

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN
PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
CIIDIR- MICHOACÁN**

**“EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA EN LA CIÉNEGA DE
CHAPALA, MICHOACÁN”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN:**

PRODUCCIÓN AGRÍCOLA SUSTENTABLE



P R E S E N T A:

ALFREDO PUENTE PALAZUELOS

DIRECTOR DE TESIS:

M. en C. SALVADOR OCHOA ESTRADA

CO-DIRECTOR

Dr. JOSÉ TEODORO SILVA GARCÍA

JIQUILPAN, MICH.

OCTUBRE, 2008



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Jiquilpan, Mich. siendo las 09:00 horas del día 10 del mes de noviembre del 2008 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR-MICHOACÁN para examinar la tesis titulada:

“ Evaluación de la vulnerabilidad acuífera en la Ciénega de Chapala, Michoacán”

Presentada por el alumno:

PUENTE

Apellido paterno

PALAZUELOS

Apellido materno

ALFREDO

Nombre(s)

Con registro:

B	0	5	1	6	6	6
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de: Maestría en Producción Agrícola Sustentable

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis

M. en C. Salvador Ochoa Estrada

Dr. Hipólito Cortez Madrigal



Dr. José Teodoro Silva García

Dr. José Venegas González

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIONES PARA EL PUEBLO QUINTANA ROO

Fco. Estrada G.

M.C. Francisco Estrada Godoy

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

Dr. Carlos V. Muñoz Ruiz



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Jilquilpan, Mich. el día 12 del mes Noviembre del año 2008 el (la) que suscribe Alfredo Puente Palazuelos alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias en Producción Agrícola Sustentable con número de registro B051666, adscrito a CIIDIR IPN Michoacán, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de M. en C. Salvador Ochoa Estrada y cede los derechos del trabajo intitulado "Evaluación de la vulnerabilidad Acuifera en la Ciénega de Chapala, Michoacán", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección sochoae@hotmail.com y cdalfredo5@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Alfredo Puente Palazuelos
Nombre y firma

DEDICATORIA

Ha sido el omnipotente, quien ha permitido que la sabiduría dirija y guíe mis pasos.

Ha sido el todopoderoso, quien ha iluminado mi sendero cuando más oscuro ha estado.

Ha sido el creador de todas las cosas, el que me ha dado fortaleza para continuar cuando a punto de caer he estado; por ello, con toda la humildad que de mi corazón puede emanar, dedico primeramente mi trabajo a Dios.

De igual forma, a mis padres, quienes han sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores, lo cual me ha ayudado a salir adelante buscando siempre el mejor camino.

Gracias papá y mamá por heredarme en vida el más preciado de los tesoros: mi carrera, por creer en mí, aunque hemos pasado momentos difíciles siempre han estado apoyándome y brindándome todo su amor, por todo esto les agradezco de todo corazón el que estén conmigo a mi lado.

Gracias papá y mamá, por cuidarme siempre, por ser mi guía, mi horizonte, mi límite ante los excesos, mis amigos y mis mejores consejeros, y sobretodo, por darme la oportunidad de ser su hijo.

A todos mis hermanos en especial a Roque por haber sido como un segundo padre durante la mayor parte de mi niñez, aquí te devuelvo hermano lo que tú me regalaste

hace muchos años solo que mejorado, tal y como te lo prometí.

A Jorge por haber confiado en mi, toda mi vida te estaré eternamente agradecido, muchas gracias hermano.

A mi esposa Tere y a mis hijos Alfredo, paúl Alfredo, Alfredo Emmanuel y Amalia Aribzagey Zenitt Senyace les digo que este trabajo lo inicie pensando en ustedes porque quise demostrarles que en esta vida nada es gratuito y mucho menos la superación académica, en espera de que me regalen una tesis mejor que la presente quiero darles las gracias por estar conmigo y aguantarme tanto, los quiero.

A mi abuelita “mamà Chuy” por tus sabios consejos y sobre todo por haber parido al más maravilloso de los hombres: mi padre.

A ti “Mamà Beca” a pesar de que no esta aquí ahora en estos momentos conmigo, se que tu alma si lo esta, y por que tuviste los mismos sueños que yo, te dedico con todo mi corazón mi tesis. Nunca te olvidare....

AGRADECIMIENTOS:

La culminación de este trabajo fue un proceso que llegó a feliz término por la participación de personas que con su valioso aporte hicieron posible la realización del mismo, por tanto quiero agradecer de una manera muy especial al:

Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional unidad Michoacán por todo el apoyo suministrado a lo largo de este proceso.

Dr. José Teodoro Siva García quien con su pasión y perseverancia en el estudio del tema de Evaluación de la Vulnerabilidad del Acuífero en la Ciénega de Chapala, supo contagiarme de ese sentimiento, el cual quizá perdure conmigo por el resto de mi carrera profesional. Además sus comentarios y diálogos oportunos acerca del tema fueron muy valiosos para ir moldeando una idea que tomó más fuerza y forma con el paso de las conversaciones.

M. en C. Salvador Ochoa Estrada, director de la presente tesis, por sus acertados comentarios y sugerencias para la realización de este trabajo, por su orientación, enseñanza, y apoyo en todo momento.

M. en C. Gustavo Cruz Cárdenas y M. en C. Francisco Estrada Godoy por su apoyo en las actividades de campo, diseño de los mapas de vulnerabilidad, impacto y de riesgo., muchas gracias.

M en C. José Antonio Ceja Díaz por sus enseñanzas en sistemas de computo.

Biólogo Héctor Rene Buelna Osben, C.P. Heliodoro Montes Silva, Dr. José Venegas González, Dr. Hipólito Cortez Madrigal, M. en C. Francisco Estrada Godoy por su asesoría y confianza que depositaron en mis ideas, conocimiento y trabajo; por haber estado ahí a pesar de mis momentos de adversidad, desilusión y pesimismo.

Dr. José Teodoro Silva García, Dr. Guillermo Herrera Arreola, Dr. José Venegas González, Dr. Luís Arturo Ávila Meléndez, Dr. Hipólito Cortez Madrigal, Dr. Francisco Covarrubias Villa, Dr. Luis Fernando Ceja Torres, M. en C. Juan Manuel Catalán Romero y M. en C. Ignacio García Ruiz; mis maestros, que a lo largo de mi carrera coadyuvaron con sus conocimientos en mi formación académica.

A todos mis sinodales quienes con su acertada revisión contribuyeron para que esta tesis fuera elaborada de la mejor manera.

CONTENIDO

Capítulo	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	iii
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE CUADROS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	4
1.2 Revisión bibliográfica	8
1.3 Objetivos y metas	17
1.4 Materiales y métodos	18
1.4.1 Localización y vías de accesos	18
1.4.2 Características del área de estudio.	19
1.4.3 Clima	19
1.4.4 Vegetación y uso del suelo	20
CAPITULO 2. MARCO GEOLÓGICO	22
CAPITULO 3. EL SISTEMA ACUÍFERO	32
CAPITULO 4. METODOLOGÍA	36
CAPITULO 5. RESULTADOS	42
5.1 Ambiente hidrogeológicos	42
5.2 Vulnerabilidad del acuífero	45
5.3 Fuentes potenciales de contaminación	75
5.4 Mapa de riesgo de contaminación del acuífero	78
CAPITULO 6. DISCUSIÓN	83
CAPITULO 7. CONCLUSIONES	87
BIBLIOGRAFÍA	90
ANEXOS	101

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.	
Fig. 1.4.1.1	Esquema de localización de la Ciénega de Chapala.	18
Fig. 1.4.4.2	Vegetación de la ciénega de Chapala CONABIO, 1999.	21
Fig. 2.1	Localización del área de estudio en relación al marco tectónico para el occidente del FVTM. Tomado de Rosas (1997).	23
Fig. 2.2	Edades radio métricas reportadas para el Rift de Chapala. Rosas, et al. (1989).	25
Fig. 2.3	Columna Geológica de la región de Chapala.	29
Fig. 2.4	Plano geológico regional para la Ciénega de Chapala (Modificado de Delgado, 1994 y Garduño et al., 1993).	31
Fig. 3.1	Sección geológica esquemática en la ciénega de Chapala. (Garduño et. Al., 1993).	32
Fig. 3.2	Esquema del Mecanismo hidrodinámico del acuífero de la ciénega de Chapala.	35
Fig. 4.1	Esquemización grafica de las puntuaciones y pesos de los factores del SINTACS ₂ (Civita, 1994).	37
Fig. 4.2	Esbozo de una zona caracterizada por varias situaciones hidrogeológico y de impacto afín a las series de los pesos elegidas para la valoración de la vulnerabilidad del agua subterránea.	38
Fig. 5.1	Ambientes hidrogeológicos identificados para la ciénega de Chapala.	44
Fig. 5.2.1	Índice SINTACS ₂ para el parámetro S.	47
Fig. 5.2.2	Índice SINTACS ₂ para el parámetro I.	50
Fig. 5.2.3	Índice SINTACS ₂ para el parámetro N.	51
Fig.5.2.4	Distribución de sitios de muestreos 2006.	53
Fig. 5.2.5	Índice SINTACS ₂ para el parámetro T.	55
Fig. 5.2.6	Instrumento geofísico de exploración.	56
Fig. 5.2.7	Perfil geoelectrico de la Ciénega de Chapala.	58

Fig.5.2.8	Secciones de resistividad para apoyar la integración de los perfiles geoelectrico.	59
Fig.5.2.9	Sección Geológica, "Ciénega". Modelo electro stratigrafico.	63
Fig. 5.2.10	Índice SINTACS ₂ para el parámetro A.	66
Fig. 5.2.11	Índice SINTACS ₂ para el parámetro C.	68
Fig. 5.2.12	Mapa altimétrico de la Ciénega de Chapala.	70
Fig. 5.2.13	Índice SINTACS ₂ para el parámetro S ₂	71
Fig. 5.2.14	Esquematización del proceso de obtención del plano de vulnerabilidad.	72
Fig. 5.2.15	Mapa de vulnerabilidad SINTACS ₂ .	74
Fig. 5.3.1	Ubicación de las fuentes potenciales de contaminación.	76
Fig.5.4.1	Zonificación de riesgo para la Ciénega de Chapala.	81

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.	
Cuadro 1.4.4.1	Tipos de Vegetación.	20
Cuadro 4.1	Puntuaciones de las curvas de los parámetros para el método SINTACS ₂ .	39
Cuadro 4.2	Fuentes potenciales de contaminación.	41
Cuadro 5.2.1	Piezometría julio, septiembre y noviembre de 2006.	46
Cuadro 5.2.2	Superficie de Suelos de la Región.	54
Cuadro 5.2.3	Valores de la conductividad hidráulica en relación con la textura del Suelo.	67
Cuadro 5.2.4	Niveles de riesgo de vulnerabilidad SINTACS ₂ .	73
Cuadro 5.3.1	Clasificación de las fuentes potencialmente contaminantes de acuerdo a su actividad, origen, geometría, temporalidad, tipo de soluto y carga contaminante.	77

RESUMEN

El aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos implica la evaluación de las condiciones en que se encuentran para garantizar un manejo racional y eficiente. Un aspecto que cada día cobra mayor importancia es el riesgo de un acuífero a ser contaminado por fuentes naturales pero principalmente por aquellas inducidas por el hombre. En el presente trabajo se utilizó el método SINTACS₂ como esquema de diagnóstico del grado de vulnerabilidad del acuífero, con el objetivo principal de obtener la zonificación del riesgo al que el acuífero puede estar sujeto por actividades antropogénicas. Consistió en un análisis por cuadrantes de 0.25 Km² basado en siete factores. La determinación de este índice involucró la multiplicación de cada uno de ellos por la puntuación del rango y posteriormente, estos fueron multiplicado por su peso respectivo; que representó de manera numérica el grado de importancia e influencia que cada uno de ellos tiene en el ámbito de manejo del medio ambiente, siendo 5, el de mayor índice de relevancia y 1 como el de menor importancia. Se generaron los mapas temáticos cuya suma paramétrica determinó finalmente dos niveles de vulnerabilidad: Mediana que cubre la mayor parte de la ciénega, y en pequeñas porciones vulnerabilidad alta; en base a esto y con la sobreposición del mapa de priorización en el mapa SINTACS₂ utilizando el modulo INTERSECT de ArcGis® se generó como producto un mapa de riesgo priorizado donde la priorización reducida ocupa la mayor parte de la superficie del área de estudio, lo cual coincide con los rangos de 34 a 49 del índice de SINTACS₂ normalizado. El valor 2 o intermedio de priorización se relaciona con valores mayores de 50 del SINTCAS₂ principalmente. En la región de estudio existe un riesgo intermedio de contaminación de los acuíferos y se encontró asociado con las áreas donde se ubican las gasolineras, descargas de las aguas residuales de las poblaciones, tiraderos a cielo abierto observándose algunos puntos dispersos que corresponden a los diferentes tiraderos municipales.

ABSTRACT

The use of groundwater resources involves the assessment of their present condition to ensure a rational and efficient management. Nowadays one of the most significant aspects is the risk of an aquifer to be contaminated by natural sources, but mainly by those induced by humans. In this study we used the SINTACS₂ method like diagnostic scheme to determinate the aquifer's degree of vulnerability with the main aim to obtain a risk zonification at which the aquifer may be subject to anthropogenic activities. It consisted in the analysis of quadrants of 0.25 km² based on seven factors. The index determination involved the multiplication of each of them for scores of rank and subsequently, they were multiplied by their respective weights, which represented a quantitative degree of importance and influence that each quadrant had in the management area of the environment, with 5 as the highest level and 1 as the lowest level of importance. The parametric sum of the thematic maps generated finally described two levels of vulnerability: Medium vulnerability that cover most of the Ciénega, and high vulnerability found in small portions; according to these results and the overlay map of prioritization on the map using the SINTACS₂ Intersect module ArcGIS® product, we generated a map where the prioritized risk prioritization reduced occupied most of the surface area of study, aspect that coincides with ranges 34 to 49 of the SINTACS₂ standard index. The value of two or intermediate prioritization is related to the SINTCAS₂ higher values mainly in the order of 50. In the study region there is an intermediate contamination risk of the aquifers associated with areas showing gas stations, wastewater urban discharges, open-air dumps and some scattered points that correspond to different Municipal dumps.

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

La importancia del agua subterránea, tanto para el abastecimiento público como para el privado, es incuestionable. Pero, si bien es absolutamente real su importancia, la misma no es tomada muchas veces en consideración para el mantenimiento de su calidad natural. En el continente iberoamericano, fue estimado que en 1987 más de 100 millones de personas utilizaban este recurso (Hirata, R. & Rebouças, A. 1999). Pocos países del citado continente poseen algún tipo de política que asegure la protección de ese recurso contra la contaminación y la sobreexplotación, lo cual resulta agravado por el hecho de que en un acuífero seriamente contaminado nunca más podrá ser restablecida su calidad natural.

Sobre la base de esta realidad, se deriva la necesidad de que los países del continente iberoamericano inicien un programa sistemático de protección de acuíferos, pues de no hacerse así puede ser inminente la pérdida del recurso y de las inversiones hechas en el mismo. Para esto debe tenerse muy en cuenta que para una administración ambientalmente segura del agua subterránea, la mejor práctica es proteger el recurso antes de su contaminación (Hirata, R. & Rebouças, A. 1999).

Los países de Norte América y de Europa tienden a optar por la creación de programas de protección del agua subterránea ante la contaminación antrópica basados en el establecimiento del *perímetro de protección de pozos (PPP, Wellhead Protection Areas)*, o en la cartografía de la vulnerabilidad *de los acuíferos* (Hirata, 1994). El primero (que tiene como centro de estudio el pozo de abastecimiento) presenta como principal objetivo el establecimiento de una zona alrededor del

mismo. Mientras que en el segundo, más amplio, se debe definir la susceptibilidad del acuífero a la contaminación a través de mapas de vulnerabilidad, así como mediante la determinación de la importancia del acuífero para el abastecimiento público o privado (Hirata, R. & Rebouças, A. 1999).

Conocer la vulnerabilidad de un acuífero a ser afectado por factores externos en una región determinada, es un asunto apremiante para las instituciones relacionadas con el medio ambiente. Por lo tanto, contar con mapas de esta índole, permite conocer que tan susceptibles son los sistemas acuíferos de incorporar de manera natural o por actividades antropogénicas una cantidad determinada de contaminantes (Foster e Hirata, 1991).

El concepto de vulnerabilidad fue introducido por el hidrogeólogo francés J. Margat (1968) y aunque inicialmente se le relacionaba solo a aspectos cualitativos de contaminación, actualmente puede incluir aspectos cuantitativos. Lo anterior es posible mediante la aplicación de diferentes métodos entre los que se encuentra el SINTACS₂, desarrollado por Civita *et al* (1990) y que para fines de este trabajo es el que se utilizó.

Por otra parte y en términos de riesgo, vulnerabilidad se puede definir como la probabilidad de que el agua subterránea se contamine con alguna sustancia, en concentraciones por encima de los valores reales recomendados por la Organización Mundial de la Salud o por el Gobiernos Federal para la calidad del agua de consumo humano (Foster e Hirata, 1991).

La combinación de valores de vulnerabilidad y fuentes potenciales de contaminación (basureros activos e inactivos, ríos y canales de aguas residuales, gasolineras, granjas, panteones, terrenos agrícolas e industriales) generan el mapa de riesgo, con lo cual se visualiza qué tan susceptibles es el sistema acuífero de incorporar solutos provenientes de fuentes potenciales y activas de contaminación localizadas en la superficie, lo que originaría alteraciones en su calidad (Civita y De Maio, 1997).

Se espera que los mapas de vulnerabilidad y riesgo resultados del presente trabajo, aporten una herramienta importante en los mecanismos a desarrollar a efecto de prevenir la contaminación del agua subterránea, preservando y garantizando la calidad del agua suministrada para el consumo humano, además que sirva como una herramienta en la planificación de actividades relacionadas con el medio ambiente y el ordenamiento territorial para posteriormente desarrollar políticas de gestión y de protección de los acuíferos.

1.1 Antecedentes

Las evaluaciones de vulnerabilidad del agua subterránea han sido utilizadas cada vez más a partir de los años noventa como una herramienta para planear y manejar los recursos acuíferos en diferentes partes del mundo (Cortés *et al*, 2004).

Aller *et al.* (1987) llevaron a cabo por primera vez un análisis DRASTIC en los Estados Unidos en escala 1:2, 000,000. Posteriormente la USEPA (1992) analizó esos resultados al aplicar el National Survey of Pesticides in Drinking Waters Wells, sobre los datos cualitativos obtenidos por el DRASTIC en esa escala. Se analizaron los índices DRASTIC a nivel Condado (un nivel jerárquico para cada uno), así como subconteos computados para 90 Condados seleccionados, en los que se realizaron análisis por plaguicidas en muestras de agua de pozos. Los resultados mostraron un DRASTIC muy pobre para esos Condados. Por lo tanto, se concluyó que para implementar un plan de manejo de la calidad del agua más exacto, es necesario incrementar el detalle en los datos de entrada del DRASTIC.

A través de un estudio sobre cuestiones de vulnerabilidad en la zona del Valle del Río Turbio se obtuvo el primer censo de fuentes potenciales de contaminación (CEASG, 2000).

Civita y de Maio (2001), realizaron un estudio de evaluación de la vulnerabilidad al riesgo de contaminación del acuífero que subyace al área municipal de San Miguel de Allende, utilizando el método paramétrico SINTACS₂. Las zonas más vulnerables se encontraron al occidente de la localidad La Ciénega, cerca de Los Rodríguez y en

el triángulo que incluye las localidades de Puente del Carmen, Santas Marías y Doña Juana/Jalpa. El índice y el mapa de vulnerabilidad fueron creados en un sistema de información geográfica, lo cual permite que en un futuro se puedan validar y refinar los resultados con información adicional.

Ramos et al. (2003), realizó un estudio sobre la validación de mapas de vulnerabilidad acuífera e impactos ambientales para el río Turbio, Guanajuato; consistente en la correlación de parámetros con índices parciales, ajuste de intervalos de ponderación, análisis de sensibilidad, variabilidad, pesos y correlación entre dos diferentes métodos de vulnerabilidad y concentración de componentes químicos con la vulnerabilidad.

1st International Workshop Aquifer Vulnerability and Risk (2003) en la ciudad de Salamanca, Gto. Se expusieron numerosos trabajos sobre el tema vulnerabilidad y riesgo de acuíferos. Algunas de las principales conclusiones fueron:

- Las metodologías de evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos pueden ayudar en los programas de prevención de la contaminación de las aguas subterráneas con la definición de áreas protegidas y el manejo del acuífero.
- La investigación futura debe llevarse a cabo para unificar criterios, para reducir al mínimo la ambigüedad y la búsqueda de oportunidades de validación

Pérez y Pacheco (2004) determinaron la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en el estado de Yucatán, utilizando las metodologías AVI, GOD y DRASTIC. Los resultados encontrados indican que la mayor vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea se presentó en la zona costera y la menor, en los cerros y la planicie interior. Además, la metodología DRASTIC presentó la mayor aproximación para la vulnerabilidad intrínseca para el estado de Yucatán.

Palomo y Figueroa (2006) señalan un estudio denominado “Desarrollo Sustentable de los Recursos Naturales al Disminuir Riesgos de Contaminación en Actividades Agropecuarias realizado en cinco drenes agrícolas del Valle de Juárez, Chihuahua” donde fueron analizados nitrógeno total (N-total), amoniacal ($N-NH_4$), nitratos ($N-NO_3$) y nitritos ($N-NO_2$), así como fósforo, fosfatos totales y ortofosfato. Entre los resultados se indica que el dren Placitas, excedió a la concentración que presenta el agua residual cruda para N-total, $N-NH_4$, $N-NO_2$.

El agua residual y residual-mezclada que se utiliza en el Distrito de Riego 009 (DR-009), Valle de Juárez es rica en nitrógeno y otros nutrientes, lo que permite a los productores aprovechar su potencial agronómico como fertilizante complementario; sin embargo, al no existir una regulación que permita utilizar racionalmente los fertilizantes orgánicos e inorgánicos, al agua residual se le confiere un riesgo de contaminación para el acuífero somero o artesiano (Palomo y Figueroa, 2006).

Recientemente se realizó una investigación en la región del Bajío Michoacano en la cual se propuso una metodología encaminada a la localización de sitios ambientales seguros para la disposición de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). El

proceso de la información implico algebra de mapas para obtener como producto final un mapa paramétrico denominado Índice de Riesgo Ambiental (Silva et al, 2006). Dentro de los factores considerados aparece la vulnerabilidad acuífera, utilizándose el método SINTACS₂ (Civita y De Maio, 2000). Con los resultados obtenidos se pudo definir que el área con mayores posibilidades para disponer de los RSU se localiza en la porción central de la región.

Al Kuisi et al., (2006) creo un mapa de vulnerabilidad para el Valle Jordán utilizando la metodología SINTACS₂ combinado con un sistema de información geográfica Arc map 9.0 en el cuál encontró que el índice de vulnerabilidad del agua subterránea de las zonas circundantes son susceptibles a la contaminación en un alto grado, atribuyendo este resultado a la profundidad del nivel del agua que osciló entre los 10 m por debajo de la superficie del terreno y a una alta tasa de recarga del crecimiento poblacional acompañado de una intensa actividad agrícola.

1.2 Revisión bibliográfica

La vulnerabilidad acuífera se define como la probabilidad de que contaminantes de una fuente superficial alcancen el agua subterránea. Un acuífero vulnerable no necesariamente está contaminado, lo estará si es que se encuentra sobre la fuente activa (Rodríguez et al., 2000).

Vrba y Zaporozec, (1994) mencionan que la vulnerabilidad acuífera es “una propiedad intrínseca del sistema de agua subterránea que depende de la sensibilidad del mismo a los impactos humanos y/o naturales”. De la definición se desprende que se incluyen en la misma tanto al sistema subterráneo como a los contaminantes y dentro de estos a los artificiales y los naturales.

De acuerdo al National Academy Council (1993) el concepto de Vulnerabilidad del Agua Subterránea se refiere a la tendencia o probabilidad que un contaminante alcance una posición especificada en el sistema acuífero, después de su introducción en algún punto sobre el terreno, por tanto, la vulnerabilidad de un acuífero esencialmente es función de la resistencia de la zona no saturada a la penetración de contaminantes, así como de la capacidad de dicha zona de atenuar o reducir la acción del o los agentes contaminantes.

De acuerdo a Esteller *et al.*, 2006, la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación puede ser determinada en función de varios aspectos y su empleo se diversifica con relación al contexto donde se inserta. Así, este término es utilizado por

los hidrogeólogos y administradores de recursos hídricos para expresar una de las tres ideas siguientes:

a) Susceptibilidad del acuífero de que no sea afectado por una carga de contaminante antrópica impuesta, la cual es función de las características del medio hidrogeológico.

b) Importancia socio-económica de los recursos hídricos en el presente y futuro, incluyendo la posibilidad de ser sustituido por otras fuentes (Hirata, 1994).

c) Importancia del acuífero en mantener áreas ecológicamente trascendentes y frágiles (Canter *et al.*, 1987).

La vulnerabilidad de los acuíferos frente a la contaminación es una propiedad intrínseca del medio que determina la sensibilidad a ser afectados negativamente por un contaminante externo. Es una propiedad relativa, no medible y adimensional y su evaluación se realiza admitiendo que es un proceso dinámico (cambiante con la actividad realizada) e iterativo (cambiantes en función de las medidas protectoras). La vulnerabilidad puede ser intrínseca (condicionada por las características hidrogeológicas del terreno) y específica (cuando se consideran factores externos como la climatología o el propio contaminante.)(Foster, 1987).

Existen metodologías que permiten evaluar la susceptibilidad de un sistema acuífero y su interacción con una carga contaminante. Civita (1990) menciona que existen veinticuatro métodos para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del

agua subterránea y los parámetros principales en que se basa cada método (Vrba y Zaporozec, 1994).

Aunque en México y América Latina los métodos mas utilizados son: DRASTIC, GOD y AVI, (Báez, 2002; Castro *et al*, 1996). Los métodos son similares siendo la cantidad de variables la diferencia entre ellos. Estos buscan determinar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero de la manera más objetiva posible, por lo que suelen utilizar rangos de clasificación definidos para cada una de las variables (Agüero, 2000).

DRASTIC, SINTACS₂ y GOD, evalúan la vulnerabilidad del acuífero dividiendo el mismo en celdas o polígonos, para los cuales calculan un índice de vulnerabilidad a partir de un sistema por rangos ponderados. O sea, estos métodos definen rangos para cada uno de los parámetros que emplean y además asignan un peso en función de la importancia relativa de dicho parámetro. La suma de estos rangos ponderados permite obtener un índice que refleja la vulnerabilidad de cada celda o polígono del acuífero. A mayor valor de este índice, mayor es la sensibilidad del acuífero a la contaminación.

El AVI (Van Stempvoort, 1994) es uno de los métodos más sencillos, fáciles y rápidos de cuantificar la vulnerabilidad, tan solo utiliza la conductividad hidráulica y el espesor de las capas de diferente material que se encuentran sobre el nivel del agua. (Báez, 2001).

El método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) es probablemente el método más utilizado en los estudios de vulnerabilidad de acuíferos. Este método se basa en la identificación de los ambientes hidrogeológicos y en el establecimiento de la vulnerabilidad del acuífero con base a un esquema jerárquico numérico de los elementos que componen el acrónimo de sus siglas en inglés.

En general puede destacarse que al DRASTIC se le critica la cantidad de variables que emplea, la dependencia entre algunas de ellas y que las ponderaciones que realiza a las mismas pueden ser cuestionables (Valcarce y Rodríguez, 2004).

SINTACS₂ es una derivación del DRASTIC, y por tanto se le hacen las mismas críticas; GOD es un método muy sencillo, fácil de aplicar en condiciones de escasa información; AVI es una metodología sencilla pero que requiere conocer el espesor y la conductividad hidráulica vertical de las capas que sobreyacen al acuífero (Valcarce y Rodríguez, 2004).

Los Sistemas de Información Geográfica constituyen herramientas muy útiles y efectivas para la aplicación de estas metodologías y se reportan no pocos trabajos en la literatura internacional en este sentido (Taco y Galarrazaga, 2002).

Otros métodos como National Rivers Authority (NRA) y Groundwater occurrence, Overall aquifer class and Depth to groundwater (GOD) (Foster e Hirata, 1988) también contemplan las variables de “impacto de zona no saturada” y “tipo de

acuífero”. Sin embargo, la aplicación de estos y otros métodos como el ERIS (Wilson, 1991), GOD - OSDI (Foster et al., 1991), SINTACS (Civita, 1990), etc., en un mismo acuifero pueden dar resultados muy variables con lo cual la validez de estos resultados es relativa.

Ante esta situación es necesario evaluar las metodologías ya elaboradas que se aplican en los estudios de vulnerabilidad de acuíferos y modificarlas tomando en consideración los escenarios existentes en la región y/o establecer nuevos métodos con base a las condiciones y medios disponibles.

Por lo anterior, se debe tener en cuenta que los estudios de vulnerabilidad ayudan a establecer estrategias de protección del agua subterránea, ya que su uso permite determinar el riesgo de contaminación de las mismas. Además, se puede utilizar para identificar los acuíferos o zonas de los acuíferos, más vulnerables y establecer que actividades pueden causar riesgo de contaminación (López, 2006).

Tomando en cuenta la escasez de recursos económicos en América Latina, la determinación del riesgo de contaminación de acuíferos, es una herramienta importantísima para la toma de decisiones acerca de la destinación de estos recursos para el monitoreo y remediación.

Foster (1988) definió el riesgo de contaminación como la relación de interacción entre la carga contaminante (que es, será, o pudiera ser aplicada al subsuelo como resultado de la actividad humana) y la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación (Debido a las características naturales de los substratos que se cubren y se separan de la superficie). Es decir que el Riesgo de Contaminación es la probabilidad de que las aguas subterráneas se contaminen a concentraciones por encima de los valores recomendados para la calidad del consumo humano.

Otros lo asimilan a la vulnerabilidad específica, que se refiere al peligro de contaminación del agua subterránea respecto a un contaminante o familia de contaminantes de características y comportamientos similares (nitratos, hidrocarburos livianos o pesados, plaguicidas, materia orgánica, fenoles, metales, etc.). (Vrba y Zaporozec, 1994).

