcázar	Ag, Au, Zn, Sb, Sn, yeso, arcilla aluminica y mármol	Stockwork, vetas, mantos, clavos y chimeneas	DM Guadalcázar ZM La Tapona ZM Núñez
Salinas de Hidalgo	Ag, Au, Pb, Zn, Cu y sal	Vetas y salmueras	DM Salinas ZM Peñón Blanco
Guaxcamá	Yeso, azufre	Vetas, mantos, chimeneas	DM Guaxcamá DM La Borreguita
Villa de Ramos	Ag, Cu, Pb, Zn, sales (NaCl, Li, K) boratos	Vetas y cuerpos estratiformes en cuencas endorreicas	DM Ramos ZM La Herradura ZM Laguna de Hernández
Santo Domingo	Mn, Ag, Au, Pb, Zn, Cu, Sb y Hg	Stockwork, vetas y diseminados	DM Montaña de Manganeso ZM El Sabino ZM El Calvo
Tamazunchale-Xilitla	Fosforita	Vetas y cuerpos irregulares	ZM Tamazunchale-Xilitla
Ahualulco	Ag, Au, Pb, Zn y Hg	Vetas	ZM Ahualulco ZM Moctezuma
Villa Hidalgo	S, Hg, fosforita y arcilla aluminica	Vetas y horizontes estratiformes	ZM Villa de Arista ZM Villa Hidalgo
Vanegas	Pb, Zn, ónix, mármol y barita	Vetas y mantos	ZM El Salado

Tabla 3. Regiones mineras			
Región	Mineralización	Forma de Yacimiento	Distritos Mineros Importantes
Ciudad Valles	Fosforita, fluorita, mármol, travertino, dolomita, materiales para construcción como caliza, arcilla y yeso	Mantos, vetas y cuerpos irregulares	ZM Ciudad Valles ZM Cárdenas ZM Ciudad del Maíz ZM San Ciro de Acosta
Zaragoza	Fluorita	Cuerpo mineralizado irregular de grandes dimensiones	DM Las Cuevas ZM Río Verde ZM Palo Verde

DM = Distrito Minero  
ZM = Zona Mineralizada

TOMADO DE: SGM (2011)

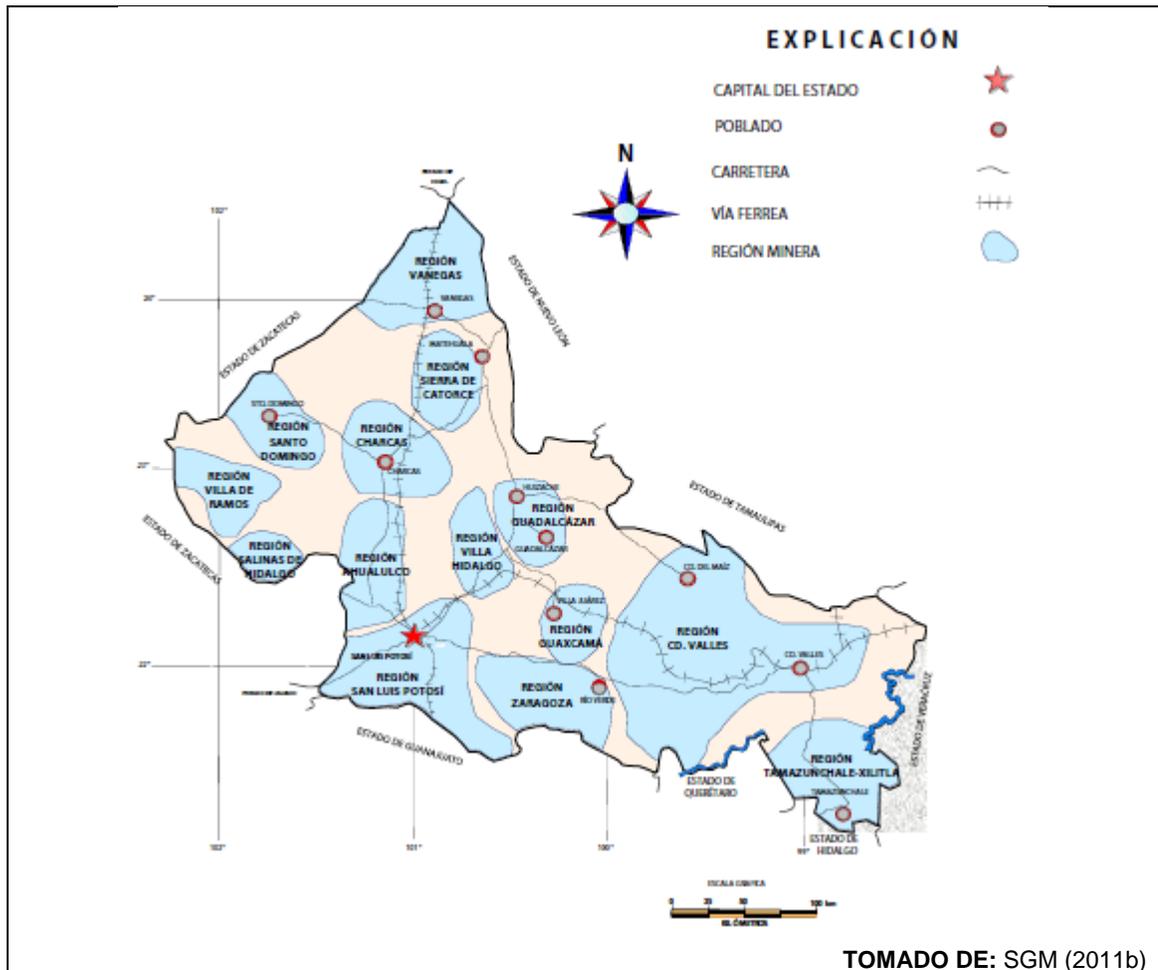


Figura 6. Regiones mineras del estado

## **2.3 FISIOGRAFÍA**

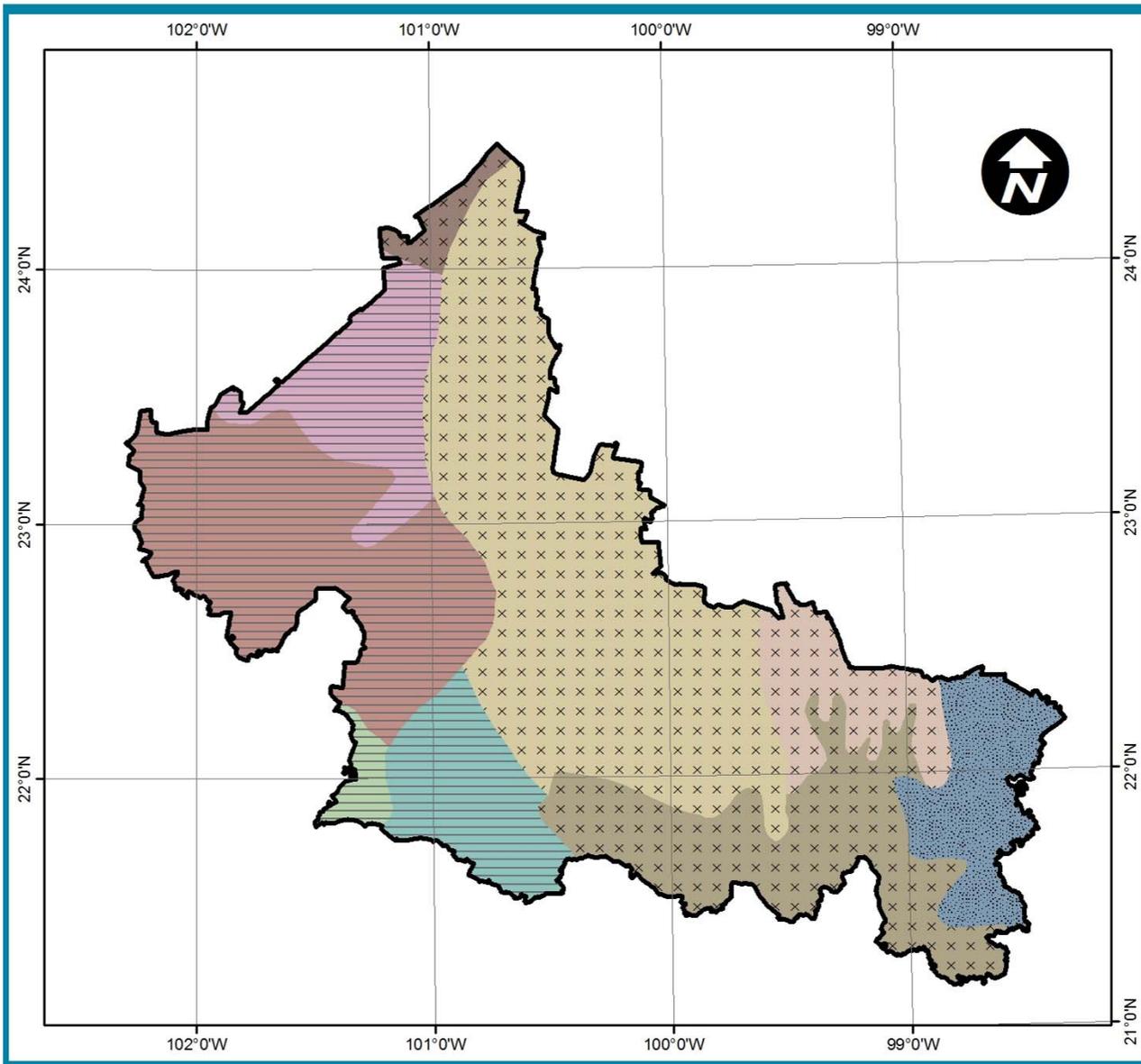
El estado de San Luis Potosí se divide en tres zonas fisiográficas (Mapa 3): la Mesa Central al oriente, la Sierra Madre Oriental ocupa la zona centro y oriental y al sureste una pequeña porción corresponde a la Llanura Costera del Golfo (Consejo de Recursos Minerales, 1992; Nieto et al., 2005).

### **2.3.1 Mesa Central**

La Mesa Central (MC) se caracteriza por la presencia de grandes llanuras y sierras dispersas por encima de los 2,000 msnm en su mayoría y diferencias altitudinales no mayores a los 600 m, afloramientos de andesitas, riolitas y algunas zonas de basaltos hacia el sur. En el norte, por el contrario, está conformada principalmente por rocas sedimentarias de origen marino siendo estas las más antiguas. Hacia el sector central, hay potentes estratos de lutita y arenisca calcáreas que corresponden a la Cuenca Mesozoica del Centro de México; mientras que en los bordes meridional y occidental las rocas son principalmente basaltos almohadillados con componentes sedimentarios de lutita, arenisca y caliza, intercalados en algunos sectores.

Estructuralmente está delimitado por el Sector Transversal de Parras de la Sierra Madre Oriental al norte, al este por el sistema de fallas Taxco – San Miguel de Allende, al sur por la falla del Bajío y al oeste por el sistema de fallas San Luis – Tepehuanes y el graben de Aguascalientes (Nieto et al., 2005).

De acuerdo con INEGI (s.f.), en el territorio potosino se presentan cuatro subprovincias:



ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA  
SUBSIDENCIA COMO HERRAMIENTA  
DE LA GESTIÓN AMBIENTAL  
EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

Mapa No. 3  
Provincias fisiográficas

CONVENCIONES

SIERRA MADRE ORIENTAL

- GRAN SIERRA PLEGADA
- SIERRAS TRANSVERSALES
- KARST HUASTECO
- SIERRAS Y LLANURAS OCCIDENTALES

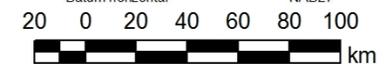
MESA CENTRAL

- LLANURAS DE OJUELOS-AGUASCALIENTES
- LLANURAS Y SIERRAS POTOSINO-ZACATECANAS
- SIERRAS Y LLANURAS DEL NORTE DE GUANAJUATO
- SIERRAS Y LOMERIOS DE ALDAMA Y RIO GRANDE

LLANURA COSTERA DEL GOLFO NORTE

- LLANURAS Y LOMERIOS

Elaboró Iván Leonardo Herrera Pérez  
Fuente Cervantes-Zamora et al. (1990)  
Proyección Cónica conforme de Lambert  
Falso este (metros) 2,000,000.00  
Falso norte (metros) 0.00  
Meridiano central -102° 0' 0"  
Primer paralelo base 17° 30' 0"  
Segundo paralelo base 29° 30' 0"  
Latitud de origen 0° 0' 0"  
Unidad lineal metros (1.000000)  
Datum horizontal NAD27



- **Sierras y lomeríos de Aldama y Río Grande**

Ubicada en la zona septentrional de la provincia, es la que exhibe el relieve más accidentado con presencia de sierras, mesetas y lomeríos alrededor de la meseta central con una altura media de 2,000 msnm. Su máxima altura corresponde al cerro Bermejo que alcanza los 2,900 msnm.

- **Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas**

Comprende la zona media de la Mesa Central. Se caracteriza por la llanura desértica potosino-zacatecana que ocupa la porción accidental de la provincia, rodeada por lomeríos y sierras bajas, destacándose la sierra El Mastrante, con 2,590 msnm.

- **Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes**

Es la subprovincia con la menor presencia en el territorio potosino, se manifiesta con grandes llanuras a los 2,000 msnm y mesetas dispersas.

- **Sierras y Llanuras del norte de Guanajuato**

Ocupa el sector meridional del estado, siendo su principal rasgo las llanuras angostas ubicadas entre sierras de origen volcánico, y algunas mesetas con una altura media de 2,800 msnm.

### **2.3.2 Sierra Madre Oriental**

La Sierra Madre Oriental es una unidad orográfica de forma alargada de más de 800 km de longitud entre la cordillera Neovolcánica y el estado de Coahuila, entre 80 y 100 km de anchura que separan la Mesa del Norte de la Llanura Costera del Golfo, y con alturas entre 2,000 y 3,000 msnm en la que se destaca

el Cerro San Rafael con 3,700 msnm. Comprende el sector nororiental del estado de San Luis Potosí, donde se presenta el Sector Transversal de Parras con una fuerte presencia rocas sedimentarias de origen marino: evaporitas en la base, rocas calcáreas con modelados cársticos y rocas clásticas (Consejo de Recursos Minerales, 1992; Eguiluz et al., 2000).

INEGI (s.f.) describe las cuatro subprovincias que se presentan en el territorio estatal:

- **Sierras Transversales**

La sierra Papagayos y algunas porciones de sierras circundantes son las únicas manifestaciones de esta subprovincia al norte del Estado. Se caracteriza por la presencia de sierras orientadas perpendicularmente al eje central de la Sierra Madre Oriental.

- **Gran Sierra Plegada**

Marca la transición hacia la Sierra Madre Oriental, y su principal característica es la secuencia de anticlinales-sinclinales y sistemas de fallas normales, ambos orientados en sentido norte-sur.

- **Sierras y Llanuras Occidentales**

Dominan la zona central del Estado, y está constituida por sierras de roca caliza orientadas en sentido norte-sur, destacándose la Sierra de Catorce ubicada en el límite occidental de la subprovincia.

- **Karst (Carso) Huasteco**

Esta subprovincia ocupa la región centro-sur del Estado. Se caracteriza por la predominancia de rocas calizas y el consecuente modelado cárstico derivado de la disolución de las rocas por el agua, con un relieve compuesto principalmente de sierras plegadas.

### **2.3.3 Llanura Costera del Golfo**

Ocupa un pequeña área del estado en su porción SE; se compone básicamente de sedimentos volcánicos no consolidados siendo los más recientes los más cercanos a la línea de costa. Comprende también llanuras planas y ondulantes como la del río Pánuco, que comparten los estados de San Luis Potosí y Veracruz (Consejo de Recursos Minerales, 1992).

- **Llanuras y Lomeríos**

Sólo una pequeña porción de esta subprovincia hace parte del territorio en su sección más oriental. Se compone principalmente de grandes llanuras planas y onduladas, destacándose la del río Moctezuma (INEGI, s.f.).

## **2.4 HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA**

### **2.4.1 Regiones Hidrológicas y cuencas**

La República Mexicana está dividida en 37 regiones hidrológicas, de las cuales dos están presentes en el estado de S.L.P.: El Salado al noroccidente, El Pánuco al oriente y una muy pequeña porción de Lerma-Santiago, en límites con Guanajuato. En el Mapa 4 se puede apreciar la distribución espacial de las regiones hidrológicas del Estado: El Salado en la porción occidental, cubre más de la mitad de la entidad y Pánuco ocupa la mitad oriental del territorio. Al sur



en inmediaciones de Villa de Arriaga y Tierra Nueva se presenta una muy pequeña porción de la región Lerma-Santiago (menos del uno por ciento del área estatal) como se puede apreciar en la Tabla 4, donde se indican las catorce cuencas hidrológicas presentes en el territorio estatal con sus áreas y divididas de acuerdo a su región hidrológica correspondiente

<b>Tabla 4. Regiones hidrológicas y cuencas</b>			
<b>CUENCA</b>	<b>REGIONES HIDROLÓGICAS (Área en km<sup>2</sup>)</b>		
	<b>EL SALADO</b>	<b>PÁNUCO</b>	<b>LERMA-SANTIAGO</b>
Camacho-Gruñidora	9.014		
San Pablo y otras	23.075		
Sierra de Rodríguez	450.040		
Fresnillos-Yesca	2,848.074		
La Tula	4,023.604		
Presa San José-Los Pilares	7,602.680		
Matehuala	8,759.750		
San Luis Potosí	10,482.651		
Río Tamesí		595.709	
Río Pánuco		710.740	
Río Moctezuma		2,823.924	
Río Tamuín		22,126.790	
Río Laja			0.291
Río Verde Grande			70.416
<b>ÁREA TOTAL (km<sup>2</sup>)</b>	<b>34,198.887</b>	<b>26,257.163</b>	<b>70.707</b>
<b>Área (%)</b>	<b>56.50%</b>	<b>43.38%</b>	<b>0.12%</b>

FUENTE: Comisión Nacional del Agua - CONAGUA (1998)

#### 2.4.2 Hidrogeología

Según Mora & Valverde (1997) las aguas subterráneas son todas aquellas que después de infiltrarse en el suelo se mueven y se almacenan en un medio rocoso, que permite la transmisión y explotación del agua, denominado acuífero. Se reconocen tres tipos de acuíferos:

- Acuífero freático, también conocido como acuífero libre o no confinado. Se caracteriza porque la presión del agua es igual a la atmosférica y con una muy buena tasa de infiltración. Muy frecuente en medios granulares y aluviales.
- Acuífero semiconfinado, se encuentra aislado por una capa semipermeable, por lo que no está expuesto a la acción de la presión atmosférica y su presión interna es ligeramente mayor.
- Acuífero artesiano, confinado o cautivo es aquel que posee una fuente de recarga a mayor altura y distante. Esto genera que la presión interna sea más elevada que la atmosférica, por lo que al agua puede alcanzar la superficie al perforar un pozo a través de la capa impermeable que lo confina.

En el Estado se ha explotado el agua subterránea para el consumo humano bajo la regulación de CONAGUA, la cual para 2008 reportó 653 acuíferos productivos en la República, y 19 de ellos (el 2.91%) se ubican dentro del territorio de San Luis Potosí (Tabla 5), por lo que ocupa el lugar 14 de cantidad de acuíferos explotados, como se aprecia en la Figura 7 (CONAGUA, 2009a).

**Tabla 5. Características de los acuíferos en San Luis Potosí**

Nombre	Clave	Región Hidrológica*	Cuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Volumen Concesionado (m <sup>3</sup> )	Recarga (m <sup>3</sup> )	Extracción (m <sup>3</sup> )	Disponibilidad (m <sup>3</sup> )	Origen	Relleno	Espesor Medio (m)	Tipo Acuífero	Abatimiento Máximo (m)	Causa Salinización
Vanegas - Catorce	2401	37	Sierra de Los Rodríguez	4,381.5	30.7	13.6	17.6	-17.1	Fosa Tectónica	Aluvial	300	Libre	30	
El Barril	2402	37	Fresnillo-Yesca	3,229.4	90.0	31.6	53.0	-58.4	Depresión Topográfica	Aluvial	300	Libre	N/D	Presencia Evaporitas
Salinas de Hidalgo	2403	37	Presa San Pablo y Otras	1,005.6	27.6	16.7	27.5	-10.9	N/D	Riolitas	N/D	Libre	N/D	Presencia Evaporitas
Santo Domingo	2404	37	Fresnillo-Yesca	6,068.7	13.8	6.0	6.5	-7.8	Depresión Topográfica	Aluvial	N/D	Libre	N/D	
Ahualulco	2405	37	Presa San Pablo y Otras	947.9	17.8	10.9	10.9	-6.9	Sinclinal	Toba Riolítica	250	Semi-confinado	N/D	
Villa de Arriaga	2406	37	Presa San Pablo y Otras	1,155.4	1.0	1.3	0.9	0.3	Depresión Topográfica	Aluvial	N/D	Libre	N/D	
Cedral - Matehuala	2407	37	Matehuala	1,954.3	19.1	43.4	54.0	24.3	Sinclinal	Aluvial	350	Libre	50	
Villa de Arista	2408	37	Presa San José-Los Pilares	4,312.0	102.3	48.2	74.8	-54.1	Depresión Tectónica	Conglomerados	400	Libre	60	
Villa Hidalgo	2409	37	Presa San José-Los Pilares	1,581.5	8.0	4.0	5.2	-4.0	Depresión Tectónica	Coluvial	N/D	Libre	8	