La vulnerabilidad del agua subterránea es el grado de inaccesibilidad de un acuífero a los contaminantes; es función de la atenuación a la contaminación que posean sus estratos suprayacentes, debido a sus características físicas, químicas y biológicas. La vulnerabilidad es el inverso a la asimilación del contaminante, con una protección adicional causada por los substratos. Es una propiedad intrínseca del acuífero y sus estratos suprayacentes. Cada formación acuífera, posee una única vulnerabilidad, y por ende se debe construir un mapa de vulnerabilidad por cada acuífero de una cuenca hidrogeológica.

Los métodos utilizados para la predicción de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, pueden ser clasificados en tres grupos (Otalvaro, 1996):

- Métodos basados en procedimientos: utilizan modelos matemáticos para analizar y simular los procesos que gobiernan el transporte de contaminantes en la subsuperficie.

- Métodos estadísticos: utilizan grupos de variables que condicionan la vulnerabilidad de la contaminación de los acuíferos, proporcionando conclusiones según la asociación que presenten éstas áreas.

- Métodos de Indexación y superposición: combinan un conjunto de características o atributos físicos del suelo, la zona no saturada y los acuíferos, a los cuales se asigna un valor numérico según su importancia en la evaluación de la vulnerabilidad. Son los más usados por su mayor flexibilidad, en cuanto al conocimiento básico de la zona, aceptando ciertas estimaciones en caso de contar con información insuficiente.

Los más usados son: el empleado por la Agencia Ambiental y la Autoridad Nacional de Ríos del Reino Unido (NRA, 1998), el Método DRASTIC (Aller y otros, 1987), utilizado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y el método GOD, propuesto por Foster (1988) en documentos del CEPIS.

La otra componente para la determinación del riesgo de contaminación de acuíferos, es la evaluación de la carga contaminante. Foster (1988), propone clasificar los contaminantes según su aplicación en el terreno, así:

- Fuentes puntuales. Comprende actividades industriales, lagunas de efluentes, disposición de residuos sólidos y aporte de aguas superficiales contaminadas.
- Fuentes dispersas. Incluye aquí saneamiento in-situ en áreas residenciales urbanas y el uso agrícola del suelo.

Otros (Vrba y Zaporozec, 1994) lo asimilan a la vulnerabilidad específica, que se refiere al peligro de contaminación del agua subterránea respecto a un contaminante o familia de contaminantes de características y comportamientos similares (nitratos, hidrocarburos livianos o pesados, plaguicidas, materia orgánica, fenoles, metales, etc.).

El riesgo de contaminación de un acuífero está integrado por el binomio: vulnerabilidad de la unidad hidrogeológica y el potencial de la carga contaminante en la superficie del terreno (Belmonte *et al.*, 1994).

Belmonte *et al.*, 1994. Presentó la metodología adaptada para determinar el riesgo de contaminación del valle de Zaachila de donde se abastece en parte la ciudad de Oaxaca y varios municipios conurbados. Para determinar la vulnerabilidad se usaron los métodos DRASTIC, AVI y GOD. La carga contaminante se determinó en tres

puntos sobre el Río Atoyac y en 10 pozos de monitoreo. El mapa de riesgo indica mayores efectos negativos en las inmediaciones del aeropuerto internacional y San Agustín de las Juntas.

La contaminación del agua subterránea por nitratos (N-NO_3^-) es un problema extendido en muchos lugares del mundo (Canter, 1997) e impone una seria amenaza al abastecimiento de agua potable (Pauwels *et al.*, 2001; Muñoz *et al.*, 2004). Este problema obedece al impacto que tiene el excesivo uso de fuentes nitrogenadas en el sector agropecuario ya que no está regulada la aplicación y uso de fertilizantes minerales (inorgánicos), ni la fertilización proporcionada por estiércol y biosólidos (inorgánicos) (Ongley, 1997; Figueroa *et al.*, 2003). En materia de regulación, los biosólidos son los únicos que reciben supervisión para su aprovechamiento, aunque la norma establece los límites máximos permisibles (LMP) para metales pesados y no especifica las dosis de nitrógeno que deben aplicarse al suelo (Figueroa *et al.*, 2003). A este respecto Figueroa *et al.*, (2006) justifica plenamente la necesidad de regular las dosis de fertilizantes utilizados en el sector agrícola, toda vez que se presentan riesgos de contaminación al acuífero.

La estructuración de los mapas de riesgo en base a los mapas de vulnerabilidad elaborados bajo el método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) o AVI (Van Stempvoort *et al.*, 1995) o SINTACS₂ (Civita y De Maio, 1997), requieren de la incorporación de fuentes de contaminación. En México ya se están dando los primeros pasos para que sean tomados como elementos en la planificación urbana (Tovar *et al.*, 1999). Los mapas

deben validarse con información química de pozos del área (Báez, 2001; Ramos, 2002).

1.3 Objetivos y metas

Objetivo General:

Obtener índices de vulnerabilidad SINTACS₂ y su correlación directa con fuentes potenciales de contaminación para generar un mapa de riesgo del acuífero de la ciénega de Chapala

Metas

- Obtención de los parámetros de vulnerabilidad SINTACS₂ y sus respectivos mapas temáticos.
- Identificación y clasificación de fuentes potenciales de contaminación del acuífero de la ciénega

1.4 materiales y métodos

1.4.1 Localización y vías de acceso

La zona de estudio se localiza al noroeste del estado de Michoacán, entre las coordenadas $19^{\circ} 53'$ y $20^{\circ} 14'$ de latitud norte y $102^{\circ} 29'$, $102^{\circ} 45'$ de longitud oeste, (Fig. 1.4.1.1) y se corresponde con el Distrito de Riego 024-Ciénega de Chapala, que comprende una superficie de 48, 920 hectáreas, equivalente al 6.11% de la superficie del Estado.

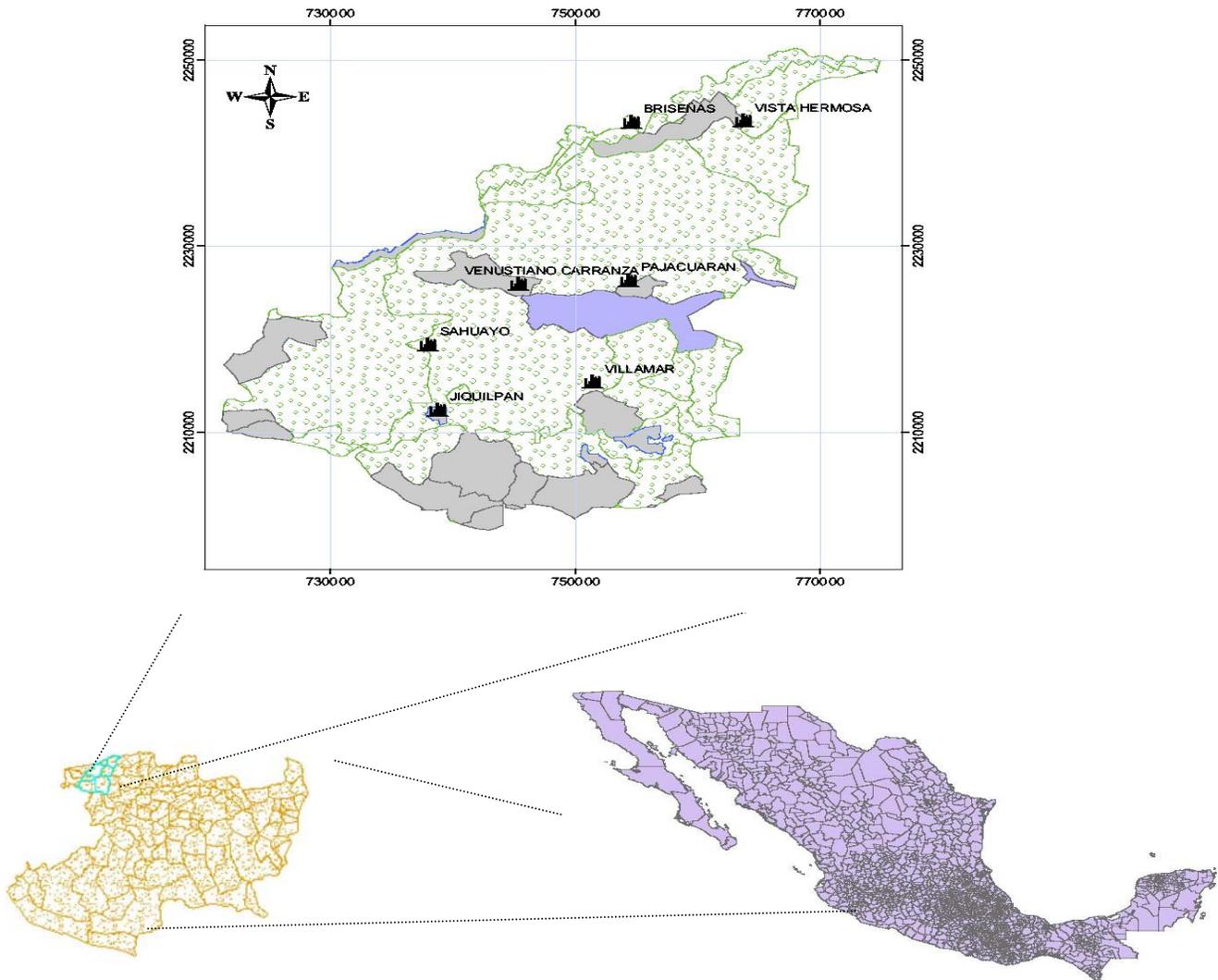


Fig. 1.4.1.1 Esquema de localización de la Ciénega de Chapala.

Las principales vías de comunicación son: la carretera federal No. 15 México-Guadalajara, en su tramo Villamar-Sahuayo, así como la carretera estatal No. 5, en su tramo Sahuayo-La Barca; además de un sinnúmero de caminos de terracería transitables todo el año que entroncan a las vías principales y que comunican con rancherías distantes.

1.4.2 Características del área de estudio

La región era originalmente un humedal, pero fue desecada por el bordo de Maltaraña. La denominación de ciénega permaneció. Comprende parte de los municipios de Briseñas, Vista Hermosa, Jiquilpan, Sahuayo, Venustiano Carranza, Villamar y Pajacuarán, a una altitud promedio de 1522 m, concentrando a 176,093 habitantes según el censo poblacional del año 2005 elaborado por el INEGI.

1.4.3 Clima

Según la clasificación de Köppen modificada por García (1988), los climas predominantes en el área de estudio son: (A) C (w1) y C (w1) semicalido subhúmedo y templado subhúmedo, con lluvias en verano, el primero abarca la mayor parte de la ciénega y el segundo la zona de lomeríos.

La precipitación media anual es de 800 mm., con un rango de escurrimiento superficial del 10 al 20%; siendo la temperatura promedio anual de 18° C. En general, la precipitación invernal es menor al 5%; el mes de marzo registra la menor precipitación (40 mm.) y Julio la máxima de 235 mm.

1.4.4 Vegetación y uso del suelo

La vegetación en la ciénega de Chapala en relación con el clima y la altitud, es típica de zonas semiáridas del centro del país, aun cuando la influencia que sobre el clima ejerce el agua es determinante, esto hace que tenga algunas particularidades. La cuenca local baja del lago está totalmente alterada por efecto de las prácticas agrícolas y los asentamientos humanos, la parte media y alta presenta diversos grados de conservación, siendo estos mayores a medida que se alejan de los centros urbanos y agrícolas. La vegetación natural que rodea al lago se clasifica como “matorral subtropical” (Estrada, *et al.*, 1983).

La mayor parte de la superficie ya no cuenta con su vegetación original. Actualmente se encuentra ocupada por cultivos que por lo general son (es) trigo, maíz, cebada, avena, entre otros. Solamente las zonas de lomeríos se encuentran con menos perturbación por el hombre (Cuadro 1.4.4.1 Fig. 1.4.4.1)

Cuadro 1.4.4.1 Tipos de Vegetación. Tomado de CONABIO, 1999.

DESCRIPCIÓN	Ha
Bosque de coníferas distintas a Pinus	834
Bosque de encino	4,130
Manejo agrícola, pecuario y forestal (plantaciones)	106,144
Matorral espinoso tamaulipeco, submontano y subtropical	30,861
Vegetación halófila y gipsófila	1,071

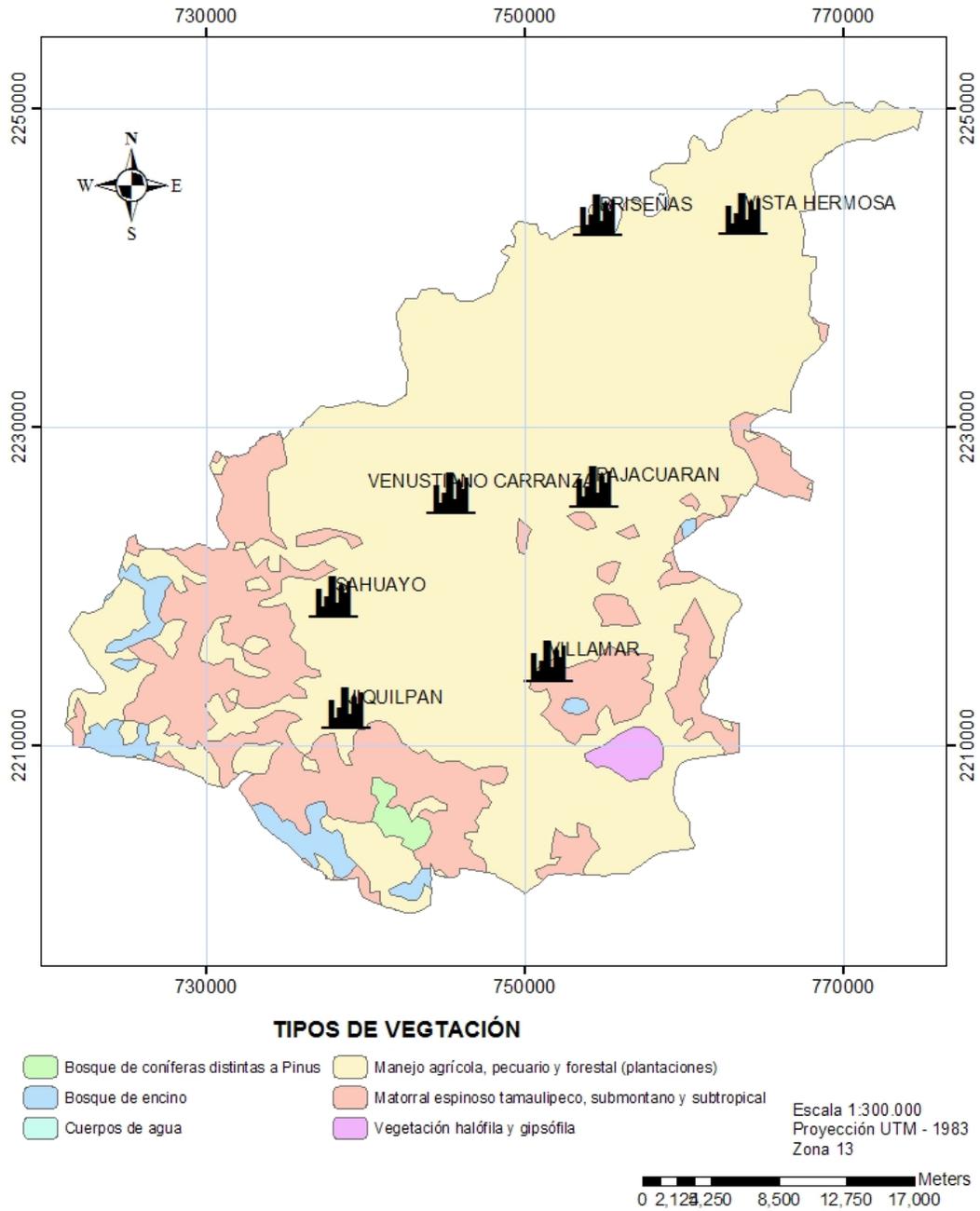


Fig. 1.4.4.1 Vegetación de la ciénega de Chapala. CONABIO, 1999

La vegetación acuática esta representada por vegetación Riparia, “sauce” en particular a lo largo de los cauces y arroyos y ríos; así como, en algunas zonas de la rivera del lago, donde se ha propagado artificialmente.

Dentro de la vegetación acuática se mencionan varios tipos como: pradera acuática latí folia, microfilia y rosetofilia (Rzedowski, 1978; Guzmán, 1989 y 1990c).

CAPITULO 2. MARCO GEOLÓGICO.

La región de estudio se encuentra ubicada en los limites de los estados de Jalisco y Michoacán, en el sector Occidental de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM) y en una región colindante con la provincia de la Sierra Madre Occidental (Fig. 2.1), en esta zona se bifurca hacia el estado de Nayarit al Noroeste y hacia Colima al Suroeste, (Delgado y Urrutia, 1986).

Uno de los rasgos estructurales más notables en la porción occidental de la FVTM, es un sistema de tres rifts que se interceptan a 50 Km. al suroeste de la ciudad de Guadalajara, formando una unión triple continental tipo RRR (Rosas, 1997). Esta unión triple la forman los rifts de Tepic-Zacoalco, Colima y Chapala con orientaciones NO-SE, N-S y E-O, respectivamente. De manera particular, la zona de estudio se ubica en el extremo oriental del rift de Chapala donde es conocida como Ciénega de Chapala.

Las tres depresiones tectónicas anteriores alojaron y alojan extensos lagos como el de Sayula, en la porción norte del rift de Colima, el de San Marcos en el extremo SE del rift Tepic-Zacoalco y el Lago de Chapala en el rift del mismo nombre. Actualmente, solo el Lago de Chapala no es intermitente.

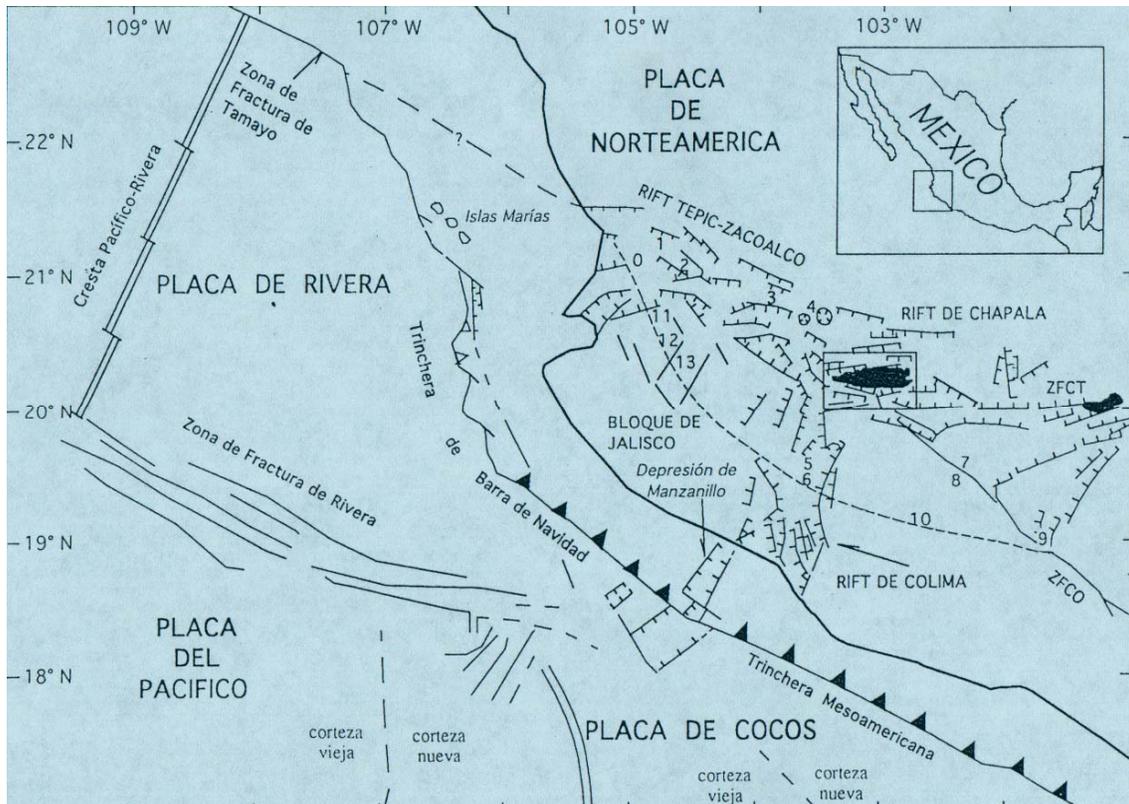


Fig. 2.1 Localización del área de estudio en relación al marco tectónico para el occidente del FVTM. Tomado de Rosas (1997).

Algunas de las primeras publicaciones relacionadas con la zona de estudio datan de principios del siglo XX (e.g. Waitz, 1906). Otros trabajos están particularmente relacionados con el contexto geológico regional (e.g. Allan et al. 1991; Delgado, 1995). Sin embargo, pocos trabajos geológicos se han ocupado de manera específica del rift de Chapala (e.g. Rosas-Elguera et al., 1989; Garduño et al., 1993;

Delgado et al., 1985, 1991; Johnson y Harrison, 1990).

Uno de los primeros trabajos geológico de esta estructura es el de Díaz y Mosser (1972) quienes sugieren que la depresión se formó por el colapso central de un anticlinal. Recientemente se ha demostrado que el rift de Chapala es la respuesta a una tectónica extensional (Rosas-Elguera et al., 1989; Garduño et al., 1993; Delgado et al., 1995).

Rosas et al. (1989) aportaron las primeras y únicas edades radiométricas para La Ciénega. En la figura 2.2 se ubican las distintas localidades, que para el rift de Chapala, cuenta con datos radiométricos publicados.

Según Delgado y Urrutia (1986) la estratificación del área abarca las edades desde el Mioceno Tardío al Reciente, donde cada grupo representa los diferentes eventos ocurridos en esta región.

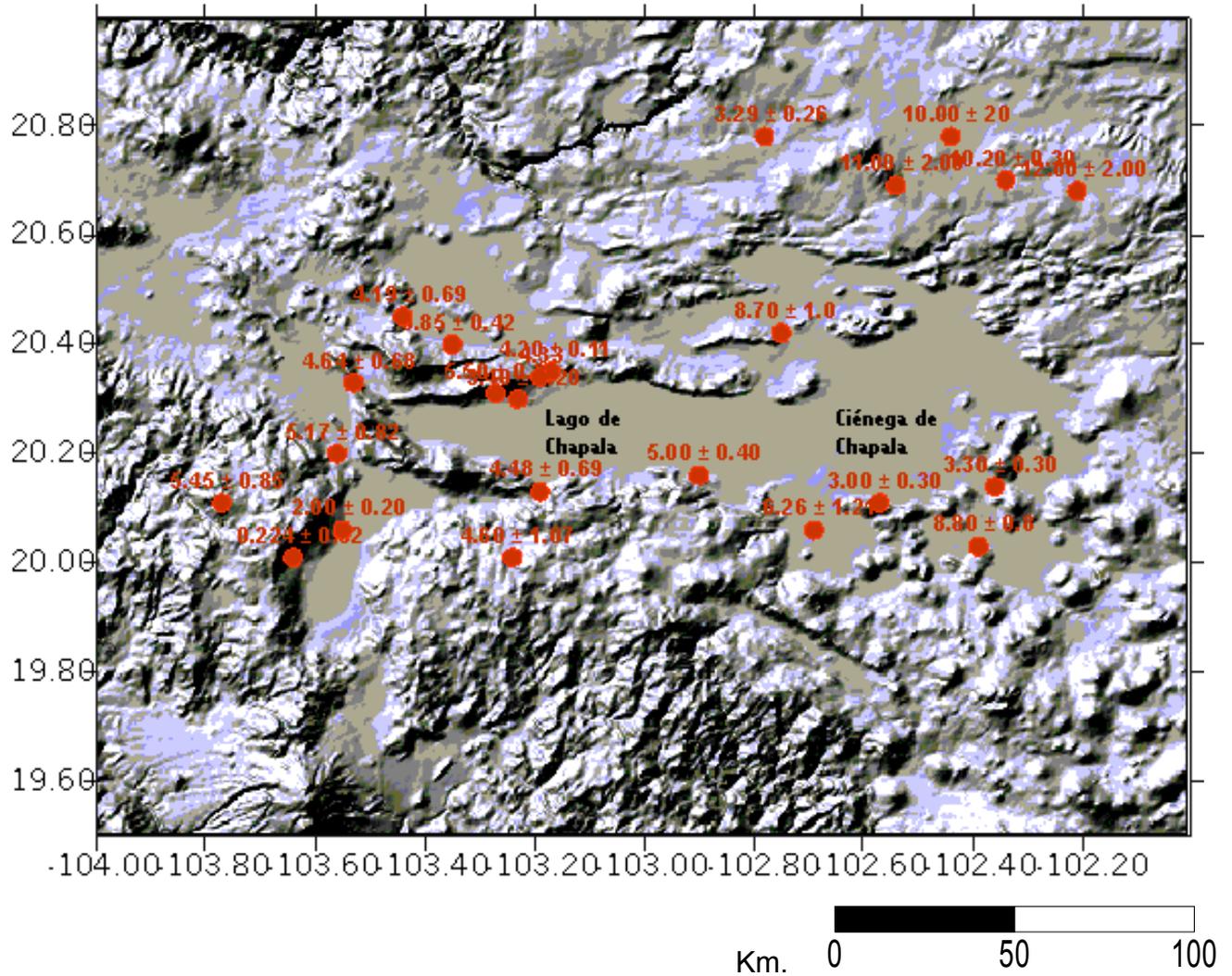


Fig. 2.2 Edades radiométricas reportadas para el rift de Chapala. Rosas, *et al.*, 1989.

Las rocas más antiguas que afloran son extrusivas de composición andesítica, las cuales se encuentran expuestas en las sierras que circundan al Lago de Chapala, están fracturadas, falladas, alteradas y mineralizadas. Estratigráficamente por encima de ellas se encuentran ignimbritas y tobas vítreas. Estas rocas están

cubiertas por derrames, brechas, tobas andesíticas y derrames basálticos que se observan fracturados y fallados.

Sobre la secuencia mencionada se encuentran descansando sedimentos lacustre de la formación Chapala, consistentes en limolitas, areniscas, conglomerados con intercalaciones de tobas, vidrio y pómez. El espesor de los sedimentos es según Reyes (1985, en Delgado y Urrutia 1986) de 400 a 600 m. Arroyo (1986, en Delgado *et al.*, 1994) estima que el espesor es de 800 m.

Delgado *et al.*, 1994. Determinaron que la secuencia Vulcano-sedimentaria tiene de 800 a 1000 m de espesor y define diez grupos estratigráficos en la región, con etapas de vulcanismo cuyas edades son: periodo Tizapán de 10.1~4.4 Ma; periodo Chapala de 6.7~4.2 Ma; periodo Travesaño ~4.2 Ma; periodo Grande de 2.7~1.4 Ma; periodo Santa Cruz 1.7~0.61 Ma y periodo Acatlán 1.1 menos de 0.65 Ma. Se observa un hiato en la actividad volcánica entre 4.2 y 2.7 Ma.

Las Vulcanitas Indiferenciadas del Mioceno Plioceno (VIMP) incluyen andesitas y basaltos de edad Mio-Plioceno (6.3 Ma – 4.5 Ma). El Grupo Tizapán está compuesto por andesitas y basaltos. Las rocas volcánicas de las VIMP y el Grupo Tizapán fueron extraídas a través de volcanes mono genéticos como escudos, conos cineríficos, conos de lava, domos de lava y derrames fisurales. Las VIMP están distribuidas principalmente al Sur y al Este del Lago de Chapala, la Sierra de Pajacuarán es parte de este Grupo. El grupo Tizapán aflora en las cercanías del poblado la Palma; Sahuayo de Morelos y en los Cerros La Caja y El Camaleón.

El grupo Chapala comprende rocas volcánicas silíceas y los depósitos de caída de flujo, asociados con edades entre 6.7 a 4.2 Ma, mezclados con sedimentos lacustre. La base del grupo cubre concordantemente a las rocas de Grupo Tizapán y de las VIMP. Estos eventos tuvieron lugar durante el Mioceno Tardío - Plioceno Temprano y fueron también contemporáneos con la actividad volcánica del Grupo Tizapán.

El volcanismo bimodal caracterizó esta época y es la razón por la cual se observa una sobre posición de ambas actividades volcánicas y la sedimentación. Rosas *et al.*, 1991 define para la porción Oriente de Chapala la 2a unidad, la cual está constituida por ignimbrita, tobas, basalto y brechas.

Las intercalaciones de rocas volcánicas y de depósitos lacustre, sugieren que la actividad volcánica fue contemporánea con la subsidencia de la cuenca, también indica que la Sierra de Pajacuarán está formada por aglomerados y basaltos que subyacen a andesitas Plio-Cuaternarias.

El Grupo Travesaño consiste de basaltos y andesitas con edades entre 4.0 a 4.3 Ma, con una composición similar a las rocas del Grupo Tizapán. Las rocas del Grupo Travesaño cubren e intrusionan a las unidades del Grupo Chapala. Algunas lavas del Grupo Travesaño muestran estructuras almohadilladas, las cuales fluyeron en condiciones subacuáticas dentro de las cuencas sedimentarias donde se encuentran los sedimentos del Grupo Chapala. En el área de estudio este Grupo aflora en los alrededores de los Poblados la Barca y Ocotlán.

El Grupo Grande, el Grupo Palo Verde y el Grupo Zacoalco, están formados por varias unidades de andesitas y basalto que constituyen volcanes, domos y conos de lava. Estas rocas cubren a los Grupos Tizapán, Chapala y Travesaño. La actividad volcánica de estos grupos abarcó de 2.7 a 1.4 Ma. (Delgado *et al.*, *op. cit.*)

Los Grupos La Zapotera, Santa Cruz y Sahuayo consisten de basaltos y andesitas extraídas a través de volcanes escudo, domos y conos de lava. La actividad volcánica del Grupo Santa Cruz abarca desde el Pleistoceno Temprano Pleistoceno Medio de 1.4 a 0.65 Ma. Los volcanes que dieron lugar a las rocas de esta unidad están asociados con el desarrollo de una caldera entre grandes fallas normales. El grupo La Zapotera es correlacionable con los Grupos Santa Cruz y Acatlán de la región de Chapala y con las rocas volcánicas de la cadena volcánica del sur de Guadalajara con edades entre 1.4 y 1.8 Ma. Esta unidad aflora en el Cerro El Pelón, el cual se encuentra entre los Poblados de Sahuayo y Jiquilpan y en el Cerro El Copito circundante al Poblado de La Palma.

La edad del Grupo Sahuayo está entre 1.3 y 1.9 Ma. El Grupo Acatlán consiste principalmente de lavas dacíticas y riolíticas expulsadas a partir de domos de lava y conos asociados con fisuras tectónicas. El volcanismo de este grupo fue contemporáneo al Grupo Santa Cruz de 1.1 Ma a menos de 0.65 Ma. (Delgado *et al.*, *op. cit.*)

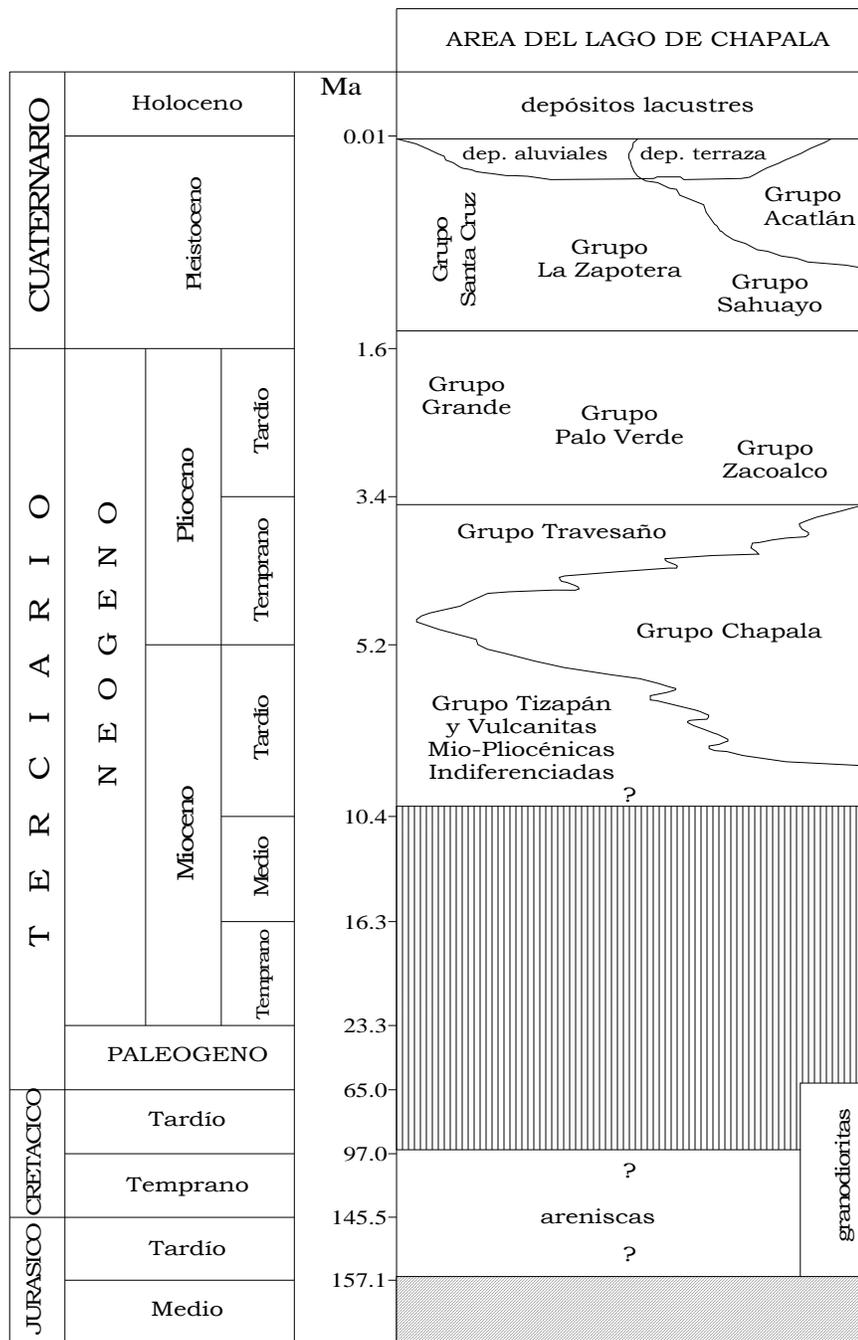


Fig. 2.3 Columna Geológica de la región de Chapala.

En la Fig. 2.3 se muestra la Columna Geológica de la región de Chapala y en la Fig. 2.4 se presenta el Mapa Geológico, (Delgado *et al.*, op. cit.).

Localmente, la geología del área de estudio está compuesta por rocas volcánicas del Mioceno Tardío, depósitos lacustres, material volcánico y sedimentos del Reciente. Las Vulcanitas Indiferenciadas del Mioceno Plioceno (VIMP) dieron origen a la Sierra de Pajacuarán. Esta unidad tiene una composición andesítica-basáltica, se encuentra fracturada, fallada y su coloración es gris oscuro. La actividad del Reciente dio origen a la formación de los cerros El Copito y El Pelón, los cuales corresponden a volcanes de escudo, domos y conos de lava, cuya composición es de basalto y andesita (Delgado *et al.*, op. cit.)

Sobre las VIMP, se encuentra distribuido en la Ciénega de Chapala el Grupo del mismo nombre, que está compuesto principalmente por arena, arcilla e intercalaciones areno-arcillosas y arcillo-arenosas, de origen lacustre que forman cuerpos lenticulares con una gran extensión en el área de estudio.

Con una gran variación en su grado de compactación y en sus espesores, que varían de metros a decenas de metros. Estos se interdigitan entre ellos y con el material volcánico hacia las Sierras circundantes. El Grupo Chapala está cubierto por depósitos lacustres Recientes y suelo residual.

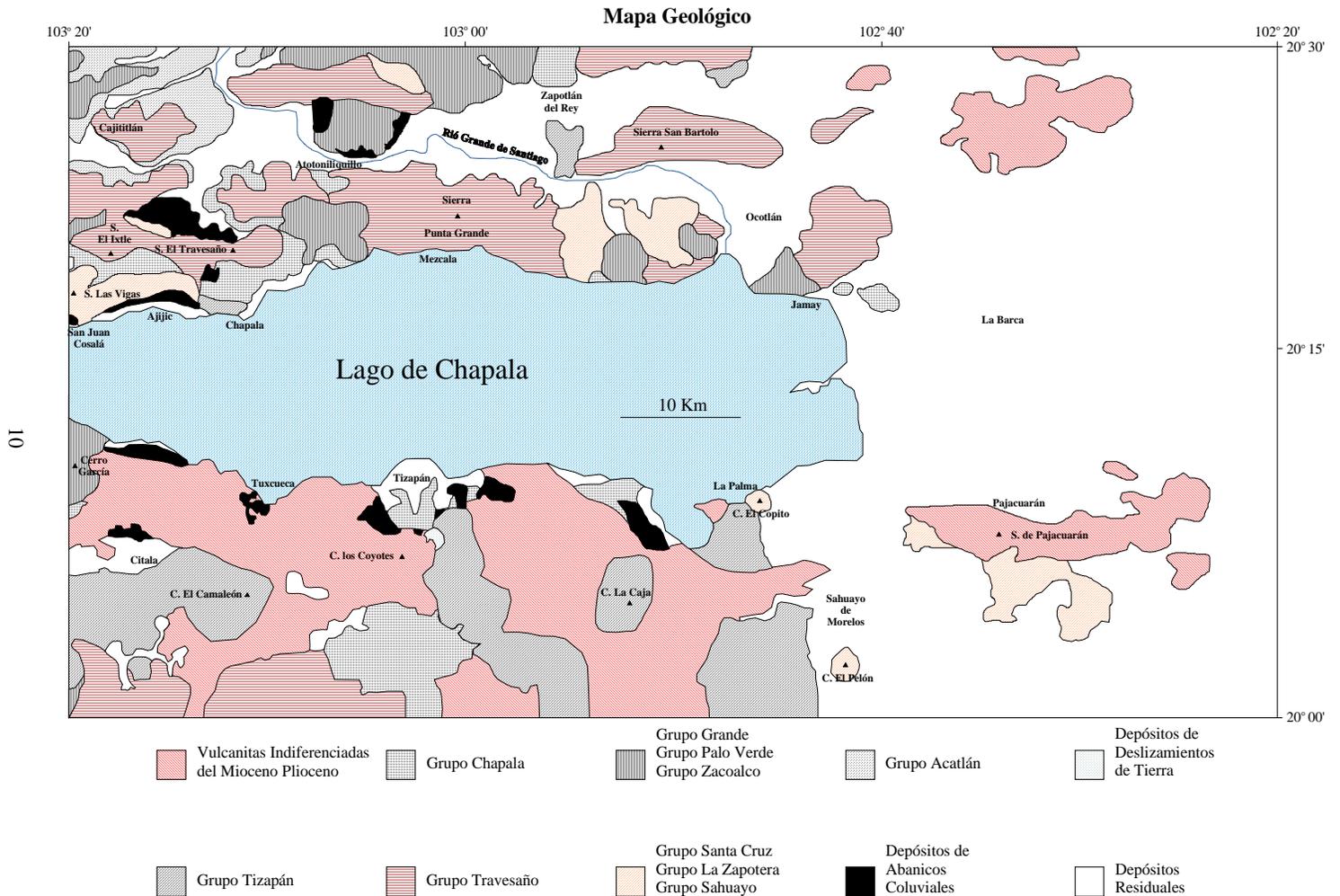


Fig. 2.4 Plano geológico regional para la Ciénega de Chapala. (Modificado de Delgado, 1994 y Garduño *et al.*, 1993).

Desde el punto de vista de la geología estructural, Delgado *et al.*, 1994 reconoce seis sistemas de fallas en la región, el sistema Ajjic; Cósala; La Lima; Citala; Cebollas y La Angostura. Para esta porción del graben de Chapala, el sistema de fallas La Angostura presenta lineamientos estructurales E-O que corresponden a fallas normales. En el caso particular de la Ciénega se encuentra delimitada en su parte Sur por la falla de Pajacuarán. Dicha falla tiene un plano inclinado de 70° N,

con un escarpe en su ladera que puede alcanzar hasta los 400 m en su desnivel, su longitud es de 18 Km.

CAPITULO 3. EL SISTEMA ACUÍFERO

Tomando en consideración características de porosidad, permeabilidad, litología y posición estratigráfica de cada una de las unidades geológicas reconocidas en la región fue definido el sistema acuífero de la Ciénega de Chapala a escala regional como puede verse de manera esquemática en la Fig. 3.1

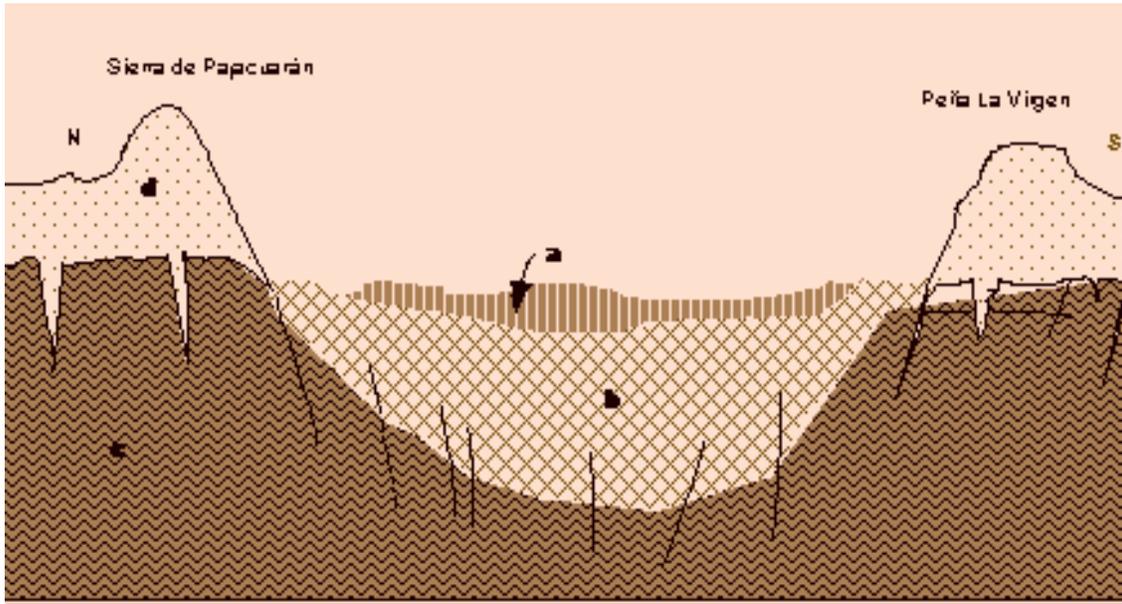


Fig. 3.1 Sección geológica esquemática en la ciénega de Chapala, en la cual se aprecia la relación estratigráfica de las unidades de rocas que conforman el sistema acuífero: a) sedimentos superficiales areno-arcillosos; b) sedimentos lacustre pliocénicos; c) rocas volcánicas miocénicas; d) lavas andesíticas cuaternarias. (Garduño *et. al.*, 1993)

En la parte superficial (unidad a) se presentan los depósitos aluviales y lacustre recientes, de características areno-arcillosas, de alta porosidad, baja permeabilidad

y heterogeneidad en su constitución, cuyo comportamiento hidráulico es el de un acuitardo que funciona como una unidad semiconfinante en gran parte de la Ciénega. Su espesor promedio es de 3m.

Subyaciendo a esta unidad, se encuentran los antiguos depósitos lacustre pliocénicos (unidad b) constituidos por intercalaciones de areniscas, limolitas, diatomitas y depósitos volcánicos piroclásticos. Su espesor llega a ser en la Ciénega de 300 a 450 m hacia la zona de Los Negritos y de Ixtlán de acuerdo a cortes litológicos reportado por Rosas, (1997), disminuyendo considerablemente hacia las prominencias volcánicas que delimitan la región.

Las unidades arriba descritas representan un sistema semiconfinado a libre en las márgenes de la cuenca y muestran comunicación hidráulica con la secuencia volcánica fracturada que la infrayace, como lo evidencia el termalismo de pozos ubicados en el paquete sedimentario (pozo Ixtlán).

Bajo el paquete granular se encuentra la vulcanitas indiferenciadas del mioceno plioceno, estas rocas, están muy fracturadas por lo que a profundidad pueden ser consideradas como conducto preferencial del flujo térmico regional manifiesto en el área de estudio (unidad c); Sin embargo, cuando afloran en superficie (N de Sahuayo) las mismas asumen el papel de unidades permeables de recarga siendo excelentes acuíferos cuando se encuentran sepultadas en partes bajas (Silva, 2002).

Por otra parte, las rocas volcánicas del Cuaternario y Plioceno (unidad d) que

conforman las principales prominencias de la región (sierra de Pajacuarán, Sahuayo, Jiquilpan) son consideradas como zonas de recarga de acuíferos por su alto grado de fracturamiento (2.6 Km. /km^2) y de igual manera, que la unidad anterior, en las porciones bajas de la Ciénega se comportan como buenos acuíferos.

Los principales factores que influyen en el proceso de recarga del acuífero de la Ciénega son:

- El aporte de la infiltración de la precipitación a través de las consideradas zonas preferenciales de recarga, siendo en este caso, todo el relieve montañoso que circunda y delimita la Ciénega, destacando la sierra de Pajacuarán en la porción centro y las altitudes volcánicas localizadas al oeste y sur como son los cerros San Francisco, Grande y Pitahayita.

- La circulación del agua es relativamente rápida ya que se da a través de un medio fracturado de alta conductividad hidráulica ($K= 1.2 \text{ E-4}$) para fluir después por formaciones de porosidad variable.

- La comunicación hidráulica entre la superficie y el acuífero, ya que las discontinuidades laterales de los paquetes arcillosos permiten el paso del flujo procedente de la superficie del suelo. La comunicación hidráulica entre el Lago de Chapala y el acuífero sobre todo hacia la porción norte.

La descarga se lleva a cabo por medio de los diferentes pozos de extracción de agua, profundos y someros, norias y manantiales la cual es del orden anual de 22.676 Mm^3 a través de aproximadamente 425 obras hidráulicas predominando pozos con profundidades menores a 100 m (Delgado, 1991).

El funcionamiento hidrodinámico prevaeciente para la zona de trabajo se esquematiza en la Fig. 3.2, en donde destaca la existencia de un gradiente piezométrico del Lago hacia el acuífero. Los flujos relacionados con procesos hidrotermales también se presentan asociados al alto grado de fracturamiento del contenedor volcánico (Silva, 2002).

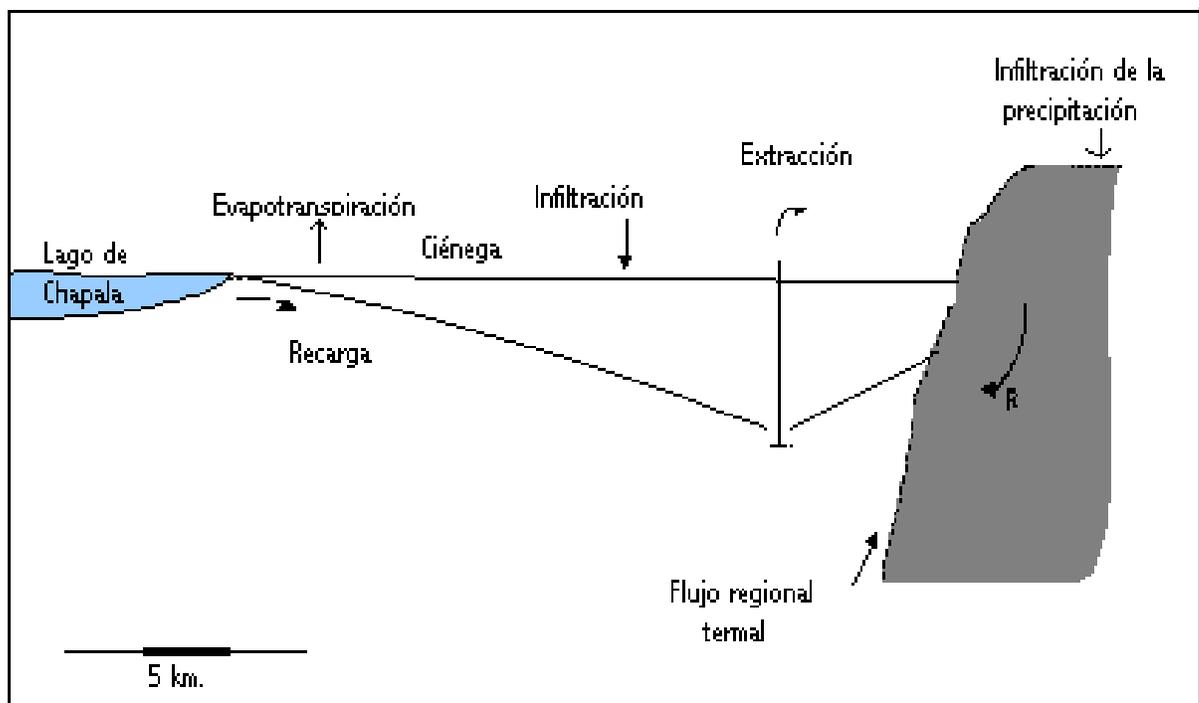


Fig. 3.2 Esquema del Mecanismo hidrodinámico del acuífero de la ciénega de Chapala (Silva, 2002).

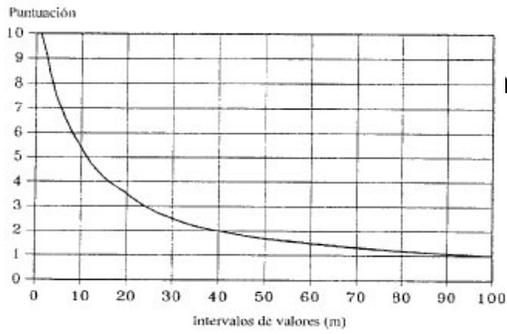
CAPITULO 4. METODOLOGÍA

Se aplicó el método SINTACS₂ como esquema de diagnóstico del grado de vulnerabilidad, con el objetivo principal de obtener la zonificación del riesgo al que el acuífero puede estar sujeto por actividades antropogénicas. (Civita *et al.*, 1997)

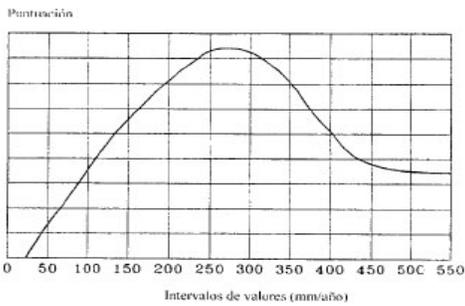
Consistió en un análisis por cuadrantes de 0.25 km² basado en siete factores:

- S. Profundidad del nivel estático.
- I. Infiltración efectiva.
- N. Capacidad de atenuación de la zona no saturada.
- T. Tipo de suelo.
- A. Características hidrogeológicas del acuífero.
- C. Conductividad hidráulica.
- S₂. Topografía.

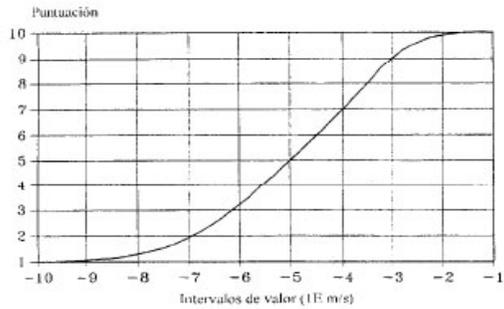
La determinación del índice SINTAC₂ involucra la multiplicación de cada uno de los factores por la puntuación del rango (Fig. 4.1) y posteriormente, estos son multiplicado por su peso respectivo (P); que representa de manera numérica el grado de importancia e influencia que cada uno de ellos tiene en el ámbito de manejo del medio ambiente, siendo de 5, el de mayor índice de relevancia y 1 como el de menor importancia.



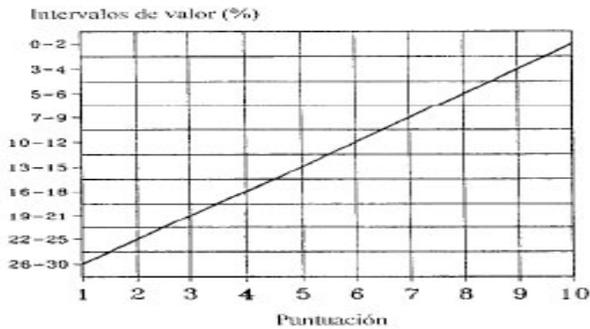
a) Profundidad del nivel freático



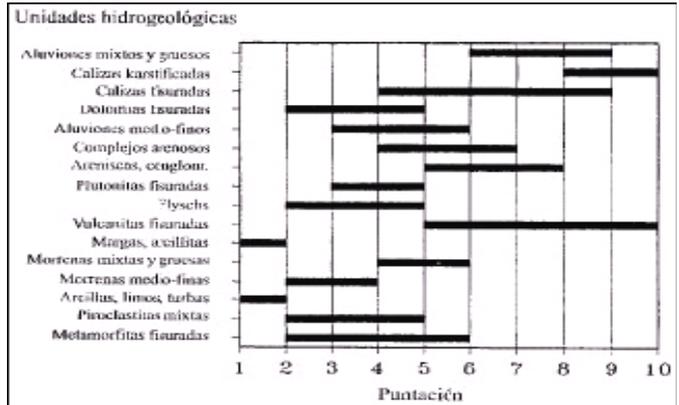
b) Infiltración



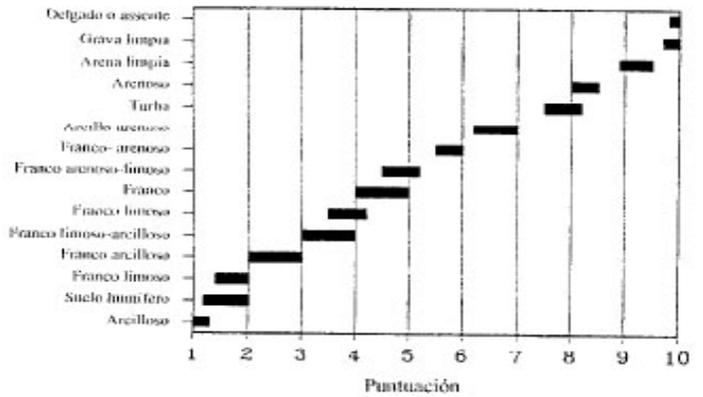
c) Conductividad Hidráulica



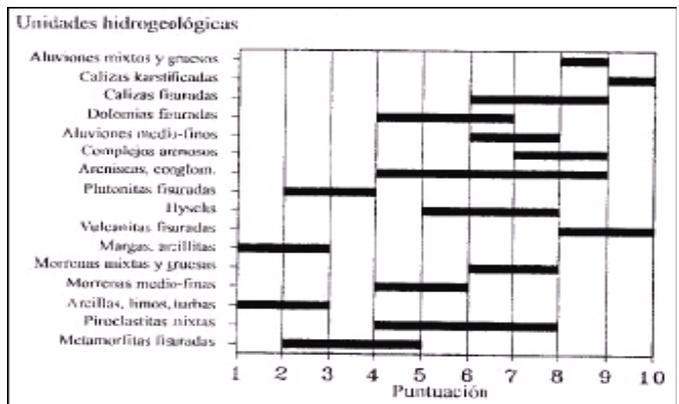
d) Pendiente



e) Capacidad de atenuación de la zona no saturada



f) Efecto de mitigación de los suelos



g) Características hidrogeológicas del acuífero

Fig. 4.1 Esquematización grafica de de las puntuaciones y pesos de los factores del SINTACS₂ (Civita, 1994)

En este método, el valor de peso, estará en función del diagnostico preliminar de la descripción de la situación hidrogeológica (Fig. 4.2). Los esquemas representativos fueron: Impacto Normal (IN), Impacto Relevante (IR), Drenaje (D), Carstico (C) y Fisurado (F) y su impacto en la región (Cuadro 4.1)

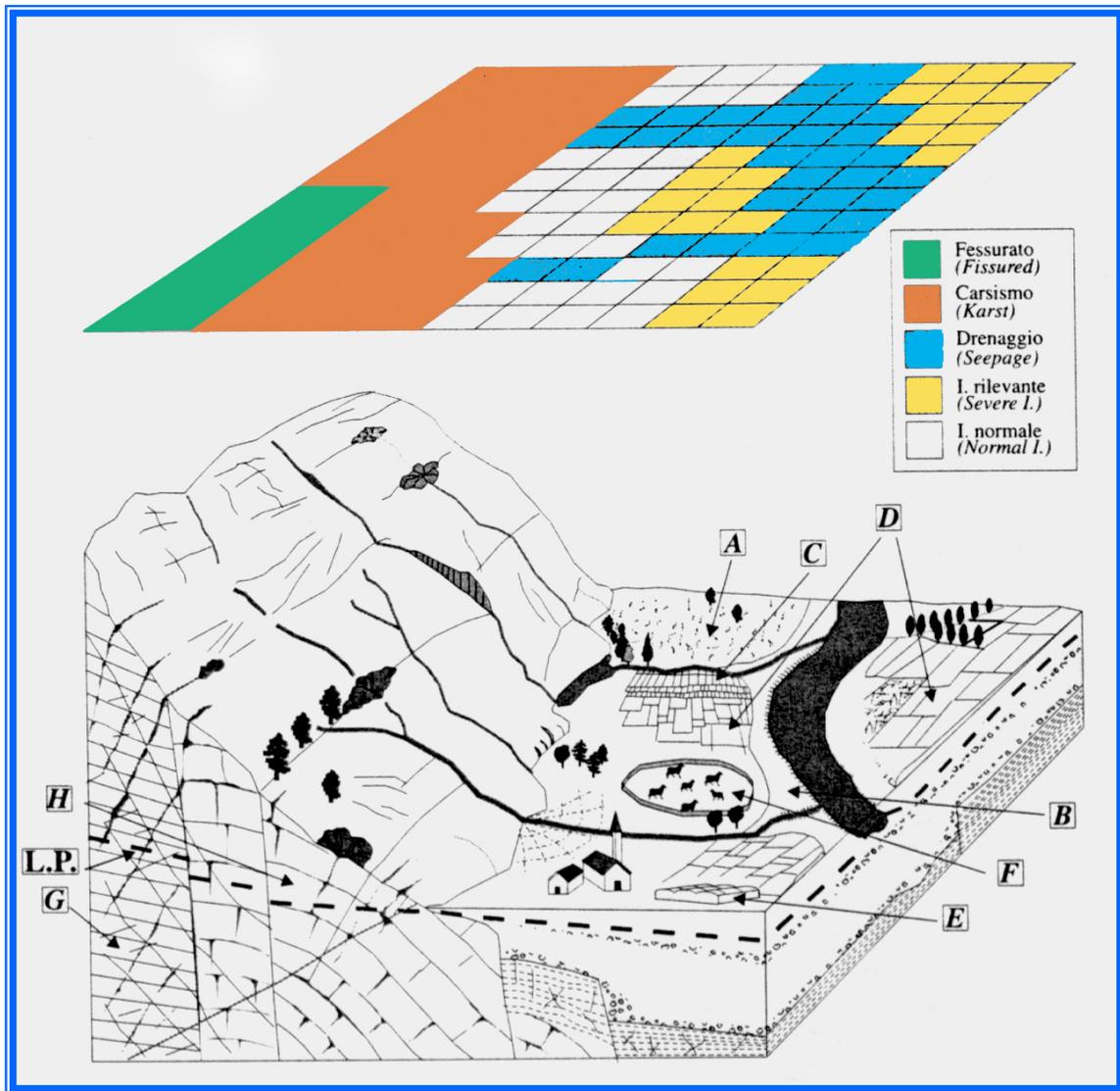


Fig. 4.2 Esbozo de una zona caracterizada por varias situaciones hidrogeológicas y de impacto afín a las series de los pesos elegidas para la valoración de la vulnerabilidad del agua subterránea; (A= Zona no cultivada; B = zona de inundaciones; C = Zona de inundación de riego; D = Zona de cultivo tratado químicamente; E =Zona para actividades Hortícola; F = Zona para crianza; G = acuífero de roca fracturada; H = acuífero de roca carbonatada.