**Tabla 5. Características de los acuíferos en San Luis Potosí**

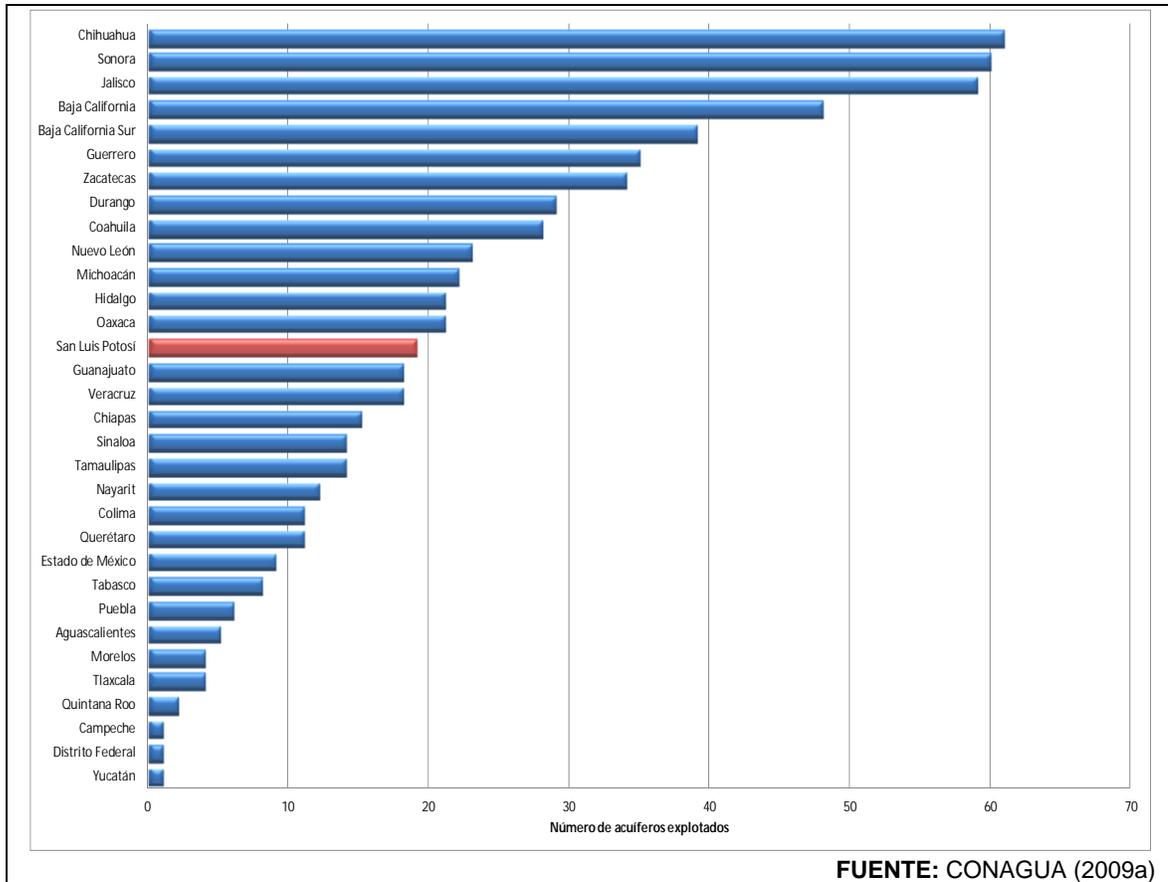
Nombre	Clave	Región Hidrológica*	Cuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Volumen Concesionado (m <sup>3</sup> )	Recarga (m <sup>3</sup> )	Extracción (m <sup>3</sup> )	Disponibilidad (m <sup>3</sup> )	Origen	Relleno	Espesor Medio (m)	Tipo Acuífero	Abatimiento Máximo (m)	Causa Salinización
Buenavista	2410	37	Sierra Madre	4,561.8	18.5	7.0	7.0	-11.5	Sinclinal	Aluvial	N/D	Libre	N/D	
San Luis Potosí	2411	37	Presa San José-Los Pilares	2,060.8	151.4	78.1	113.5	-73.3	Depresión Tectónica	Conglomerados	350	Libre	20	
Jaral de Berrios - Villa de Reyes	2412	26	Río Tampaón	1,037.6	119.1	132.1	213.2	13.0	Fosa Tectónica	Aluvial	400	Libre	50	
Matehuala - Huizache	2413	37	Matehuala	3,776.1	48.0	31.5	48.0	-16.5	Sinclinal	Aluvial	400	Libre	N/D	
Cerritos - Villa Juárez	2414	37	Sierra Madre	2,039.1	16.0	7.0	7.5	-9.0	Sinclinal	Aluvial	300	Libre	N/D	
Rio Verde	2415	26	Río Tampaón	2,755.8	84.3	84.5	74.4	0.2	Depresión Topográfica	Aluvial	N/D	Libre	25	
San Nicolás Tolentino	2416	26	Río Tampaón	1,695.8	4.9	7.0	5.8	2.1	Valle Intermontano	Aluvial	N/D	Libre	N/D	
Santa María del Rio	2417	26	Río Tampaón	2,709.7	15.3	3.7	3.4	-11.6	Fosa Tectónica	Conglomerados	120	N/D	N/D	

**Tabla 5. Características de los acuíferos en San Luis Potosí**

Nombre	Clave	Región Hidrológica*	Cuenca	Área (km2)	Volumen Concesionado (m <sup>3</sup> )	Recarga (m <sup>3</sup> )	Extracción (m <sup>3</sup> )	Disponibilidad (m3)	Origen	Relleno	Esesor Medio (m)	Tipo Acuífero	Abatimiento Máximo (m)	Causa Salinización
Huasteca Potosina	2418	26	Río Tampaón	10,173.4	22.2	12.0	11.8	-10.2	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	
Tamuín	2419	26	Río Tampaón	5,080.1	6.2	6.0	5.1	-0.2	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	

\* Regiones Hidrológicas:  
 26 Pánuco  
 37 El Salado

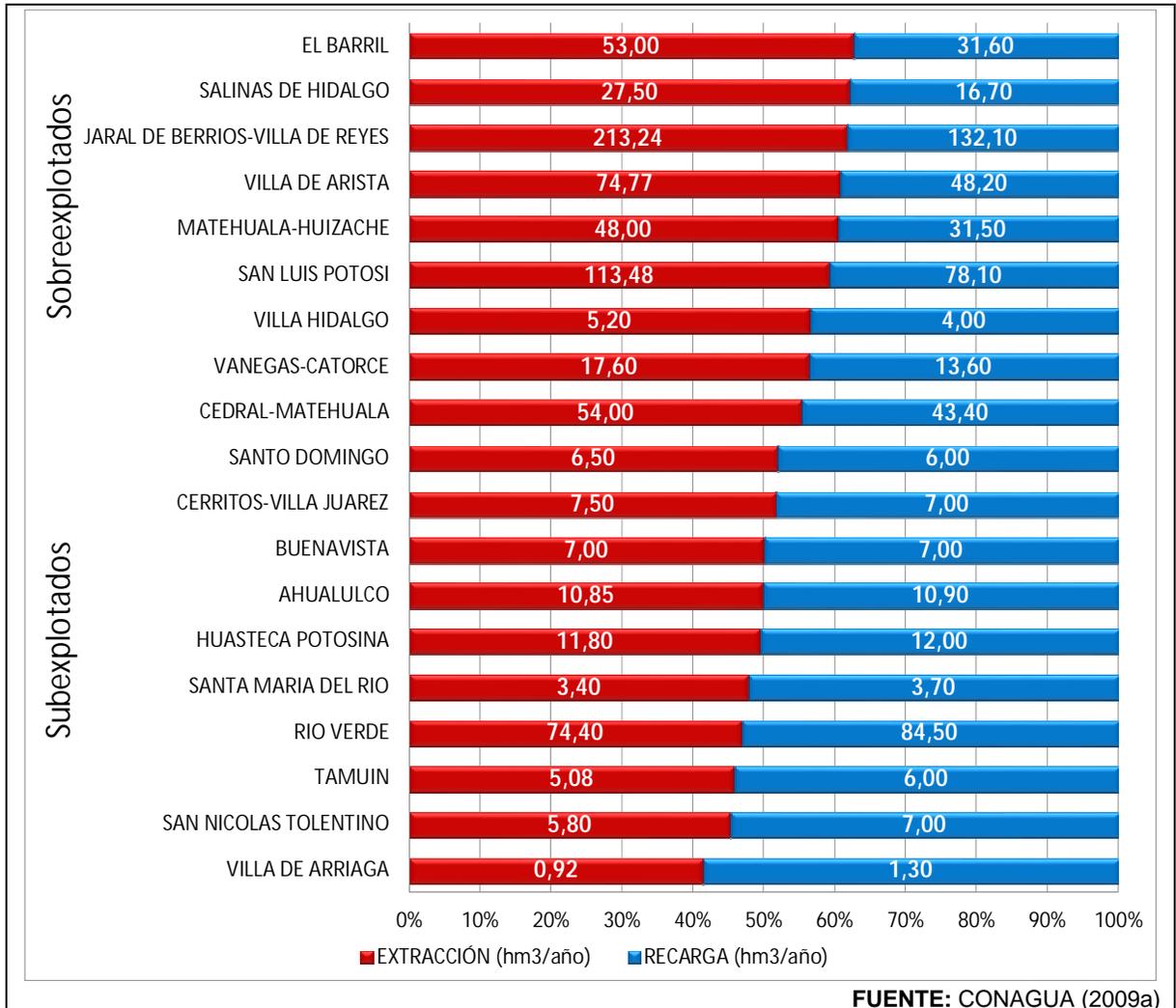
Fuentes: INEGI (2007), CONAGUA (2009a)



**Figura 7. Cantidad de acuíferos explotados por estado**

De acuerdo con los datos reportados, los acuíferos están presentando serios problemas, como son la salinización de suelos y aguas, debida a la presencia de evaporitas en los acuíferos Salinas de Hidalgo y El Barril. En la Figura 8 se observa la relación de extracción/recarga de los acuíferos expresada en porcentajes, de esta forma es posible ver cómo los acuíferos Cedral-Matehuala, Santo Domingo, Cerritos-Villa Juárez, Buenavista, Ahualulco, Huasteca Potosina, Santa María del Río, Rio Verde, Tamuín, San Nicolás Tolentino y Villa de Arriaga tienen una relación inferior al 50%, lo que indica que el volumen extraído es menor al recargado, con lo que se configura la subexplotación, sin embargo hay que aclarar que la relación más baja es de apenas 0.71 para Villa

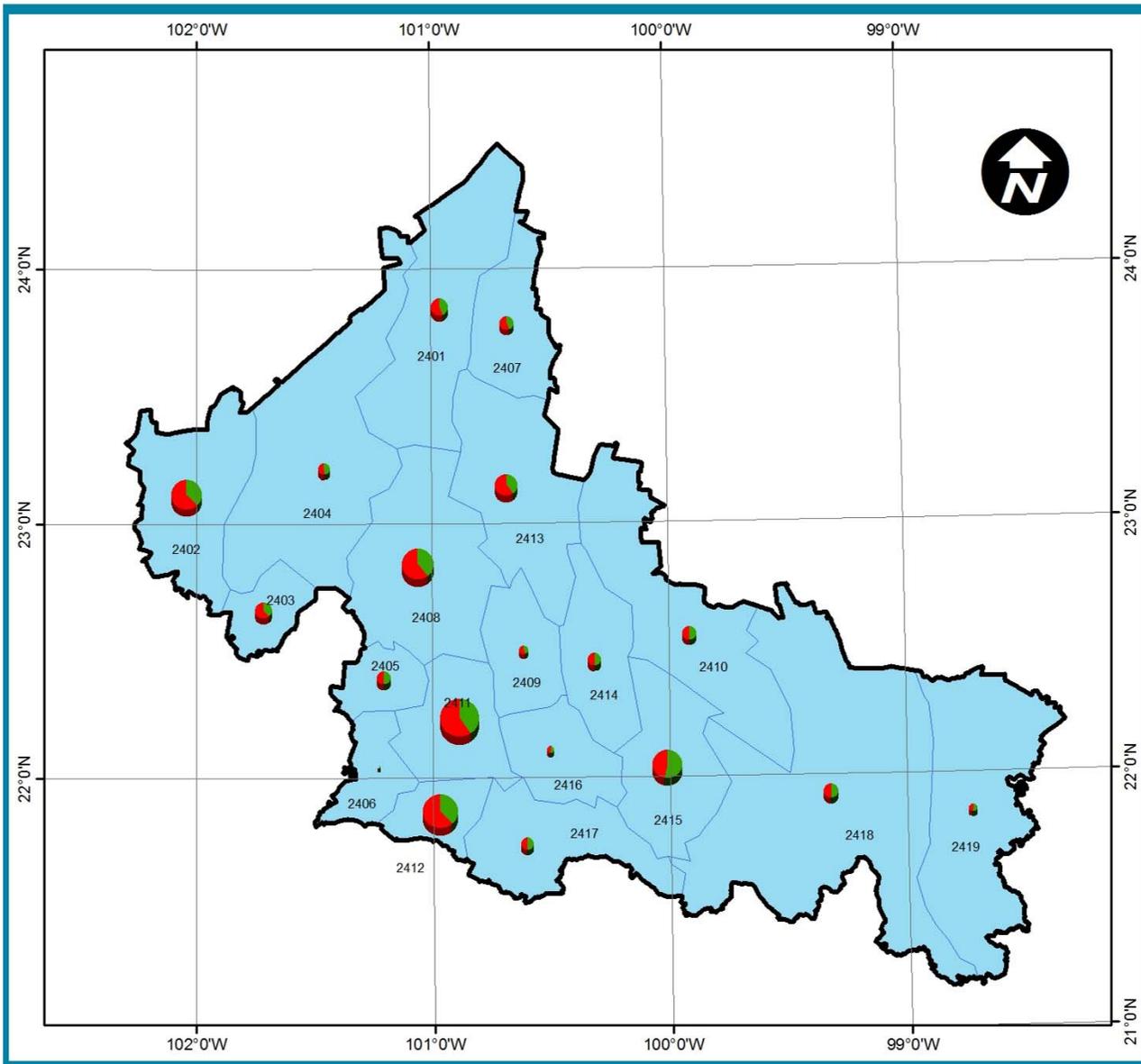
de Arriaga. Buenavista, Ahualulco y Huasteca Potosina fueron reportados con una proporción aproximadamente igual a 1, y los restantes tienen una relación mayor a uno, es decir, están siendo sobre-explotados.



**Figura 8. Relación extracción/recarga de los acuíferos en S.L.P.**

En el Mapa 5 se aprecia la distribución de las zonas y la relación existente entre el volumen concesionado y las tasas de recarga y extracción.

Los acuíferos con mayor gasto son Villa de Arista, Rioverde, El Barril y San Luis Potosí, los cuales en conjunto representan el 54% del total del agua extraída.



ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA  
SUBSIDENCIA COMO HERRAMIENTA  
DE LA GESTIÓN AMBIENTAL  
EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

Mapa No. 5  
Límites de acuíferos  
y volúmenes de extracción

CONVENCIONES

Volumen Concesionado (m3)

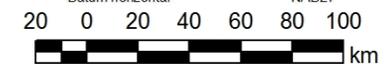


Recarga

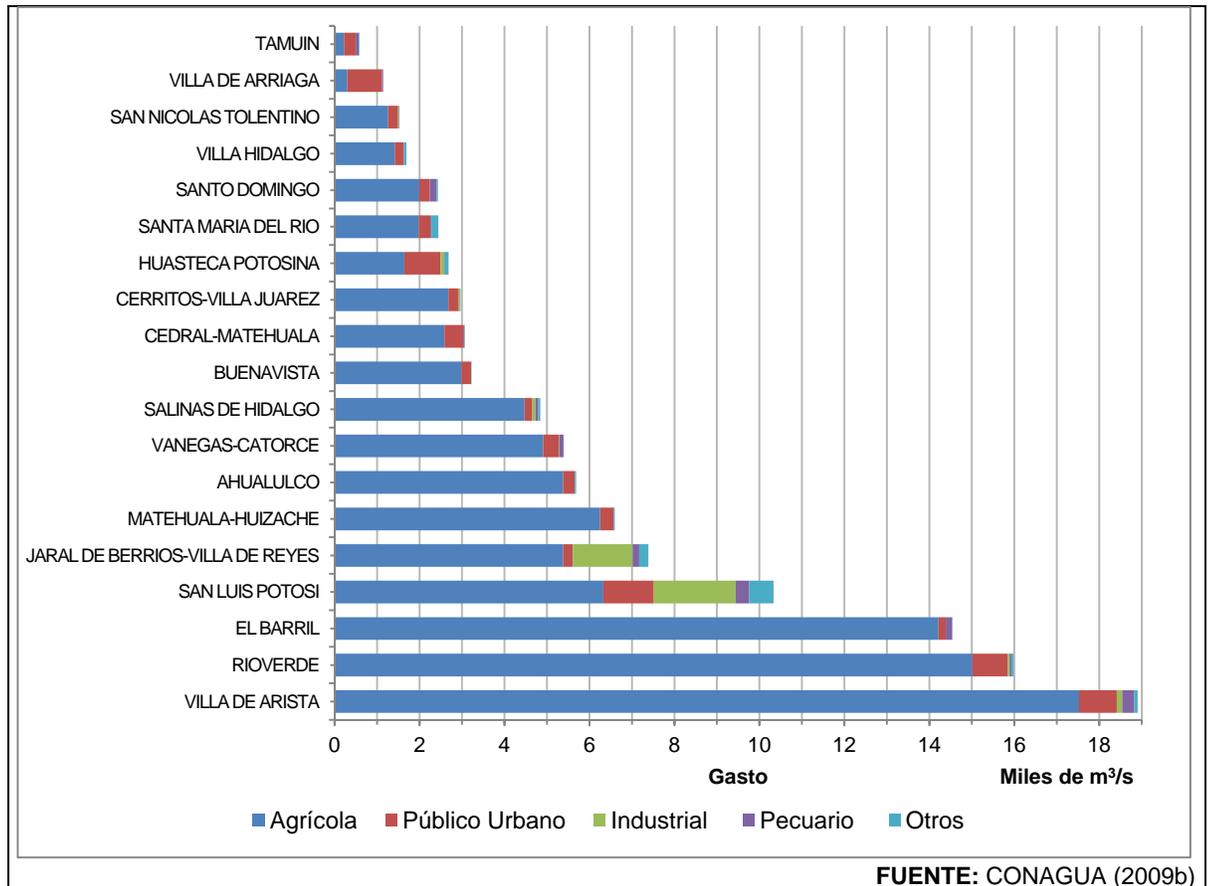
Extracción

Clave	Acuífero
2401	VANEGAS-CATORCE
2402	EL BARRIL
2403	SALINAS DE HIDALGO
2404	SANTO DOMINGO
2405	AHUALULCO
2406	VILLA DE ARRIAGA
2407	CEDRAL MATEHUALA
2408	VILLA DE ARISTA
2409	VILLA HIDALGO
2410	BUENAVISTA
2411	SAN LUIS POTOSÍ
2412	JARAL DE BERRIOS-VILLA DE REYES
2413	MATEHUALA-HUIZACHE
2414	CERRITOS VILLA JUAREZ
2415	RIO VERDE
2416	SAN NICOLAS TOLENTINO
2417	SANTA MARIA DEL RIO
2418	HUASTECA POTOSINA
2419	TAMUÍN

Elaboró Iván Leonardo Herrera Pérez  
Fuente CONAGUA (2009b)  
Proyección Cónica conforme de Lambert  
Falso este (metros) 2,000,000.00  
Falso norte (metros) 0.00  
Meridiano central -102° 0' 0"  
Primer paralelo base 17° 30' 0"  
Segundo paralelo base 29° 30' 0"  
Latitud de origen 0° 0' 0"  
Unidad lineal metros (1.000000)  
Datum horizontal NAD27



El principal uso del agua es con fines agrícolas que corresponde al 87% del gasto total mientras que el 13% restante se distribuye en 8% para uso público urbano, 3% para uso industrial y 1% para uso pecuario y otros usos tales como doméstico, servicios y acuacultura (Figura 9).



**Figura 9. Uso y gasto del agua**

Las zonas de veda restringen el uso del agua subterránea con el fin de disminuir la presión ejercida sobre los acuíferos y cuencas del país (CONAGUA, 2011) y fueron definidas en el artículo 9 del reglamento de la Ley de fecha 29 de diciembre de 1956 en materia de aguas del subsuelo, publicado por el DOF el 29 de febrero de 1958, como “...aquellas regiones en las que por sus condiciones hidrogeológicas, o por consideraciones de interés público, el

*Ejecutivo haya decretado o decrete la prohibición temporal o condicional para realizar nuevas obras de alumbramiento de las aguas del subsuelo.” El artículo 11 del mismo Reglamento, define tres tipos de veda:*

- I. Zonas de veda en las que no es posible aumentar las extracciones sin peligro de abatir peligrosamente o agotar los mantos acuíferos.*
- II. Zonas en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.*
- III. Zonas de veda en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.*

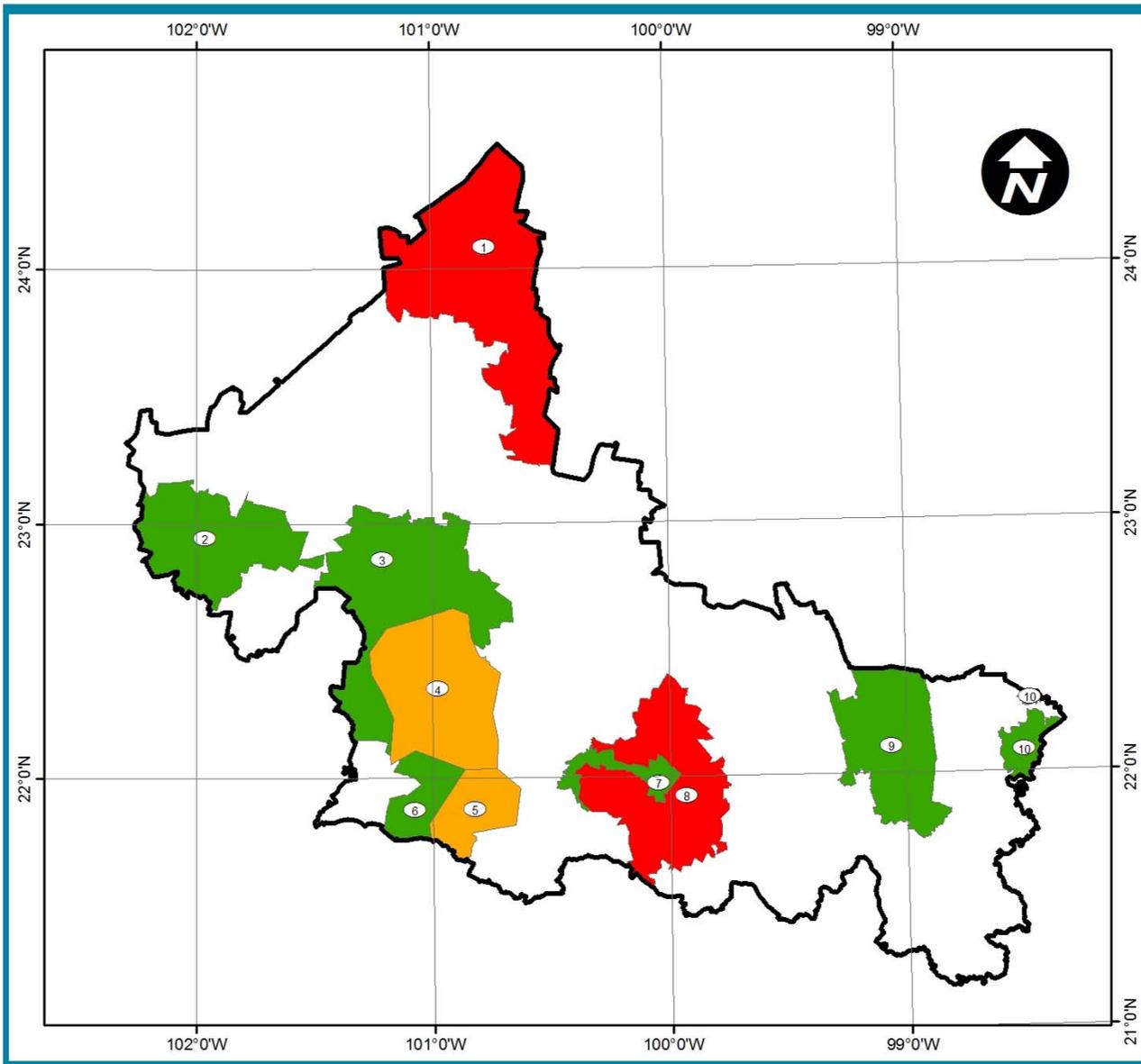
En la Ley de Aguas Nacionales promulgada en 1992, en su artículo 3 amplió la definición de zona de veda:

*Aquellas áreas específicas de las regiones hidrológicas, cuencas hidrológicas o acuíferos, en las cuales no se autorizan aprovechamientos de agua adicionales a los establecidos legalmente y éstos se controlan mediante reglamentos específicos, en virtud del deterioro del agua en cantidad o calidad, por la afectación a la sustentabilidad hidrológica, o por el daño a cuerpos de agua superficiales o subterráneos.*

Esta misma ley en el artículo 38, establece que el Ejecutivo Federal es la autoridad competente para decretar el establecimiento de zonas de veda; las cuales continúan vigentes pero ya no se clasifican (CONAGUA, 2004).

En el territorio potosino se han establecido zonas de veda para la protección del recurso hídrico, que están disponibles en el subsistema de visualización de las capas de datos geográficos de los aprovechamientos inscritos del Registro

Público de Derechos de Agua (REPDA) de CONAGUA, (Mapa 6). Se declararon dos zonas de veda tipo III, la primera en los municipios de Matehuala y Cedral y la otra en Rioverde, la veda tipo II fue declarada en el valle de San Luis Potosí, cuya área posteriormente fue ampliada. Las restantes zonas de veda se definen como “No Clasificada” y corresponden a los municipios de Ciudad Valles, Villa de Ramos, Venado, Mexquitic, Ahualulco, Ciudad Fernández y el distrito de riego del río Pánuco.



ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA  
SUBSIDENCIA COMO HERRAMIENTA  
DE LA GESTIÓN AMBIENTAL  
EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

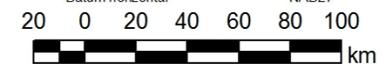
Mapa No. 6  
Zonas de veda

CONVENCIONES

- N *No clasificada*
- Tipo II *Extracciones para usos domésticos.*
- Tipo III *Extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros*

ID	NOMBRE
1	Municipios de Vanegas, Cedral y Matehuala
2	Villa de Ramos
3	Municipios de Venado, Mexquitic, Ahualulco y ot
4	Valle de San Luis Potosí
5	Ampliación Valle de San Luis Potosí
6	Municipios de Villa de Reyes y San Luis Potosí
7	Municipio de Ciudad Fernández
8	Municipio de Río Verde
9	Municipio de Ciudad Valles
10	Distrito de Riego Río Pánuco
10	Distrito de Riego Río Pánuco

Elaboró Iván Leonardo Herrera Pérez  
Fuente CONAGUA (2009b)  
Proyección Cónica conforme de Lambert  
Falso este (metros) 2,000,000.00  
Falso norte (metros) 0.00  
Meridiano central -102° 0' 0"  
Primer paralelo base 17° 30' 0"  
Segundo paralelo base 29° 30' 0"  
Latitud de origen 0° 0' 0"  
Unidad lineal metros (1.000000)  
Datum horizontal NAD27



### **CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA**

De acuerdo con Bonachea (2006), INGEOMINAS (2001) y Vargas (1999) la zonificación de amenazas se puede llevar a cabo mediante el uso de métodos directos, también llamados empíricos o implícitos que se basan en el levantamiento del inventario de fenómenos ocurridos anteriormente, partiendo del principio de que nuevos eventos ocurrirán con mayor probabilidad donde se han presentado previamente. También se pueden usar métodos indirectos que pueden ser:

- **Método Determinístico:** usado principalmente en trabajos de ingeniería, mediante el uso de modelos físicos y matemáticos, lo cual lo limita a áreas de pequeña extensión donde las condiciones geológicas y geomorfológicas son homogéneas.
- **Método Heurístico o Explícito Empírico:** Se lleva a cabo mediante la ponderación de los factores condicionantes y detonantes de los fenómenos, usando criterios subjetivos con base en la experiencia del zonificador quien asigna los pesos, dando como resultado un mapa de valores numéricos divididos en rangos para diferenciar zonas con diferentes niveles de susceptibilidad.
- **Métodos semianalíticos:** También se basa en la ponderación de factores, pero con este método los pesos se calculan mediante análisis estadísticos univariados o multivariados. La ponderación se lleva a cabo usando mapas índice (factores condicionantes) que se contrastan con una muestra representativa del fenómeno a evaluar.

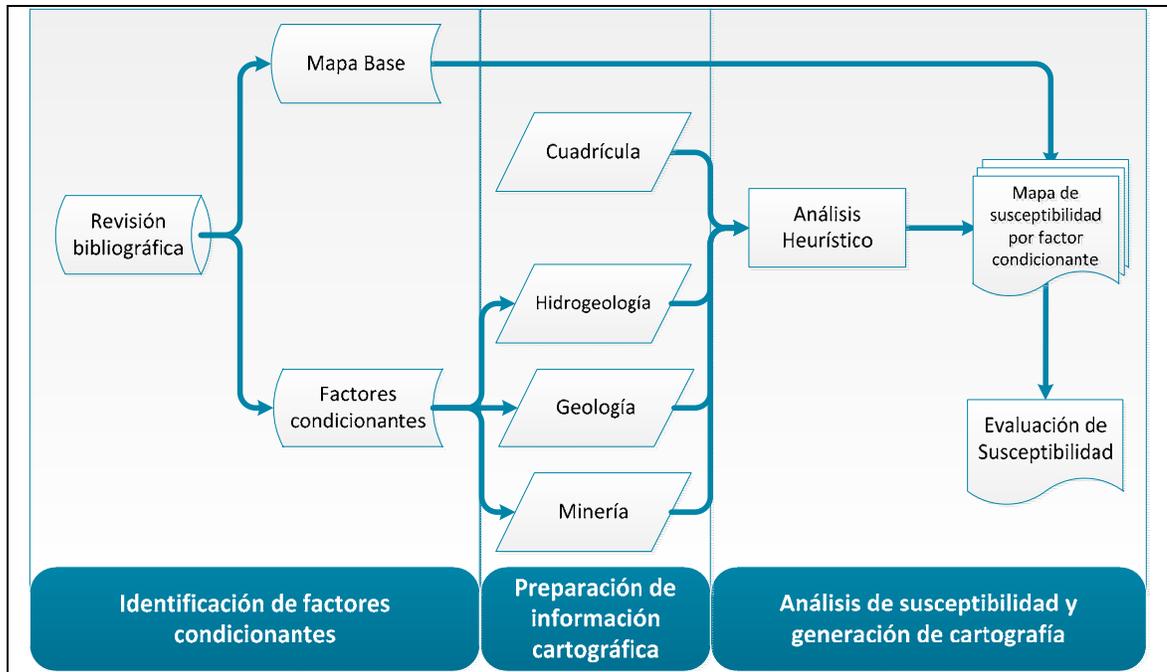
El presente trabajo se llevará a cabo mediante una adaptación del método heurístico empleado para la zonificación de susceptibilidad para movimientos en masa (Herrera, 2007; INGEOMINAS, 2001; Vargas, 1999), en razón a que a la fecha no se ha definido una metodología para la evaluación de subsidencia del terreno. Esta metodología propuesta se compone de tres etapas (Figura 10):

1. Identificación de factores condicionantes: mediante revisión bibliográfica se buscará identificar los principales factores que inciden en el desarrollo de zonas de subsidencia del terreno.
2. Preparación de información cartográfica: En una segunda etapa, se recopila la información cartográfica que represente los factores identificados previamente y se hace una homogenización de proyecciones si es necesario.
3. Evaluación de la susceptibilidad: la combinación de la información cartográfica, permitirá hacer un análisis espacial el cual se representará a través de un mapa de susceptibilidad a la subsidencia del terreno.

### **3.1 IDENTIFICACIÓN DE FACTORES CONDICIONANTES**

Como se indica en la Figura 10, la primera etapa consistió en la revisión bibliográfica con el objetivo de identificar los factores que condicionan la subsidencia del terreno, cuyo resultado se sintetiza en la Tabla 6, en donde se puede apreciar que de veintiséis trabajos consultados, los primeros veinte muestran que el principal factor es la explotación de agua subterránea mientras que en los seis restantes señalan la disolución de rocas y el colapso de túneles como factores condicionantes. En la mayoría de estos trabajos se mencionan

las manifestaciones del fenómeno, las cuales se resumen en aparición de grietas en infraestructuras y hundimientos del terreno.



**Figura 10. Proceso metodológico para la evaluación de susceptibilidad**

<b>Tabla 6. Factores condicionantes de subsidencia del terreno</b>			
<b>Autor</b>	<b>Lugar</b>	<b>Factor</b>	<b>Manifestación</b>
Abidin et al. (2001)	Jakarta (Indonesia)	Explotación de agua subterránea	Agrietamiento de construcciones
Anderssohn, et al. (2008)	Irán	Explotación de agua subterránea para agricultura intensiva	No reportada
Aranda et al. (2008)	San Luis Potosí - Soledad de Graciano Sánchez (México)	Explotación de agua subterránea. Presencia de paleo cauces	Deformación vertical del relleno sedimentario debido a la irregularidad del subsuelo. Coincidencia con horizontes arenosos y limosos
Arroyo et al. (2004)	Aguascalientes (México)	Explotación de agua subterránea	Agrietamiento del suelo
Arzate et al. (2008)	San Luis Potosí - Soledad de Graciano Sánchez	Compactación del suelo por explotación de acuíferos. Lechos rocosos irregulares	Asentamientos, ruptura de pisos, agrietamientos de calles

<b>Tabla 6. Factores condicionantes de subsidencia del terreno</b>			
<b>Autor</b>	<b>Lugar</b>	<b>Factor</b>	<b>Manifestación</b>
Babel et al. (2006)	Tailandia	Explotación de agua subterránea para uso doméstico e industrial	Inundación de áreas costeras Cambios en la pendiente y elevación de drenajes
Chai, et al. (2004)	Shangai (China)	Explotación de agua subterránea	No reportada
Chou & Ting (2007)	Taiwán	Explotación de agua subterránea	No reportada
Don et al. (2006)	Japón	Explotación de agua subterránea	Daños en infraestructura
Esteller & Díaz-Delgado (2002)	Río Lerma - Cuenca superior (México)	Explotación de agua subterránea	Secado de pantanos, descenso en el nivel del río
He et al. (2006)	Tianjin (China)	Explotación de agua subterránea	Declinación de la infiltración, intrusiones marinas, salinización del suelo
Kontogianni et al. (2007)	Grecia	Explotación de agua subterránea	Agrietamiento del suelo
Marfai & King (2007)	Semarang (Indonesia)	Explotación de agua subterránea, consolidación natural del suelo y el peso de las construcciones	Daños en infraestructura e intrusión de la marea en zonas bajas
Mousavi et al. (2001)	Irán	Explotación de agua subterránea	Fisuras del terreno, salinización de acuíferos, grietas en carreteras y daños a los equipos de bombeo de agua subterránea
Raucoules et al. (2003)	Prato (Italia)	Explotación de agua subterránea para uso industrial	Alteración del nivel piezométrico
Shi et al. (2007)	Su-Xi-Chang (China)	Explotación de agua subterránea	No reportada
Sletto (1995)	México D.F.	Explotación de agua subterránea	Hundimientos del terreno
Tortajada (2006)	México D.F.	Explotación de agua subterránea	No reportada
Trueba (2004)	San Luis Potosí (México)	Explotación de agua subterránea	Agrietamientos y depresiones del terreno, daños a viviendas, edificios e infraestructura en general, daños a parcelas agrícolas.

<b>Tabla 6. Factores condicionantes de subsidencia del terreno</b>			
<b>Autor</b>	<b>Lugar</b>	<b>Factor</b>	<b>Manifestación</b>
Xue et al. (2005)	China	Explotación de agua subterránea, extracción de petróleo y aguas termales, neotectónica	Deformación y agrietamiento del terreno, agrietamiento de infraestructura.
Johnson (2005)	EEUU	Disolución de evaporitas	Generación de dolinas
Lucha et al. (2008)	España	Disolución de masas salinas	Generación de nuevas cavidades y ampliación de las existentes, aparición de dolinas
Simón et al. (2009)	Zaragoza (España)	Disolución de yeso	Dolinas, agrietamientos y colapso de edificaciones
Bell, et al. (2005)	Inglaterra, Alemania, Colombia	Colapso de túneles mineros antiguos, yacentes bajo áreas urbanas	Hundimiento de la superficie
Ingeominas (2003)	Pasto (Colombia)	Colapso de túneles mineros	Colapso del suelo bajo las casas. Agrietamientos en muros, daños en puertas y algunos daños estructurales
Tapia (2006)	México D.F.	Colapso de túneles mineros	Hundimiento y destrucción de algunas viviendas, agrietamientos de muros y calles

Con base en los resultados de la información recopilada y analizada, se estableció que la hidrogeología, geología y minería serían los factores a analizar para el análisis de susceptibilidad.

### **3.2 PREPARACIÓN DE INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA**

En el trabajo cartográfico se utilizó el software ArcMap 9.2, por lo que la información de entrada relacionada con los factores definidos en la etapa anterior: hidrogeología, geología y minería, además de la información para el mapa base, se recopiló en formato shape, compatible con dicho software.

Como software de apoyo se utilizó Google Earth, principalmente para la visualización de información en formato KMZ, propio de este software.

En la Tabla 7 se presenta un resumen de las capas de información cartográfica usadas en el presente trabajo, la fuente y la escala original, donde fue especificada.

<b>Tabla 7. Capas utilizadas</b>				
<b>Nombre</b>	<b>Tipo Archivo</b>	<b>Geometría</b>	<b>Escala Original</b>	<b>Fuente</b>
<b>Mapa Base</b>				
Cabecera	Shape	Punto	GPS	CONABIO (2004)
Curvas de nivel	Shape	Línea	1:250,000	CONABIO (1998)
Límite estatal	Shape	Polígono	1:250,000	CONABIO (2003)
Límite municipal	Shape	Polígono	No especificada	CTREIG (s.f.)
<b>Hidrogeología</b>				
Aprovechamientos subterráneos	KMZ	Punto	No especificada	CONAGUA (2009b)
Límite de acuíferos	KMZ	Polígono	No especificada	CONAGUA (2009b)
Zonas de veda	KMZ	Polígono	No especificada	CONAGUA (2009b)
<b>Geología</b>				
Estratigrafía	Shape	Polígono	No especificada	CTREIG (s.f.)
Lineamientos	Shape	Línea	No especificada	CTREIG (s.f.)
Minas	Shape	Punto	1:1,000,000	INEGI (2002)

El Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Percepción Remota (PR) de la Coordinación de Ciencias Sociales y Humanidades - CCSyH en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí - UASLP, proporcionó los archivos digitales en formato shape generados por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad - CONABIO, el Comité Técnico Regional de Estadística y de Información - CTREIG y el INEGI. No así la información de CONAGUA, la cual está disponible para descarga en formato KMZ para Google Earth usando el subsistema de visualización de las capas de

datos geográficos de los aprovechamientos inscritos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) en el sitio web <http://siga.conagua.gob.mx/REPDA/Menu/FrameKMZ.htm>.

El análisis espacial se realizó mediante el uso del software ArcMap 9.2, por lo tanto los archivos KMZ descargados se transformaron a formato shape compatible con ArcMap, usando la herramienta en línea “Google Earth to Shapefile” alojada en <http://www.zonums.com/online/kml2shp.php>.

Los archivos shape resultantes conservaron la información espacial, pero no así los atributos de cada elemento. Para recuperar los datos, fue necesario extraer los atributos del archivo KMZ original para obtener una tabla en formato DBF compatible con ArcGis, que permitiera realizar un join con el shape, procediendo de la siguiente manera para cada uno: Se desplegó el archivo KMZ en Google Earth y con un click derecho sobre la capa se seleccionó la opción “Copiar” del menú contextual. El contenido del portapapeles se pegó en una hoja de Microsoft Excel para filtrar y eliminar los datos innecesarios; en el programa ArcMap, se transformó el archivo Excel resultante a formato DBF mediante la herramienta “*Copy Rows*” y se anexaron los atributos de la tabla al shape mediante un join.

Una vez recopilada toda la información en formato shape, se estandarizaron los parámetros cartográficos para ajustarlos a la proyección cartográfica Cónica Conforme de Lambert como se muestra en la Tabla 8.

<b>Tabla 8. Parámetros cartográficos utilizados</b>	
Proyección	Cónica conforme de Lambert
Falso este (metros)	2,000,000.000000
Falso norte (metros)	0.000000
Meridiano central	-102.000000
Primer paralelo base	17.500000
Segundo paralelo base	29.500000
Latitud de origen de la proyección	0.000000
Unidad lineal	Meter (1.000000)
Dátum horizontal	Dátum de Norte América de 1927-NAD27

### **3.3 ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A LA SUBSIDENCIA DEL TERRENO**

El análisis espacial consiste en la asignación de pesos a cada uno de los elementos que componen los factores tenidos en cuenta, para después mediante la intersección de capas obtener áreas con diferentes pesos que indicarán la susceptibilidad. Sin embargo, debido a que la información recolectada se presentaba en forma de puntos, líneas y polígonos fue necesario buscar la forma de obtener una unidad espacial de referencia homogénea que permitiera la comparación de estas geometrías.

Por ello se utilizó el recurso de la cuadrícula donde la selección del tamaño de los cuadrantes se realizó de forma subjetiva al no encontrar referencias explícitas a la forma de calcular los tamaños de los cuadrantes, de forma que no sean tan grandes que oculten la información o tan pequeños que generen una redundancia de datos, sino que permitan una visualización de las diferencias espaciales en las variables procesadas. Lara (2010) utilizó una cuadrícula de diez minutos, para su trabajo sobre valoración ambiental a través de niveles de asimilación económica realizado en el estado de San Luis Potosí, en donde cada cuadrante cubría aproximadamente 300 km<sup>2</sup>. Con estas

consideraciones, para este trabajo el territorio estatal se dividió en 265 cuadrantes de 300 km<sup>2</sup> cada uno, correspondientes a aproximadamente el 0.5% del área total del Estado; enumerando las columnas de la A a la X y las filas de la 1 a la 22 (Mapa 7).

La cuadrícula permitió entonces comparar los puntos y líneas con polígonos, calculando para los puntos la densidad de puntos por cuadrante, y para líneas la longitud total de líneas por cuadrante.

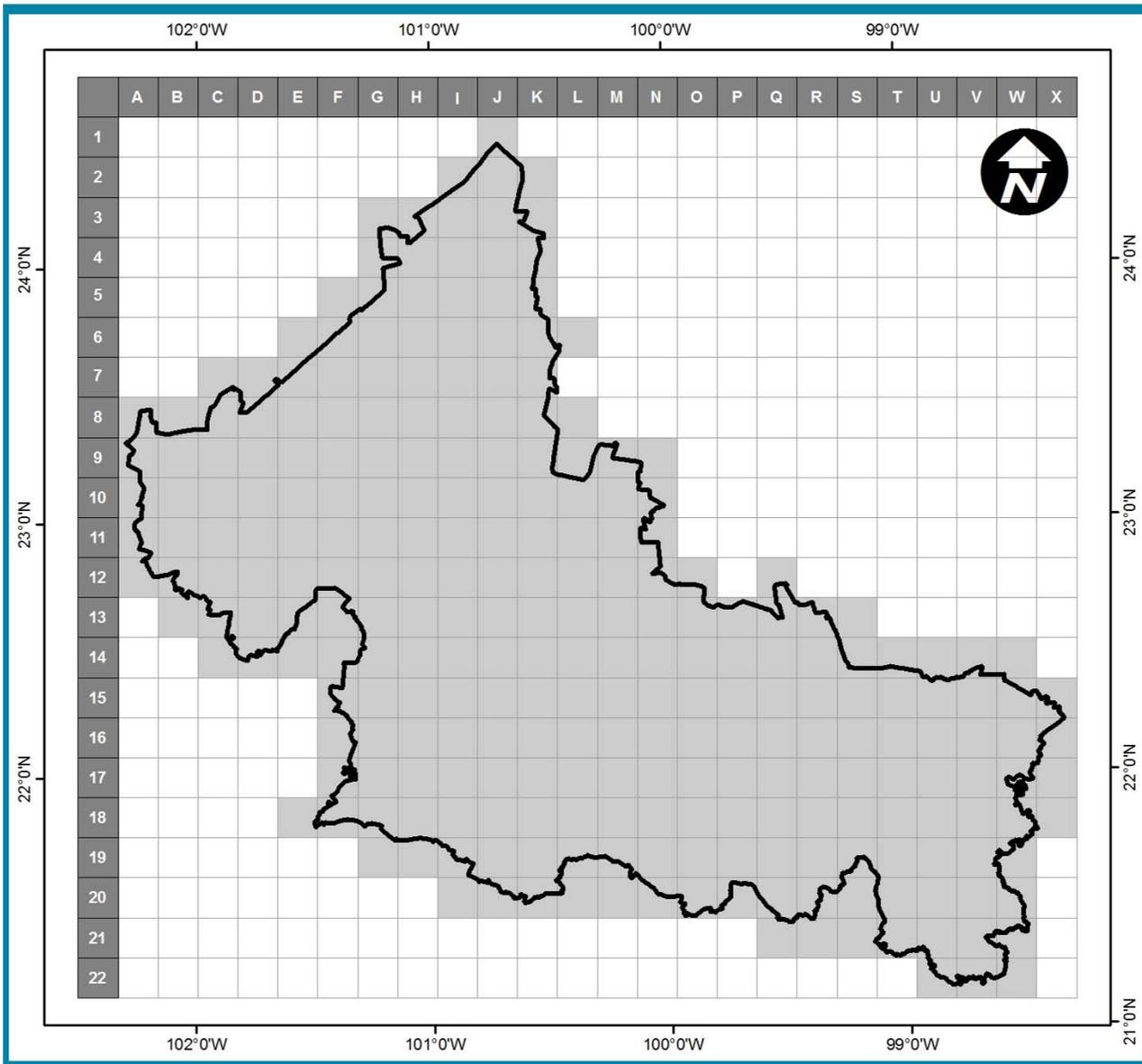
A continuación se describe el procedimiento realizado para cada uno de los factores empleados en la evaluación de la susceptibilidad.

### **3.3.1 Hidrogeología**

Se tomaron en cuenta los aprovechamientos de agua subterránea y las zonas de veda. Los acuíferos no fueron incluidos debido a que sus características de origen, relleno y tipo son muy homogéneas y por lo tanto, tienen niveles de susceptibilidad muy similares, que no aportaban diferencias significativas en el análisis.

#### **3.3.1.1 Pozos**

La información generada por CONAGUA en lo relativo a los aprovechamientos de aguas subterráneas (Mapa 8) contenía datos como su localización, región hidrológica y cuenca, municipio, acuífero, uso del agua, volumen concesionado y gasto para cada uno de los 12,445 aprovechamientos registrados en el Estado. Para efectos del análisis se consideró pertinente evaluar los datos de: densidad (número de pozos por unidad de área), gasto y volumen concesionado.



ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA SUBSIDENCIA COMO HERRAMIENTA DE LA GESTIÓN AMBIENTAL EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

Mapa No. 7 Cuadrícula guía

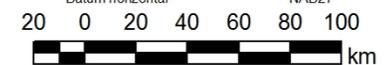
CONVENCIONES

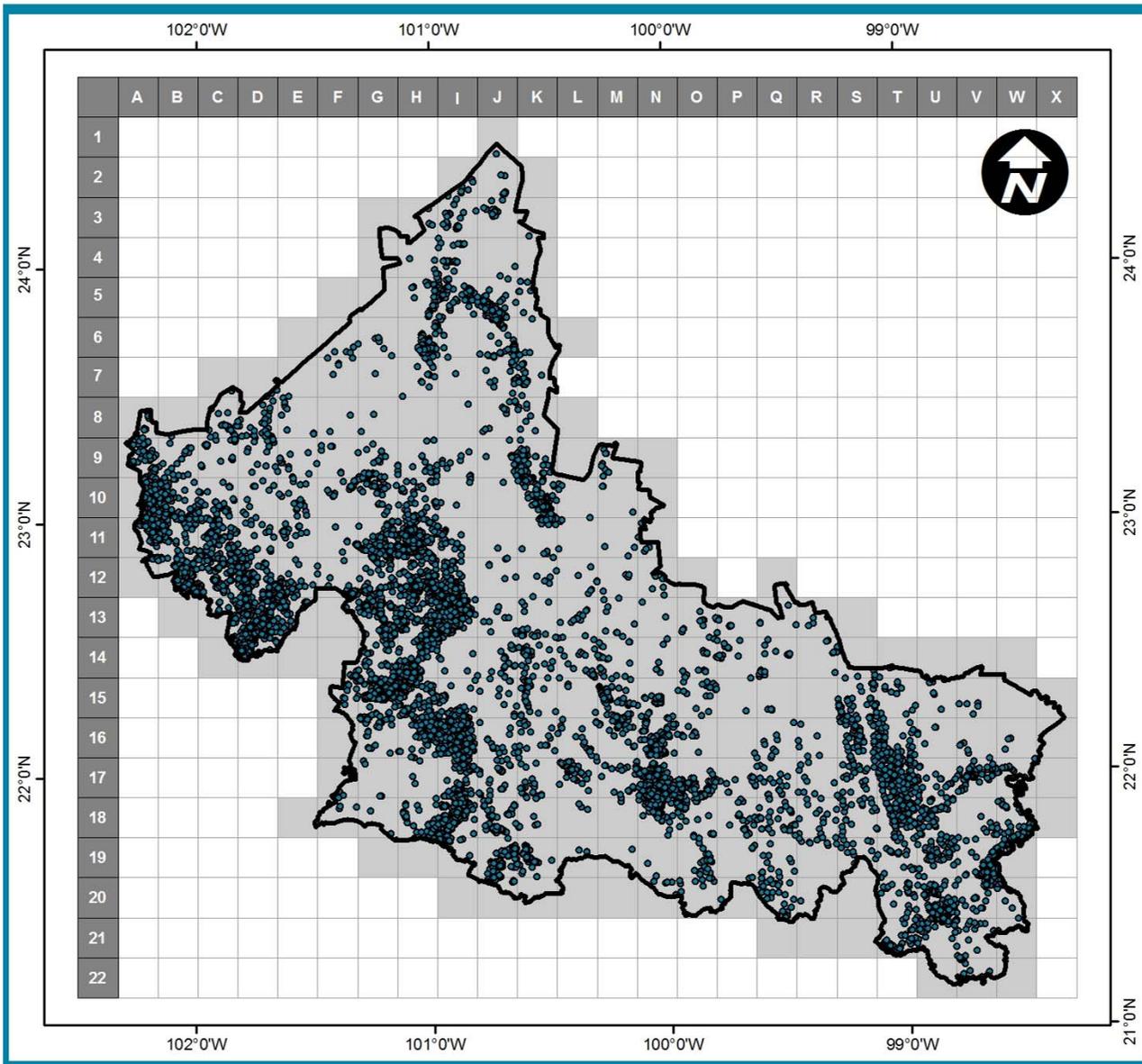
Limite estatal

Cuadrícula

Cuadrantes usados

Elaboró Iván Leonardo Herrera Pérez  
Fuente Elaboración propia  
Proyección Cónica conforme de Lambert  
Falso este (metros) 2,000,000.00  
Falso norte (metros) 0.00  
Meridiano central -102° 0' 0"  
Primer paralelo base 17° 30' 0"  
Segundo paralelo base 29° 30' 0"  
Latitud de origen 0° 0' 0"  
Unidad lineal metros (1.000000)  
Datum horizontal NAD27





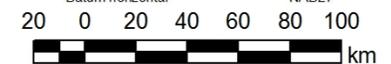
**ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA  
SUBSIDENCIA COMO HERRAMIENTA  
DE LA GESTIÓN AMBIENTAL  
EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO**

**Mapa No. 8**  
**Localización de aprovechamientos**  
**de agua subterránea**

**CONVENCIONES**

- Aprovechamientos de agua registrados

Elaboró Iván Leonardo Herrera Pérez  
Fuente CONAGUA (2009b)  
Proyección Cónica conforme de Lambert  
Falso este (metros) 2,000,000.00  
Falso norte (metros) 0.00  
Meridiano central -102° 0' 0"  
Primer paralelo base 17° 30' 0"  
Segundo paralelo base 29° 30' 0"  
Latitud de origen 0° 0' 0"  
Unidad lineal metros (1.000000)  
Datum horizontal NAD27



El proceso se realizó completamente en ArcMap 9.2, y el primer paso consistió en asignar a cada punto el valor del cuadrante correspondiente mediante la intersección de la capa de pozos con la cuadrícula creando un shape intermedio.

Para obtener la densidad, a partir del shape recién creado se calculó el número de pozos para cada cuadrante mediante una tabla de frecuencias, valor que finalmente se transfirió a la tabla de atributos de la cuadrícula en forma de porcentaje. Los datos resultantes fueron clasificados con cortes naturales (Jenks) en seis clases y a la que se le asignó un peso ( $W_p$ ) que varía entre 0 y 5, donde 0 indica el menor peso de la variable y 5 el máximo.

Para el volumen concesionado y el gasto se siguió un proceso similar; a partir del shape intermedio se calculó la sumatoria de volumen concesionado y gasto para cada cuadrante usando una tabla de frecuencias, y a partir de esta, se calculó el valor total. Con estos dos valores fue posible calcular el porcentaje del total de volumen y gasto para cada celda, que fue anexado a la tabla de atributos de la cuadrícula. Los datos resultantes se clasificaron con cortes naturales (Jenks) en seis clases y se le asignó un peso ( $W_v$  para el volumen concesionado y  $W_s$  para el gasto) que varía entre 0 y 5, donde 0 indica el menor peso de la variable y 5 el máximo (Tabla 9).

<b>Tabla 9. Valores de W para pozos</b>			
<b>Densidad Pozos</b>	<b>Volumen Concesionado</b>	<b>Gasto</b>	<b>W</b>
0%	0%	0%	0
< 0.2%	< 0.4%	< 0.3%	1
0.2 - 0.5%	0.4 - 1.1%	0.3 - 1.2%	2
0.5 - 1.2%	1.1 - 2.3%	1.2 - 2.2%	3
1.2 - 2.8%	2.3 - 4.0%	2.2 - 3.7%	4
2.8 - 7.0%	4.0 - 6.3%	3.7 - 7.4%	5

### **3.3.1.2 Zonas de veda**

La importancia del mapa de zonas de veda radica en que indica las áreas con explotación intensiva de acuíferos, razón por la cual se incorporó esta variable en el análisis. La capa de zonas de veda se intersectó con la cuadrícula, para determinar los cuadrantes coincidentes generando un shape intermedio que permitió asignar el tipo de veda a cada cuadrante. Una vez establecido el tipo de veda se le asignaron pesos ( $W_z$ ): 0 si no hay veda, 1 para vedas tipo N, 3 para vedas tipo II y 5 para vedas tipo III; con lo que se asigna un mayor peso a las zonas que poseen vedas de control sobre aquellas que tienen veda no clasificada.

### **3.3.1.3 Susceptibilidad por factores hidrogeológicos**

Para obtener el valor de la susceptibilidad por valores hidrogeológicos, se sumaron los pesos de la densidad de pozos, volumen concesionado, gasto y zonas de veda para obtener un peso total ( $W_H$ ).

$$W_p + W_v + W_s + W_z = W_H$$

Con base en este valor, se clasificaron los datos en cinco categorías asignando el grado de susceptibilidad entre muy baja y muy alta, como se indica en la Tabla 10.

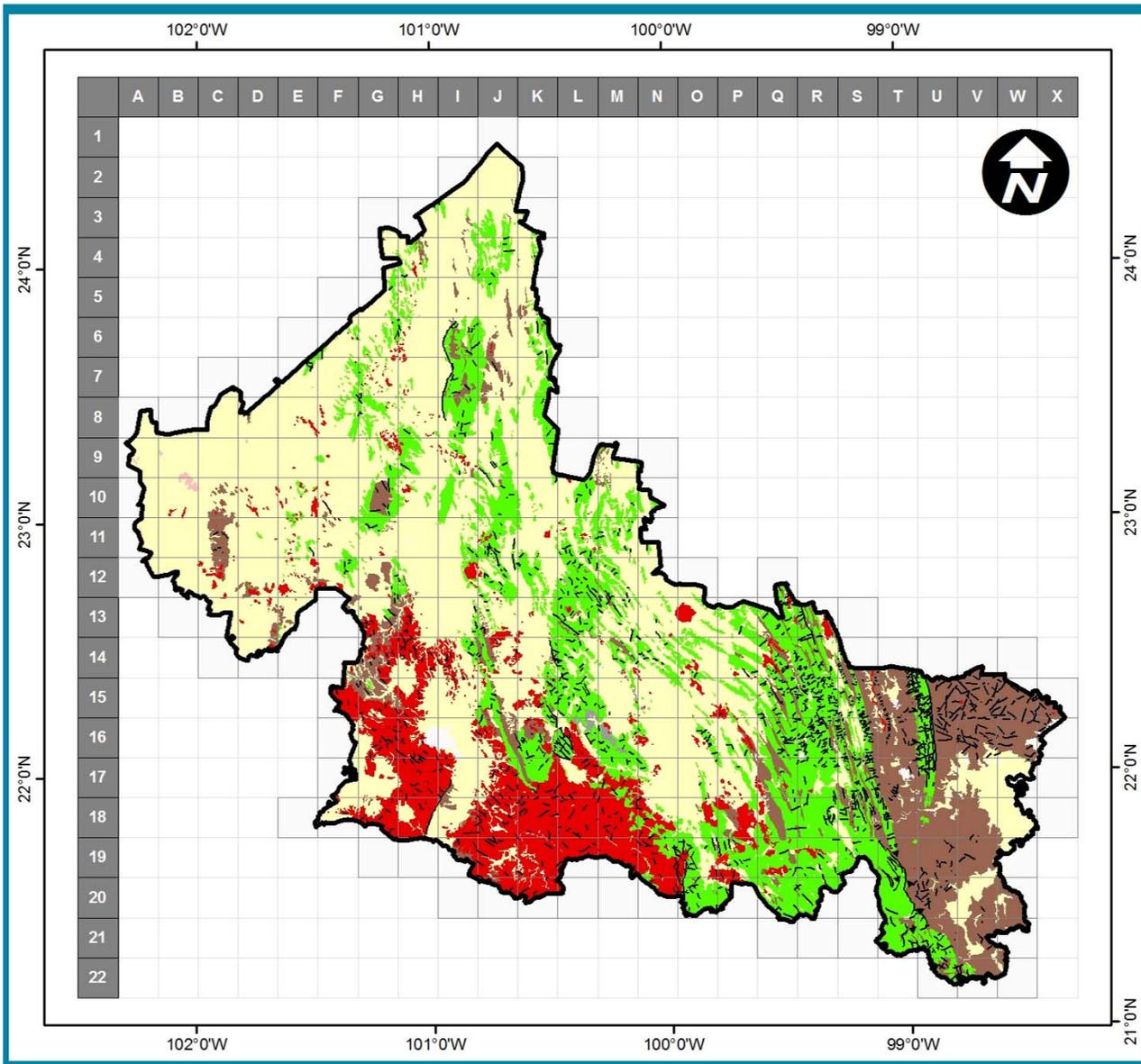
<b>Tabla 10. Intervalos de <math>W_H</math> para la susceptibilidad</b>	
<b>Intervalo</b>	<b>Categoría</b>
0	Muy baja
1 – 5	Baja
6 – 10	Media
11 – 15	Alta
16 – 20	Muy alta

### **3.3.2 Geología y minería**

En la geología se tomaron en cuenta dos variables, la litología (tipos de roca) y los lineamientos (fallas y fracturas), para la minería se evaluó la densidad de explotaciones mineras.

#### **3.3.2.1 Litología**

Dentro del territorio estatal afloran varios tipos de rocas, los cuales presentan diferentes niveles de susceptibilidad a la subsidencia del terreno. Por esta razón, se realizó una simplificación del mapa geológico agrupando en seis categorías los diferentes tipos de roca de acuerdo con su predisposición a la subsidencia del terreno obteniendo el Mapa 9, y de acuerdo con las características de cada grupo descritas a continuación, se asignaron pesos  $W_i$  entre 1 y 5, como se indica en la Tabla 11, donde 5 representa la mayor susceptibilidad:



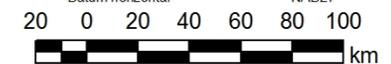
ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA  
SUBSIDENCIA COMO HERRAMIENTA  
DE LA GESTIÓN AMBIENTAL  
EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

Mapa No. 9  
Geología simplificada  
y lineamientos

CONVENCIONES

Geología simplificada	Lineamientos
Depósitos no consolidados	Falla Normal
Calizas	Falla Inversa
Yesos	Falla de Rumbo
Rocas Sedimentarias	Fractura
Rocas Metamórficas	
Rocas Ígneas	

Elaboró Iván Leonardo Herrera Pérez  
Fuente CTREIG (s.f.) CONABIO (2004)  
Proyección Cónica conforme de Lambert  
Falso este (metros) 2,000,000.00  
Falso norte (metros) 0.00  
Meridiano central -102° 0' 0"  
Primer paralelo base 17° 30' 0"  
Segundo paralelo base 29° 30' 0"  
Latitud de origen 0° 0' 0"  
Unidad lineal metros (1.000000)  
Datum horizontal NAD27



- Depósitos no consolidados: Agrupa los diferentes tipos de sedimento, que son compresibles, fácilmente erosionables y son los que se usan preferentemente para emplazar los aprovechamientos de agua subterránea.
- Calizas: Son rocas sedimentarias solubles en las que se presenta la subsidencia del terreno, sin embargo sus manifestaciones son a largo plazo; se presentan en una gran porción del territorio.
- Yesos: Roca sedimentaria evaporítica, altamente soluble en agua, mucho más soluble que la caliza, pero con una menor presencia en el área.
- Rocas Sedimentarias: Agrupa las rocas sedimentarias no solubles.
- Rocas Ígneas: Comprende las rocas intrusivas y extrusivas, tienen poca extensión en el área de estudio, son muy estables y no son solubles.
- Rocas Metamórficas: Al igual que las rocas ígneas, son estables, no solubles y con poca extensión.

En algunos cuadrantes, se presentó el caso de que contenía dos o más unidades geológicas diferentes. En estos casos fue necesario calcular el peso porcentual de cada unidad a partir de su área proporcional y cuya suma indica el peso definitivo del cuadrante. Para ello, se intersectó el mapa geológico con la cuadrícula y se generó un shape intermedio, en el cual se segmentaron las unidades geológicas y se calculó el área de cada unidad segmentada. Conociendo que cada cuadrante tiene un área de 300 km<sup>2</sup>, se calculó el porcentaje del área de cada segmento con respecto al cuadrante respectivo y este porcentaje se multiplicó por el peso de la unidad geológica para obtener el peso proporcional. El peso definitivo se obtuvo al sumar los pesos

proporcionales de las unidades geológicas que conforman el cuadrante, con valores entre 0 y 5.

**Tabla 11. Grupos de rocas y valores de  $W_i$**

<b>Grupo</b>	<b>Tipo de Roca</b>	<b><math>W_i</math></b>
Depósitos no consolidados	Aluvial	5
	Conglomerado	
	Lacustre	
	Residual	
Calizas	Caliza	4
Yesos	Yeso	3
Rocas Sedimentarias	Arenisca	2
	Arenisca-Conglomerado	
	Caliza-Lutita	
	Lutita	
	Lutita-Arenisca	
	Travertino	
Rocas Ígneas	Andesita	1
	Basalto	
	Basalto-Brecha volcánica básica	
	Brecha volcánica ácida	
	Brecha volcánica básica	
	Dacita	
	Diorita	
	Granito	
	Granodiorita	
	Latita	
	Pórfido riolítico	
	Riodacita	
	Riolita	
	Riolita-Toba ácida	
	Sienita	
	Toba ácida	
Toba básica		
Tonalita		
Rocas Metamórficas	Cuarcita	1
	Esquisto	

### 3.3.2.2 Lineamientos

A partir del shape de líneas geológicas, se extrajo la información referente a los lineamientos (fallas y fracturas) presentes, debido a que facilitan la infiltración

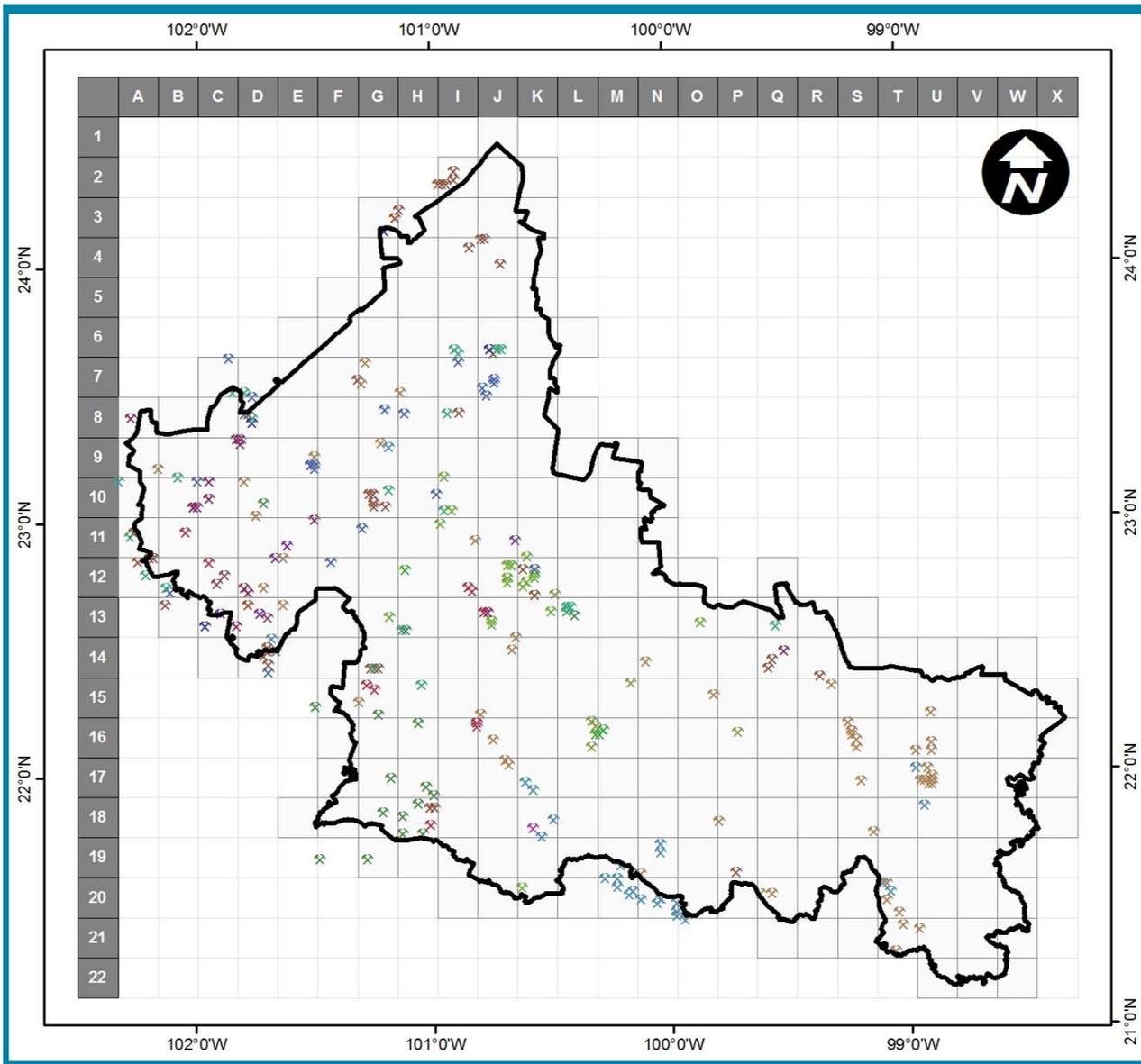
de agua, y en las rocas no solubles estos lineamientos son los lugares elegidos para la perforación de pozos de extracción de agua.

La evaluación de esta variable se llevó a cabo mediante la intersección de la capa de lineamientos con la cuadrícula, lo cual permitió segmentarlos; posteriormente se le asignó la celda correspondiente y se calculó la longitud de lineamientos para cada una de las cuadrículas (Mapa 9). Mediante una tabla de frecuencias, se totalizó la longitud total de lineamientos para cada celda y se calculó el porcentaje equivalente; se clasificaron los porcentajes en cinco clases mediante intervalos naturales (Jenks) y a cada una se le asignó un valor  $W_f$  como se muestra en la Tabla 12.

<b>Tabla 12. Valores de <math>W_f</math> para lineamientos</b>	
<b>Intervalos</b>	<b><math>W_f</math></b>
< 0.20%	1
0.20% - 0.57%	2
0.58% - 1.12%	3
1.13% - 2.06%	4
2.07% - 3.66%	5

### **3.3.2.3 Minería**

El mapa de explotaciones mineras de INEGI reporta un total de 268 minas en el territorio (Mapa 10). Para este trabajo se tomaron en cuenta únicamente las explotaciones que se desarrollan en túneles, por lo que se filtraron de acuerdo al mineral explotado y se excluyeron los aprovechamientos de mármol, bauxita, bitumen y caolín por ser explotaciones a cielo abierto, obteniendo un total de 247 minas (Tabla 13).



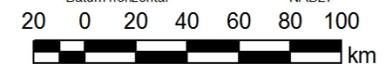
ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA  
SUBSIDENCIA COMO HERRAMIENTA  
DE LA GESTIÓN AMBIENTAL  
EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

Mapa No. 10  
Explotaciones mineras

CONVENCIONES

- |                  |                 |
|------------------|-----------------|
| ✕ Antimonio      | ✕ Fosforita     |
| ✕ Azufre         | ✕ Halita        |
| ✕ Barita         | ✕ Hierro        |
| ✕ Bentonita      | ✕ Manganeso     |
| ✕ Calcita        | ✕ Mercurio      |
| ✕ Calcita óptica | ✕ Oro           |
| ✕ Cobre          | ✕ Plata         |
| ✕ Cuarzo         | ✕ Wollanstonita |
| ✕ Estaño         | ✕ Yeso          |
| ✕ Estroncio      | ✕ Zinc          |
| ✕ Fluorita       |                 |

Elaboró Iván Leonardo Herrera Pérez  
Fuente INEGI (2002)  
Proyección Cónica conforme de Lambert  
Falso este (metros) 2,000,000.00  
Falso norte (metros) 0.00  
Meridiano central -102° 0' 0"  
Primer paralelo base 17° 30' 0"  
Segundo paralelo base 29° 30' 0"  
Latitud de origen 0° 0' 0"  
Unidad lineal metros (1.000000)  
Datum horizontal NAD27



Al estar representada mediante puntos, esta variable se evaluó mediante el cálculo de la densidad de minas para cada celda, a partir de una tabla de frecuencias para conocer el número de minas por unidad espacial y expresándolo en forma de porcentaje con respecto al valor total para cada cuadrante. El porcentaje obtenido se clasificó mediante intervalos naturales (Jenks) para asignar valores de  $W_m$  entre 1 y 5 de acuerdo a la Tabla 14.