Cuadro 4.1 Puntuaciones de las curvas de los parámetros para el método SINTACS₂

Parámetro	Impacto Normal	Impacto Relevante	Drenaje	Cárstico	Fisurado
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	3	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	3	2	2	5	4
Σ	26	26	26	26	26

El Índice Vulnerabilidad acuífera SINTACS₂, será la suma de los factores considerados:

$$I_{\text{SINTACS}_2} = \sum_{j=1}^7 P_j W_j$$

Donde:

SINTACS₂: Índice de Vulnerabilidad del método SINTACS₂

P (1,7) = Puntaje de cada uno de los parámetros

W (1, N) = Pesos que está en función de la situación hidrogeológica.

Los valores adimensionales mínimos de vulnerabilidad son en todos los casos de 26 y los máximos de 260.

El proceso de la información implicó en cada caso, algebra de mapas, para obtener como producto final un mapa paramétrico. Se implementó Arc Gis de ESRI® para la discretización de áreas, con los siguientes módulos y extensiones Spatial Analyst, Geostatistical y 3D Analyst. Se utilizaron conjuntos de datos vectoriales procesados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

Para la obtención del mapa de riesgo al acuífero se realizó un inventario de fuentes potenciales de contaminación ya que existe una gran cantidad de actividades humanas que generan cierta carga contaminante, aunque solo un pequeño número de estas pueden considerarse como tal.

El inventario es tan importante como la propia vulnerabilidad (Rodríguez *et al.*, 1999) ya que de la combinación de ambas resulta el mapa de riesgo de acuífero (Ramos, 2000; Hirata y Reboucas, 1999).

Se considera como fuente contaminante al acuífero, a un sitio que esta generando o puede generar lixiviados o solutos, que al incorporarse a un sistema acuífero, altera la calidad natural del agua subterránea. Mientras que la calidad del agua subterránea esta definida por los valores de fondo de los elementos que de manera natural se incorporan al flujo subterráneo, estas concentraciones no necesariamente tienen que estar por arriba de la normatividad vigente para agua potable (Ramos, 2002).

Dependiendo de los mecanismos de control primario de cada actividad, los tipos de fuentes contaminantes (Cuadro 4.2), se caracterizaron según su origen, geometría, actividad o temporalidad (OTA, 1984; Fetter, 1999).

Cuadro 4.2 Fuentes potenciales de contaminación (OTA, 1984; Fetter, 1999)

Origen	Natural	Antropogénico	
Geometría	Puntual	Lineal	Difusa
Actividad	Activa	Potencial	Inactiva
Temporalidad	Pulso	Intermitente	Permanente

La contaminación es antropogénica si esta asociado a alguna actividad humana, y es de origen natural cuando esto no ocurre, como en el caso de la lixiviación de rocas y suelos (Fetter, 1999; Armienta *et al.*, 1996; Robles y Armienta, 2000). De acuerdo con su geometría, se considera como puntual cuando dependiendo de la escala que se trabaje, esta puede ser representada por un punto en el espacio o puede ser lineal en el caso de un río.

Por otra parte una fuente es difusa si se dispersa en la zona de estudio o si la generación de lixiviados ocurren en mas de dos puntos. En caso de existir evidencias de generación de lixiviados será activa, mientras que si existen o pueden existir elementos suficientes para que se generen en un futuro inmediato o a largo plazo lixivaciones será potencial.

Cuando la generación de lixiviados es continua en el tiempo, se definirá como permanente, si los lixiviados solo están presentes cuando las condiciones de humedad en el sitio lo permiten (lluvias e incremento de humedad) será intermitente y si los lixiviados solo ocurren una ocasión, su carácter temporal será de pulso, como en el caso de algunos accidentes químicos.

CAPITULO 5. RESULTADOS

5.1 Ambiente hidrogeológico.

Se destacan principalmente dos: Impacto relevante (IR) e Impacto normal (N). La figura 5.1 muestra su distribución espacial. El primero de ellos ocupa la mayor superficie de la ciénega de Chapala y se refiere a las situaciones de impactos importantes como lo son las fuentes difusas de contaminación potencial, áreas sujetas a uso abundante de productos fitosanitarios, efluentes orgánicos, depósitos de sedimentación y dispersión de aguas residuales, oleoductos, vertederos incontrolados, descargas de alcantarillas, áreas industriales activas o abandonadas, cementerios, gasolineras, establos, gallineros, basureros y otros.

Un segundo nivel lo ocupa el área de Impacto Normal (IN). Se trata de áreas estériles o con cultivos espontáneos que no utilizan fitosanitarios. Reúne generalmente a todas esas situaciones, conectadas con las áreas al gradiente topográfico escaso (llano, pie de monte, mesetas, etc.).

Destaca en la ciénega el área de Los Negritos como zona estéril, delimitada por la sierra de Pajacuarán. Para este caso se exalta al máximo el peso relativo de la profundidad del nivel freático y de la zona insaturada estrictamente ligada a la infiltración efectiva del sistema.

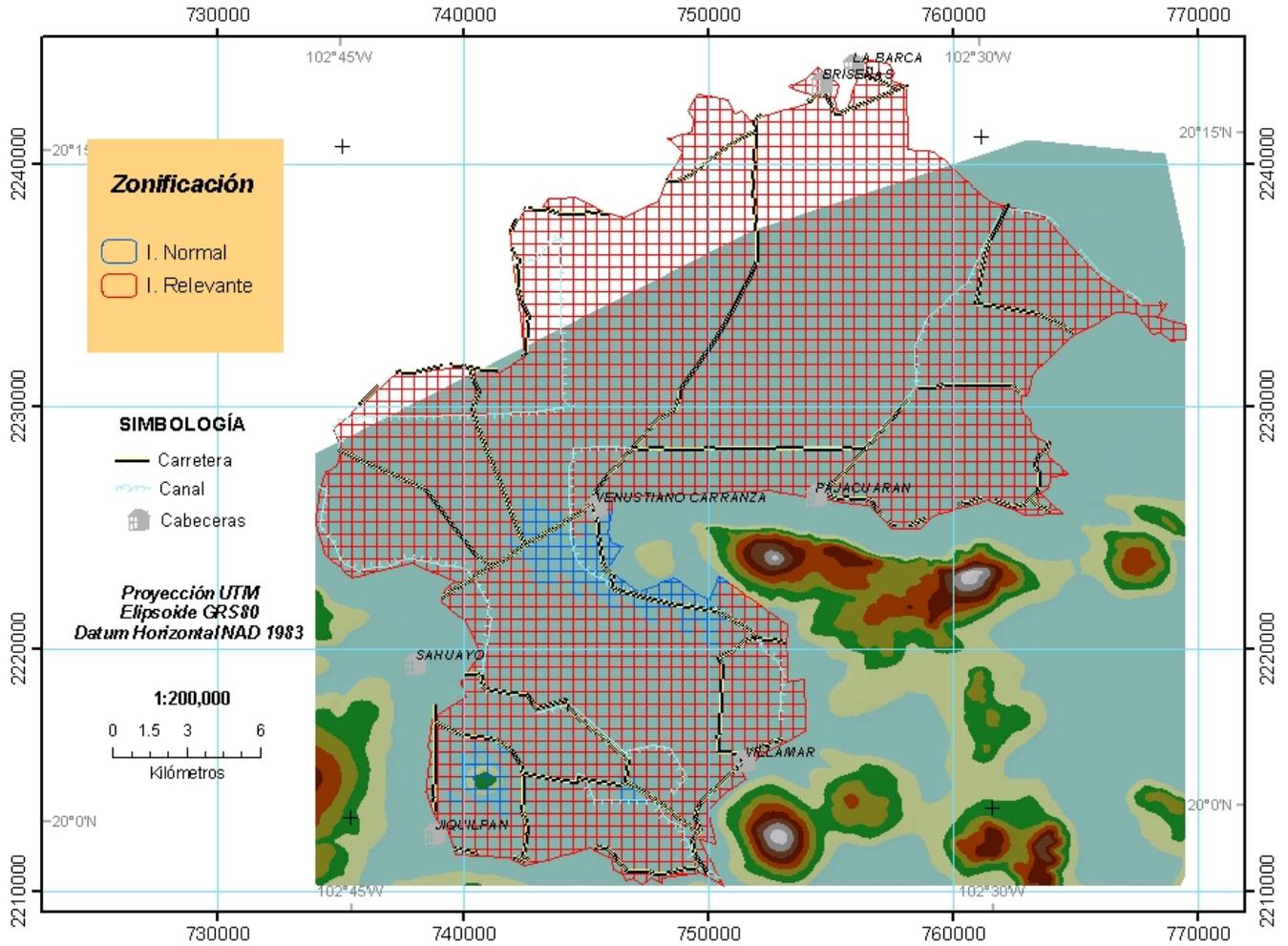


Fig. 5.1 Ambientes hidrogeológicos identificados para la ciénega de Chapala.

5.2 Vulnerabilidad del acuífero

El riesgo de contaminación de un acuífero se puede definir como la probabilidad de que el agua subterránea se contamine con algunas sustancias en concentraciones por encima de los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud para la calidad del agua de consumo humano (Foster e Hirata, 1991).

Para la zona de estudio se aplicó el método SINTACS (Civita; De Maio, 1997)

A continuación se describen los resultados obtenidos para cada factor:

- **S.** Profundidad del nivel estático (S). Un monitoreo directo de este parámetro, en pozos profundos, se llevó a cabo tanto en época de estiaje como lluviosa, en los meses de julio, septiembre y noviembre de 2006. Se utilizó una sonda eléctrica de 150 m con la cual se tomó la lectura directa del nivel estático (Cuadro 5.2.1). En cada pozo se tomaron tres lecturas de las cuales se obtuvo un promedio, las lecturas oscilaron entre 2 y 9 m de profundidad, los menores valores (2 m) están distribuidos en una superficie de 878 ha, mientras que los valores mayores se distribuyen en 2, 690 ha equivalentes al 4.93%.

Por otra parte, el nivel estático que más predomina es el de 4 m, distribuidos en 12, 164 ha ocupando un 22.35%, seguido de la profundidad de 8m, encontrándose en 11, 509 ha y un 21.11%.

Cuadro 5.2.1 Piezometría julio, septiembre y noviembre de 2006.

No.	Nombre	X	Y	M.S.N.M	Lectura piezométrica (Julio)	Lectura piezométrica (Septiembre)	Lectura piezométrica (Noviembre)	Promedio
1	Juan Barajas	750950	2232700	1523,5	1518	1518,15	1518,03	5,44
2	Cumuatillo	749400	2230400	1523,4	1518,4	1518,67	1518,7	4,81
3	Campo de futbol San Pedro	746150	2226870	1521,8	1518,7	1518,9	1518,61	3,06
4	Victor Arovalo	752600	2235400	1523,2	1518,35	1519,87	1519,77	3,87
5	Jose Zepeda	752400	2234600	1523	1516,8	1518,5	1519,5	4,73
6	Jesus Cervera	753950	2235000	1523	1515,9	1517,95	1518,81	5,45
7	Enrique Santos	756500	2235300	1523,8	1517,4	1519,3	1518,9	5,27
8	Rayas Blancos	756050	2238050	1523,1	1519,85	1519,9	1519,9	3,22
9	Andres Bravo	754450	2239800	1523	1519,6	1519,8	1519,8	3,27
10	Daniel Gomez	753850	2239850	1522,7	1518,49	1519,8	1519,82	3,33
11	Luis Bravo	752750	2237850	1522,6	1519,55	1520,32	1520,35	2,53
12	Hector Ascencio	752950	2241200	1524	1520	1520,4	1520,8	3,60
13	Sergio Avalos	749900	2237350	1523,9	1520,6	1521,27	1521,3	2,84
14	Luis Perez	749650	2238350	1524	1520	1520,69	1520,9	3,47
15	Rafael Morales	749000	2235850	1523,6	1519,85	1520,5	1520,6	3,28
16	Luis Rodriguez	746850	2237400	1524,3	1520,3	1520,8	1520,95	3,62
17	Jose Avalos	744650	2237600	1523,2	1519,9	1520,2	1520,25	3,08
18	Gustavo Avalos	743650	2234600	1523	1516	1517,2	1518,5	5,77
19	La Magdalena II	744500	2232500	1522,4	1514,8	1515,92	1516,16	6,77
20	La Magdalena III	745100	2232050	1522,3	1515	1516,43	1516,55	6,31
21	La Magdalena IV	745150	2230700	1522,4	1514,17	1516,03	1516,1	6,97
22	Francisco Tres Motores	745400	2229750	1522,4	1517,74	1518,4	1518	4,35
23	Octaviano Cortez	746650	2232150	1522,5	1516,2	1517,6	1517,61	5,36
24	Roberto Zepeda	748150	2231300	1523,1	1517,3	1517,39	1516,18	6,14
25	Lorenzo Lopez II	747350	2230850	1522,2	1514,1	1516,7	1516,4	6,47
26	Pedro Duran	751250	2233300	1523,3	1518,2	1518,5	1518,8	4,80
27	Jose Zepeda II	751550	2233900	1523,4	1519,2	1519,83	1519,92	3,75
28	Hinojoza	754950	2234750	1523,4	1517,6	1517,8	1517,8	5,67
29	Juvenal Galvez	757100	2235200	1522,7	1518,65	1520,1	1520,18	3,06
30	Jesus Morales	757350	2233600	1523	1518,8	1520,1	1520,15	3,32
31	Ejido Periban	760850	2234400	1522,3	1521,2	1520,8	1520,82	1,36
32	Ballesteros	762700	2237700	1523,9	1520,1	1520,61	1521	3,33
33	La Galera	762750	2233900	1522,6	1521,5	1521,6	1521,5	1,07
34	Ricardo Zapien	762850	2232900	1522,8	1521,05	1521,3	1521,4	1,55
35	La Luz	763350	2231150	1523,6	1521,6	1520,35	1522,38	2,16
36	Rancho Los Morales	761800	2230500	1523,5	1519,8	1521,38	1521,1	2,74
37	Ramon Rios	763150	2229300	1524	1520,8	1520,9	1520,9	3,13
38	Ejido La Higuera	763900	2228400	1524	1520,8	1521	1521,1	3,03
39	Genaro Morales	762450	2228550	1524	1520,85	1521,26	1521,15	2,91
40	Jose Padilla	760850	2225950	1525	1521,7	1522,46	1522,53	2,77
41	Roberto Garibay	754500	2227000	1521,3	1519,2	1518,9	1518,05	2,58
42	El Mezquite	756570	2231050	1522,3	1520,2	1518,95	1518,3	3,15
43	Los Gallineros	755600	2230450	1523,1	1520,5	1521,14	1521,12	2,18
44	Mario Valdez	744250	2227150	1522,5	1519,5	1519,67	1519,45	2,96
45	La Yerbabuena	741100	2223100	1526,8	1520,05	1520,1	1520,1	6,72
46	Crucero La Palma	741750	2223400	1524,4	1515,6	1516,5	1516,35	8,25
47	Maldonado	741050	2224200	1524	1515,7	1516,9	1516,5	7,63
48	Casa Blanca	739200	2225650	1524,2	1515,5	1516,94	1516,95	7,74
49	Trino Villaseñor	742500	2223800	1524,2	1516	1516,94	1516,99	7,56
50	Francisco Tejeda	744250	2227150	1523,5	1519,3	1519,85	1519,94	3,80
51	Adan Macias	742600	2229100	1522,4	1518,6	1519,2	1518,8	3,53
52	Emilio Gudíño	740600	2231600	1522,6	1518,6	1518,5	1518,75	3,98
53	Bombas de Gvar.	735650	2229200	1523	1515,9	1516,7	1517,67	6,24
54	Roberto Buenrostro	740700	2230500	1523,7	1517,1	1517,93	1517,31	6,25
55	Jesus Ayala	745450	2224500	1522,3	1519,3	1519,35	1519,4	2,95
56	Palo Blanco	739100	2221450	1524,2	1517,45	1520	1518,6	5,52
57	Luis Maciel	739900	2222100	1528,2	1517,55	1517,42	1517,9	10,58
58	Enrique Arceo	743900	2222800	1526,8	1519,8	1519,5	1519,8	7,10
59	Crescencio Castillo	746100	2225200	1523,3	1520	1520,48	1520,8	2,87
60	Gilberto Hernandez	746100	2225200	1526,3	1520,9	1521	1521,1	5,30
61	Marco Antonio Ruiz	750900	2215200	1524	1520	1520,52	1520,39	3,70
62	Gonzalo Castillo	752200	2216300	1522,8	1518,8	1519,78	1519,7	3,37
63	Casa del Trigo	748600	2211350	1534,3	1532,8	1533	1533,2	1,30
64	Tiburcio Moreno	749350	2211700	1536,3	1534,8	1534,9	1534,7	1,50
65	Ing. Bautista	748100	2213600	1527,4	1520,05	1523,6	1524,67	4,63
66	Cotijaran	746600	2214400	1524,9	1519,9	1518,5	1518,9	5,80
67	Avenida Constitucion	739450	2212500	1541,8	1535,25	1536,8	1536,9	5,48
68	Lobera 1	742250	2214650	1523,4	1518,46	1518,38	1518,3	5,02
69	Lobera 2	742200	2214500	1523,8	1521,05	1520,9	1520,92	2,84
70	Cumuatillo. Agua Potable	749250	2229250	1525,2	1523,7	1522,7	1522,7	2,17
71	Pueblo Viejo. Agua Potable	750900	2226500	1522	1519	1519	1519	3,00
72	Totolan I	742700	2212450	1529,2	1515,2	1515,2	1515,2	14,00
73	Totolan II	743150	2212700	1528,8	1516,8	1516,8	1516,8	12,00
74	Colegio Colón	739950	2211600	1541,6	1530,6	1537,5	1536,83	6,62
76	Juan Manuel Figueroa	738850	2215200	1537,2	1521,2	1521,2	1521,2	16,00
77	El Salitre	747000	2210750	1528,2	1518,2	1516,2	1516,2	11,33

En relación al peso considerado, el otorgado fue de 5 para toda la ciénega, en virtud de que es el peso otorgado para ambientes hidrológicos de impacto normal y relevante.

Los valores menores (30 puntos) se localizan hacia el Oeste de la región de estudio y áreas aledañas al corredor de Jiquilpan, Sahuayo y La Palma, que coinciden con las porciones más bajas de la Ciénega. Pasando por los valores inmediatos superiores conforme un recorrido con dirección Oeste-Este hasta encontrar los mayores valores (45-50 puntos) en la zona más altas de la ciénega de Chapala (Figura 5.2.1).

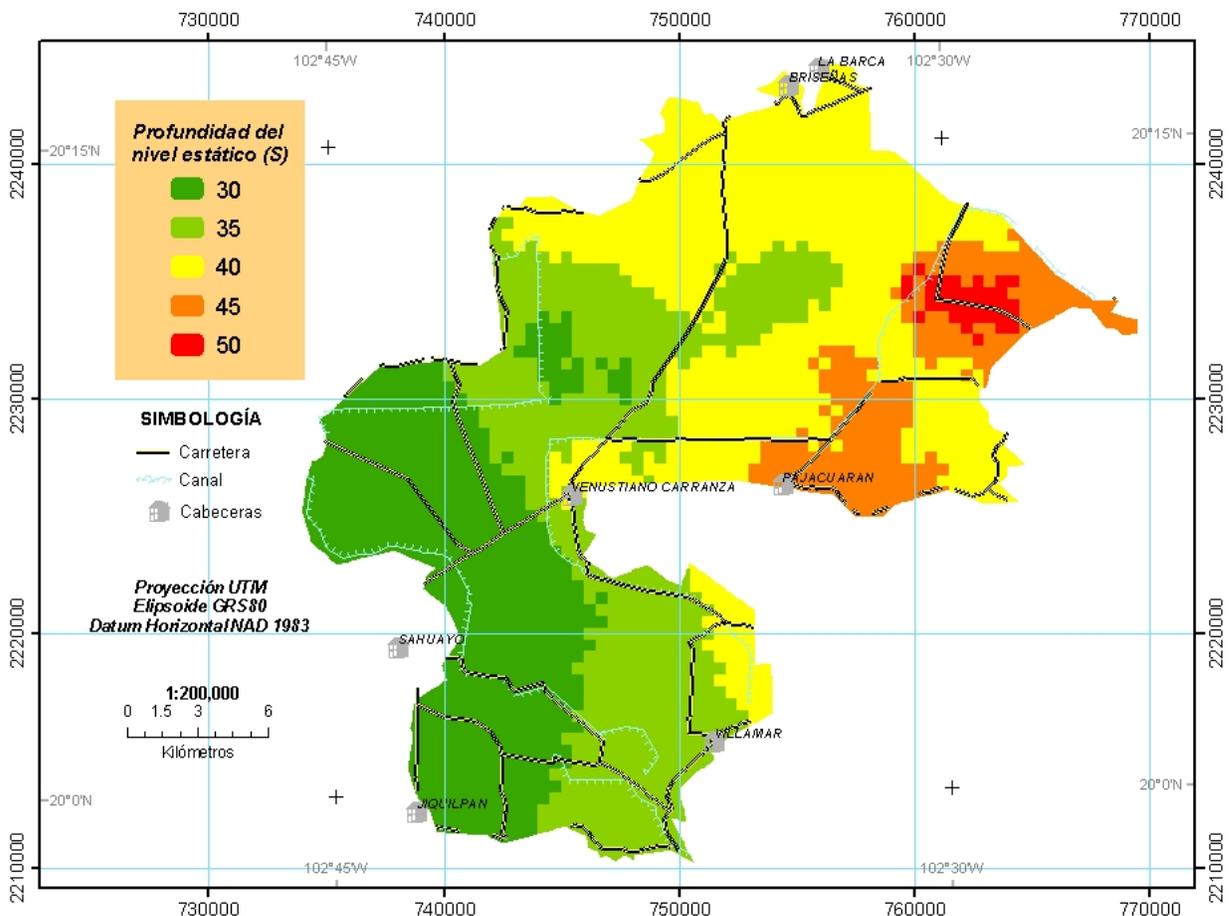


Fig. 5.2.1 Índice SINTACS2 para el parámetro S.

- **I. Infiltración** El concepto de infiltración efectiva se refiere al proceso por el cual el agua penetra al suelo y queda retenida por él o desciende hasta la zona saturada incrementando el volumen de agua ya existente. Este factor involucra aspectos relacionados con la temperatura y la precipitación y estará en función de la condición geológica y la textura del suelo.

En su cálculo, se utilizó la siguiente ecuación

$$I = Q \chi$$

Donde

I= Infiltración efectiva

Q= Precipitación efectiva

χ = Índice de infiltración

Para el cálculo de la precipitación efectiva (Q), se utilizó la siguiente ecuación:

$$Q = P - E_r \text{ donde}$$

Q = Precipitación efectiva (mm/año)
P = Precipitación m³/año
E_r = Evapotranspiración real en m³/año

La precipitación promedio (P) para la ciénega fue de 778 mm/año y una temperatura media anual de 19° C. La obtención de los valores anteriores consideró datos de los últimos veinte años de diez estaciones meteorológicas ubicadas en la ciénega.

En el cálculo de la evapotranspiración, se tomó en cuenta el concepto de evapotranspiración real (Er), definido como la cantidad de agua utilizada por el complejo planta-suelo en las condiciones meteorológicas edáficas y biológicas existentes, aplicando para su cálculo el método de Turc.

$$Er = \frac{P}{\sqrt{0.9 + P^2/L^2}}$$

Donde Er = Evapotranspiración real
 P = Precipitación anual en mm
 $L = 300 + 25T + 0.05T^2$
 T = Temperatura media anual

Obteniendo un valor de: Er = 570.08 mm/año

Con los cálculos obtenidos para cada parámetro, se procedió a determinar la precipitación efectiva, obteniendo lo siguiente:

$$Q = P - Er = 778 - 570.08$$

$$Q = 207.2 \text{ mm/año}$$

Los rangos obtenidos del factor χ , están en función del material aflorante (Fig.5.2.2) para la ciénega se obtuvieron valores de 0.3, 0.4 y 0.5 que se corresponden a materiales arcillosos, arcillo-arenoso y piroclastos. De esta forma la infiltración (I) calculada osciló entre 62 y 103 mm/año, correspondiendo, de acuerdo a la escala de referencia (Civita; De Maio, 1997) una puntuación de entre 4 y 5 puntos.

La figura 5.2.2 muestra la distribución de los índices de vulnerabilidad para este parámetro, cuyos valores máximos fueron de 30-35 puntos (zona sur y noreste), predominando los valores de 5 en el 70% del área de estudio.

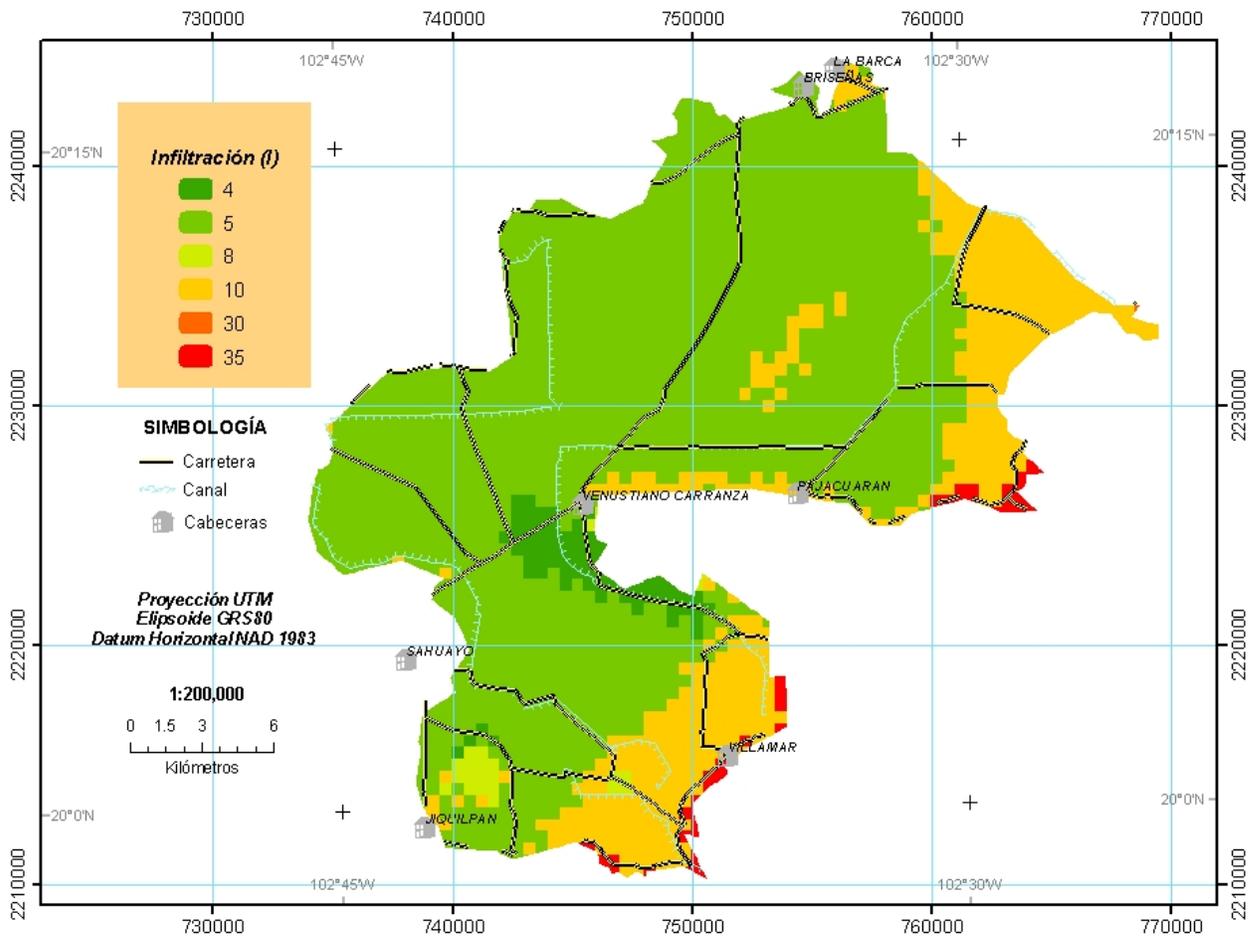


Fig. 5.2.2 Índice SINTACS para el parámetro I

- **N.** Capacidad de atenuación de la zona no saturada. Considerada como la “segunda línea de defensa” del sistema acuífero., depende esencialmente de las características texturales, minerales, granulométricas de fracturamiento y del espesor reportado del complejo hidrogeológico. Los pesos asignados fueron de 5 y 4 dependiendo del ámbito hidrogeológico.

Los datos considerados se tomaron de cortes litológicos de la zona, definiéndose la presencia de: Aluviones de granulometría media y fina, depósitos piroclásticos y rocas volcánicas fracturadas. Los rangos obtenidos oscilaron entre 6 y 9, obteniéndose índices para este parámetro entre 20 a 40 puntos (Fig. 5.2.3).