<b>Tabla 13. Número de minas por mineral extraído</b>			
<b>Mineral extraído</b>	<b>No. de Minas</b>	<b>Mineral extraído</b>	<b>No. de Minas</b>
Fosforita	50	Cobre	4
Oro	38	Cuarzo	4
Fluorita	26	Halita	4
Antimonio	20	Barita	2
Plata	20	Bentonita	2
Mercurio	19	Zinc	2
Estaño	16	Calcita	1
Manganeso	14	Calcita óptica	1
Hierro	11	Estroncio	1
Yeso	7	Wollanstonita	1
Azufre	4		
<b>Total</b>		<b>247</b>	

<b>Tabla 14. Valores de <math>W_m</math> para minería</b>	
<b>Intervalos</b>	<b><math>W_m</math></b>
0.00 %	1
0.01% - 0.82%	2
0.83% - 1.63%	3
1.64% - 2.45%	4
2.46% - 3.27%	5

### 3.3.2.4 Susceptibilidad geológica-minera

El mapa de susceptibilidad por geología y minería, se obtuvo al sumar los valores  $W_l + W_f + W_m$  para obtener un valor total  $W_G$ , el cual se clasificó en cinco categorías según los intervalos de la Tabla 15.

<b>Intervalo</b>	<b>Categoría</b>
2.01 – 2.41	Muy baja
2.42 - 4.83	Baja
4.84 – 7.24	Media
7.25 – 9.66	Alta
9.67 – 12.07	Muy alta

### 3.3.3 Análisis de susceptibilidad total

El mapa de susceptibilidad total se obtuvo a través de la combinación de los análisis parciales de susceptibilidad de hidrogeología, geología y minería. Los valores  $W_H$  y  $W_G$  fueron estandarizados igualándolos a 100 cada uno para realizar la suma de ambos valores y obtener un valor  $W_T$ , el cual se clasificó en cinco clases usando como límite de clase los valores correspondientes al 20, 40, 60, 80 y 100% (Tabla 16).

<b>Intervalo de <math>W_T</math></b>	<b>%</b>	<b>Categoría</b>
10.92 - 34.72	20	Muy baja
34.73 - 69.44	40	Baja
69.45 - 104.16	60	Media
104.17 - 138.88	80	Alta
138.89 - 173.60	100	Muy alta

La cuadrícula resultante se transformó en un mapa de isolíneas para una mejor comprensión. Para lograr este resultado, se generó un mapa de puntos a partir

de la cuadrícula mediante la herramienta *Feature to point* de ArcMap, obteniendo los centroides de los 265 cuadrantes, estos puntos se transformaron en una imagen ráster usando la función *Spline*, la cual realiza una interpolación de una superficie de puntos, asumiendo el valor de  $W_T$  como altura. La imagen ráster resultante se transformó en un shape, previa reclasificación de datos usando los intervalos correspondientes al 20, 40, 60, 80 y 100% de los valores como se indica en la Tabla 17.

<b>Tabla 17. Intervalos para la reclasificación</b>		
<b>Intervalo</b>	<b>%</b>	<b>Categoría</b>
-478,79 - 32,64	20	Muy baja
32,64 - 65,28	40	Baja
65,28 - 97,93	60	Media
97,93 - 130,57	80	Alta
130,57 - 163,21	100	Muy alta

El shape obtenido es entonces la representación cartográfica del análisis de la susceptibilidad a la subsidencia del terreno del Estado de San Luis Potosí.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 HIDROGEOLOGÍA

En el estado de San Luis Potosí, el principal factor que condiciona la ocurrencia de la subsidencia del terreno es la explotación de aguas subterráneas que son usadas para satisfacer las diferentes necesidades de la población (uso agrícola y público urbano principalmente).

CONAGUA (2009b) tiene registrados 12,445 aprovechamientos de agua subterránea, con un volumen concesionado total de 596,395,285.66 m<sup>3</sup> de agua y un gasto promedio de 5,867.93 m<sup>3</sup>/s para los 19 acuíferos ubicados en el Estado. Esto equivale a que existe un pozo para cada 4.9 km<sup>2</sup> del territorio estatal. La menor densidad la tiene el acuífero Buenavista (1 pozo por cada 32 km<sup>2</sup>), mientras que las más altas corresponden a Salinas de Hidalgo (1 pozo por cada 0.81 km<sup>2</sup>) y Ahualulco (1 pozo por cada 0.74 km<sup>2</sup>).

El volumen concesionado vs. gasto tienen una relación directa, así como la cantidad de aprovechamientos vs. volumen concesionado y la cantidad de aprovechamientos vs. gasto, aunque estos últimos presentan una mayor varianza.

Con el fin de preservar la calidad de los acuíferos y garantizar el suministro de agua, en el territorio estatal se han declarado las siguientes zonas de veda:

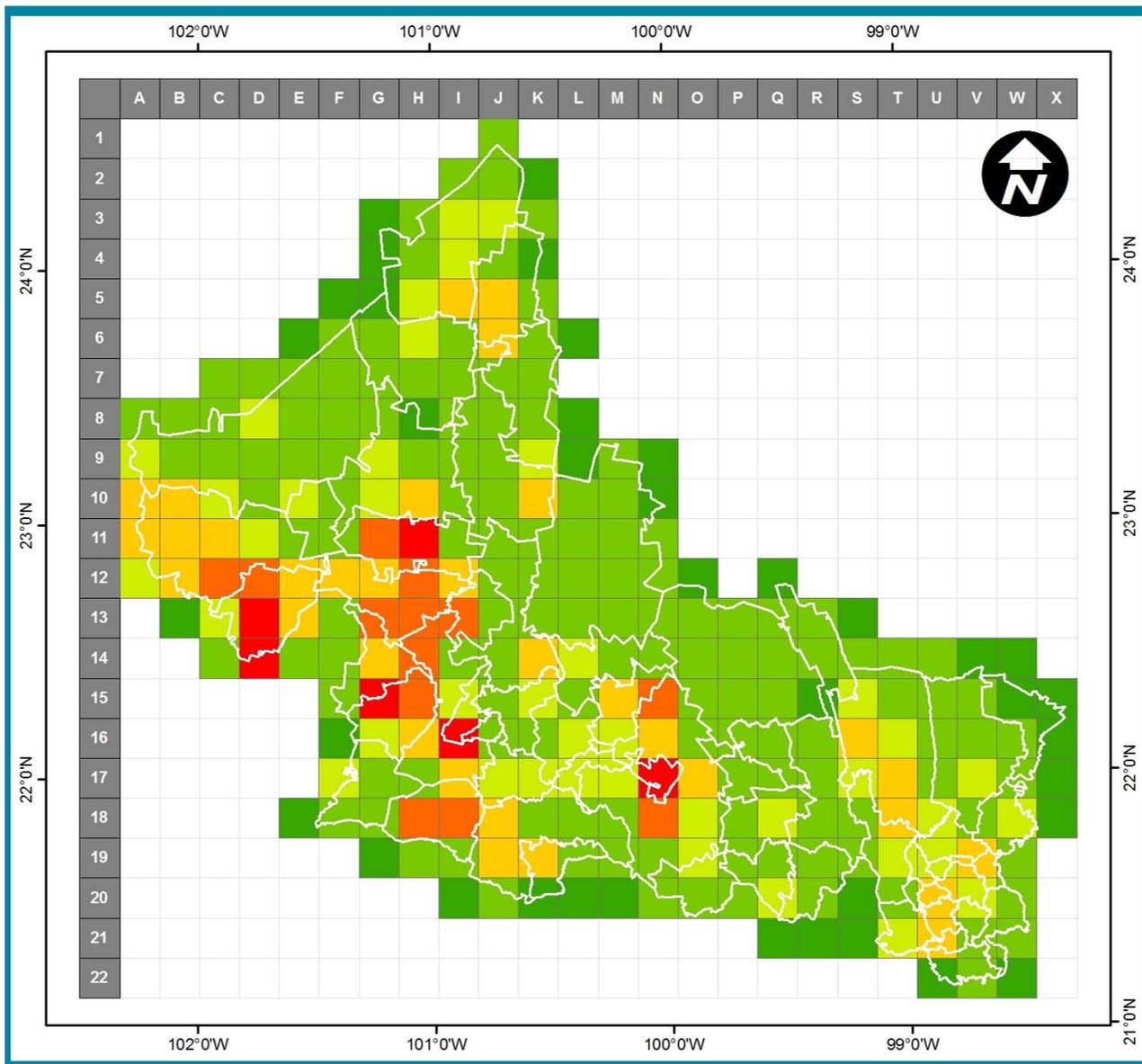
- El Valle de San Luis Potosí posee veda tipo II, es decir, que la capacidad del manto acuífero sólo permite extracción de agua para uso doméstico.

- Municipios de Vanegas, Cedral, Matehuala y Rioverde, con veda tipo III que permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.
- Distrito de Riego Río Pánuco, municipios de Ciudad Fernández, Ciudad Valles, Venado, Mexquitic, Ahualulco, Villa de Reyes, San Luis Potosí y Villa de Ramos con el fin de conservar los mantos acuíferos y mejorar el control de extracciones, alumbramiento y aprovechamiento del agua.

Los 19 acuíferos presentes en el área de estudio son en su mayoría de tipo libre, con relleno aluvial y originados por depresiones topográficas o tectónicas, por lo que sus características son muy homogéneas haciendo que el grado de susceptibilidad a la subsidencia del terreno no sea diferenciable, por lo que no se incorporó al análisis de susceptibilidad.

El cálculo de la densidad de pozos por unidad de análisis dio como resultado el Mapa 11. Como se mencionó, cada cuadrante tiene una extensión de 300 km<sup>2</sup> con un promedio de 47 pozos para cada uno. Predominan los cuadrantes con baja densidad de pozos (menos de 10) y se presenta una densidad máxima de 863 aprovechamientos para el cuadrante I16, en donde se localiza la zona metropolitana de San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez. Los cuadrantes con mayores concentraciones son en orden G15, D13, H11 y N17 en los que se ubican las cabeceras municipales de Ahualulco y Mexquitic, Salinas, Venado y Ciudad Fernández-Rioverde respectivamente.

Los cuadrantes H12-15 y C12-D12 son áreas con densidades importantes de entre 172 a 340 pozos para cada cuadrante. Hacia el oriente y cerca a las



ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA SUBSIDENCIA COMO HERRAMIENTA DE LA GESTIÓN AMBIENTAL EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

Mapa No. 11  
Cuadrícula  
densidad de pozos

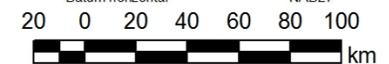
CONVENCIONES

Valores de  $W_p$  para cada intervalo

- 0 (0%)
- 1 (0,0% - 0,2%)
- 2 (0,2% - 0,5%)
- 3 (0,5% - 1,2%)
- 4 (1,2% - 2,8%)
- 5 (2,8% - 7,0%)

Elaboró Iván Leonardo Herrera Pérez

Fuente Elaboración propia  
Proyección Cónica conforme de Lambert  
Falso este (metros) 2,000,000.00  
Falso norte (metros) 0.00  
Meridiano central  $-102^{\circ} 0' 0''$   
Primer paralelo base  $17^{\circ} 30' 0''$   
Segundo paralelo base  $29^{\circ} 30' 0''$   
Latitud de origen  $0^{\circ} 0' 0''$   
Unidad lineal metros (1.000000)  
Datum horizontal NAD27



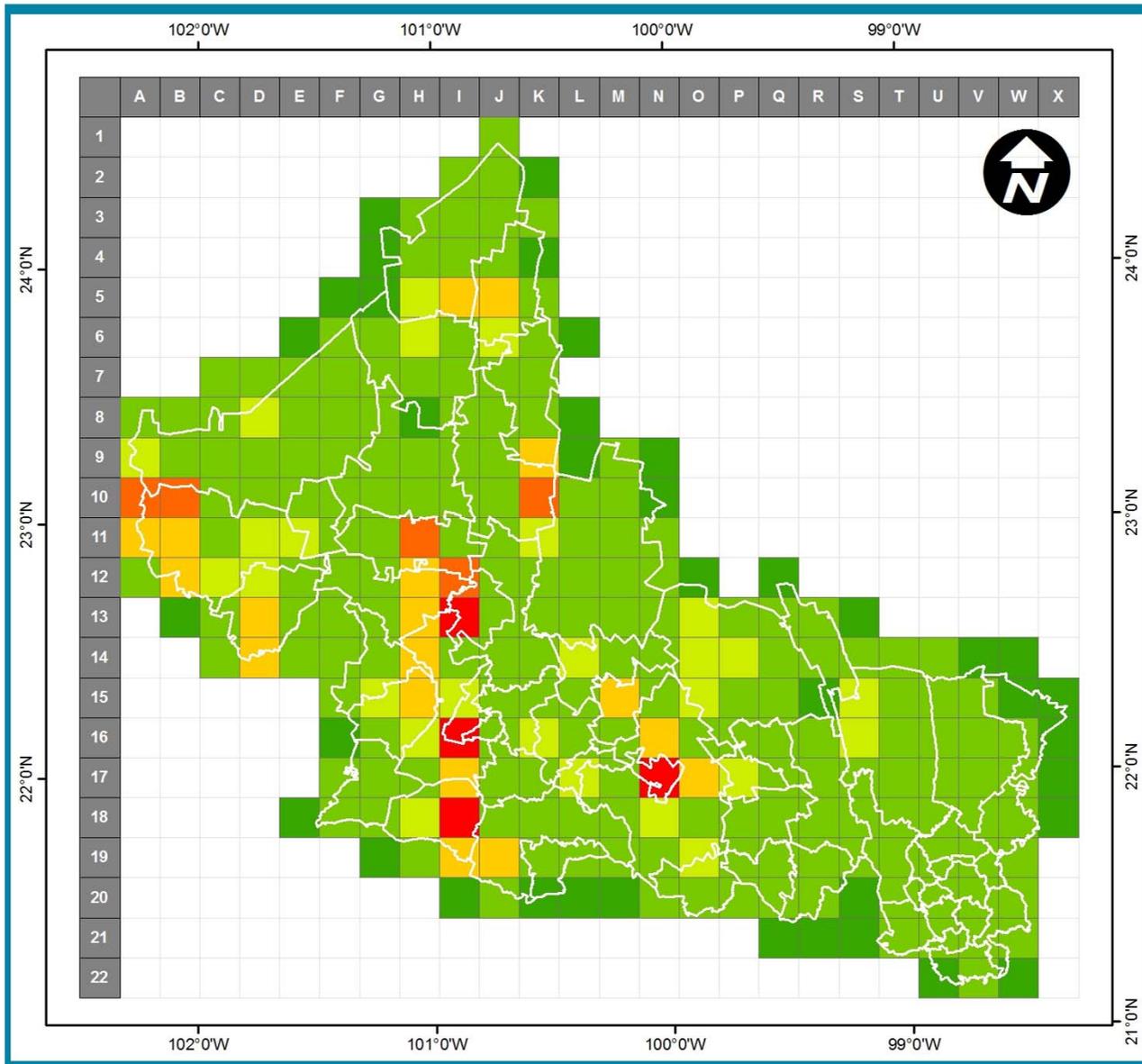
cabeceras municipales de Vanegas, Cedral y Villa de la Paz se presentan dos zonas aisladas con densidad media de aprovechamientos (de 60 a 110 pozos por cuadrante), En contraste, existen 11 cuadrantes con densidades de apenas un pozo: B8, C7, E7, G7, I8, J1, J11, M18, M19, R20 y U14, ninguno de los cuales coincide con cabeceras municipales.

Por último, se tienen 38 cuadrantes sin explotaciones reportadas, y se ubican en los límites del estado, excepto por el H8 y el R15 que se localizan en inmediaciones de las cabeceras de Charcas y Catorce y Ciudad del Maíz y El Naranja respectivamente.

En lo que se refiere al volumen concesionado, el valor máximo está en el cuadrante N17 donde se ubica la cabecera de Rioverde y Ciudad Fernández con 37,516,912.5 m<sup>3</sup> que corresponde al 6.3% del total. Los cuadrantes I16 (San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez), I13 (Villa de Arista) e I18 (Villa de Reyes) son los que siguientes en orden descendente. El volumen más bajo es de 956 m<sup>3</sup> en el cuadrante R20. Los demás valores inferiores corresponden a los cuadrantes U14, F13 y L19 (Mapa 12).

El 65% de los cuadrantes corresponde a los volúmenes concesionados más bajos (diferentes a cero) y se ubican hacia el oriente y en la zona norte-central del Estado, con valores inferiores a un millón de metros cúbicos, mientras que los más altos son el 1.5% del total y se concentran en la porción central.

El gasto (cantidad de agua extraída en m<sup>3</sup>/s) más alto presenta valores de entre 5,500 hasta 8,100 m<sup>3</sup>/s, en los cuadrantes N17 (Rioverde-Ciudad Fernández), I16 (San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez) e I13 (Villa de Arista) y presenta una distribución espacial similar al volumen concesionado (Mapa 13);



ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA  
SUBSIDENCIA COMO HERRAMIENTA  
DE LA GESTIÓN AMBIENTAL  
EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

Mapa No. 12  
Cuadrícula  
volumen concesionado

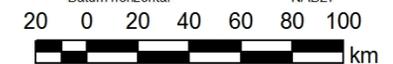
**CONVENCIONES**

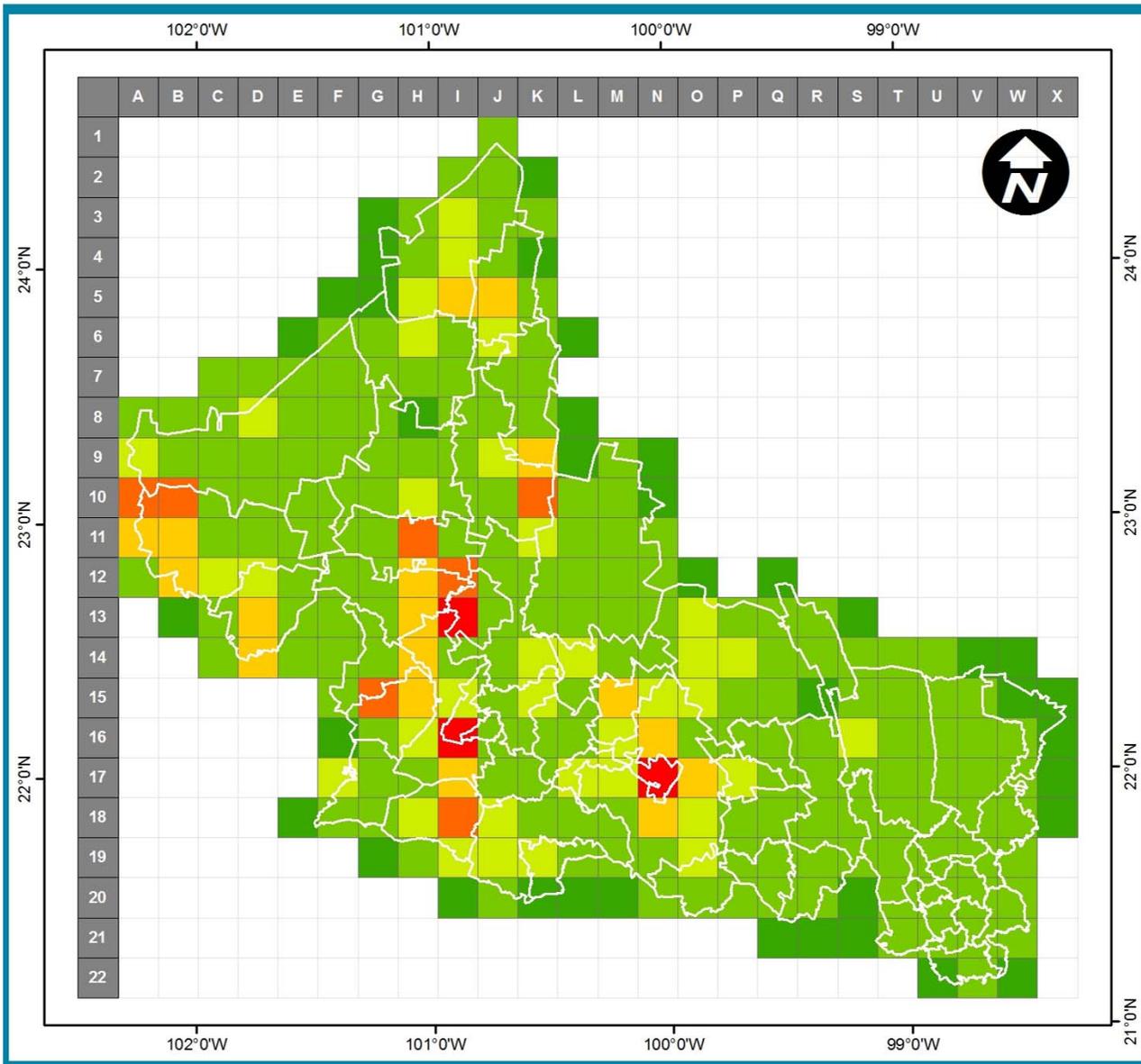
Valores de  $W_v$  para cada intervalo

- 0 (0%)
- 1 (0,0% - 0,4%)
- 2 (0,4% - 1,1%)
- 3 (1,1% - 2,3%)
- 4 (2,3% - 4,0%)
- 5 (4,0% - 6,3%)

Elaboró Iván Leonardo Herrera Pérez

Fuente Elaboración propia  
Proyección Cónica conforme de Lambert  
Falso este (metros) 2,000,000.00  
Falso norte (metros) 0.00  
Meridiano central  $-102^{\circ} 0' 0''$   
Primer paralelo base  $17^{\circ} 30' 0''$   
Segundo paralelo base  $29^{\circ} 30' 0''$   
Latitud de origen  $0^{\circ} 0' 0''$   
Unidad lineal metros (1.000000)  
Datum horizontal NAD27





ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA SUBSIDENCIA COMO HERRAMIENTA DE LA GESTIÓN AMBIENTAL EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

Mapa No. 13  
Cuadrícula  
gasto

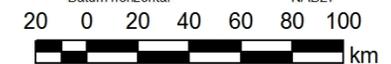
CONVENCIONES

Valores de  $W_s$  para cada intervalo

- 0 (0%)
- 1 (0,0% - 0,3%)
- 2 (0,3% - 1,2%)
- 3 (1,2% - 2,2%)
- 4 (2,2% - 3,7%)
- 5 (3,7% - 7,4%)

Elaboró Iván Leonardo Herrera Pérez

Fuente Elaboración propia  
Proyección Cónica conforme de Lambert  
Falso este (metros) 2,000,000.00  
Falso norte (metros) 0.00  
Meridiano central  $-102^{\circ} 0' 0''$   
Primer paralelo base  $17^{\circ} 30' 0''$   
Segundo paralelo base  $29^{\circ} 30' 0''$   
Latitud de origen  $0^{\circ} 0' 0''$   
Unidad lineal metros (1.000000)  
Datum horizontal NAD27



además de una relación directa (menor volumen, menor gasto). Los cambios más significativos se presentan en Rioverde, donde el volumen es bajo pero el gasto es medio, y en Villa de Reyes, donde el volumen es medio pero el gasto muy alto.

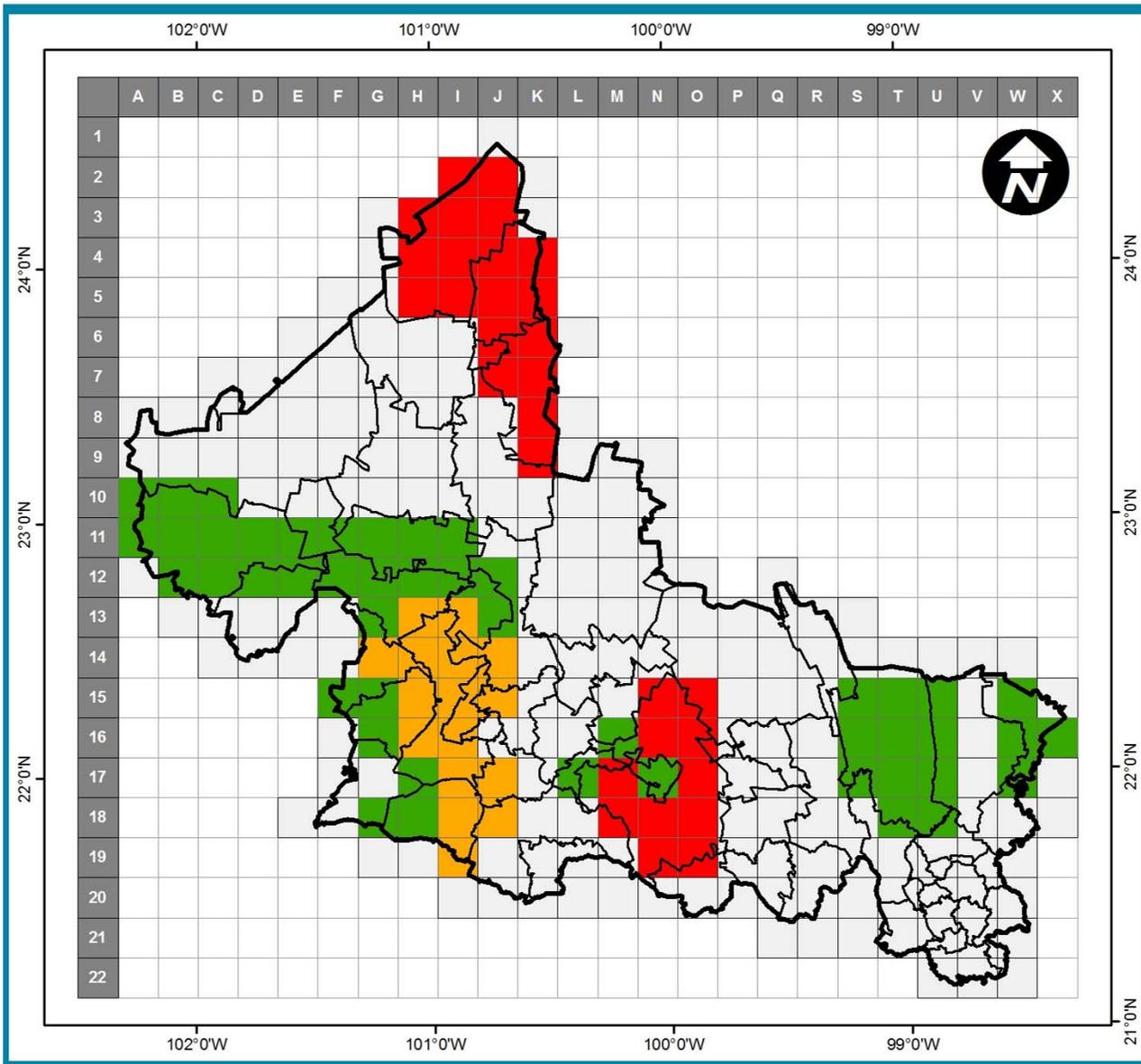
Los valores de gasto medio se ubican principalmente en el municipio de Rioverde, en la zona noroccidental: Vanegas-Cedral, el W de Villa de Ramos y Salinas y el eje conformado por las cabeceras de Charcas, Venado y Moctezuma. Los cuadrantes con valores más bajos de gasto corresponden al 65% del total, por debajo de los 350 m<sup>3</sup>/s con un valor mínimo de 0.04 m<sup>3</sup>/s (cuadrante N19).

Las zonas de veda más restrictivas (tipo III) son el 11% del total y cubren los municipios de Rioverde, Vanegas, Cedral y Matehuala. La veda tipo II equivale al 6% y cubre los municipios de San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez, Ahualulco, Villa Hidalgo, Zaragoza, Villa de Reyes. En el 65% del Estado no hay ninguna restricción (Mapa 14).

#### **4.2 SUSCEPTIBILIDAD POR FACTORES HIDROGEOLÓGICOS**

De acuerdo con la evaluación de factores hidrogeológicos (Mapa 15), los cuadrantes con susceptibilidad muy alta son I16, I13, N17 e I18. La susceptibilidad alta se manifiesta en áreas cercanas a las de muy alta, y en los cuadrantes D13, O19, H15, H12, H11, J5, J6 e I5.

En los cuadrantes C12, G14, H10, J7, J14, J15, J17, J18, K19, M15 y T17 se obtuvieron valores de susceptibilidad media. La susceptibilidad baja se



ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA SUBSIDENCIA COMO HERRAMIENTA DE LA GESTIÓN AMBIENTAL EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

Mapa No. 14  
Cuadrícula  
tipo de veda

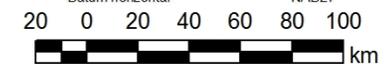
CONVENCIONES

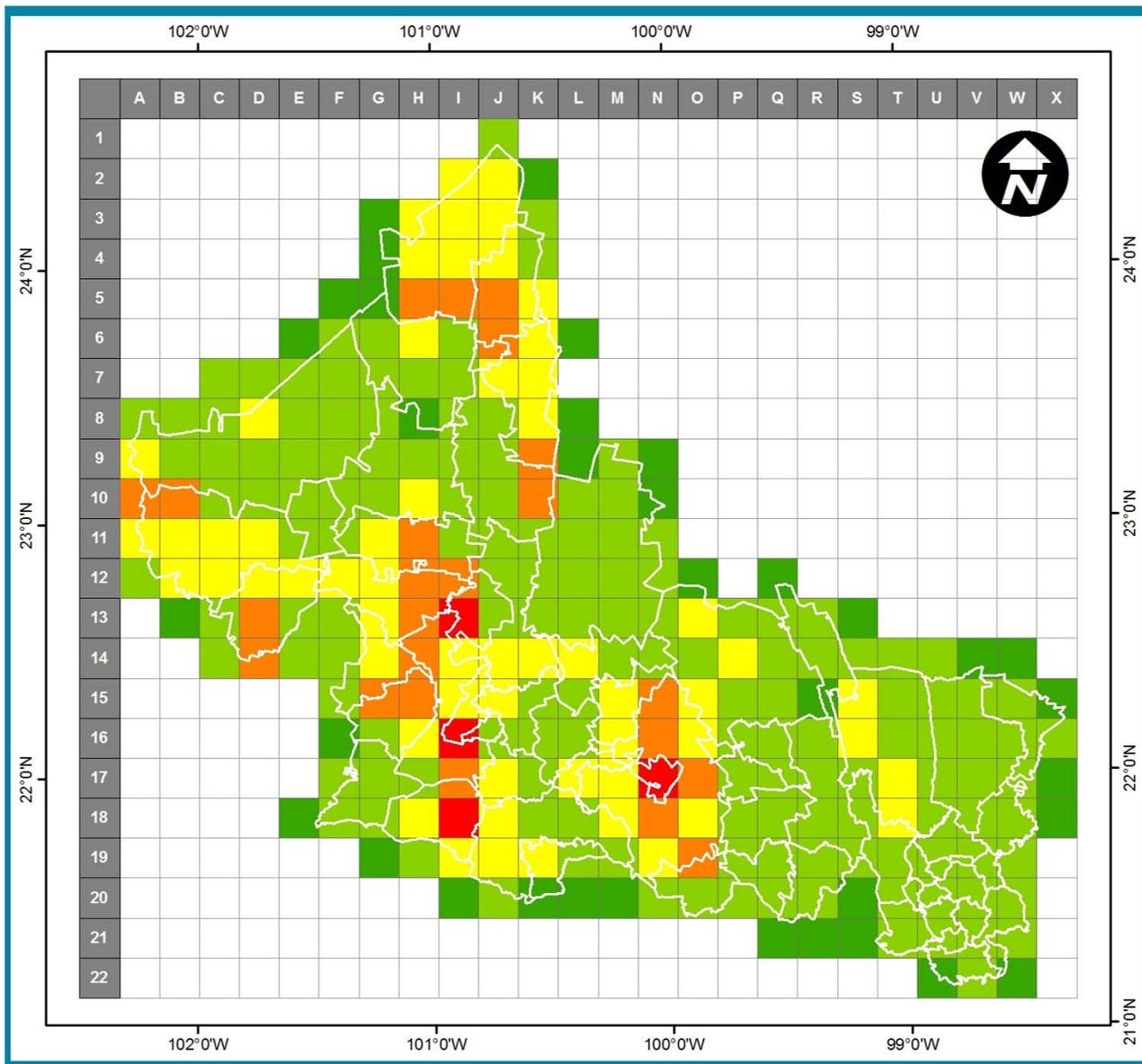
Valores de Wv para cada tipo de veda

- 0 (Sin Veda)
- 1 (Veda N)
- 3 (Veda Tipo II)
- 5 (Veda Tipo III)

Elaboró Iván Leonardo Herrera Pérez

Fuente Elaboración propia  
Proyección Cónica conforme de Lambert  
Falso este (metros) 2,000,000.00  
Falso norte (metros) 0.00  
Meridiano central -102° 0' 0"  
Primer paralelo base 17° 30' 0"  
Segundo paralelo base 29° 30' 0"  
Latitud de origen 0° 0' 0"  
Unidad lineal metros (1.000000)  
Datum horizontal NAD27





ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA  
SUBSIDENCIA COMO HERRAMIENTA  
DE LA GESTIÓN AMBIENTAL  
EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

Mapa No. 15  
Cuadrícula susceptibilidad  
factores hidrogeológicos

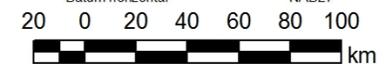
**CONVENCIONES**

**Rangos de susceptibilidad  
según intervalos de WH**

- Muy Baja 0
- Baja 1 - 5
- Media 6 - 10
- Alta 11 - 15
- Muy Alta 16 - 20

Elaboró Iván Leonardo Herrera Pérez

Fuente Elaboración propia  
Proyección Cónica conforme de Lambert  
Falso este (metros) 2,000,000.00  
Falso norte (metros) 0.00  
Meridiano central -102° 0' 0"  
Primer paralelo base 17° 30' 0"  
Segundo paralelo base 29° 30' 0"  
Latitud de origen 0° 0' 0"  
Unidad lineal metros (1.000000)  
Datum horizontal NAD27



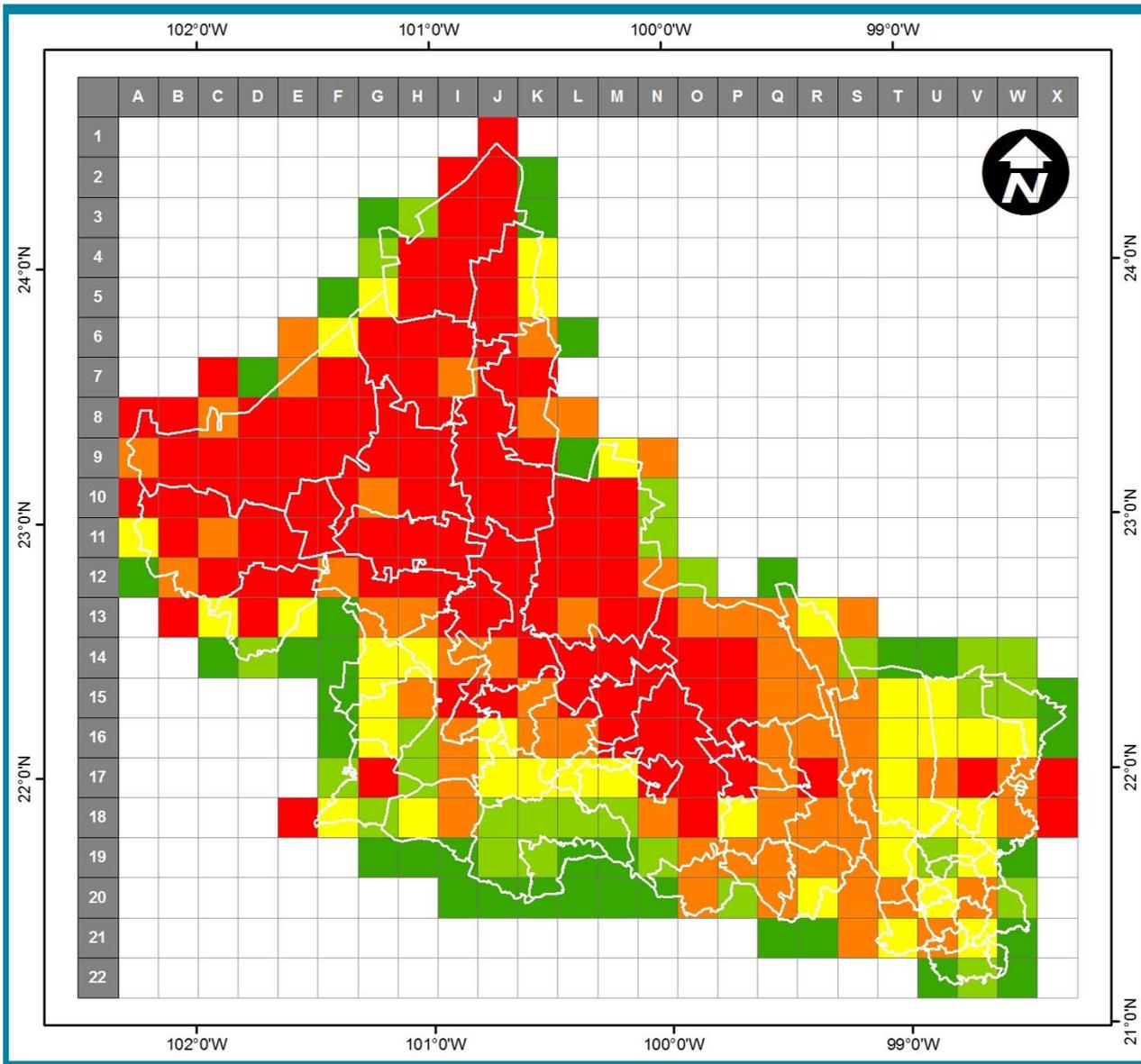
distribuye en el resto del territorio estatal mientras que la muy baja corresponde a los límites con los otros estados.

### **4.3 GEOLOGÍA**

La geología juega un papel importante en el fenómeno estudiado debido a que en el área se presentan rocas con diferentes grados de susceptibilidad a la subsidencia del terreno, tales como las calizas y yesos que son altamente solubles, además de depósitos no consolidados que pueden compactarse como consecuencia de la extracción de agua. Así, la zona de estudio fue dividida en cinco zonas homogéneas para la evaluación de la susceptibilidad teniendo en cuenta su comportamiento ante la extracción de agua y su solubilidad. Otro aspecto importante, es que la mayoría de los aprovechamientos de agua se localizan en los depósitos no consolidados.

La Gran Sierra Plegada y el Karst Huasteco son las subprovincias de la Sierra Madre Oriental en donde se observa la mayor concentración de fracturas y fallas, que afectan principalmente calizas y lutitas. Estos lineamientos no muestran ningún patrón que condicione la ubicación de los aprovechamientos de agua subterránea.

La susceptibilidad presenta el valor más alto (superior a 4.0) en la zona norte del Estado así como en los municipios de Cerritos, Villa de Juárez, Cárdenas y la zona N de Rioverde. De manera aislada se presenta en inmediaciones de Cerro de San Pedro, Armadillo de los Infante, Tamasopo y Tamuín, zonas donde predominan los depósitos no consolidados. (Mapa 16).



ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA  
SUBSIDENCIA COMO HERRAMIENTA  
DE LA GESTIÓN AMBIENTAL  
EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

Mapa No. 16  
Cuadrícula  
litología

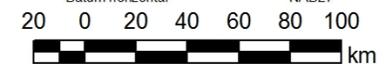
**CONVENCIONES**

Valores de WI para cada intervalo

- 1 (0,00 - 1,00)
- 2 (1,01 - 2,00)
- 3 (2,01 - 3,00)
- 4 (3,01 - 4,00)
- 5 (4,01 - 5,00)

Elaboró Iván Leonardo Herrera Pérez

Fuente Elaboración propia  
Proyección Cónica conforme de Lambert  
Falso este (metros) 2,000,000.00  
Falso norte (metros) 0.00  
Meridiano central -102° 0' 0"  
Primer paralelo base 17° 30' 0"  
Segundo paralelo base 29° 30' 0"  
Latitud de origen 0° 0' 0"  
Unidad lineal metros (1.000000)  
Datum horizontal NAD27

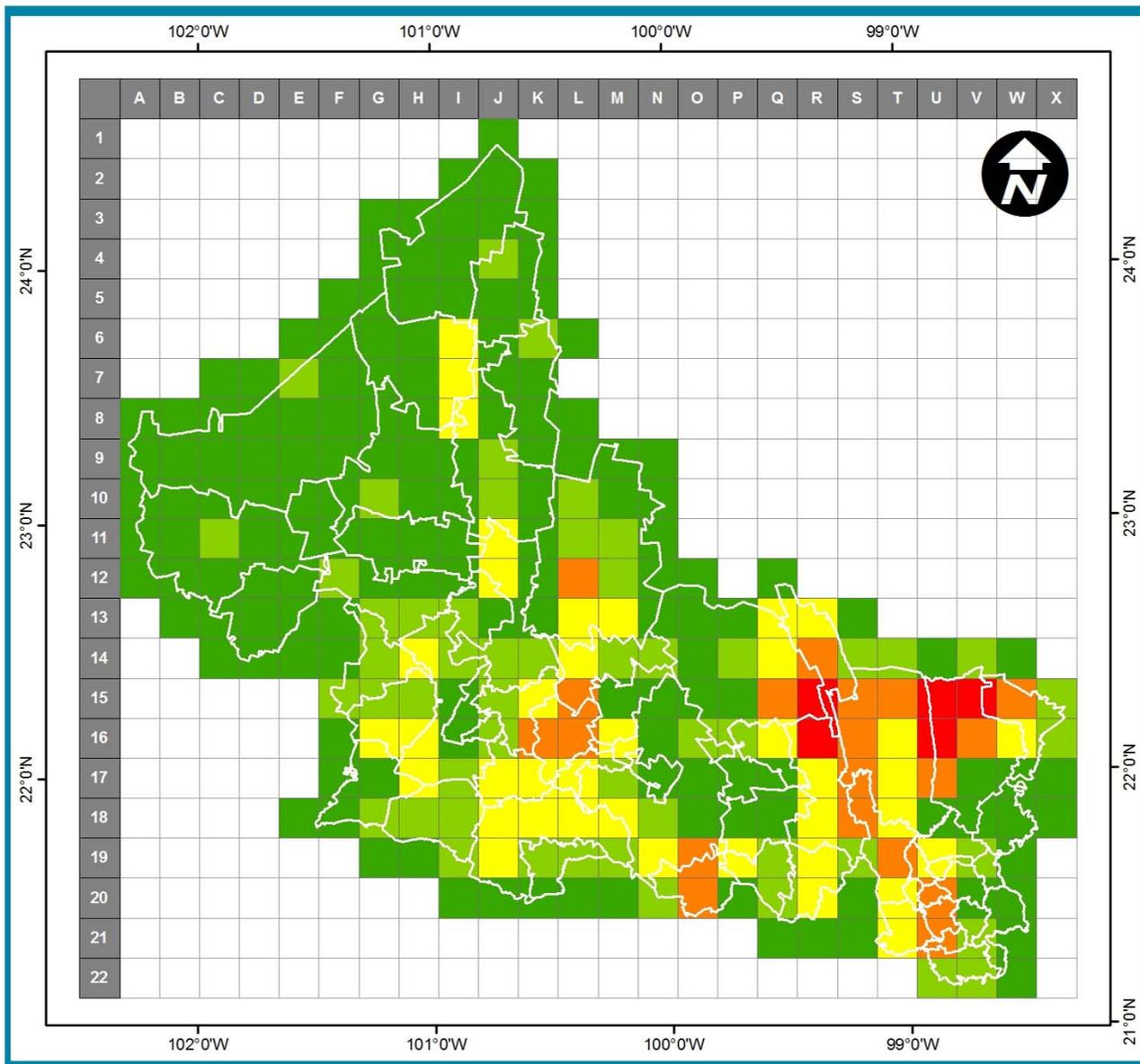


Los valores de peso medio se ubican en cuadrantes con predominancia de rocas calizas, principalmente en la Provincia de la Sierra Madre Oriental. Los valores de peso bajo están hacia el E del estado, especialmente en Ciudad Valles y Tamuín, donde hay gran predominio de rocas sedimentarias.

Estructuralmente hay una gran concentración de fallas y fracturas en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental, con lo que se configuran dos zonas de máximo fracturamiento. La primera en los cuadrantes U15 -cuadrante con el máximo valor (184 km)-, U16 y V15 en límites de los municipios de Ciudad Valles y Tamuín, y el estado de Tamaulipas. La segunda en los cuadrantes R15 y R16 donde se ubican los municipios de Ciudad Valles, Tamasopo y El Naranjo (Mapa 17).

Las longitudes de fracturamiento descienden hacia el E y el W encontrando valores bajos en la zona Media, pero aumentan en límites de las zonas Media y Centro en las subprovincias del Karst Huasteco y las Sierras y Llanuras Occidentales de la Sierra Madre Oriental (Columnas N a P). La zona Altiplano no se encuentra afectada por fracturamientos debido a que éstos están cubiertos por depósitos no consolidados, aunque aparece un lineamiento de longitud importante en los cuadrantes I6-I8, al E del municipio de Catorce.

La minería de socavón es una actividad que se desarrolla principalmente en áreas de depósitos no consolidados y calizas, con una alta concentración de explotaciones mineras en las regiones Ciudad Valles, Guadalcázar y Sierra de Catorce.



ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA SUBSIDENCIA COMO HERRAMIENTA DE LA GESTIÓN AMBIENTAL EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

Mapa No. 17  
Cuadrícula  
lineamientos

CONVENCIONES

Valores de Wf para cada intervalo

- 1 (< 0,20%)
- 2 (0,20% - 0,57%)
- 3 (0,57% - 1,12%)
- 4 (1,12% - 2,06%)
- 5 (2,06% - 3,66%)

Elaboró Iván Leonardo Herrera Pérez

Fuente Elaboración propia  
Proyección Cónica conforme de Lambert  
Falso este (metros) 2,000,000.00  
Falso norte (metros) 0.00  
Meridiano central -102° 0' 0"  
Primer paralelo base 17° 30' 0"  
Segundo paralelo base 29° 30' 0"  
Latitud de origen 0° 0' 0"  
Unidad lineal metros (1.000000)  
Datum horizontal NAD27



#### **4.4 MINERÍA**

En lo referente a la minería, no hay grandes concentraciones de explotaciones mineras, siendo ocho el máximo valor de aprovechamientos en el cuadrante U17, ubicado entre Ciudad Valles y Tamuín. Los cuadrantes H18 y K12 tienen siete minas cada uno. Los cuadrantes con valores bajos se encuentran de forma dispersa en todo el territorio (Mapa 18).