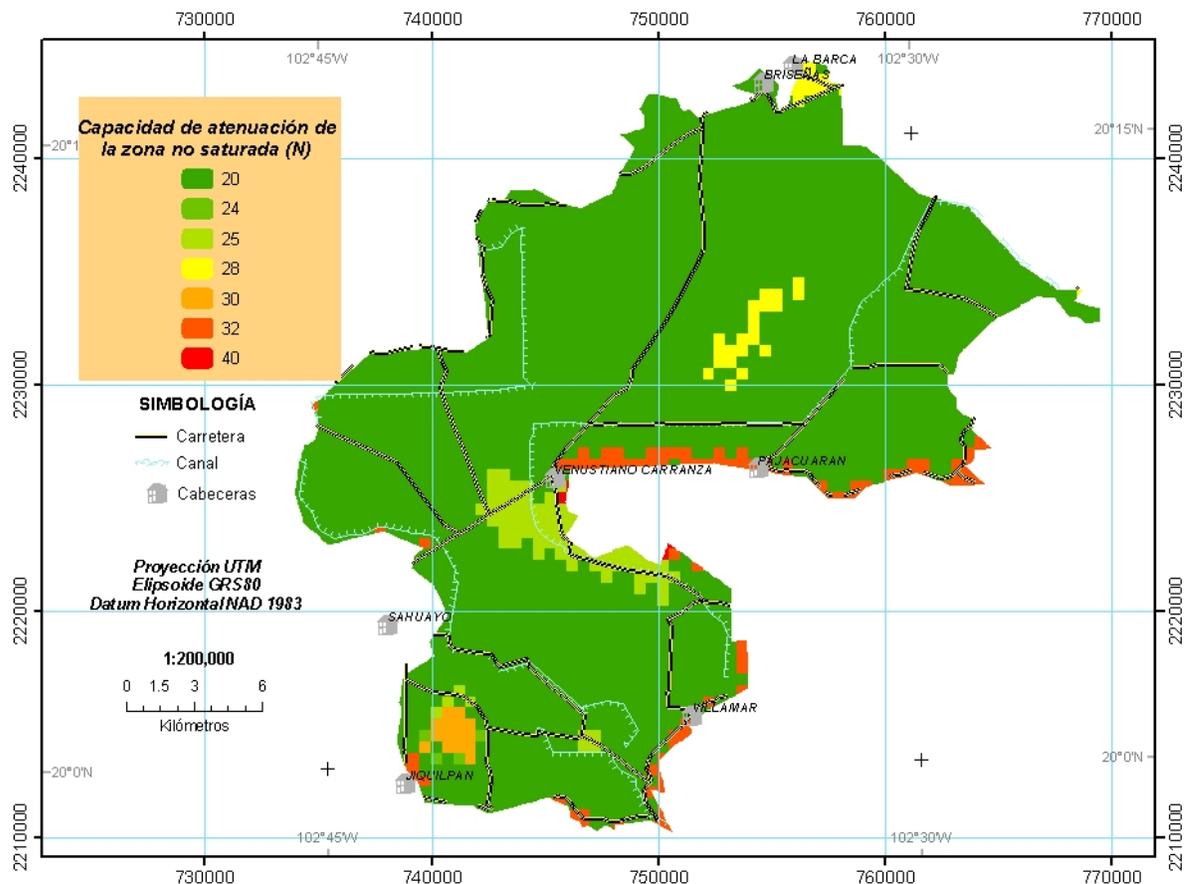


Fig. 5.2.3 Índice SINTACS2 para el parámetro N

Los menores valores (20 puntos) se encontraron distribuidos por toda la zona de estudio dominando hasta en un 90%, encontrándose valores intermedios de 25- 28 puntos en la parte media y los mayores hacia las zonas cercanas a las serranías como la de Pajacuarán, Sierra del Rayo y algunos volcanes internos como el Cerro Pelón.

- **T. Tipo de suelo.** Esta es la “primera línea de defensa” del acuífero. Durante el periodo febrero a julio del 2006, se tomaron 103 muestras de suelo cuya distribución se observa en la Fig. 5.2.4 .El objetivo fue conocer la clase textural, para lo cual se mandaron analizar en el laboratorio central de la Universidad Autónoma Chapingo, siguiendo las especificaciones que establece la Norma Oficial Mexicana (Nom-021- RECNAT-2000).

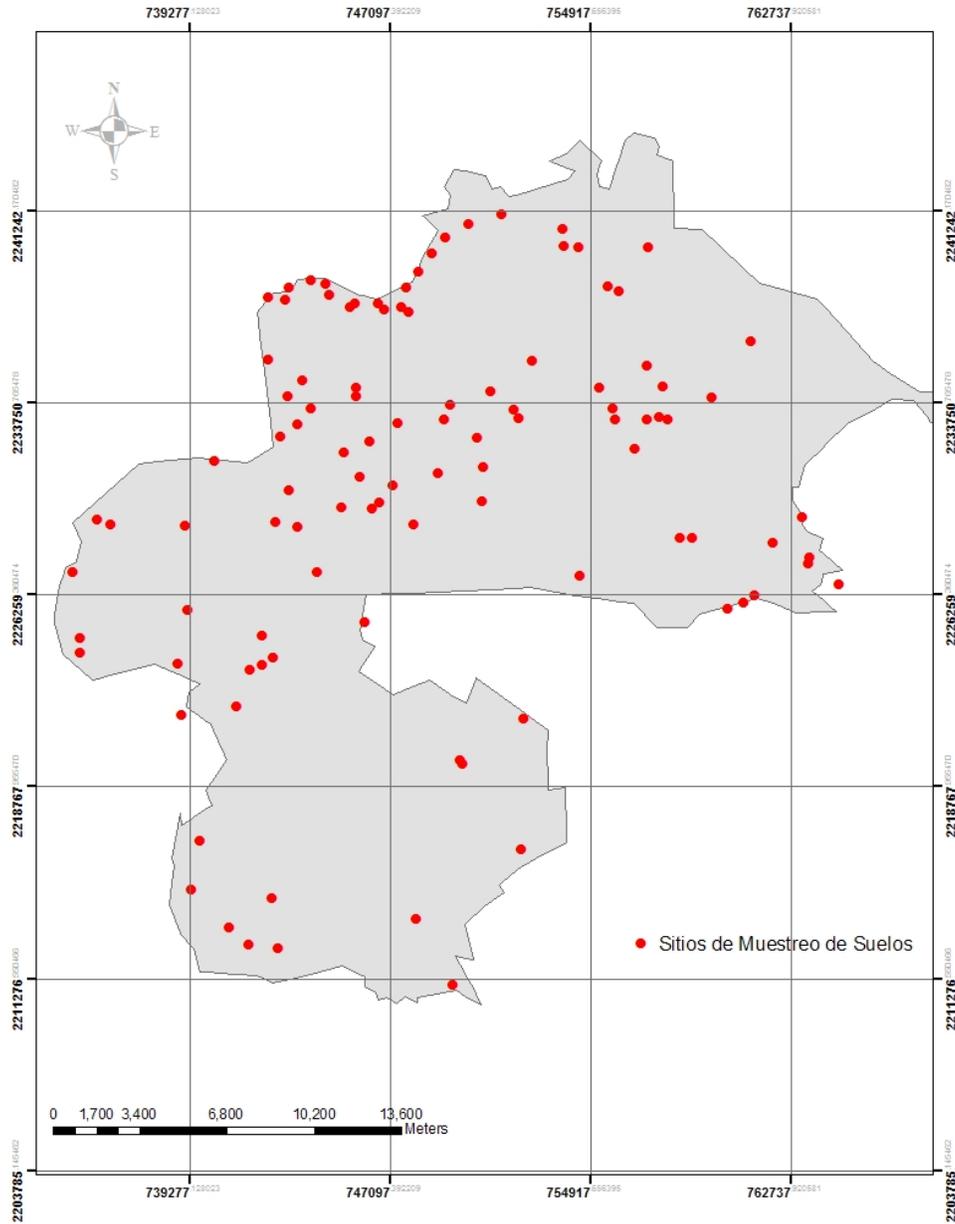


Fig.5.2.4 Distribución de sitios de muestreos 2006

Los resultados encontrados muestran el predominio de la clase textural arcillosa con porcentajes de arcilla mayores a 40%. Dentro de la región, se acumulan suelos arcillosos (>40 % de arcilla) que de acuerdo con INEGI (1986 y 1988) los clasifica como Vertisoles, que son los que ocupan la mayor superficie con 95.7%, presentan grietas

que se abren y se cierran periódicamente, contienen agregados en forma de cuña y son de naturaleza alcalina.

En las periferias del valle predominan los suelos arenosos, someros del tipo litosol, fluvisol Calcárico y phaozem Háptico y representa un mínimo porcentaje (4.26%). Tal y como se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro 5.2.2. Superficie de Suelos de la Región.

DESCRIPCIÓN	Ha	%
Phaozem Háptico	3	0.006
Fluvisol Calcárico	1,145	2.101
Litosol	1,178	2.161
Vertisol Crómico	2,135	3.918
Vertisol Pélico	50,035	91.814
Total	54496	100.0

Este hecho se refleja en los índices obtenidos (Fig. 5.2.5) para este parámetro, en donde el valor que más predomina (10) se distribuye por toda la región de estudio y los valores más altos (50) bordean la sierra de Pajacuarán por su ladera sur, cerca de la zona geotérmica de los negritos, además, de un área con textura arenosa hacia la parte norte muy cercana con el límite con el estado de Jalisco.

Además, también existe un área con valores intermedios (30 puntos) que se localizan muy cercanos también al área de los negritos y otra, muy mínima, que bordea al lago de Chapala desde el punto conocido como la Palma hasta La Magdalena.

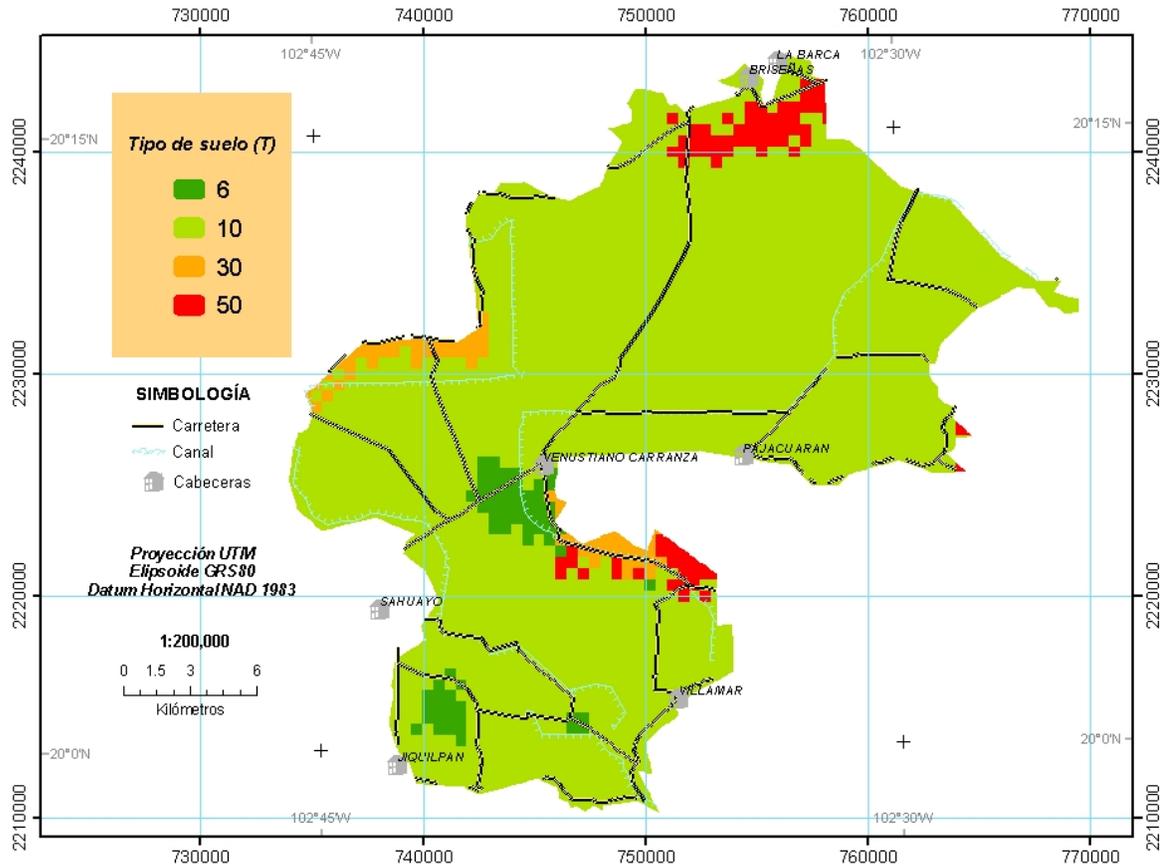


Fig. 5.2.5 Índice SINTACS₂ para el parámetro T

- **A. Complejo hidrogeológico.** Este parámetro está referido a la condición o tipo de acuífero, encontrando para la zona, es decir, las condiciones de libre, confinado o semiconfinado, asociando esta situación a las características geológicas.

Para conocer las características hidrogeológicas del acuífero se llevaron a cabo ocho sondeos geofísicos, para lo cual se utilizó la técnica de sondeo eléctrico vertical (SEV) que permitió definir las variaciones en la resistencia eléctrica de diferentes capas a profundidad; el equipo utilizado fue un aparato de corriente continua "Atlas

Copco” y su sistema Terrameter SAS, el cual consiste de una unidad básica denominada Terrameter SAS 300-C. (Fig. 5.2.6).



Fig. 5.2.6. Instrumento geofísico de exploración.

SAS es el acrónimo de System Averaging Signal (Señal Promedio de Sistema) un método mediante el cual se toman automáticamente lecturas consecutivas y los resultados se promedian de forma continua; esto hace que los datos obtenidos sean más confiables que los recabados con sistemas de disparo único. Se utilizó una distancia AB (emisión de corriente) de 200 m., con arreglo eléctrico Schlumberger. El cálculo de resistividades, electro estratos y construcción de gráfica se realizó con el programa de cómputo Resixp.

Para este caso, se encuentra en la parte superficial depósitos aluviales y lacustres recientes, de características arcillosas, de alta porosidad, baja permeabilidad y heterogeneidad en su constitución, cuyo comportamiento hidráulico es el de un acuitardo que funciona como una unidad semiconfinante en gran parte de la Ciénega. Su espesor promedio es de 3 m.

Los depósitos aluviales dominan el 95.13% de la zona de estudio, el resto está compuesto por materiales volcánicos como rocas ígneas extrusivas básicas e intermedias, así como un área de Limolita- Areniscas. Estos materiales volcánicos se presentan en las áreas aledañas a las cadenas volcánicas como La Sierra de Pajacuarán, Sierra del Rayo, etc., o algunos aparatos volcánicos presentes dentro de la Ciénega, localmente conocidos como: Cerro Pelón, Cerrito de Cotijaran, Cumuatillo y Los puercos.

El perfil geoelectrónico de la ciénega se obtuvo a partir de ocho sondeos geofísicos localizados a lo largo de la carretera Venustiano Carranza - Cuatro Esquinas con orientación NE-SO en la porción central de la región, cruzando los Ejidos Cumuato; El Fortín; Pajacuarán y Venustiano Carranza, (Fig. 5.2.7). Su longitud es de 16.6 Km, con aperturas entre $\frac{AB}{2}$ que variaron de 215 y 365m (Cuadro 5.2.2).

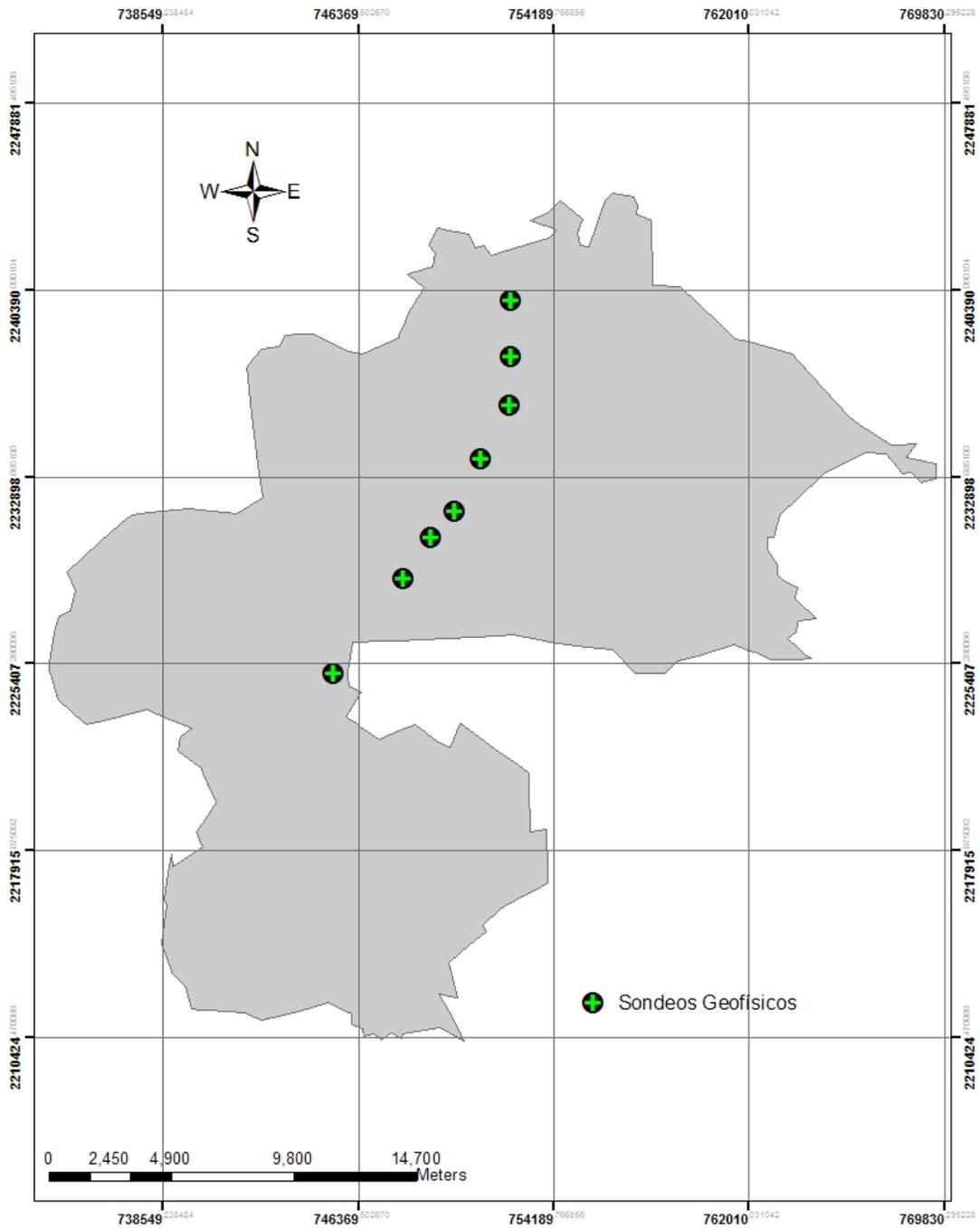
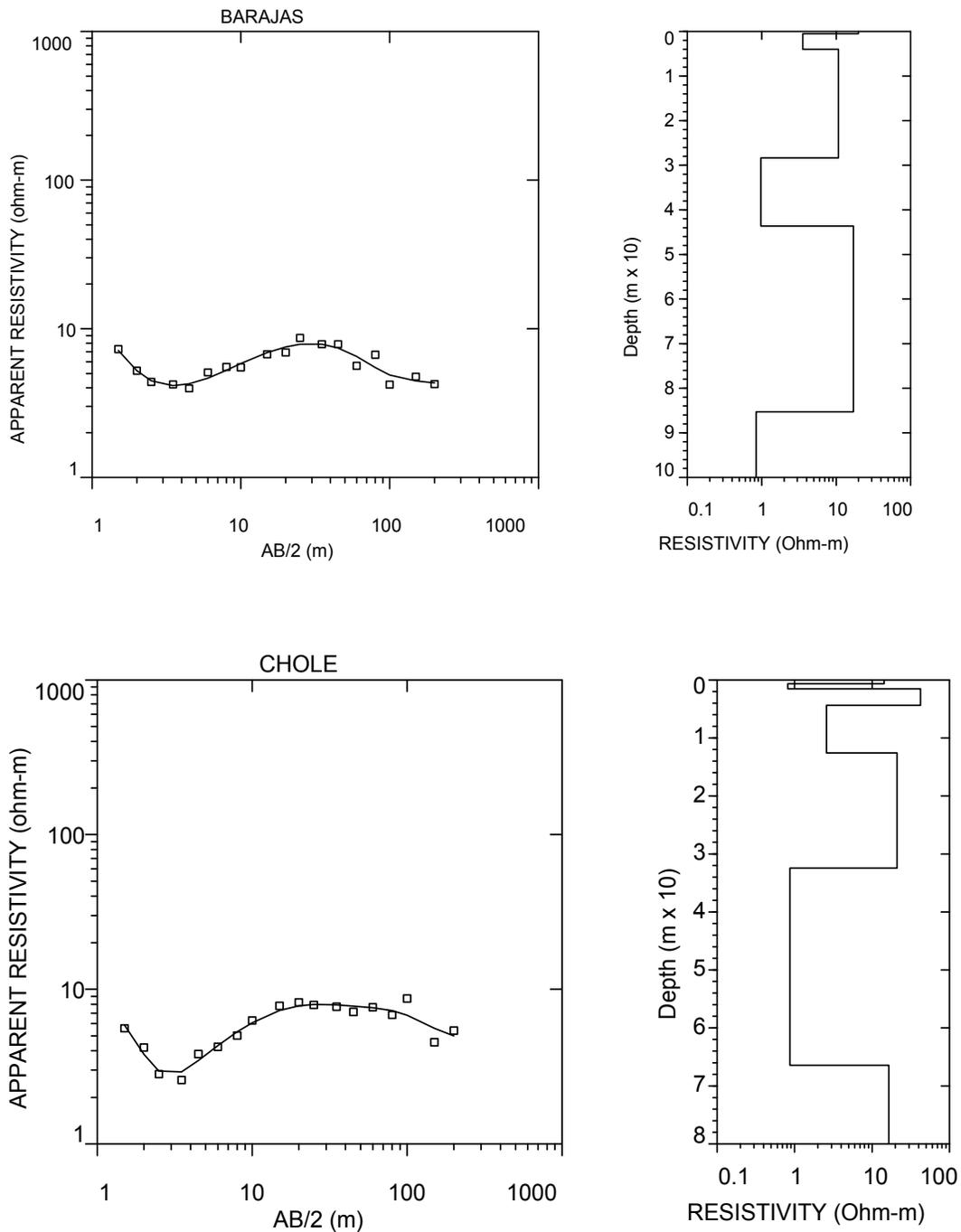
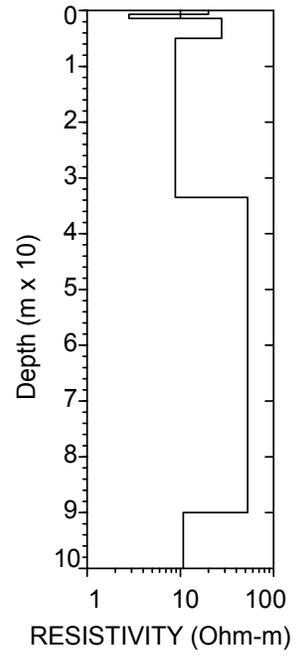
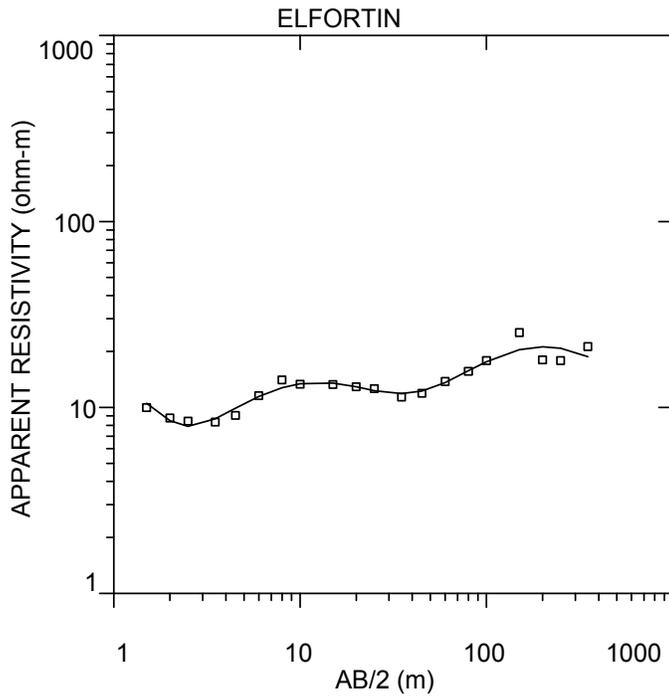
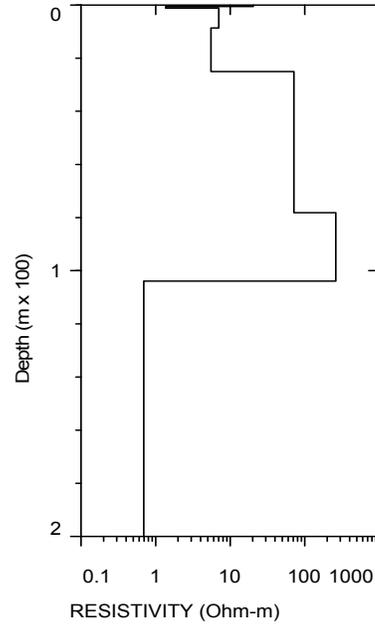
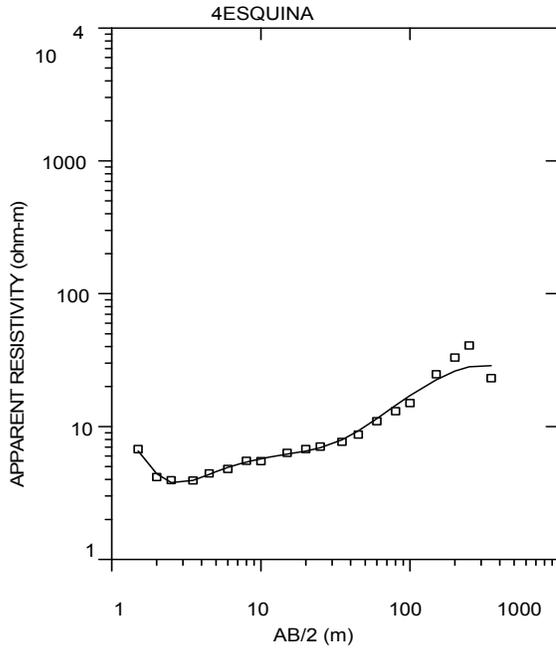
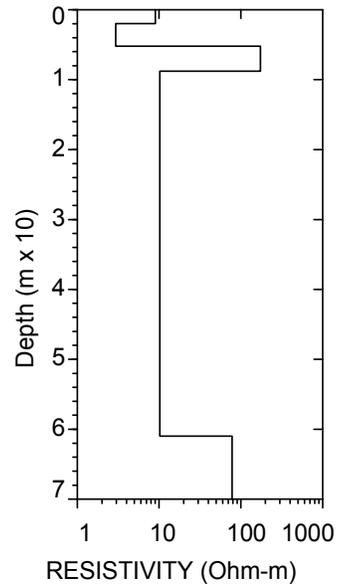
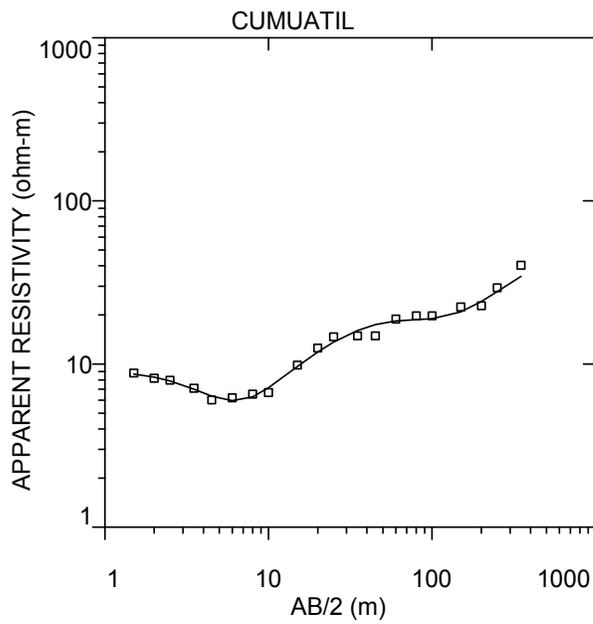
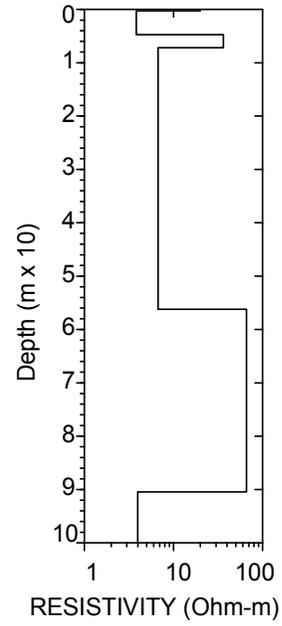
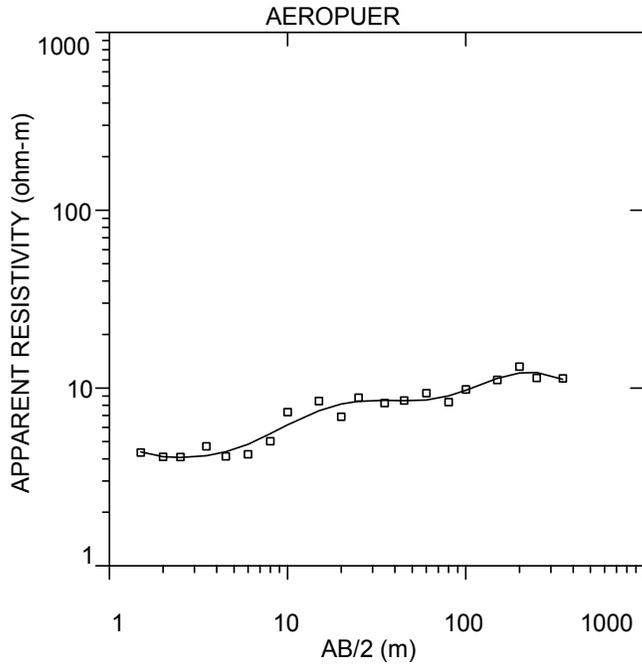


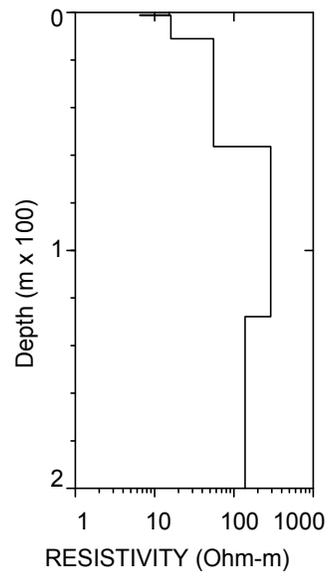
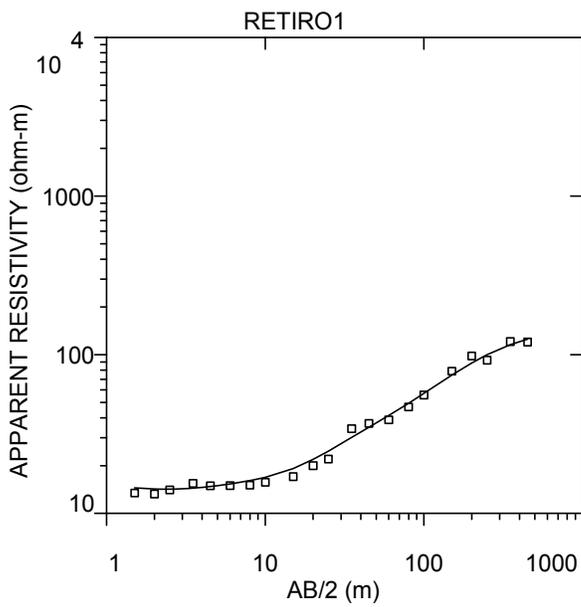
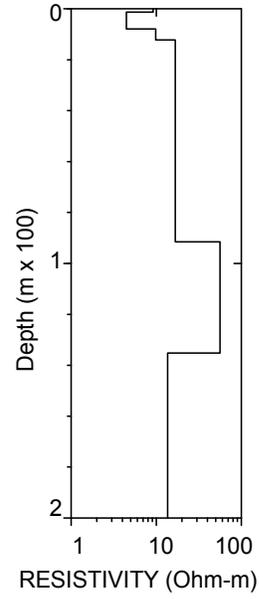
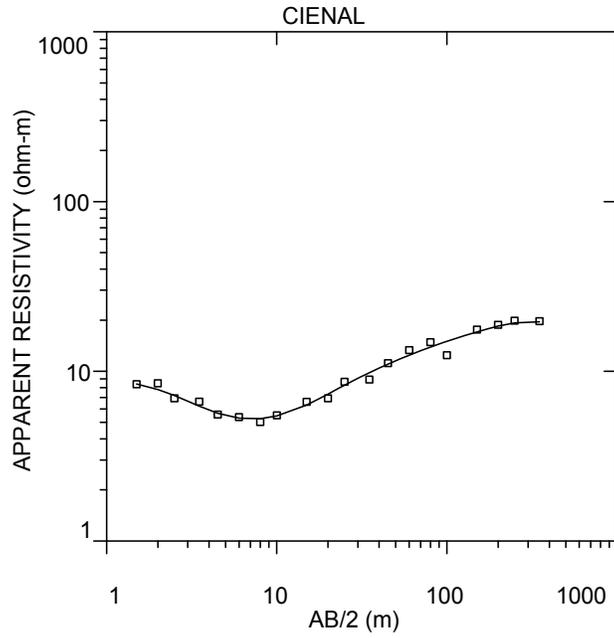
Fig. 5.2.7. Perfil geoelectrico de la Ciénega de Chapala.