#### **4.5 SUSCEPTIBILIDAD POR FACTORES GEOLÓGICOS**

La susceptibilidad debida a factores geológicos tiene su valor máximo en el cuadrante U17, seguido de los cuadrantes S16, J12, L134, R15, U16, K12, T20, L12 Y O20. La susceptibilidad alta se presenta con amplias regiones, principalmente en la zona central del Estado.

La susceptibilidad media tiene una distribución dispersa, sin embargo es la predominante en el área de estudio. La susceptibilidad baja y muy baja se restringe a sectores ubicados en límites estatales (Mapa 19).

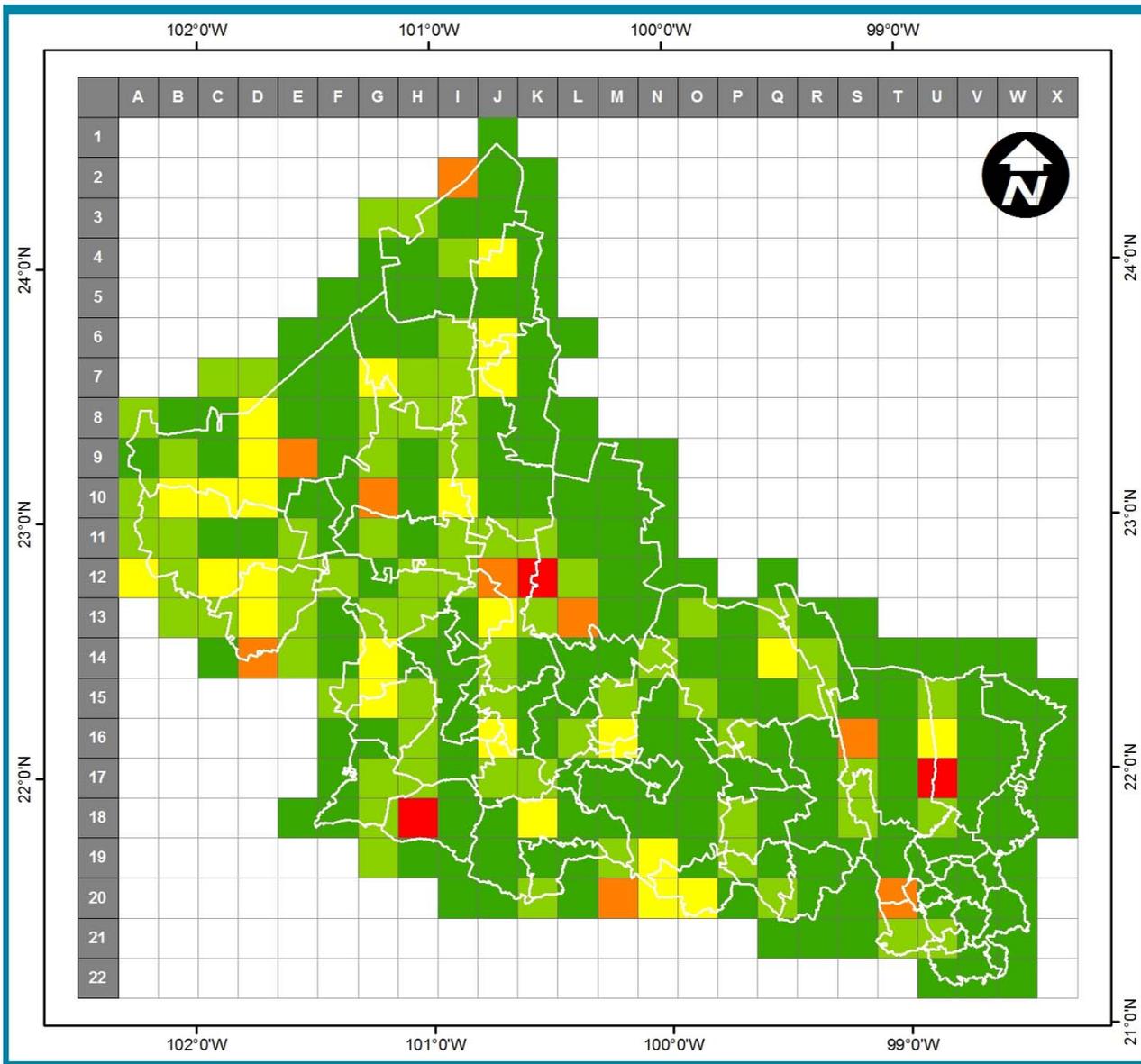
#### **4.6 SUSCEPTIBILIDAD TOTAL**

En el mapa de susceptibilidad total (Mapa 20), muestra en forma de cuadrícula los rangos de susceptibilidad calculada. Sin embargo, para una mejor comprensión se generó el mapa de isolíneas, en el cual se identifican las zonas con idénticos grados de susceptibilidad (Mapa 21). En él se aprecia que la susceptibilidad muy alta se presenta en siete zonas bien marcadas relacionadas con las cabeceras municipales de Villa de Arista, Venado, San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez, Rioverde-Ciudad Fernández, Villa de Reyes, Vanegas-Cedral-Villa de la Paz, y Salinas. Alrededor de estas zonas, se

presentan las franjas de susceptibilidad Alta, donde se destacan Matehuala, Guadalcázar, Ahualulco, Villa de Ramos, Santo Domingo, Moctezuma y Xilitla, entre otros.

La susceptibilidad Media predomina en el territorio estatal, y se ubica de forma dispersa, mientras que la susceptibilidad baja y muy baja se ubican hacia los límites estatales.

En el territorio del estado de San Luis Potosí, predomina la susceptibilidad media (57% del territorio), seguido de la susceptibilidad alta (29%), Baja (9%), Muy alta (5%) y Muy baja (menos del 1%). En la Tabla 18 se muestra la distribución de las cabeceras municipales para cada grado de susceptibilidad.



ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA  
SUBSIDENCIA COMO HERRAMIENTA  
DE LA GESTIÓN AMBIENTAL  
EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

Mapa No. 18  
Cuadrícula  
minería

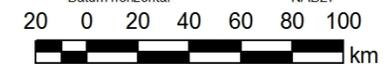
**CONVENCIONES**

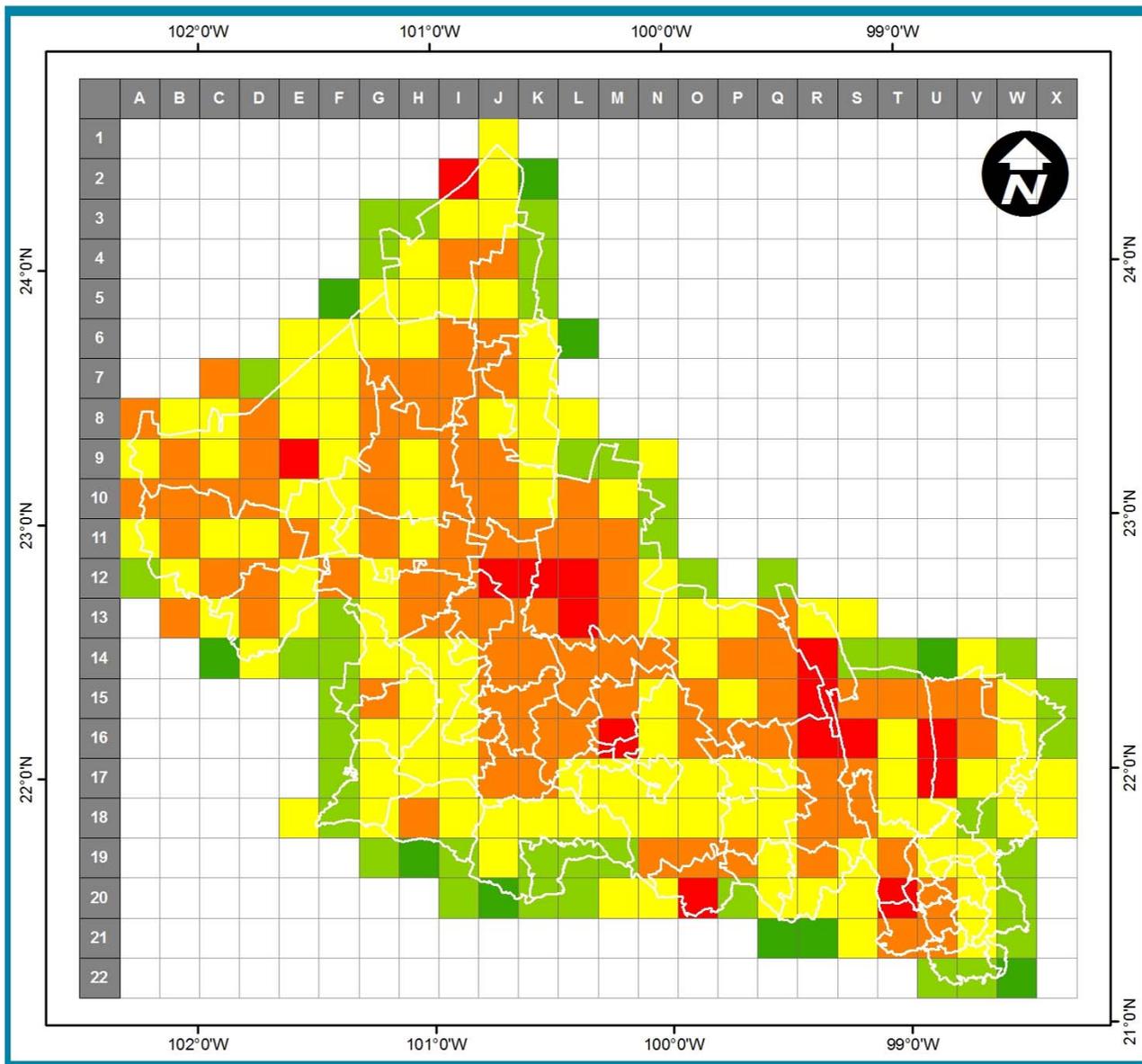
Valores de  $W_m$  para cada intervalo

- 1 (0,00%)
- 2 (0,00% - 0,82%)
- 3 (0,82% - 1,63%)
- 4 (1,63% - 2,45%)
- 5 (2,45% - 3,27%)

Elaboró Iván Leonardo Herrera Pérez

Fuente Elaboración propia  
Proyección Cónica conforme de Lambert  
Falso este (metros) 2,000,000.00  
Falso norte (metros) 0.00  
Meridiano central  $-102^{\circ} 0' 0''$   
Primer paralelo base  $17^{\circ} 30' 0''$   
Segundo paralelo base  $29^{\circ} 30' 0''$   
Latitud de origen  $0^{\circ} 0' 0''$   
Unidad lineal metros (1.000000)  
Datum horizontal NAD27





ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA  
SUBSIDENCIA COMO HERRAMIENTA  
DE LA GESTIÓN AMBIENTAL  
EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

Mapa No. 19  
Caudrícula susceptibilidad  
factores geológicos

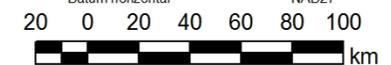
**CONVENCIONES**

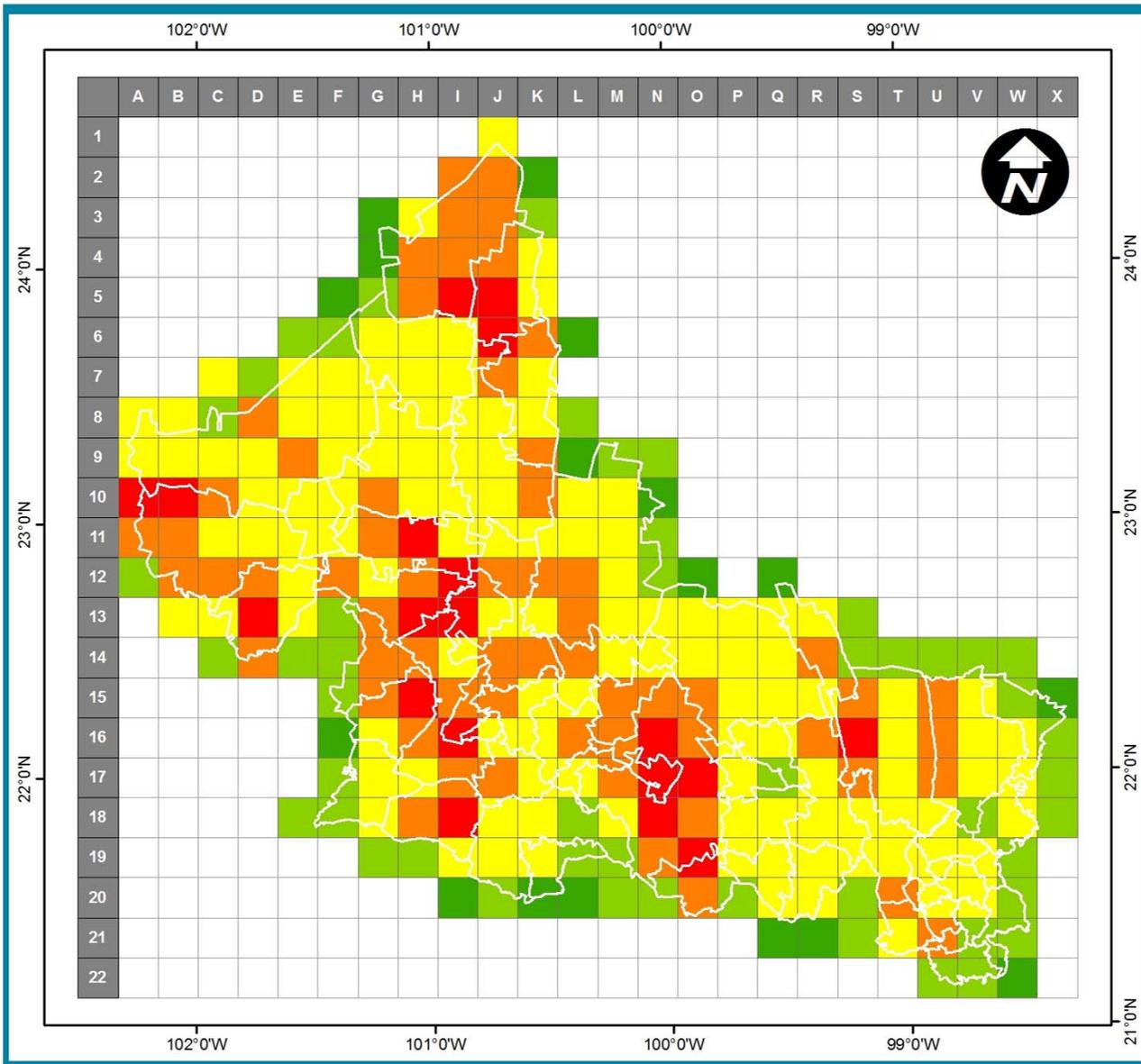
**Rangos de susceptibilidad  
según intervalos de WG**

- Muy Baja 2.01 - 2.41
- Baja 2.42 - 4.83
- Media 4.84 - 7.24
- Alta 7.25 - 9.66
- Muy Alta 9.67 - 12.07

Elaboró Iván Leonardo Herrera Pérez

Fuente Elaboración propia  
Proyección Cónica conforme de Lambert  
Falso este (metros) 2,000,000.00  
Falso norte (metros) 0.00  
Meridiano central -102° 0' 0"  
Primer paralelo base 17° 30' 0"  
Segundo paralelo base 29° 30' 0"  
Latitud de origen 0° 0' 0"  
Unidad lineal metros (1.000000)  
Datum horizontal NAD27





ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA  
SUBSIDENCIA COMO HERRAMIENTA  
DE LA GESTIÓN AMBIENTAL  
EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

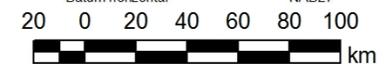
Mapa No. 20  
Cuadrícula evaluación  
de la susceptibilidad

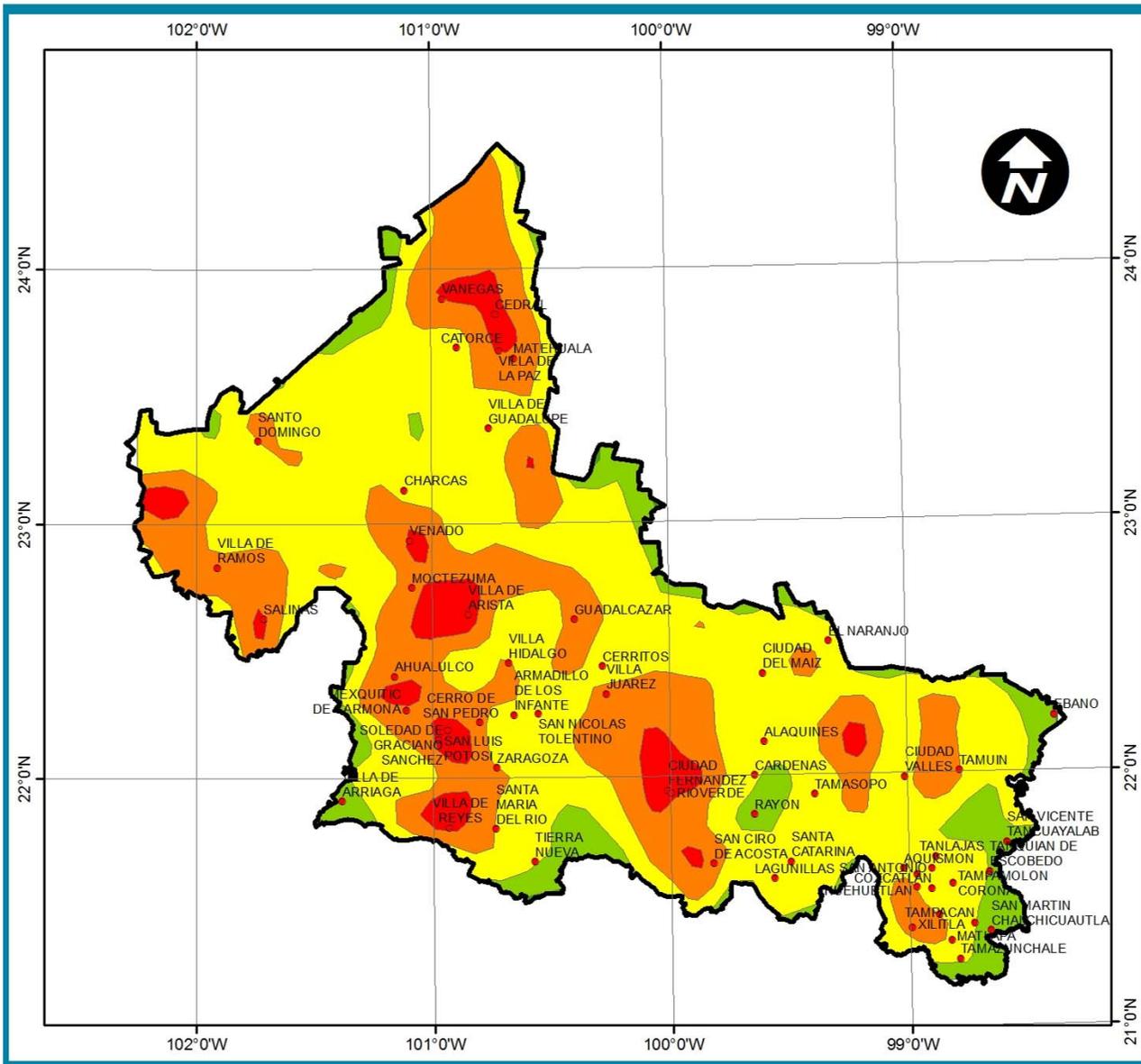
**CONVENCIONES**

**Rangos de susceptibilidad  
según intervalos de WT**

- Muy Baja 10,92 - 31,98
- Baja 31,99 - 63,96
- Media 63,97 - 95,93
- Alta 95,94 - 127,91
- Muy Alta 127,92 - 159,89

Elaboró Iván Leonardo Herrera Pérez  
Fuente Elaboración propia  
Proyección Cónica conforme de Lambert  
Falso este (metros) 2,000,000.00  
Falso norte (metros) 0.00  
Meridiano central -102° 0' 0"  
Primer paralelo base 17° 30' 0"  
Segundo paralelo base 29° 30' 0"  
Latitud de origen 0° 0' 0"  
Unidad lineal metros (1.000000)  
Datum horizontal NAD27





ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA SUBSIDENCIA COMO HERRAMIENTA DE LA GESTIÓN AMBIENTAL EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

Mapa No. 21  
Análisis de susceptibilidad a subsidencia

CONVENCIONES

Rangos de susceptibilidad a subsidencia

- Muy baja
- Baja
- Media
- Alta
- Muy alta

Elaboró Iván Leonardo Herrera Pérez

Fuente CONABIO (2004)

Proyección Cónica conforme de Lambert

Falso este (metros) 2,000,000.00

Falso norte (metros) 0.00

Meridiano central -102° 0' 0"

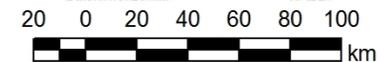
Primer paralelo base 17° 30' 0"

Segundo paralelo base 29° 30' 0"

Latitud de origen 0° 0' 0"

Unidad lineal metros (1.000000)

Datum horizontal NAD27



**Tabla 18. Cabeceras municipales por grado de susceptibilidad total**

Muy alta	Alta	Media	Baja	Muy baja
Cedral <sup>1 2</sup> Ciudad Fernández <sup>2</sup> Rioverde <sup>1 2</sup> Salinas de Hidalgo <sup>2</sup> San Luis Potosí <sup>1 2</sup> Soledad de Graciano Sánchez <sup>1 2</sup> Venado Villa de Arista <sup>1 2</sup> Villa de La Paz <sup>2</sup> Villa de Reyes <sup>2</sup>	Ahualulco del Sonido 13 Cerro de San Pedro <sup>1</sup> Guadalcázar Matehuala <sup>1 2</sup> Mexquitic de Carmona Moctezuma <sup>1 2</sup> San Ciro de Acosta <sup>2</sup> Tamuín Vanegas Villa de Ramos Villa de Zaragoza <sup>2</sup> Villa Hidalgo <sup>2</sup> Villa Juárez Xilitla <sup>2</sup>	Alaquines Aquismón <sup>2</sup> Armadillo de Los Infante Axtla de Terrazas Cárdenas <sup>2</sup> Cerritos <sup>2</sup> Charcas <sup>1</sup> Ciudad del Maíz Ciudad Valles <sup>1</sup> Coxcatlán El Naranjo <sup>1 2</sup> Huehuetlán Lagunillas <sup>2</sup> Matlapa Real de Catorce <sup>1</sup> San Antonio San Nicolás Tolentino Santa Catarina Santa María del Rio Santo Domingo Tamasopo <sup>1 2</sup> Tamazunchale <sup>2</sup> Tampacan Tampamolón Corona Tancanhuitz de Santos Tanlajás Tierra Nueva Villa de Guadalupe <sup>2</sup>	Ébano Rayón <sup>2</sup> San Martín Chalchicuatla San Vicente Tancuayalab Tanquián de Escobedo Villa de Arriaga	----

<sup>1</sup> Municipios con notas de prensa relacionadas con subsidencia del terreno

<sup>2</sup> Municipios reportados en el atlas estatal de riesgos

## CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, se pudo establecer que en el territorio potosino se presentan ambientes geológicos y condiciones de extracción de aguas subterráneas que contribuyen en la subsidencia del terreno; la cual ha sido estudiada principalmente en la ciudad capital mientras que el resto del estado carece de estudios y por lo tanto de información sobre los factores que pueden favorecer la existencia de éste fenómeno.