En el procesamiento de la información geofísica, previamente se constituyeron secciones de resistividad para apoyar la integración de los perfiles geoelectricos. En la Fig. 5.2.8 se puede observar que las tendencias resistivas son de valores bajos uniformes (6-15 ohms-m) por lo que se infiere la existencia de un medio homogéneo a profundidad.









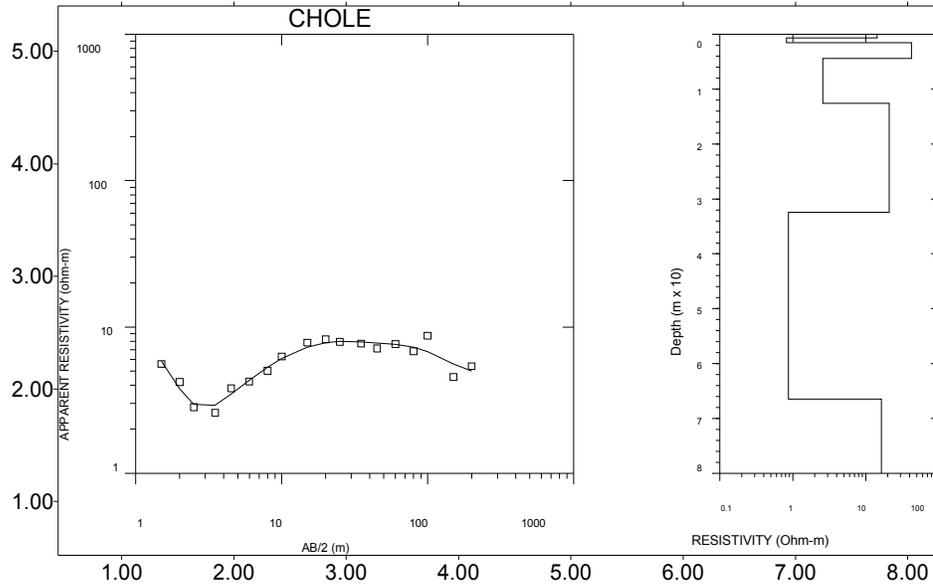


Fig.5.2.8 Secciones de resistividad para apoyar la integración de los perfiles geoelectrico.

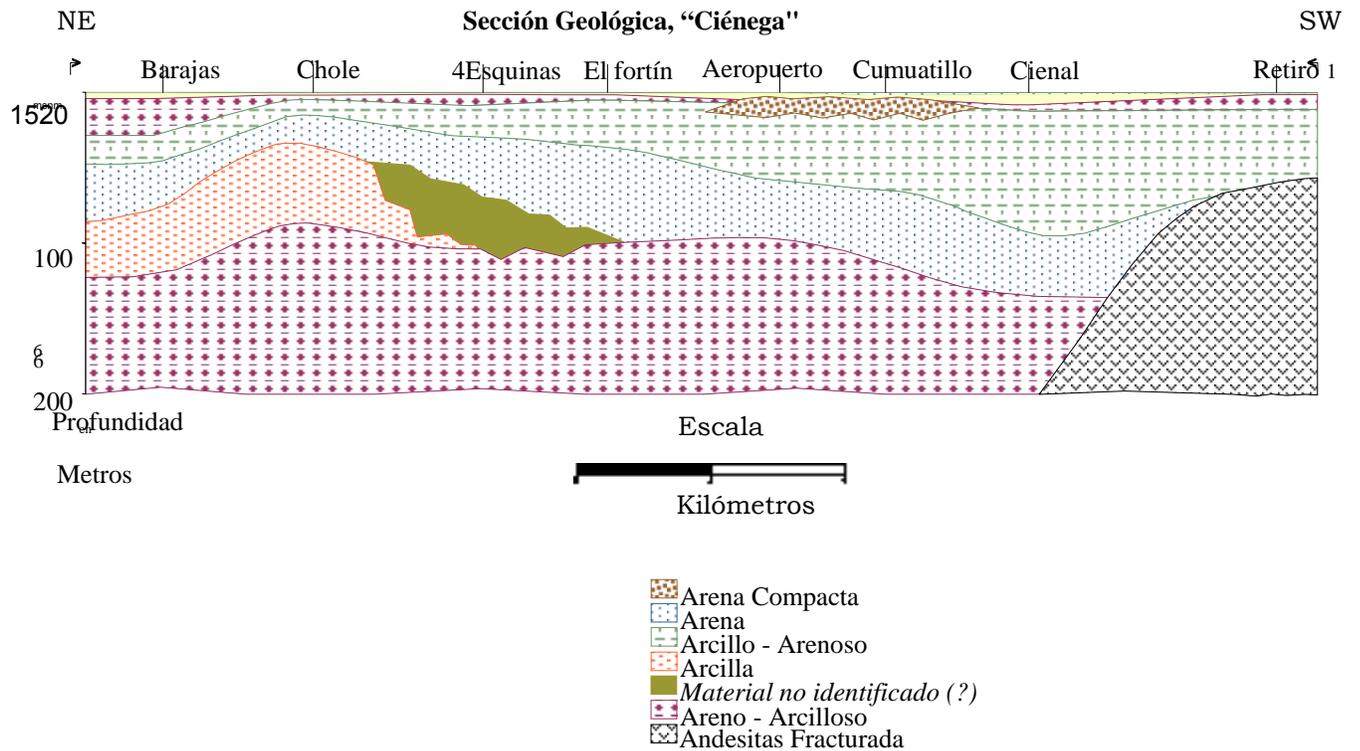


Fig.5.2.9 Sección Geológica, "Ciénega". Modelo electro estratigráfico.

El valor más bajo, de 2.95 $\Omega\cdot\text{m}$, se registro en el sondeo Chole, mientras que en el sondeo Retiro1 se detectó la mayor resistividad aparente con un valor de 38.9 $\Omega\cdot\text{m}$, cabe mencionar que el sondeo anterior se levantó en la cercanías del cerro el Sombreroete cuya composición es andesítica (INEGI, 1979. Carta Geológica. Villa Chavinda F-13-D-88 Mich. - Jal.).

En general los valores menores aparecen en los sondeos Barajas, Chole y 4 Esquinas para un $AB/2$ igual a 3 m a partir del sondeo denominado Aeropuerto y hasta el denominado Retiro1, para las aberturas en $AB/2$ de 10 m y 15 m los rangos en las resistividades son de 5 $\Omega\cdot\text{m}$ a 9.98 $\Omega\cdot\text{m}$.

Los mayores valores de la resistividad se presentan en la abertura de 316 m para $AB/2$, en los sondeos 4 Esquinas y Cumuatillo con valores de 31.5 $\Omega\cdot\text{m}$ y de 33.8 $\Omega\cdot\text{m}$ respectivamente. Este perfil presentó en general un esquema estratificado a lo largo de todo el perfil, como se observa en la figura anterior.

En la Fig. 5.2.9., también se muestra el modelo electro estratigráfico obtenido, infiriendo la existencia de hasta cuatro unidades geoelectrica, la más superficial es una capa con resistividades que varían desde 9.2 a 18.8 ohms-m y cuyo espesor es menor a 1 m. Esta unidad puede ser correlacionada con un estrato de composición arcillo-arenosa.

La segunda unidad litológica que subyace a la anterior registra resistividades de 1.6 a 4.2 ohms-m, esta se encuentra ampliamente distribuida a lo largo de toda la sección con espesores máximos de 5 m (sondeo 7) y puede corresponder a una unidad lacustre arcillosa.

Un tercer electro estrato, bien definido en toda la sección presenta valores resistivos de 7.4 a 22.4 ohms-m, considerándose como un estrato de características arcillo-arenosa con espesores registrados en los SEV 5 y 6 de 31 y 28 m., respectivamente.

Finalmente, la capa más profunda interpretada, presenta resistividades de 4 a 121 ohms-m y se detecta de manera uniforme en la sección, siendo considerada como el basamento geoelectrico; por sus valores resistivos, debe corresponder a una unidad con mayor contenido de arcilla

Los índices obtenidos para este parámetro están entre 21 y 27 puntos, predominando en un 95% la condición para ambientes depósitos aluviales y el resto materiales volcánicos (Fig. 5.2.10).

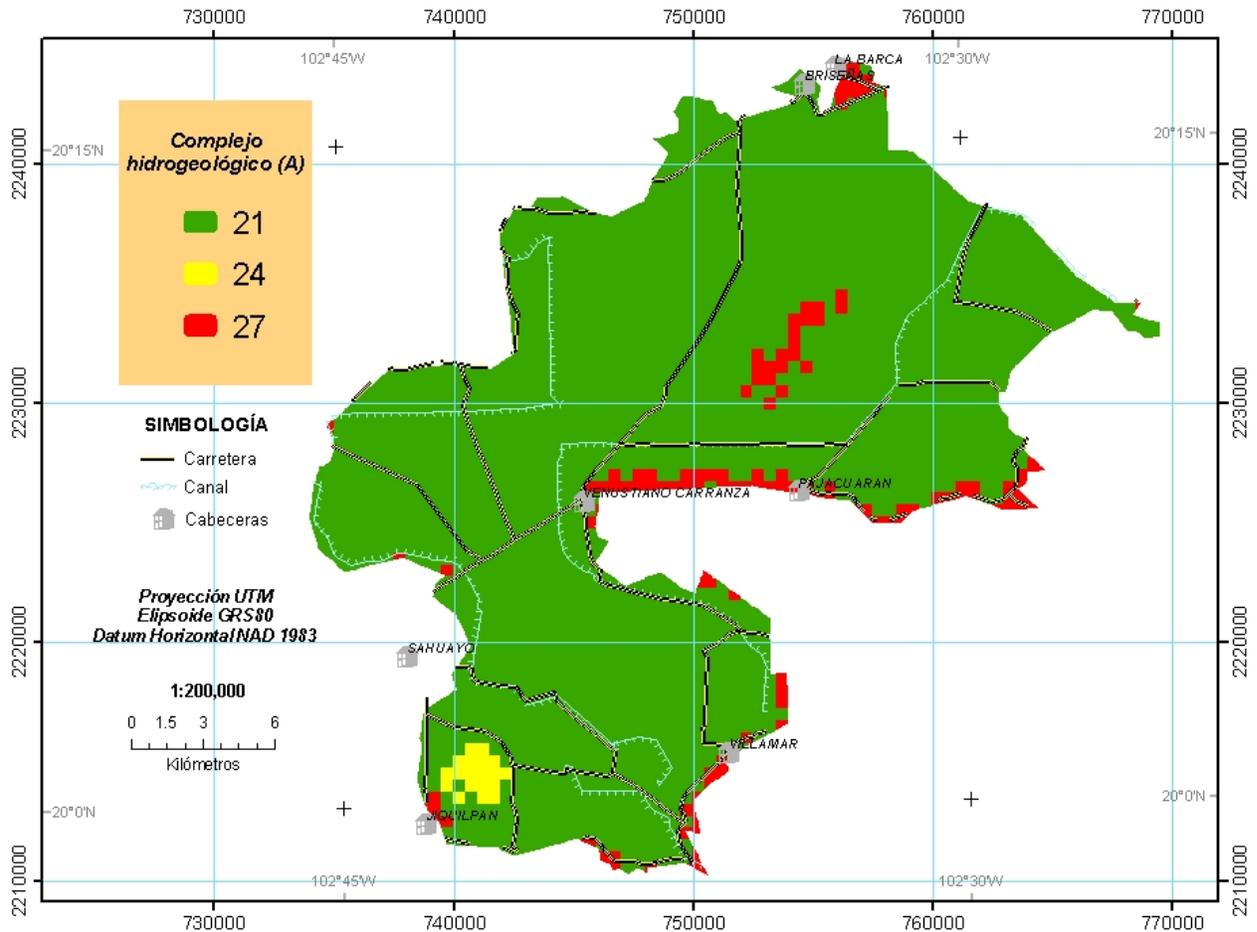


Fig. 5.2.10 Índice SINTACS₂ para el parámetro A

- **C.** Conductividad hidráulica. Parámetro obtenido por correlación directa con materiales cuyos valores son conocidos y que ofrecen similitud con el tipo de litología presente en la región. Así, los valores obtenidos en el área han sido mayores para medios fracturados que para medios granulares, esta misma respuesta se ve en la distribución de los índices calculados sin embargo, algunas estructuras permeables como son las fallas regionales, tienen fuerte influencia en los valores altos de este parámetro.

Cuadro 5.2.3. Valores de la conductividad hidráulica en relación con la textura del Suelo (Civita y De Maio, 2000).

Textura	K (m/s)
Arena	4.2E-04 - 4.3E-02
Franco Arenoso	4.6E-05 - 7.0E-04
Franco	4.6E-05 - 5.6E-04
Franco Limoso	3.4E-06 - 1.7E -04
Franco Arcilloso	3.4E-06 - 1.2E-04
Limo-Arcilloso	6.8E-06 - 2.0E-04
Franco Limoso Arcilloso	3.4E-05 - 1.2-05
Arcilla	1.7E -07 - 8.5E -05

Los rangos asignados estuvieron entre 8 (1E-34 m/s) y 5 equivalente a valores de 1E-5m/s. (Fig. 5.2.11).

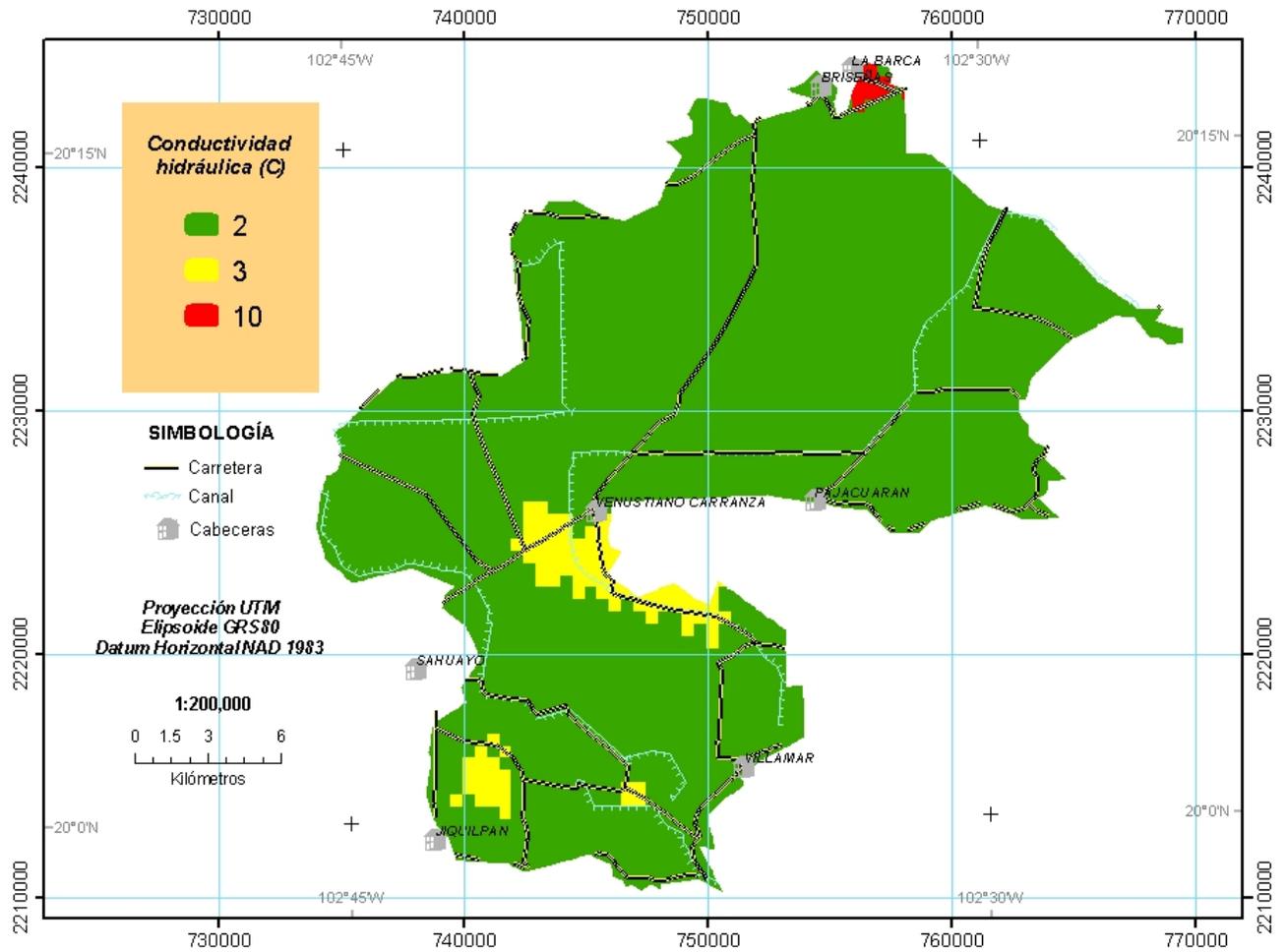


Fig. 5.2.11 Índice SINTACS₂ para el parámetro C

- **S₂.** Topografía. Relacionada con la velocidad de desplazamiento del agua superficial. Para conocer la topografía de la Ciénega se llevó a cabo un levantamiento topográfico con un GPS marca GARMIN XL obteniendo en total de 307 puntos con coordenadas UTM. Estos fueron almacenados en un archivo EXCEL, el cual fue exportado a ARC MAP con extensión DBASE IV para generar un archivo RASTER y con esto poder definir las isocurvas que

dan como resultado el mapa de altimetría. Así, la Ciénega de Chapala esta conformada como un valle, donde predomina la topografía plana, existiendo un cambio en la pendiente hacia las estribaciones montañosas. La altura sobre el nivel del mar predominante es la 1524 m, con un incremento progresivo hacia la parte sur de la Ciénega donde se encuentran las mayores alturas, hasta de 1540 m; así mismo se localizan algunas alturas menores a 1524 m que corresponden a las zonas bajas donde se localizan algunos equipos de bombeo de drenaje interno (Tal es el caso del bombeo Casa Fuerte, donde se tiene una altura registrada de hasta 1514 m). Además, también existen algunas protuberancias altitudinales que corresponden con el cerro Pelón, cerro de Cotijaran, cerro de la Isla y el cerrito de los Puercos, donde las alturas no llegan a rebasar los 1560m.

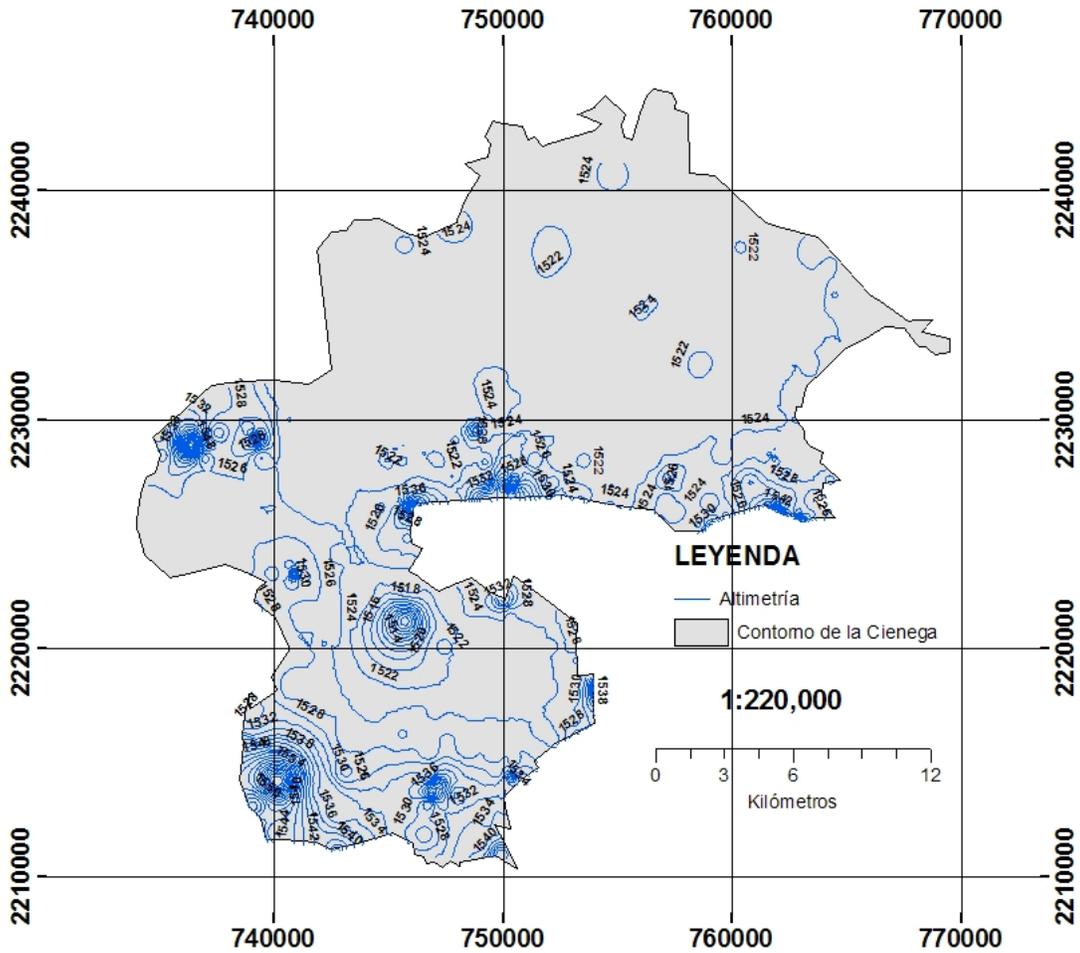


Fig. 5.2.12. Mapa altimétrico de la Ciénega de Chapala

Las áreas de menor pendiente estuvieron entre 5 y 8%. Con lo anterior y para este parámetro los índices más altos se encuentran hacia los valles mientras que los valores más bajos se hallan en las estribaciones de las partes montañosas (Fig. 5.2.13).

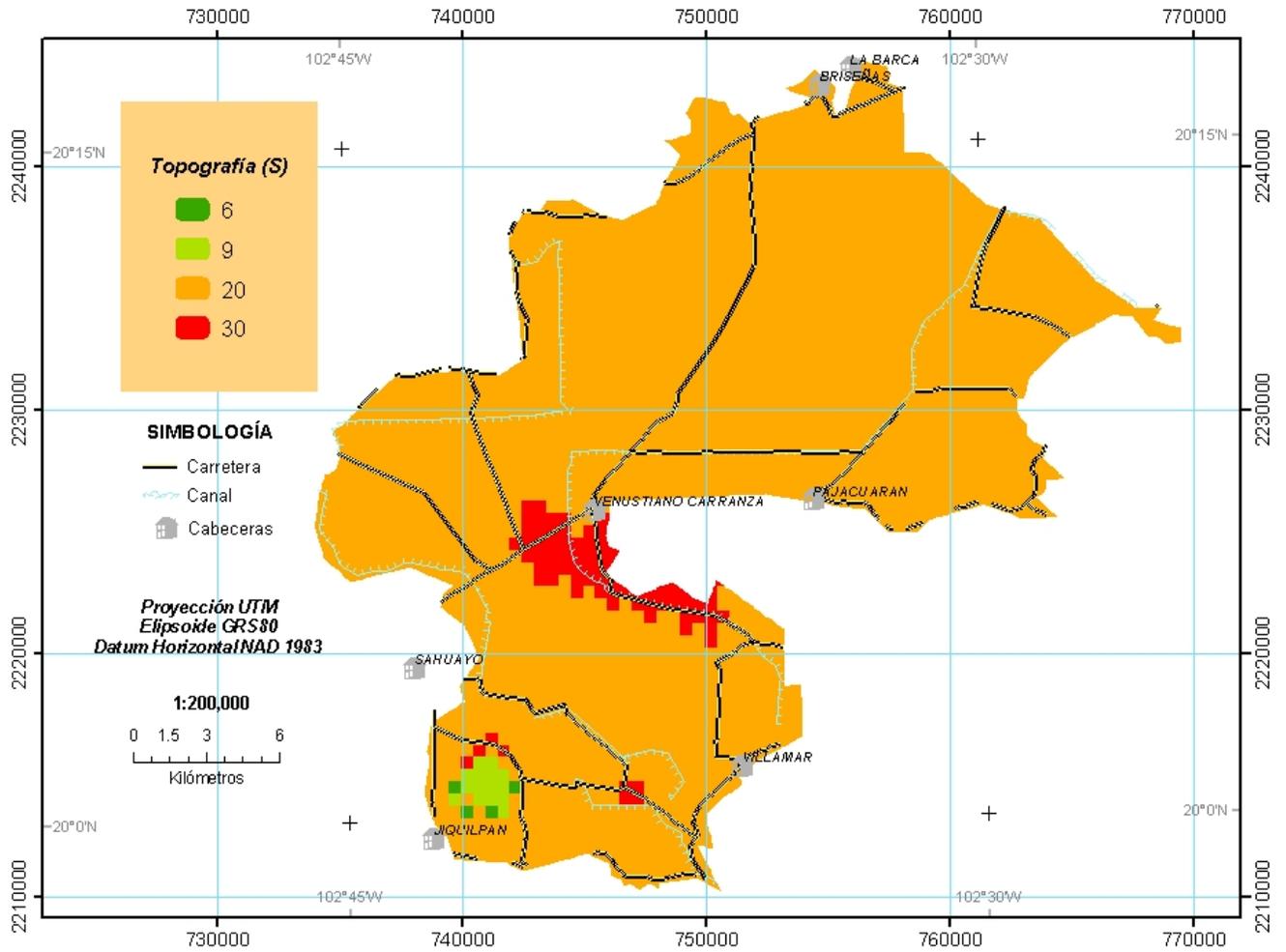


Fig. 5.2.13 Índice SINTACS2 para el parámetro S2

Índice de vulnerabilidad SINTACS2. El plano de vulnerabilidad es el resultado de la suma aritmética de los siete parámetros, los valores altos son provocados por valores altos de cada uno de ellos. En la figura 5.2.14 se esquematiza este proceso.