Debido a que es un movimiento lento con efectos a largo plazo no ha sido tomado en cuenta por el Fondo de Desastres Naturales (Fonden), y en diagnósticos regionales como el Atlas de Riesgos del Estado y el Ordenamiento Ecológico Estatal ha sido tratado de manera tangencial, no obstante sus manifestaciones en diferentes lugares del Estado. El desconocimiento de sus mecanismos, factores, consecuencias y zonas afectadas hace que aumente la vulnerabilidad ante el fenómeno.

Por ello los resultados presentados son un aporte en el conocimiento de su distribución espacial, que plantean un panorama general de la subsidencia del terreno a nivel estatal y que pretenden identificar zonas prioritarias bien sea para la realización de estudios detallados, como insumo para el atlas estatal de riesgo de San Luis Potosí o para una adecuada planeación y ordenamiento del territorio.

La inadecuada gestión ambiental trae entre otras consecuencias, la degradación de los ecosistemas, la cual genera desequilibrios sobre los cuales se generan nuevas amenazas y se agudizan las existentes dando lugar a la construcción del riesgo. En aquellos casos en donde la gestión del riesgo es

incipiente o incluso nula, se generarán efectos adversos de los fenómenos naturales con consecuencias ambientales. De esta manera, se pone de manifiesto que existe una relación directa entre la gestión ambiental y del riesgo, pero la tendencia actual apunta a una desarticulación entre ambas.

Un claro ejemplo de lo anterior, es que la cantidad de agua subterránea extraída ha superado la capacidad de recarga en once de los diecinueve acuíferos del Estado, lo que representa un problema ambiental debido a la contaminación de las aguas, la salinización de los acuíferos, la disminución de la oferta hídrica y el desarrollo de zonas de subsidencia del terreno. Adicionalmente, no hay una extracción racional del agua subterránea, pues en la medida en que aumenta el volumen de agua concesionada también aumenta el caudal de agua extraída.

Las tasas de gasto de agua presentan un comportamiento exponencial, con valores que varían desde menos de un millón de metros cúbicos por segundo, hasta un máximo cercano a los 19 millones de metros cúbicos, a pesar del establecimiento de zonas de veda para la explotación de agua. Este comportamiento se puede apreciar en los acuíferos Cedral-Matehuala, Vanegas-Catorce y Matehuala-Huizache, todos en condición de explotación intensiva y sujetos a veda tipo III.

Según la literatura consultada para este trabajo, los factores más importantes para el desarrollo de zonas de subsidencia del terreno son la explotación intensiva de aguas subterráneas, la presencia de rocas solubles y la existencia de túneles y cavidades subterráneas. La existencia de estas condiciones en el

área de estudio explican las manifestaciones del fenómeno en diferentes zonas del Estado, como se ha reportado en notas de prensa desde hace varios años.

La metodología propuesta en este trabajo, es una adaptación de la empleada para la zonificación de movimientos en masa. De acuerdo con los resultados obtenidos se puede afirmar que es confiable a pesar de las limitaciones que presenta, ya que el mapa de susceptibilidad obtenido arroja un resultado que coincide con los datos registrados en los recortes de prensa consultados y con el atlas de riesgo de Protección Civil; los municipios citados por ambas fuentes se ubican en zonas de media a muy alta susceptibilidad.

Las limitaciones se refieren a la poca calidad y confiabilidad de la información utilizada, la cual no permite hacer un análisis más detallado. Otra limitación que presenta esta metodología es que pondera todas las variables al mismo nivel, y no establece cuál de ellas ni en qué magnitud incide en la subsidencia del terreno.

Una última limitación de este trabajo es la validación de resultados. Una primera parte se realizó mediante la comparación de la zonificación obtenida y la base de datos construida a partir de fuentes hemerográficas y el Atlas Estatal de Riesgos, obteniendo que las cabeceras municipales reportadas en dichas fuentes se localizan en áreas de susceptibilidad media a muy alta. Tal es el caso de la zona metropolitana San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez, de la que existen numerosos estudios de carácter técnico y reportes de prensa, y en este trabajo se ubica en la zona de muy alta susceptibilidad. Debido a la poca confiabilidad de los antecedentes tomados para la base de datos y la ausencia de otro tipo de fuentes para localidades diferentes a la ciudad de San

Luis Potosí, se planteó una segunda etapa consistente en la realización de trabajo de campo para reconocer, ubicar y estimar magnitudes de las diferentes manifestaciones de la subsidencia del terreno en las cabeceras municipales identificadas como de muy alta susceptibilidad, así como la visita a las cabeceras municipales seleccionadas correspondientes a las zonas de alta a muy baja susceptibilidad. Sin embargo, aunque por cuestiones de tiempo no fue posible llevar a cabo esta segunda etapa, se realizará posteriormente para recabar los datos faltantes y dar continuidad a esta investigación.

De acuerdo con los procesos intermedio llevados a cabo en el análisis, se podría esperar una mayor influencia de la litología en los procesos de subsidencia del terreno, debido a que prevalecen los cuadrantes con valores altos de susceptibilidad y con una amplia distribución en el territorio. Sin embargo es necesario estudios más detallados para confirmar esta afirmación.

De acuerdo con el trabajo realizado, el 5.1% del territorio corresponde a susceptibilidad muy alta, 29.2% a susceptibilidad alta, 56.6% a susceptibilidad media, 8,9% a susceptibilidad baja y apenas 0,1% a susceptibilidad muy baja.

Las cabeceras municipales que se ubican en áreas de muy alta susceptibilidad son Cedral, Ciudad Fernández, Mexquitic de Carmona, Moctezuma, Rioverde, Salinas, San Ciro De Acosta, San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez, Vanegas, Venado, Villa De La Paz, Villa De Reyes y Villa De Arista, razón por lo cual se recomienda que investigaciones más detalladas se deben centrar en estos municipios, teniendo en cuenta que los mayores valores de susceptibilidad, se ubican por lo general cerca a cabeceras municipales, mientras que los menores valores de susceptibilidad se ubican en áreas rurales;

esto indica que las áreas urbanas ejercen mayor presión sobre el medio natural y los recursos, lo que conlleva a que se presenten consecuencias cada vez más desastrosas.

Por este motivo se hace necesaria una adecuada gestión del riesgo, enfocada a la gestión ambiental y los resultados obtenidos en este trabajo constituyen la base para la realización de investigaciones más detalladas en lo relacionado a la subsidencia del terreno en el estado de San Luis Potosí.

## REFERENCIAS

- Abidin, H. Z., Djaja, R., Darmawan, D., Hadi, S., Akbar, A., Rajiyowiryono, H., Sudibyoy, Y., Meilano, I., Kasuma, M. A., Kahar, J. & Subarya, C. (2001). Land Subsidence of Jakarta (Indonesia) and its Geodetic Monitoring System. *Natural Hazards*, 23, 365-387.
- Alfie Cohen, M. (2007). Una nueva gestión ambiental: el riesgo y el principio precautorio. *Espacio Abierto*, 16(2), 209-222.
- Anderssohn, J., Wetzel, H.-U., Walter, T. R., Motagh, M., Djamour, Y., & Kaufmann, H. (2008). Land subsidence pattern controlled by old alpine basement faults in the Kashmar Valley, northeast Iran: results from InSAR and levelling. *Geophysics Journal International*, 174, 287-294.
- Aranda Gómez, J. J., Arzate Flores, J. A., Pacheco Martínez, J., Barboza Gudiño, R., López Doncel, R., Mata Segura, J. L. & Martínez, O. (2008). Ampliación a la cobertura del estudio geológico-geofísico para la evaluación de los hundimientos y agrietamientos en el área metropolitana San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez realizado en el año 2005. San Luis Potosí: Instituto Municipal de Planeación de San Luis Potosí.
- Arroyo, G. M., Zermeño, M. E., & Castañeda, J. A. (2004). El Agrietamiento en Aguascalientes. Causas y efectos. Aguascalientes, Ags.: Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Arzate Flores, J., Barbosa Gudiño, J. R., López Doncel, R., Pacheco Martínez, J., Mata Segura, J. L., & Del Rosal, A. (2006). Estudio geológico-geofísico para la evaluación de los hundimientos y agrietamientos del área metropolitana San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez (Folleto Técnico No. 130). San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Babel, M. S., Das Gupta, A., & Sto. Domingo, N. D. (2006). Land Subsidence: A Consequence of Groundwater Over-Exploitation in Bangkok, Thailand. *International Review for Environmental Strategies*, 6(2), 307-328.

- Bell, F. G., Donnelly, L. J., Genske, D. D., & Ojeda, J. (2005). Unusual cases of mining subsidence from Great Britain, Germany and Colombia. *Environmental Geology*, 47, 620-631.
- Bonachea Pico, J. (2006). Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos. Tesis Doctoral. Santander, España: Universidad de Cantabria.
- Carrera de la Torre, L., & Izurieta, I. (2004). Reducción del Riesgo de desastres a través de la Gestión Ambiental: Uso de Instrumentos Económicos. Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
- CENAPRED (2001). Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México. Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana. México D.F.: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Chai, J. C., Shen, S. L., Zhu, H. H., & Zhang, X. L. (2004). Land subsidence due to groundwater drawdown in Shanghai. *Géotechnique*, 54(2), 143-147.
- Chou, P. Y., & Ting, C. S. (2007). Feasible Groundwater Allocation Scenarios for Land Subsidence Area of Pingtung Plain, Taiwan. *Water Resources*, 34(3), 259-267.
- CONAGUA (2004). Situación de los recursos hídricos. En: Estadísticas del agua en México, Edición 2004 (pp. 21-50). México D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA (2009a). Tabla de acuíferos, con información de Región Hidrológico-Administrativa, clave, nombre, región y subregión hidrológica, cuenca, así como sus principales características para el cálculo de disponibilidad o déficit al 31 de diciembre de 2009. Obtenido de [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/SINA/TM\(Acuiferos\).xls](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/SINA/TM(Acuiferos).xls)
- CONAGUA (2011). Instrumentos de gestión del agua. En: Estadísticas del agua en México, Edición 2011 (pp. 79-100). México D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- Consejo de Recursos Minerales (1992). Monografía Geológico – Minera del estado de San Luis Potosí. Pachuca, Hdo.
- De Justo Alpañez, J. L., & Vázquez Carretero, N. J. (2004). Subsistencia unidimensional no lineal de un suelo saturado. Aplicación al caso urbano de Murcia. *Revista de Obras Públicas*, 3443, 51-64.
- Dirección Estatal de Protección Civil (s.f.). Atlas de Riesgo. Recuperado el 21 de Abril de 2011, de <http://201.144.123.34/webproteccion.nsf/WEB%20Noticias%20sin%20foto%2005?OpenPage>
- DNP (2007). Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010. Estado comunitario: desarrollo para todos. Bogotá D.C.
- Don, N. C., Hang, N. T. M., Araki, H., Yamanishi, H., Koga, K. (2006). Groundwater resources management under environmental constraints in Shiroishi of Saga plain, Japan. *Environmental Geology*, 49, 601-609.
- Eguiluz de Antuñano, S., Aranda García, M., & Marrett, R. (2000). Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Tomo LIII(3), 1-26.
- Esteller, M. V., & Díaz-Delgado., C. (2002). Environmental Effects of Aquifer Overexploitation: A Case Study in the Highlands of Mexico. *Environmental Management*, 29(2), 266-278.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. & Oteo, C. (2004). Mecánica del suelo. En: *Ingeniería geológica* (pp. 17-115). España: Pearson Educación.
- He, X., Xiaoqin, L., Lei, Z. & Guopingd, J. (2006). The Challenge of Managing Groundwater Sustainably: Case Study of Tianjin, China. *International Review for Environmental Strategies*, 6(2), 387 – 402.
- Herrera Pérez, I. L. (2007). Uso del método heurístico para la zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa. XI Congreso Colombiano de Geología. Bucaramanga, Sant. (Col.): Sociedad Colombiana de Geología.
- INEGI (s.f.). Fisiografía de San Luis Potosí. Recuperado el Marzo de 2011, de <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/slp/fisio.cfm?c=444&e=15>

- INEGI (2007) Estudio hidrológico del Estado de San Luis Potosí. Aguascalientes (Ags.).
- INEGI (2011). Sistema de Cuentas Nacionales de México : Producto Interno Bruto por entidad federativa 2006-2010. Aguascalientes (Ags.).
- INGEOMINAS (2001). Evaluación del riesgo por fenómenos de remoción en masa. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- INGEOMINAS (2003). Evaluación de los efectos actuales de subsidencia y colapsos por actividades de aprovechamiento subterráneo de recursos minerales en la ciudad de San Juan de Pasto. Bogotá D.C.
- Johnson, K. S. (2005). Subsidence hazards due to evaporite dissolution in the United States. *Environmental Geology*, 48, 395-409.
- Kontogianni, V., Pytharouli, S. & Stiros, S. (2007). Ground subsidence, Quaternary faults and vulnerability of utilities and transportation networks in Thessaly, Greece. *Environmental Geology*, 52, 1085-1095.
- Lara Juárez, P. (2010). Valoración ambiental del estado de San Luis Potosí a través de sus niveles de asimilación económica, México. Tesis de Licenciatura. San Luis Potosí, S.L.P., México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Larson, M. K. (1986). Potential for subsidence fissuring in Phoenix, Arizona USA area. En A. I. Johnson, L. Carbognin & L. Ubertini (Eds.), *Land subsidence. Proceedings of the third International Symposium on land subsidence held in Venice, Italy. 19-25 March 1984* (Vol. 151, pp. 291-299). Wallingford, Oxon:IAHS.
- López Doncel, R., Mata Segura, J. L., Cruz Márquez, J., Arzate-Flores, J., & Pacheco Martínez, J. (2006). Riesgo geológico para el patrimonio histórico. Ejemplos del centro histórico de la ciudad de San Luis Potosí. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Número Especial de Geología Urbana, Tomo LVIII(2)*, 259-263.
- Lucha, P., Cardona, F., Gutiérrez, F. & Guerrero, J. (2008) Natural and human-induced dissolution and subsidence processes in the salt outcrop of the Cardona Diapir (NE Spain). *Environmental Geology*, 58, 1023-1035.

- Mansilla, E. (2010). Ideas y práctica de la reducción del riesgo y patrones de riesgo en México. En: Villafuerte, D. & Mansilla, E. (Coord.). Vulnerabilidad y riesgos en la Sierra de Chiapas: Dimensiones económica y social. 11-37. Universidad de Artes y Ciencias de Chiapas.
- Marfai, M. A., & King, L. (2007). Monitoring land subsidence in Semarang, Indonesia. *Environmental Geology*, 53, 651-659.
- Mora Castro, S., & Valverde Guillén, R. (1997). La geología y sus procesos. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Mousavi, S. M., Shamsai, A., El Naggari, M. H., & Khamehchian, M. (2001). A GPS-based monitoring program of land subsidence due to groundwater withdrawal in Iran. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(3), 452-464.
- National Research Council (1991). Mitigating Losses from Land Subsidence in the United States. Washington D.C.: National Academies Press.
- Nieto Samaniego, A. F., Alanís Álvarez, S. A., & Camprubí i Cano, A. (2005). La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Tomo LVII(3), 285-318.
- Olivera A., M. F. (2007). Articulación de la Gestión Ambiental y la Gestión del Riesgo. En *Tiempo para Entregar el Relevé: Reducción del riesgo de desastre desde la perspectiva de gestión ambiental, ordenamiento territorial, finanzas e inversión pública* (págs. 21-78). San José (Costa Rica): Grupo Internacional de Recursos del Sur, IRG.
- Ortiz Rodríguez, A. J. (2010). Análisis del impacto ocasionado por el fenómeno de subsidencia en la zona metropolitana de San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez, México. Tesis de Licenciatura. San Luis Potosí, S.L.P., México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Pacheco-Martínez, Arzate-Flores, J., López-Doncel, R., Barboza-Gudiño, R., Mata-Segura, J. L., Del-Rosal-Pardo, A. & Aranda-Gómez, J. (2010). Zoning map of ground failure risk due to land subsidence of San Luis Potosí (México). *Land Subsidence, Associated Hazards and the Role of Natural*

- Resources Development, Proceedings of EISOLS 2010, Queretaro, Mexico, October 2010, IAHS Publ. 339.
- Protti, M., Ballesteros, D. & Fonseca, A. (2010). Tectónica, nivel del mar y ciclo sísmico en Playa Junquillal y el Pacífico norte costarricense. WWF/UNA/OVSICORI. 14 p.
- Raucoules, D., Le Mouelic, S., Carnec, C., Maisons, C., & King, C. (2003). Urban subsidence in the city of Prato (Italy) monitored by satellite radar interferometry. *International Journal of Remote Sensing*, 24(4), 891-897.
- Remondo, J., González, A., Díaz de Terán, J. R., Cendrero, A., Fabbri, A., & Chung, C. F. (2003). Validation of landslide susceptibility maps: Examples and applications from a case study in northern Spain. *Natural Hazards*, 30, 437-449.
- Rodríguez Castillo, R., & Rodríguez Velázquez, I. (2006). Consecuencias sociales de un desastre inducido, subsidencia. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Tomo LVIII(2), 265-269.
- Rodríguez Esteves, J. M. (2007). La conformación de los “desastres naturales”. Construcción social del riesgo y variabilidad climática en Tijuana B.C. *Frontera Norte*, 19(37), 83-112.
- SEGAM (2008). Ordenamiento Ecológico del Estado de San Luis Potosí. Gobierno del Estado de San Luis Potosí. San Luis Potosí, S.L.P..
- SGM (2011a). Producción minero metalúrgica. En: Anuario Estadístico de la Minería Mexicana Ampliada 2010 (pp. 47-197). Recuperado de: [http://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Cap\\_II.pdf](http://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Cap_II.pdf)
- SGM (2011b). Panorama Minero del estado de San Luis Potosí. Servicio Geológico Mexicano, México D.F.
- Shi, X. Q., Xue, Y. Q., Ye, S. J., Wu, J. C., Zhang, Y., & Yu, J. (2007). Characterization of land subsidence induced by groundwater withdrawals in Su-Xi-Chang area, China. *Environmental Geology*, 52, 27-40.
- Simón, J. L., Soriano, M. A., Pocoví, A., Arlegui, L. E., Casas, A. M., Liesa, C. L., Luzón, A., Pérez, A., Pueyo, O., Pueyo, E., Mochales, T., Gracia Abadías,

- F. J. & Ansón, D. (2009). Riesgo de subsidencia kárstica en áreas urbanas: el caso de Zaragoza. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(3), 303-31
- Sletto, B. (1995). That sinking feeling. *Geographical*, 67(7), 24-26.
- Tapia C., L. A. (2006). Informe de la vista a las calles San José Capula, Lázaro Cárdenas, Topaza y Ruiseñor, de la Colonia Las Golondrinas 2ª sección, Delegación Álvaro Obregón, Distrito Federal, efectuada el día 11 de septiembre del 2006. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Tomás, R., Herrera, G., Delgado, J. & Peña, F. (2009). Subsidencia del terreno. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(3), 295-302.
- Tortajada, C. (2006). Water Management in Mexico City Metropolitan Area. *Water Resources Development*, 22(2), 353–376.
- Trueba, V. (2004). Anexo vt. La Subsidencia regional y agrietamiento del subsuelo en San Luis Potosí por la sobreexplotación de los acuíferos. En Proyecto de manejo integrado y sostenible del agua en la Región Centro de San Luis Potosí. San Luis Potosí.
- Vargas C., G. (1999). Guía técnica para la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza por movimientos en masa. Villavicencio, Meta (Col.): Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ), Proyecto Río Guatiquía.
- Xue, Y. Q., Zhang, Y., Ye, S. J., Wu, J. C., & Li, Q. F. (2005). Land subsidence in China. *Environmental Geology*, 48, 713-720.

## FUENTES CARTOGRÁFICAS

- Cervantes-Zamora, Y., Cornejo-Olgín, S. L., Lucero-Márquez, R., Espinoza-Rodríguez, J. M., Miranda-Viquez, E. y Pineda-Velázquez, A, (1990). Provincias Fisiográficas de México. Extraído de Clasificación de Regiones Naturales de México II, IV.10.2. Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:4,000,000. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- CONABIO (1998). Topografía de México. Escala 1:250 000. Extraído del Modelo Digital del Terreno. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEG). México.
- CONABIO (2003). División Política Estatal. Escala 1:250 000. Extraído de Conjunto de Datos vectoriales y toponimia de la carta topográfica. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2000). y Marco Geoestadístico Municipal, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2000). Escala 1:250 000. México.
- CONABIO (2004). Cabeceras Municipales, 2000. Extraído de Principales Resultados por Localidad. XII Censo de Población y Vivienda 2000 del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). México.
- CONAGUA (1998). Cuencas Hidrológicas. Escala 1:250,000. México.
- CONAGUA (2009b). Subsistema de visualización, en Google Earth, de las capas de datos geográficos de los aprovechamientos inscritos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA). Obtenido de <http://siga.conagua.gob.mx/REPDA/Menu/FrameKMZ.htm>
- CTREIG (s.f.) Geología del Estado de San Luis Potosí.
- INEGI (2002). Minas y otras ubicaciones geológicas Escala 1:1,000,000. México

Maderey-R, L. E. y Torres-Ruata, C. (1990), Hidrografía e hidrometría, IV.6.1  
(A). Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1: 4,000,000. Instituto de  
Geografía, UNAM. México.

## **ANEXO**

### **RESUMEN EJECUTIVO**

La subsidencia del terreno es un fenómeno natural que se manifiesta en la superficie terrestre mediante la aparición de grietas en la infraestructura y hundimientos del suelo de forma lenta y gradual, y en el cual influyen tres factores importantes: la explotación de agua subterránea, la presencia de rocas que sean solubles al contacto con el agua o fácilmente erosionables y la existencia de cavidades subterráneas, tales como cuevas o túneles mineros que pueden colapsar y afectar la superficie del terreno. Estos tres factores se presentan en el Estado, por lo que se realizó una evaluación para identificar las áreas más propensas a que se desarrollen zonas de subsidencia del terreno, expresándolo de forma gráfica a través de un mapa.

Este mapa representa cinco niveles cualitativos de la susceptibilidad, desde muy baja a muy alta, y colores que van del verde oscuro al rojo respectivamente, siendo este último el que indica los lugares prioritarios para el desarrollo de estudios detallados sobre subsidencia del terreno.

Como se puede observar, aunque las zonas de mayor susceptibilidad ocupan sólo el seis por ciento del territorio, contiene a cabeceras municipales de Ahualulco del Sonido 13, Cedral, Ciudad Fernández, Rioverde, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez, Vanegas, Venado, Villa de Arista y Villa de La Paz, algunas de ellas de gran importancia para la entidad. Es importante precisar también que más del ochenta por ciento del territorio se ubica en áreas de susceptibilidad media a alta, lo que implica la

necesidad de incorporar el tema en procesos de planeación, educación y comunicación del riesgo.

Adicionalmente se sugiere desarrollar estudios técnicos y trabajos de monitoreo detallados en aquellos municipios identificados como prioritarios con el fin de generar políticas de prevención ante un fenómeno poco conocido, pero altamente perjudicial para la comunidad.