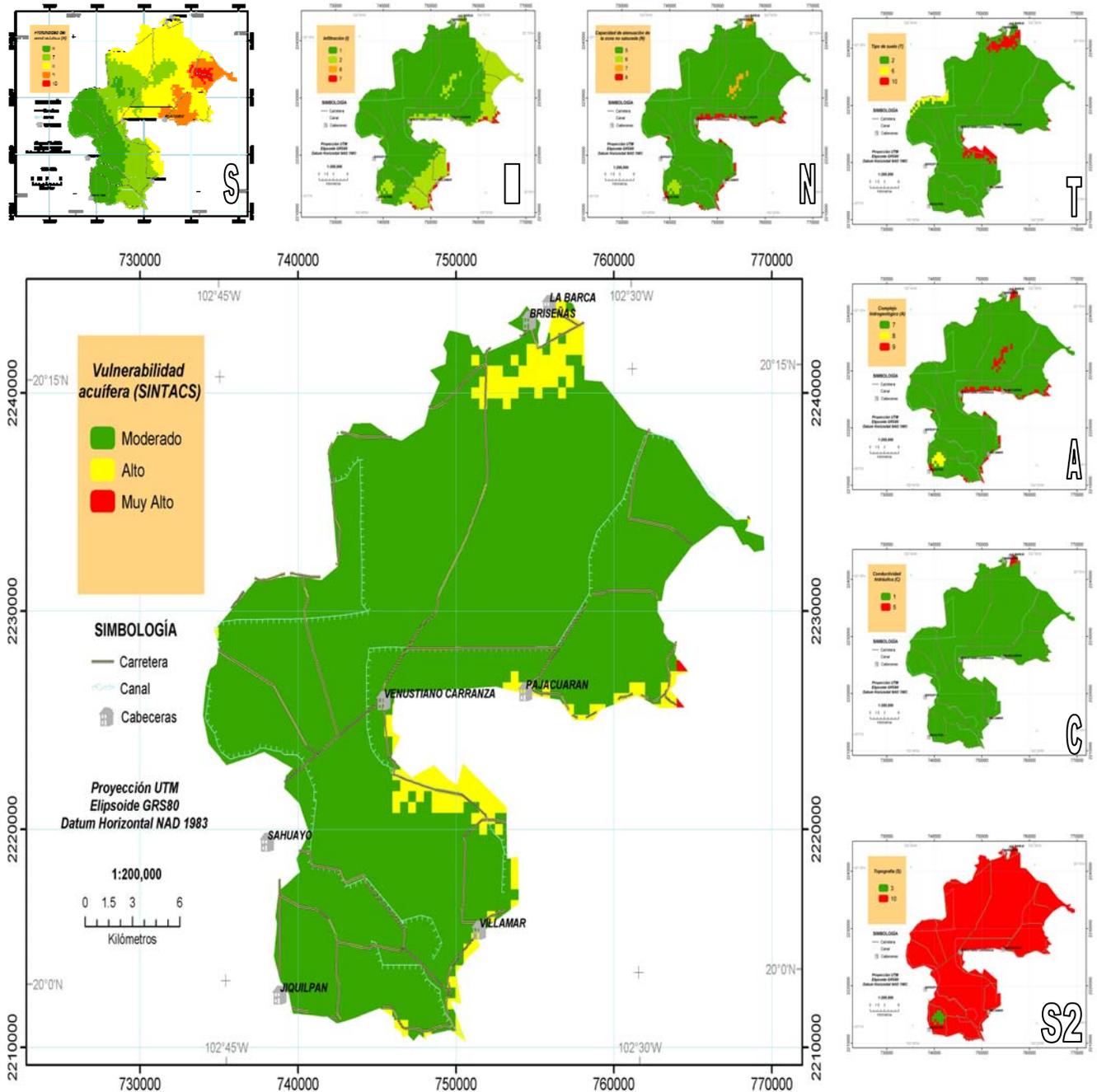


Fig. 5.2.14. Esquematización del proceso de obtención del plano de vulnerabilidad

El plano de vulnerabilidad acuífera, está representado por seis niveles de riesgo, en rangos de 26-260 puntos. Estos se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 5.2.4 Niveles de riesgo de vulnerabilidad SINTACS₂ tomado de Civita y de Maio, 2000.

Simbología	Índice	Rango
EA	Extremadamente alta	210-260
MA	Muy alta	186-210
A	Alta	140-186
M	Mediana	105-140
B	Baja	80-105
MB	Muy baja	26-80

La fig. 5.2.15; muestra la distribución de cada rango; en la región predominan dos niveles de vulnerabilidad: Mediana (105-140 puntos), que cubre la mayor parte de la ciénega, y en pequeñas porciones vulnerabilidad alta (140-186 puntos) en sitios próximos a la ciudad de La Barca, y la zona que limita y bordea la sierra de Pajacuarán. Los valores bajos reflejan zonas donde el ambiente acuífero es predominantemente arcilloso y de escaso fracturamiento.

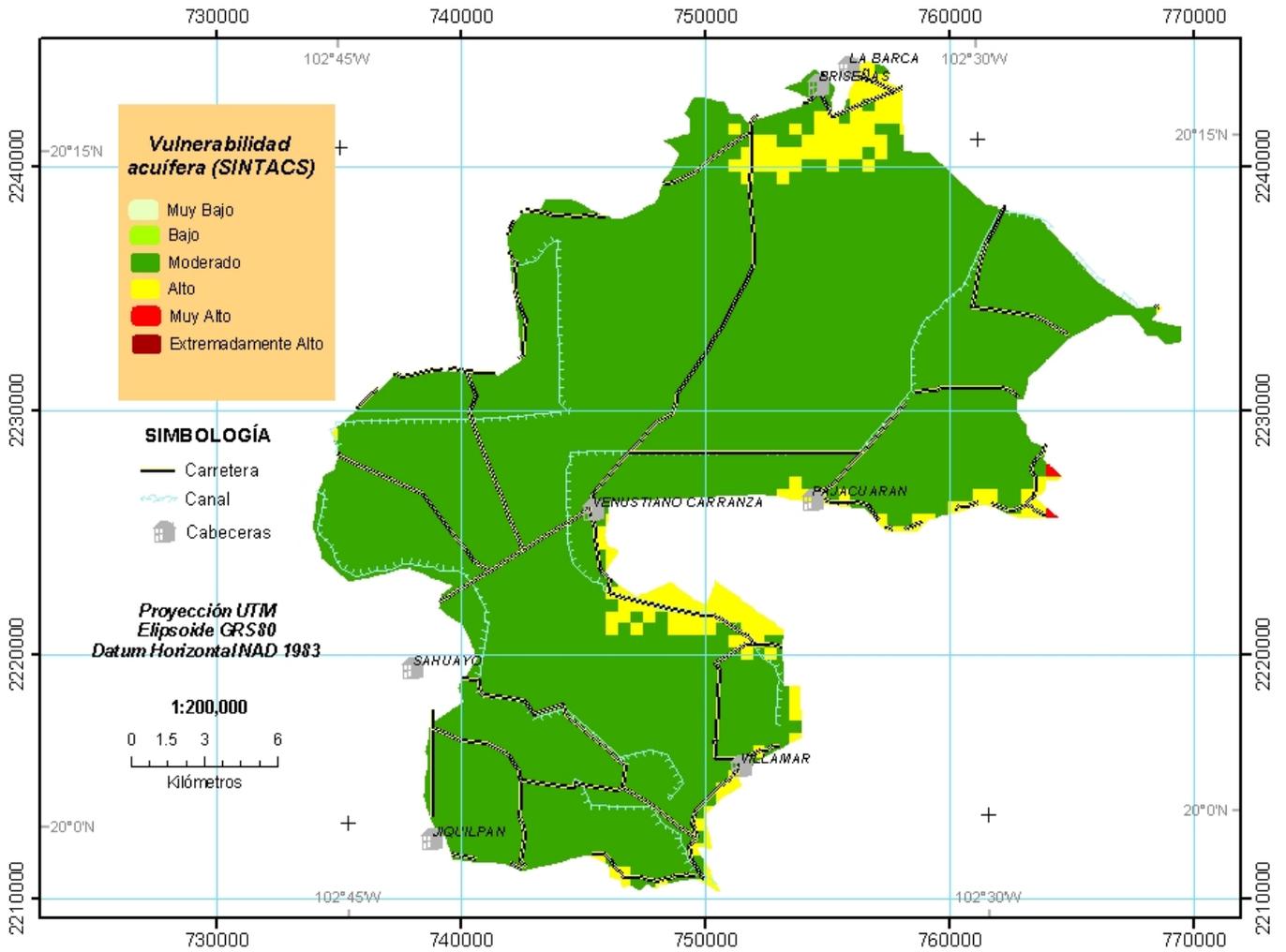


Fig. 5.2.15. Mapa de vulnerabilidad SINTACS₂

5.3. Fuentes potenciales de contaminación.

A efecto de obtener una evaluación del riesgo a la contaminación de un acuífero, es fundamental la identificación de las posibles fuentes puntuales potencialmente contaminantes, ejemplos de ellas son: actividades industriales (estaciones de servicio, descargas en el suelo), disposición de residuos sólidos, cursos superficiales potencialmente contaminados y el saneamiento in situ (Donado, 1999).

El inventario es una actividad que comprende la identificación, localización espacial, período de funcionamiento y la caracterización de las prácticas utilizadas, de forma sistemática (WHO 1982). Una de las mayores dificultades en un inventario es la obtención de la información. En muchos casos, una gran parte de los datos esta concentrada en organismos del gobierno, empresas estatales y privadas.

Estudios anteriores, realizados con otros fines, son también importantes fuentes de información, así como los directorios telefónicos (incluyendo las páginas amarillas) y los registros de asociaciones y juntas comerciales de la ciudad. Fotografías aéreas antiguas o imágenes de satélite de gran escala pueden facilitar el mapeo del uso y ocupación del suelo, inclusive desde una perspectiva histórica.

Un inventario de fuentes potenciales de contaminación es tan importante, como la propia determinación de la vulnerabilidad (Rodríguez *et al.*, 1999), ya que de la combinación de ambos, resulta el mapa de riesgo al acuífero (Ramos, 2000; Hirata y Reboucas, 1999).

Durante marzo de 2008, se realizó un censo de fuentes potenciales de contaminación, registrándose un total de 70, entre los que destacan, basureros a cielo abierto, gasolineras, panteones, establos, agroindustrias, gallineros y descargas de aguas residuales de las poblaciones. La Fig. 6.1, muestra la ubicación de las mismas.

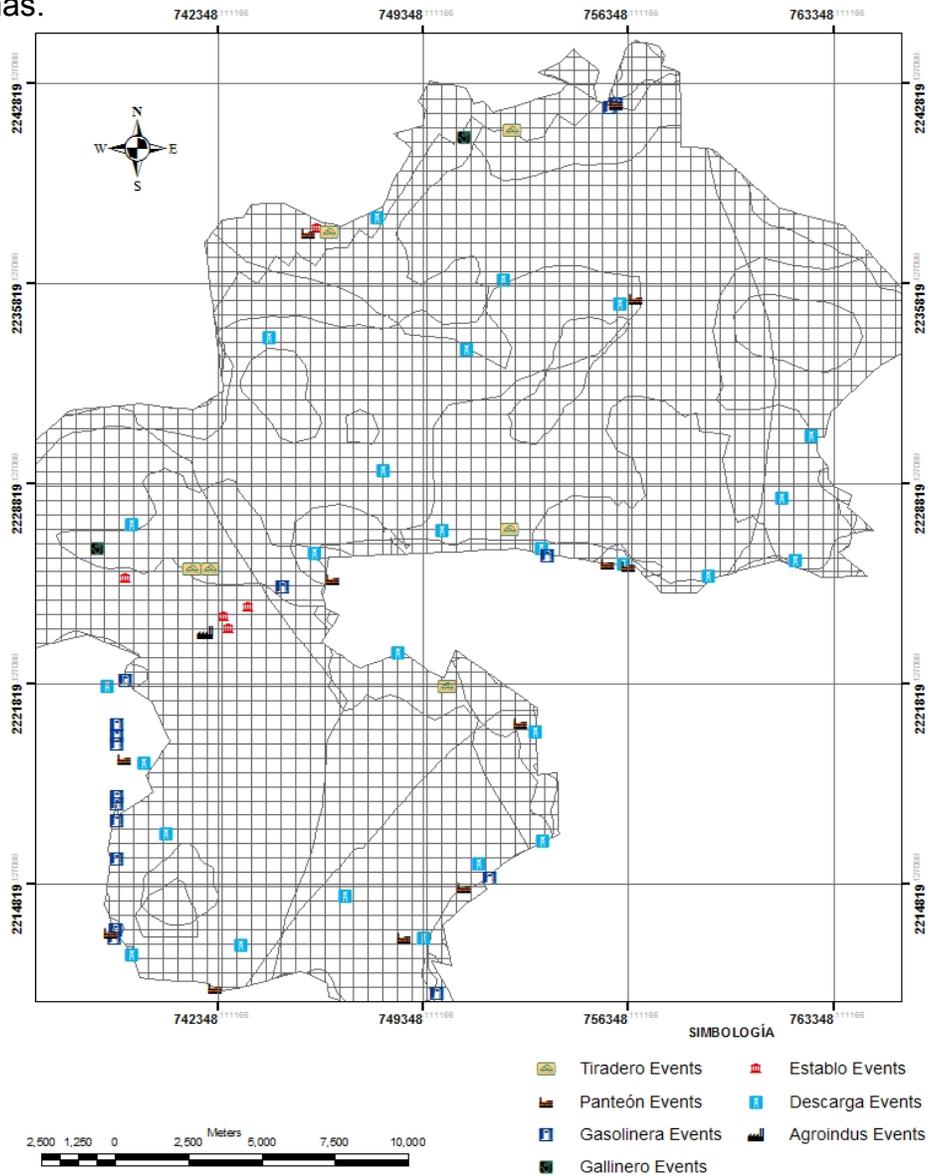


Fig. 5.3.1 Ubicación de las fuentes potenciales de contaminación

Las fuentes potenciales de contaminación que mas predominan fueron clasificadas en el nivel de priorización 2 (40%) y el resto se encuentran repartidas tanto para el nivel 1 y 3 con 30% para cada uno de los niveles (Cuadro 5.3.1).

Cuadro 5.3.1 Clasificación de las fuentes potencialmente contaminantes de acuerdo a su actividad, origen, geometría, temporalidad, tipo de soluto (CEASG, 1999) y carga contaminante de acuerdo con Foster (1987) y Foster & Hirata (1988)

Tipo de Fuente	Actividad	Geometría	Temporalidad	Soluto	Carga Contaminante	Priorización
Gasolineras	Potencial	Puntual	Intermitente	BTEX	Elevada	1
Basureros activos	Potencial	Puntual	Intermitente	Nitratos, STD, Componentes orgánicos	Elevada	1
Panteones	Potencial	Puntual	Intermitente	Aminas, Ca y P	Reducida	3
Granjas	Potencial	Difuso	Intermitente	Nitratos	Reducida	3
Establos	Potencial	Difuso	Intermitente	Nitratos	Reducida	3
Descargas de aguas residuales	Activa/Potencial	Puntual	Intermitente	STD, Cl, N, Comp. Orgánicos	Intermedia	2
Agroindustrias	Activa / potencial	Puntual	Pulso / intermitente	Compuestos orgánicos	Intermedia	2

5.4. Mapa de riesgo de contaminación del acuífero

El riesgo a la contaminación es determinado por las actividades propias que se den en la zona de interés. Según la Agencia Ambiental del Reino Unido (1998), el riesgo está asociado a la naturaleza de la carga contaminante, la vulnerabilidad del acuífero y las medidas preventivas.

En general existen dos tendencias referidas a estrategias sobre la protección de la calidad del agua subterránea, la primera es el denominado perímetro de protección de pozos (PPP) que tiene como centro de estudio el pozo de abastecimiento y cuyo objetivo es establecer una zona de protección alrededor del mismo (Hirata y Reboucas, 1999).

La otra línea, es más amplia y esta dirigida al acuífero, tiene como propósito una cartografía de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea.

Dichos autores, proponen un sistema sencillo para la priorización de actividades (Fig. 6.1), donde el peligro es definido como la interacción entre la intensidad de la carga contaminante antrópicas y la vulnerabilidad del acuífero. Por las dimensiones del área se eligió la segunda opción.

La estructuración de los mapas de riesgo en base a los mapas de vulnerabilidad elaborados bajo el método DRASTIC (Aller *et al.*, 1985) o AVI (Van Stempvoort *et al.*, 1995) o SINTACS2 (Civita y De Maio, 1997), requieren de la incorporación de fuentes de contaminación priorizadas.

En México ya se están dando los primeros pasos para que sean tomados como elementos en la planificación urbana (Tovar *et al.*, 1999). Los mapas deben ser validados con información química de pozos del área (Báez, 2001; Ramos, 2002).

En primer término se procedió a obtener el mapa del índice de Priorización, se emplearon valores de puntos de muestreo distribuidos al azar en La Ciénega de Chapala. Se utilizó el método de inverso de la distancia (IDW por sus siglas en inglés) de ArcGis® como algoritmo de interpolación el cual tiene la siguiente fórmula (Burrough *et al.*, 1998):

$$\bar{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)$$

Donde:

$\bar{Z}(s_0)$ Es el valor que se trata de predecir por la localización de s_0 . N es el tamaño de la muestra que será usada para la predicción. λ_i son los pesos asignados a cada punto medido que es usado. Estos pesos decrecerán con la distancia. $Z(s_i)$ es el valor observado de la localización s_i . Los pesos se determinan con la siguiente fórmula:

$$\lambda = d_{i0}^{-p} / \sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p} \quad \sum_{i=1}^N \lambda = 1,$$

Como la distancia se incrementa, los pesos se reducen por el factor de p . La medida de d_{io} es la distancia entre la localización calculada, s_o y la medida, s_i . El poder del parámetro p influye en el peso del valor medido sobre el calculado, que es como la distancia se incrementa entre la muestra medida y la calculada, el peso que el punto medido tendrá sobre la predicción decrecerá exponencialmente.

Una vez que se obtuvo el mapa de Priorización, se procedió a realizar una sobreposición con el mapa SINTACS₂, para determinar la relación espacial de estos dos mapas. Esto se realizó con el modulo INTERSECT de ArcGis[®]. El producto obtenido es el denominado mapa de riesgo priorizado.

La Figura 5.4.1.1 muestra el SINTACS₂ con los índices de Priorización. El valor 3 o priorización reducida ocupa la mayor parte de la superficie del área de estudio, lo cual coincide con los rangos de 34 a 49 del índice de SINTACS₂ normalizado. El valor 2 o intermedio de priorización se relaciona con valores mayores de 50 del SINTCAS₂ principalmente.

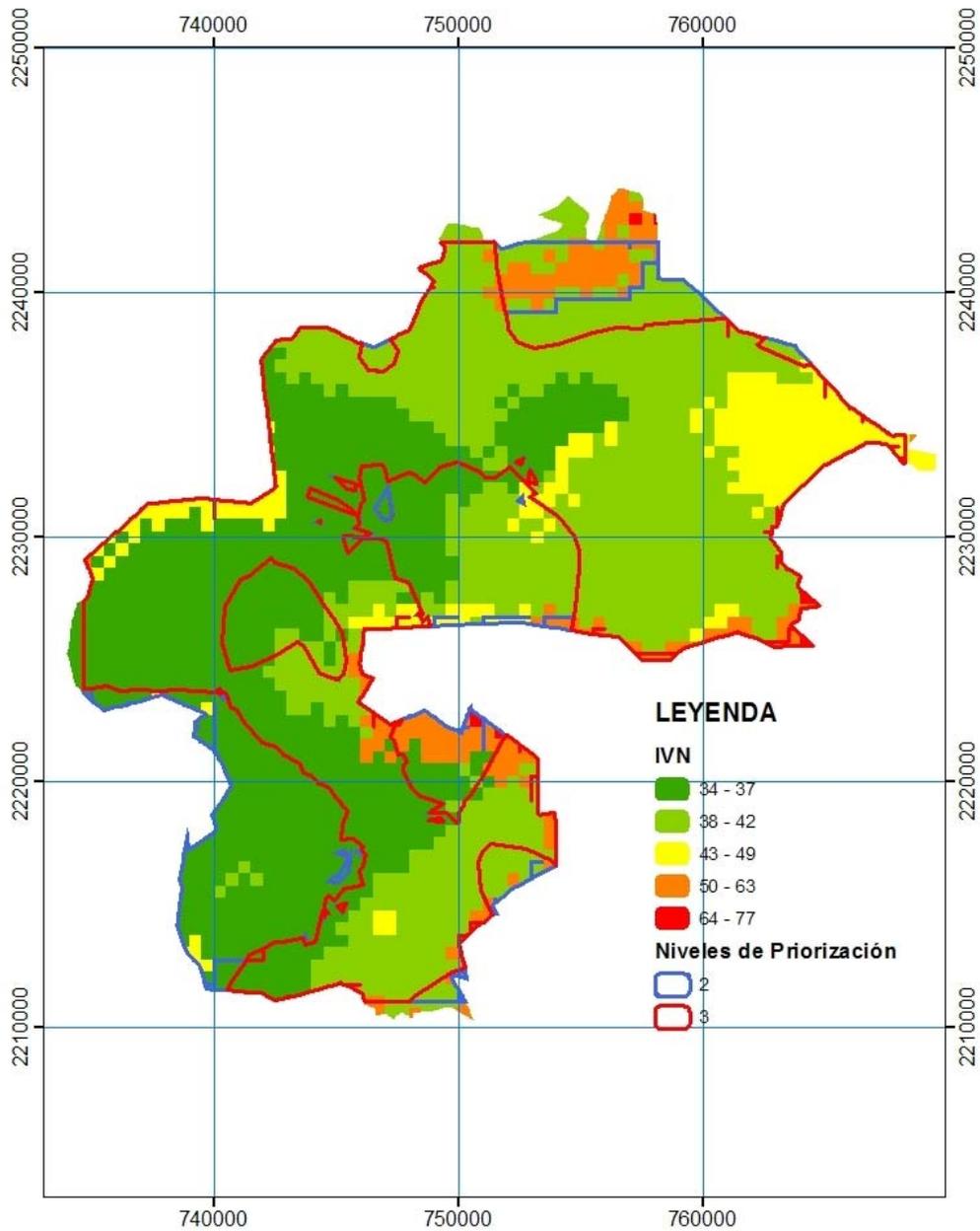


Fig.5.4.1.1 Mapa de zonificación de riesgo para la Ciénega de Chapala

La figura muestra la zonificación de riesgo con sus correspondientes niveles de priorización para la ciénega de Chapala.

Por lo tanto, en la región de estudio existe un riesgo intermedio de contaminación de los acuíferos y se encuentran asociado con las áreas donde se ubican las

gasolineras, descargas de las aguas residuales de las poblaciones, tiraderos a cielo abierto.

Las áreas antes mencionadas coinciden en la parte sur con las poblaciones de Villamar y Emiliano Zapata, además del corredor Jiquilpan – Sahuayo- La Palma; en la parte intermedia las poblaciones de Venustiano Carranza y Pajacuarán y hacia la parte norte con las poblaciones de Briseñas y Vista Hermosa. También en el área de estudio se pueden observar algunos puntos dispersos que corresponden a los diferentes tiraderos municipales.

CAPITULO 6. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de vulnerabilidad permiten lograr mapas que muestran las áreas con mayor o menor sensibilidad de que el acuífero subyacente llegue a contaminarse, en nuestro caso se encontró que la mayoría de la zona de estudio presenta una escala de vulnerabilidad media y en menor superficie vulnerabilidad alta y muy alta.

Esto permitirá utilizar la información de vulnerabilidad con múltiples propósitos tal como lo mencionan Bessouat *et al.*, 1999 y González (2003) y refieren que estos mapas deberán servir como guía en la planificación de actividades relacionadas con el medio ambiente y el ordenamiento territorial, siendo una herramienta fundamental para definir que utilización puede tener determinadas zonas, y en el desarrollo de políticas de protección para las aguas subterráneas subyacentes a la superficie de asentamiento de actividades existentes.

El parámetro que tiene mayor probabilidad de ser afectado y que es determinante en la vulnerabilidad del acuífero es la profundidad del nivel del agua; que se encuentra en la mayoría de la zona de estudio somero.

El nivel en la zona de estudio está influenciado por las aguas del lago de Chapala ya que de acuerdo con Silva *et al.*, 2002 existe una comunicación hídrica entre estos dos cuerpos, así lo manifiestan los menores niveles piezométricos encontrados hacia el área aledaña con el lago, además de que en algún tiempo estos dos cuerpos fueron uno sólo y que después de llevar a cabo una delimitación por medio del bordo

de Maltaraña se dio esta separación física (Macias y Márquez, 2001) y posterior a esto, la ciénega ha estado funcionando como subsistema regulador del lago, ya que en años lluviosos retiene el agua y en años secos la libera, permitiendo cierta estabilidad (Silva, *et al.* 2002).

También la vulnerabilidad del acuífero puede ser favorecida por la topografía plana que domina la zona de estudio, ya que los escurrimientos generados por las lluvias en las zonas cerriles aledañas pasan a formar parte de la red de drenaje del distrito de riego 024 Ciénega de Chapala (CNA, 2004) y posteriormente al acuífero como lo menciona (Civita y De Maio, 1997) que encontraron que la forma del terreno es determinante en la infiltración del agua ya que en un terreno plano el agua tendrá mayor oportunidad de infiltrarse y habrá más facilidad de encontrar depósitos mayores de aguas subterráneas, que ahí se encuentran tanto de agua infiltrada localmente como la descarga de regiones montañosas vecinas en pudiendo aumentar con esto la vulnerabilidad.

Aunque todo lo anterior es contrarrestado por el material arcilloso encontrado en la mayoría de las muestras superficiales y su continuación a profundidad encontrada por medio de los sondeos geofísicos, como lo muestra el modelo estratigráfico, principalmente en la zona no saturada. Al respecto, Ramos (2002) en la zona del bajo, encontró que los mayores valores de vulnerabilidad coinciden con las áreas circundantes del valle, en donde se tiene ausencia de suelo y hacia las zonas centrales próximas al río Turbio, los suelos son profundos y arcillosos y por lo tanto concuerdan con los menores valores de vulnerabilidad.

En el caso de las áreas de vulnerabilidad alta y muy alta están relacionadas principalmente con los suelos de texturas franco arcillosas y poca profundidad, como lo menciona Rangel (2001), donde el rango de mayor vulnerabilidad tiene una correlación directa con áreas en donde predominan las arenas, gravas y suelo delgado o ausente, ello confirma la mayor sensibilidad del medio y susceptibilidad del agua para ser contaminada.

También las características texturales condicionan la velocidad de flujo que tendrá un contaminante dentro de la zona no saturada, este parámetro es conocido como la conductividad hidráulica y para nuestro caso es bajo, esto coincide con los datos encontrados por Ramos y Rodríguez (1998) donde al realizar pruebas de bombeo del acuífero en diferentes materiales geológicos del valle del río Turbio encontraron que los menores valores fueron para materiales arcillosos y en estas áreas los rangos de vulnerabilidad son menores. Además, también los materiales arcillosos funcionan como una barrera para los contaminantes que pueden migrar sobre la zona no saturada, esto si se considera a la alta capacidad de retención de los materiales arcillosos como (Rangel, 2001).

En cuanto al mapa de riesgo elaborado en base a los mapas de vulnerabilidad bajo este método, la priorización obtenida es localizada y la que mas domina es el nivel tres, que se refiere a bajo riesgo y solamente se obtuvieron algunos puntos también muy localizados, clasificados como nivel uno y le confiere a un riesgo medio.

Este comportamiento de los niveles de priorización del riesgo se debe al tipo de fuentes potenciales de contaminación en combinación con las propiedades que el suelo proporciona al mapa de vulnerabilidad; ya que de acuerdo con Foster e Hirata (1991) el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas dependerá en alto grado de la instalación sanitaria, esto determinará la carga hidráulica asociada y la profundidad de descarga de la misma.

Además, también estos autores mencionan que la mayoría de los procesos que causan la atenuación y eliminación en el subsuelo son mucho más activos en la zona del suelo biológicamente activa, como resultado de su mayor contenido de arcilla y materia orgánica, y de su población bacteriana mayor.

Por otra parte, un punto importante que no fue tomado en cuenta para la obtención del riesgo a la contaminación del acuífero fue la incorporación de zonas urbanas, ya que en estas sólo se consideran las descargas. Pero dentro de las zonas urbanas existen fuentes localizadas en las que se pueden generar volúmenes variados de diferentes tipos de solutos. La llamada industria "underground" difícilmente sujeta a regulaciones ambientales puede manejar compuestos orgánicos riesgosos, cuyo destino final difícilmente es conocido (Rodríguez y Rodríguez, 2004).

CAPITULO 7. CONCLUSIONES

- La suma paramétrica de los mapas temáticos generados determinó finalmente dos niveles de vulnerabilidad: Mediana que cubre la mayor parte de la ciénega, y en pequeñas porciones vulnerabilidad alta.
- En base a la vulnerabilidad obtenida y con la sobreposición del mapa de priorización en el mapa SINTACS₂ utilizando el modulo INTERSECT de ArcGis® se generó como producto un mapa de riesgo priorizado donde la priorización reducida ocupa la mayor parte de la superficie del área de estudio, lo cual coincide con los rangos de 34 a 49 del índice de SINTACS₂ normalizado. El valor 2 o intermedio de priorización se relaciona con valores mayores de 50 del SINTCAS₂ principalmente.
- De acuerdo con el modelo estratigráfico, el acuífero de la ciénega de Chapala puede clasificarse como un sistema semiconfinado en la parte central, asociado a materiales arcillosos, y libre en los márgenes donde coinciden con el piso volcánico compuesto por roca fracturada de las sierras circundantes.
- Las condiciones uniformes de topografía plana en la mayoría de la zona de estudio, son determinantes en la definición del ambiente hidrogeológico que esta asociado a la vulnerabilidad del acuífero.
- En la Ciénega, los niveles piezométricos registrados, son someros, esto representa una alta vulnerabilidad, sin embargo por la capacidad de atenuación, asociada a los materiales arcillosos de baja conductividad

hidráulica dentro de un acuífero semiconfinado hacen que la vulnerabilidad sea menor.

- Los valores obtenidos de vulnerabilidad SINTACS₂, están directamente relacionados con las condiciones hidrogeológicas, de tal manera, que los rangos de alta vulnerabilidad están asociados a las condiciones del acuífero libre, mientras que los rangos de vulnerabilidad media son coincidentes con áreas donde el acuífero es semiconfinado.
- El inventario de fuentes potenciales de contaminación es tan importante, como la propia determinación de la vulnerabilidad, ya que de la sobreposición de ambos, resulta el mapa de riesgo al acuífero.
- La capacidad de atenuación, asociada a los materiales arcillosos de baja conductividad hidráulica dentro de un acuífero semiconfinado hacen que en la región de estudio sólo existan algunas áreas puntuales con riesgo intermedio a la contaminación del acuífero, debido principalmente a la influencia de las áreas donde se ubican las gasolineras, descargas de las aguas residuales de las poblaciones, tiraderos a cielo abierto, etc., mientras que instalaciones como establos, agroindustrias y panteones presenten un riesgo reducido a la contaminación.
- La metodología empleada en este estudio y los resultados obtenidos pueden ayudar en los programas de prevención de la contaminación de las aguas subterráneas con la definición de áreas protegidas y el manejo del acuífero.

- La existencia de mapas de vulnerabilidad e índice de riesgo pueden apoyar en el establecimiento de estrategias de protección del agua subterránea, e identificar los acuíferos o zonas de los acuíferos, más vulnerables y establecer que actividades pueden tener un riesgo a la contaminación.

BIBLIOGRAFÍA

Agüero V. Jonathan., 2000. Análisis de Vulnerabilidad a la Contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica. Proyecto de Graduación -: Ingeniería Civil- San José. Costa Rica. 130 pp.

Al, Kuisi M. 2006. Vulnerability mapping of shallow groundwater aquifer using SINTACS model in the Jordan Valley area, Jordan. *Environ Geol* (2006) 50: 651–667.

Allan, J. F. A.; Nelson S. F. Lhur J.; S. E. Carmichael I.; M. Wopat and Wallace P.J. 1991. Pliocene - Recent rifting in SW México and associated volcanism: an exotic terrain in the making, in Dauphin, J. P., and Simoneit, B. R. T., eds., *The Gulf and the Peninsular Province of the California's: American Association of Petroleum Geologists Memoir 47*, p.425-445.

Aller, L. T. B.; J. Lehr; R. Petty and G. Hackett. 1987. DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydro geologic Setting. National Water Well Association. Dublin Ohio. EPA, Oklahoma. USA, EPA - 600/2-87-035.

Armienta, H. M. A.; R. Rodríguez C.; N. Cenicerros; F. Juárez y O. Cruz 1996. Distribution, Origin and Fate Soils in Guanajuato México. *Environmental Pollution*, Vol. 9, No. 3, p. 391-397.

Báez, A. (2002). Validación de mapas de vulnerabilidad en medios urbanos
<http://tierra.rediris.es/hidrored/ponencias/baez.html> .14/02/2008

Belmonte-Jiménez, S. I.; S. Navarro Mendoza y Julián Soto F. 1994. Informe Técnico Final del proyecto “Diagnóstico de la contaminación del sistema acuífero de los Valles Centrales de Oaxaca”, CIIDIR-OAXACA-IPN. (Inédito).

Bessouat, C.; G. Constagnino; J. De los Santos; A. Oleaga y F. Pacheco. 1999. Carta preliminar de Vulnerabilidad del Acuífero Raigón. In: II Encuentro de las Aguas. Montevideo, Uruguay.

Burrough, P. A, McDonnell R A, 1998. Principles of Geographical Information Systems 2nd edition (Oxford University Press, Oxford) 333 pp.

Canter, L.; R. Knox; D. Fairchild. 1987. Groundwater quality protection. Lewis Publishers, Inc. 562 pp.

Castro, E.; J. Tullio y C. Schulz. 1996. Vulnerabilidad del acuífero de intendente Alvear (La Pampa), Argentina. Riesgo de contaminación por actividades agropecuarias. In: 1er. Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. San Luis Potosí. México.

CEASG (Comisión Estatal de Agua y Saneamiento del Estado de Guanajuato). 1999. Estudio Isotópico para la Caracterización del Agua Subterránea en la Zona de La Muralla Guanajuato. Contrato CEAGS-APA-GTO-97-02. Estudio realizado a contrato por GEOPSA.

Caveat, M. 1990. Assessment of aquifer vulnerability to contamination. "Protezione e Gestione delle Acque Sotteranee Metodologie, Technologie e Obbietivi". Marano sul Panaro. Italy. v-3, p. 39-86

Civita, M. 1994. Le Carte Della vulnerabilita degli acquiferi all'inquinamento: Teoría & Practica. Pitágoras Editrice, Bologna. Italy. 325 pp.

Civita M. y M. De Maio. 1997. SINTACS. Un Sistema Parametrico per la Valutazione e la Cartografia della Vulnerabilità Degli Acquiferi All'inquinamento. Metodologia & Automatizzazione. Pitagora Editrice Bologna. Italy. pp 191.

Civita, M. and M. De Maio. 2000. Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico SINTACS R5, Pitagora, Bologna, Italy. 226 pp.

Civita, M.; M. De Maio; M. Farina and A. Zavatti A. 2001. Linee guida per la redazione e l'uso delle Carte Della Vulnerabilità degli: acquiferi all'inquinamento. Agenzia Nazionale per la protezione dell' Ambiente- Manual; Linne guida 4/2001; 100 pp. 1CD.

CEASG (Comisión Estatal de Agua y Saneamiento del Estado de Guanajuato). 2000. Estructuración de Mapas Temáticos de Índices de Vulnerabilidad de las Subcuencas de los Ríos Turbio y Guanajuato. Reporte Técnico, 150 pp. México. Estudio realizado a contrato por la universidad Iberoamericana, Campus León, Guanajuato, México.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2004. Informe Final. Análisis costo beneficio del programa de rehabilitación y modernización de los distritos de riego 024 Ciénega de Chapala, 045 Tuxpan, 061 Zamora y 087 Rosario Mezquite en el estado de Michoacán. México.

Cortes. B. J.; L. Samaniego. M.; A. Monroy. N.; A. López M. 2004. Vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación.

http://www.uaaan.mx/DirInv/Resul_PI. 18/02/2008

Delgado-Granados, H. and J. Urrutia – Fucugauchi. 1985. The structure of the Chapala Graben, México, EOS, Trans. Am. Geophysics. Union, Vol. 66, no. 46, p. 1090

Delgado-Granados, H. y J. Urrutia-Fucugauchi. 1986. Tectónica cuaternaria del Lago de Chapala. VIII Convención Geológica Nacional. Resúmenes, 18-19.

Delgado - Granados, H. 1991. Características del Rift de Chapala. Primer Congreso Mexicano de Mineralogía. Memorias de la Convención sobre la Evolución Geológica de México., pp. 40-41

Delgado, H.; C. Suárez y L. Valdivia. 1994. Análisis Geomorfológico de Tres Estaciones: Región Chapala, Sierra la Primavera y Complejo Volcánico del Tequila. En el Libro guía para la excursión de la tercera reunión nacional de geomorfología Guadalajara, Jalisco, Mayo., pp. 17-21.

Delgado - Granados, H.; Urrutia - Facugauchi J. ; T. Hasenaka and M. Ban. 1995. Southwestward volcanic migration in the western Trans-Mexican Volcanic Belt during the last 2 Ma. Geofís. Internacional., 34, 341-352

Díaz, E. C. and F. Mooser. (1972). Formación del Graben de Chapala. Sociedad Geológica Mexicana. Memoria II. Convención Nacional, 144-145.

Donado, L. D. (1999). Riesgo de Contaminación en Hidrogeología con Aplicaciones y Casos de Estudio Latinoamericanos. (Hydrogeology with applications and Latin-American Study Cases). Published ON LINE. Edited by Gonzalo Pulido Silva, PhD. Chapter 13. (In Spanish).

Esteller, M. y L. Espinoza. 2006. "Nitratos en el acuífero del Valle de Toluca (México): Estudio de su posible origen por contaminación urbana". In: VII Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Septiembre 2006. Asunción, Paraguay.

Environmental Agency. 1998. Policy and Practice for protection of Groundwater. (NRA), Reino Unido.

Estrada, F. E.; E. Flores T. y J.E.A.N. Michel R. 1983. Lago de Chapala. Investigación actualizada. Instituto de Geografía y Estadística., Instituto de Astronomía y Meteorología. Univ. Guadalajara. Guadalajara. México. 67 pp.

Fetter, C.W. (1999). Contaminant Hydrogeology. (2nd Ed.). Prentice-Hall, New Jersey, 500 p.

Figueroa, V. U.; M. Flores O. y M. Palomo R. 2003. Uso de biosólidos en suelos agrícolas. Folleto técnico No. 3. INIFAP-Campo Experimental Valle de Juárez. 17 p.

Figueroa, V. U.; J. Márquez R.; R. Faz C.; A. Cueto W. y Palomo G. A. 2006. Uso eficiente de estiércol como fertilizante orgánico en cultivos forrajeros. In: Memoria de la XVIII Semana Internacional de Agronomía FAZ-UJED. Venecia Durango México, pp. 7-13.

Foster, S. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution, risk and protection strategy. TNO Comm. On Hydrog Research. Proceed and Information No. 38: 69-86.

Foster, S and R. Hirata. 1988. Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data. CEPIS Tech Report. (WHO-PAHO-CEPIS). Lima, Peru.

Foster, S. and R. Hirata. 1991. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, una metodología basada en datos existentes. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima, Perú. 81 p.

García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 4ª Ed. México - Industria editorial. Universidad Autónoma de México. D.F., México. 220 p.

Garduño, V.H; J. Spinnler and E. Ceragioli. 1993. Geological and Structural study of the Chapala rift, state of Jalisco, México Geof. Int. 32 (3) pp. 487-499.

González, L. N.; A. González y M. Mardones. 2003. Evaluación de la vulnerabilidad natural del acuífero freático en la cuenca del río Laja, centro-sur de Chile. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 30 No. 1 pp. 3 - 22.

Guzmán, A. M., 1989b y 1990c. La Fauna Acuática de la Nueva Galicia. Instituto de. Limnología. Universidad de Guadalajara, Chapala, Jalisco. México. 72 p.

Hirata, R. 1994. Fundamentos e estratégias de proteção e controle da qualidade das águas subterrâneas. Estudos de casos no estado de São Paulo. (Tese de doutoramento, IGUSP, inédita).

Hirata, R. and A. Rebouças. 1999. La protección de los recursos hídricos subterráneos: una visión integrada, basada en perímetros de protección de pozos y vulnerabilidad de acuíferos. *Boletín Geológico Minero*. Vol. 110(4):423-436.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 1986. Michoacán en Síntesis. México. 44 p.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 1988. Jalisco en Síntesis. México. 57 p.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 1979. Carta Geológica. Villa Chavinda F-13-D-88 Mich. - Jal.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2005. II Censo de Población y Vivienda. México.

Johnson, C.A. and C.G. Harrison A. (1990). Geotectonic in Central México. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 64: 187-210.

Lopez, Z. M. A. 2006. Design and operation of the bio-toilet system. Water Science and Technology. Reino Unido. pp: 55-61. ISSN: 0273-1223.

Margat, J. 1968. Groundwater vulnerability to contamination. BRGM, 68 SLG 198, HYD, Orleans, France.

Macias, L. A. y A. Márquez. 2006. La región de la ciénega de Chapala. Su delimitación y dinámica urbano sectorial desde 1990: alternativas de desarrollo regional y ordenamiento territorial. In: 11º encuentro nacional de la AMECIDER en Mérida Yucatán, Noviembre de 2006.

Muñoz H.; M. Armenta A.; A. Vera y N. Cenicerros. 2004. Nitrato en el agua subterránea del Valle de Huamantla Tlaxcala México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 20 (03):91-97

National Academy Press, "Groundwater vulnerability assessment Contamination potential under conditions of uncertainty." 1993, 204 p.

Norma Oficial mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis. SEMARNAP, Diario oficial de la federación 31 de diciembre de 2002. Segunda sección 1-75pp. México.

Office of Technology Assessment (OTA). 1994. Protecting the Nation's Groundwater from Contamination, Vols. I and II. OTA – 0 - 276. OTA. Washington DC. (Chapter 2 of Volume I and Appendix A of Volume II focus on ground-water contamination and its impacts).

Ongley, E. D. 1997. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Estudio FAO Riego y Drenaje No. 55. Roma. Italia. 41-58 p.

Otalvaro, D. L. 1996. Evaluación de la Vulnerabilidad a la Contaminación de los Acuíferos de la Sabana de Bogotá. Universidad de Caldas. Facultad de Geología y Minas. Manizales. Bogotá, Colombia.

Palomo R. M. y U. Figueroa V. 2006. Caracterización de la carga nutrimental en agua de drenes agrícolas en el Valle de Juárez, Chihuahua. In: Semana Internacional de Agronomía. UJED. México. 493-498 p.

Pauwels H.; P. Lachassagne; P. Bordenave; C. Foucher J., and A. Martelat. 2001. Temporal variability of nitrate concentration in a schist aquifer and transfer to surface water. Appl. Geochemical 16:583-596

Pérez C. R. Y Pacheco A. J. 2004. Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. Ingeniería: 8-1, 33-42 pp.

Ramos Leal, J. A.; A. Ramírez G.; I. Sandoval M.; L. E. Barrón R. 2003. Uso de los mapas de riesgo a la contaminación acuífera e índices de contaminación en el diseño de redes de monitoreo para calidad del agua. In: International Workshop on Aquifer Vulnerability and Risk. Instituto de Geofísica-UNAM, CEAG, COTAS-I-VS, Municipio de Salamanca. Guanajuato, México.

Ramos, L. J. A. y R. Rodríguez C. 1998. Análisis de la Vulnerabilidad del sistema acuífero del Valle del río turbio, estado de Guanajuato, In: 4º. Latin-American Congress of Ground Water, ALSHUD, Montevideo Uruguay.

Ramos, L. J. A., 2000. Uso y Validación de Mapas de Vulnerabilidad. Tlaloc - AMH, Asociación Mexicana de Hidráulica, año VII, No. 19, 11-13 pp.

Ramos, L. J. A. 2002. Validación de mapas de vulnerabilidad acuífera e impacto ambiental: caso Río Turbio, Guanajuato. Tesis de Doctorado en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geofísica. UNAM. 104 p.

Ramos Leal, J. A., and Rodriguez C. R., 2003 "Validation Alternatives for Aquifer Vulnerability Mapping. The Turbio River Valley, México." *Geofísica Internacional*. 42:141-156

Rangel, M. M. 2001. Análisis de Vulnerabilidad en Zonas Áridas y Semiáridas con Énfasis en las Condiciones de Matape, Sonora. In: I Seminario-Taller. Protección de Acuíferos frente a la Contaminación: Metodología. Toluca, México.

Robles, C. J. and M. A. Armienta H. 2000. Natural Chromium Contamination of Groundwater at León Valley, México. *Journal of Geochemical Exploration*. 68, 167-181 pp.

Rodríguez, C. R.; J. A. Ramos L. y J. A. Mejía. 1999. Geological and Hydro geological Controls Over Organic Compounds Groundwater Supply of Salamanca, Gto. México. Proceeding. AGU. San Francisco, California.

Rodríguez C. R.; J. A Mejía; J. Berlín, M. A. Armienta H. y T. González. 2000. Estudio para la determinación del grado de alteración de la calidad del agua subterránea por compuestos orgánicos en Salamanca, Gto. CEASG, IGF-UNAM. Reporte Téc. II

Rodríguez R. C. y I. Rodríguez V. 2004. Los mapas de riesgo de contaminación acuífera en zonas urbanas. In: IV Seminario – Taller. Protección de acuíferos frente a la contaminación: Protección a la calidad del agua. Lima, Perú.

Rosas, E. J.; J. Urrutia, F. y F. Maciel. 1989. Geología del extremo oriental del graben de Chapala, breve discusión sobre su edad: zonas geotérmicas Ixtlán de los Hervores-Los Negritos. México. *Geotermia*: Vol. 5, 1, p. 3-18.

Rosas, J. G. 1991. Una Cuenca Tensional. El Graben de Chapala y Paleomagnetismo de su Porción Oriental. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Rosas E. J. 1997. Tectónica extensional en el occidente de la Faja Volcánica trans Mexicana. Tesis doctoral, postgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica-UNAM. 110 p.

Silva, T., 2002. Estudio hidrogeológico del sistema acuifero de la Ciénega de Chapala, Mich. Enfocado a una gestión sustentable, Tesis doctoral, postgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica-UNAM.150 p.

Silva, G. J. T.; R. Rodriguez C.; S. Ochoa E. y S. Lopez D. 2002. Lake Chapala and the Ciénega aquifer: Chemical evidence of hydraulic communication. Geofísica Internacional, vol. 41, Num. 1 pp. 63-74.

Silva, G. J. T.; F. Estrada G.; S. Ochoa E. y G. Cruz C. 2006. Propuesta metodológica para la ubicación de áreas de disposición de residuos sólidos urbanos. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, año/Vol. 22, número 004. pp. 147-156.

Taco, G. y R. Galarrazaga. 2002. Aportación de los sistemas de información geográficos a la protección de acuíferos. Uso de un sistema de información geográfico para determinar la vulnerabilidad de un acuífero andino de origen volcánico. Escuela Politécnica Nacional, Dpto. de Ciencias del Agua, Quito, Ecuador.

Tovar, M.; R. Rodríguez y A. Ramos. 1999. Índices DRASTIC en la planificación urbana. In: Memoria Técnica del Segundo Congreso Nacional de Aguas Subterráneas en Aguascalientes, México.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). 1993. A Review of Methods for Assessing Aquifer Sensivity and Ground Water Vulnerability to pesticide Contamination. Office of Waters (4602) 813-R-93-002.

Valcarce, O. R. M y Rodríguez, M. W. 2004. Vulnerabilidad a la Contaminación de las Aguas Subterráneas en los Acuíferos Cubanos. In: IV Seminario-Taller. Protección de Acuíferos frente a la contaminación: Protección de la Calidad del Agua. Lima, Peru.

Van Stempvoort, D.; L. Ewert and L. Wassenaar. 1995. AVI: A method for Groundwater Protection mapping in the Praire Province of Canada. PPWB Report. Hydrogeology Research Institute. No. 114, National, Saskatoon Saskatchewan, Canada.

Vrba, J. and A. Zaporozec. 1994. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. International Association of Hydrogeologists. Verlag Heinz Heise. Vol. 16. 131pp.

Waitz, P. 1906. Le volcán de Colima: México, D.F., Congreso Geológico Internacional. 10. Guide des Excursions, v. 13.28 p.

Wilson, A. R. 1991. Environmental Risk: Identification and Management, Lewis Publisher Inc.

WHO (World Health Organization). 1982. Rapid assessment of sources of air, water, and land pollution. WHO Offset Publication 62:113 p.

ANEXO 1 (SONDEOS GEOFÍSICOS)**JIQ. RSX**

Barajas 1			Chole 2			4 Esquinas 3		
	AB/2	rho[ohm*m]		AB/2	rho[ohm*m]		AB/2	rho[ohm*m]
1	1.50	7.29	1	1.50	5.58	1	1.50	6.76
2	2.00	5.22	2	2.00	4.19	2	2.00	4.16
3	2.50	4.38	3	2.50	2.82	3	2.50	3.95
4	3.50	4.21	4	3.50	2.58	4	3.50	3.93
5	4.50	3.96	5	4.50	3.80	5	4.50	4.44
6	6.00	5.08	6	6.00	4.23	6	6.00	4.80
7	8.00	5.52	7	8.00	5.02	7	8.00	5.52
8	10.00	5.49	8	10.00	6.28	8	10.00	5.49
9	10.00	7.46	9	10.00	6.22	9	10.00	7.62
10	15.00	9.14	10	15.00	7.74	10	15.00	8.79
11	20.00	9.40	11	20.00	8.14	11	20.00	9.40
12	25.00	11.76	12	25.00	7.84	12	25.00	9.80
13	25.00	10.36	13	25.00	6.97	13	25.00	8.67
14	35.00	9.42	14	35.00	6.78	14	35.00	9.42
15	45.00	9.42	15	45.00	6.28	15	45.00	10.68
16	60.00	6.73	16	60.00	6.73	16	60.00	13.47
17	80.00	8.01	17	80.00	6.00	17	80.00	16.02
18	80.00	9.89	18	80.00	7.91	18	80.00	14.84
19	100.0	6.22	19	100.0	10.10	19	100.0	17.10
20	150.0	7.03	20	150.0	5.27	20	150.0	28.14
21	200.0	6.26	21	200.0	6.26	21	200.0	37.60
						22	200.0	13.57
						23	250.0	16.74
						24	350.0	9.49

El Fortín 4			Aeropuerto 5			Cumuatillo 6		
	AB/2	rho[ohm*m]		AB/2	rho[ohm*m]		AB/2	rho[ohm*m]
1	1.50	9.98	1	1.50	4.33	1	1.50	8.80
2	2.00	8.77	2	2.00	4.10	2	2.00	8.18
3	2.50	8.43	3	2.50	4.09	3	2.50	7.95
4	3.50	8.34	4	3.50	4.69	4	3.50	7.09
5	4.50	9.04	5	4.50	4.12	5	4.50	6.03
6	6.00	11.57	6	6.00	4.23	6	6.00	6.21
7	8.00	14.06	7	8.00	5.02	7	8.00	6.53
8	10.00	13.34	8	10.00	10.99	8	10.00	3.92
9	10.00	15.55	9	10.00	7.30	9	10.00	6.68
10	15.00	15.48	10	15.00	8.44	10	15.00	9.85
11	20.00	15.04	11	20.00	6.89	11	20.00	12.53
12	25.00	14.70	12	25.00	8.82	12	25.00	14.70
13	25.00	11.31	13	25.00	8.48	13	25.00	14.89
14	35.00	10.17	14	35.00	7.91	14	35.00	15.08
15	45.00	10.68	15	45.00	8.16	15	45.00	15.08
16	60.00	12.35	16	60.00	8.98	16	60.00	19.09
17	80.00	14.01	17	80.00	8.01	17	80.00	20.02
18	80.00	10.88	18	80.00	7.91	18	80.00	21.77
19	100.0	12.44	19	100.0	9.33	19	100.0	21.77
20	150.0	17.59	20	150.0	10.55	20	150.0	24.63
21	200.0	12.53	21	200.0	12.53	21	200.0	25.07
22	200.0	12.06	22	200.0	16.58	22	200.0	24.12
23	250.0	11.95	23	250.0	14.34	23	250.0	31.09
24	350.0	14.24	24	350.0	14.24	24	350.0	42.73

Cienal 7

	AB/2	rho[ohm*m]
1	1.50	8.38
2	2.00	8.49
3	2.50	6.92
4	3.50	6.61
5	4.50	5.55
6	6.00	5.36
7	8.00	5.02
8	10.00	5.49
9	10.00	4.97
10	15.00	5.98
11	20.00	6.26
12	25.00	7.84
13	25.00	5.84
14	35.00	6.03
15	45.00	7.54
16	60.00	8.98
17	80.00	10.01
18	80.00	14.84
19	100.0	12.44
20	150.0	17.59
21	200.0	18.80
22	200.0	13.57
23	250.0	14.34
24	350.0	14.24

Retiro1

	AB/2	rho[ohm*m]
1	1.50	13.43
2	2.00	13.25
3	2.50	14.05
4	3.50	15.44
5	4.50	14.92
6	6.00	14.97
7	8.00	15.07
8	10.00	15.70
9	15.00	17.06
10	20.00	19.98
11	25.00	21.97
12	35.00	34.18
13	45.00	36.86
14	60.00	38.86
15	80.00	46.82
16	100.0	55.68
17	150.0	78.74
18	200.0	98.18
19	250.0	92.38
20	350.0	121.1
21	450.0	120.2

Análisis Textural

No.	X	Y	% Arena	% Limo	% Arcilla	Clase
1	758862	2228449	17,76	21,24	61	Arcilla
2	755886	2233114	21	17	62	Arcilla
3	751926	2233490	20	16	64	Arcilla
4	747788	2237311	24,76	32	43,2	Arcilla
5	755577	2238312	2,76	9,64	87,6	Arcilla
6	761301	2226208	10,76	22,64	66,6	Arcilla
7	747382	2232936	8	9	83	Arcilla
8	757701	2234400	18,76	20,24	61	Arcilla
9	746275	2232218	14	20	66	Arcilla
10	735079	2223818	19,76	18,24	62	Arcilla
11	734296	2225141	25,48	30,34	44,18	Arcilla
12	749514	2220300	11,76	19,64	68,6	Arcilla
13	756628	2231930	24,32	23,33	52,35	Arcilla
14	745750	2234000	15,12	14	70,88	Arcilla
15	751018	2234204	8,12	25	66,88	Arcilla
16	73500	2237500	6,76	30,04	63,2	Arcilla
17	746665	2229828	11,12	27	61,88	Arcilla
18	757602	2233176	13,31	26,19	60,5	Arcilla
19	763441	2227712	20,48	31,34	48,18	Arcilla
20	747500	2237500	25,12	32	42,88	Arcilla

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA EN LA CIÉNEGA DE CHAPALA, MICHOACÁN.

21	757924	2233084	14,76	18,04	67,2	Arcilla
22	742805	2232416	5	15	80	Arcilla
23	757087	2233084	14,2	20,04	65,76	Arcilla
24	743087	2233990	9,76	14,28	76	Arcilla
25	744631	2231275	11,12	22	66,88	Arcilla
26	745200	2229650	23,47	28,33	48,2	Arcilla
27	743450	2232900	9,76	11,28	79	Arcilla
28	744000	2233500	10,76	10,64	78,6	Arcilla
29	743650	2234600	18,76	20,24	61	Arcilla
30	743055	2235882	9,76	17,04	73,2	Arcilla
31	746850	2237400	14,76	16,64	68,6	Arcilla
32	745750	2234350	12,4	28	59,6	Arcilla
33	748950	2231000	5,12	19	75,88	Arcilla
34	747200	2230500	15,12	27	57,88	Arcilla
35	746400	2229600	13,12	28	58,88	Arcilla
36	745900	2230850	9,76	15,04	75,2	Arcilla
37	744537	2234245	6,76	30,04	63,2	Arcilla
38	749200	2233100	12,76	17,64	69,6	Arcilla
39	750555	2233419	19,12	23	57,88	Arcilla
40	752100	2233150	9,76	18,28	72	Arcilla
41	750500	2232400	11,12	22	66,88	Arcilla
42	747780	2229564	14,76	19,04	66,2	Arcilla
43	750650	2229900	9,76	14,28	76	Arcilla
44	750700	2231250	22,04	18	60	Arcilla

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA EN LA CIÉNEGA DE CHAPALA, MICHOACÁN.

45	755750	2233500	14	20	66	Arcilla
46	761141	2236164	12,4	28	59,6	Arcilla
47	753379	2227033	19,47	36,33	44,2	Arcilla
48	763150	2229300	18	22	60	Arcilla
49	763400	2227450	14	20	66	Arcilla
50	764600	2226650	19,48	27,34	53,18	Arcilla
51	762000	2228300	13,12	34	52,88	Arcilla
52	760850	2225950	25,4	23,35	51,2	Arcilla
53	760250	2225700	19,76	18,24	62	Arcilla
54	744250	2227150	9,76	21,28	69	Arcilla
55	742600	2229100	2,76	9,64	87,6	Arcilla
56	743450	2228900	12,12	12	75,88	Arcilla
57	740221	2231493	11,46	22,34	66,2	Arcilla
58	742586	2224140	13,12	28	58,88	Arcilla
59	742492	2224550	25,12	30	40,88	Arcilla
60	739100	2228950	14,76	18,04	67,2	Arcilla
61	735356	2229440	16,2	22,04	61,76	Arcilla
62	734251	2227193	9,76	14,28	76	Arcilla
63	739200	2225650	11,12	27	61,88	Arcilla
64	740535	2223918	10	13	77	Arcilla
65	736150	2229000	27,12	30	42,88	Arcilla
66	738950	2221550	19,76	18,24	62	Arcilla
67	738552	2223694	6,76	30,04	63,2	Arcilla
68	741100	2221900	8	21	71	Arcilla

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA EN LA CIÉNEGA DE CHAPALA, MICHOACÁN.

69	742100	2223500	12,76	20,64	66,6	Arcilla
70	746100	2225200	8	16	76	Arcilla
71	752300	2221400	5,12	19	75,88	Arcilla
72	749900	2219650	15,76	18,28	66	Arcilla
73	752542	2216419	15,48	20,34	64,18	Arcilla
74	747665	2213917	15,76	19,04	65,2	Arcilla
75	754662	2240622	14,3	19,18	66,52	Arcilla
76	754450	2239800	12,76	20,04	67,2	Arcilla
77	756682	2237749	14,76	18,64	66,6	Arcilla
78	757150	2239800	2,76	9,28	88	Arcilla
79	760773	2233664	18,76	20,24	61	Arcilla
80	757100	2235200	9,76	17,04	73,2	Arcilla
81	755746	2234325	12,76	19,64	67,6	Arcilla
82	752600	2235400	10,76	16,64	72,6	Arcilla
83	753850	2239850	9,76	11,28	79	Arcilla
84	749500	2211000	13,48	20,34	66,18	Arcilla
85	742700	2212450	24,48	26,24	49,28	Arcilla
86	742415	2214198	25,4	23,35	51,2	Arcilla
87	741817	2212917	21,47	38,33	40,2	Arcilla
88	740444	2212741	8,76	11,64	79,6	Arcilla
89	739160	2214578	24,76	32	43,2	Arcilla
90	739287	2216769	25,12	32	42,88	Arcilla
91	742314	2237873	13,12	22	64,88	Arcilla
92	743960	2236930	19,72	20,08	60,2	Arcilla

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA EN LA CIÉNEGA DE CHAPALA, MICHOACÁN.

93	743143	2238238	7,12	16	76,88	Arcilla
94	743972	2238543	14,76	16,64	68,6	Arcilla
95	744569,6	2238397	8	16	76	Arcilla
96	744213	2237906	14	20	66	Arcilla
97	745703,3	2237641	14,76	19,28	66	Arcilla
98	746605,4	2237641	22,4	26	51,6	Arcilla
99	747726,9	2238238	5	15	80	Arcilla
100	748726	2238596	9,76	15,04	75,2	Arcilla
101	748702,1	2239592	25,12	32	42,88	Arcilla
102	749226,3	2240201	26,4	36	37,6	Migajón arcilloso
103	750140,5	2240725	13,12	34	52,88	Arcilla
104	750945	2240802	25,48	30,34	44,18	Arcilla

Anexo 2. Datos altimétricos de la ciénega de Chapala

Punto	X	Y	Alt.
1	740400	2231350	1523
2	740650	2230000	1521,9
3	740600	2229450	1522,2
4	740800	2228800	1522,2
5	741300	2227950	1522,2
6	741650	2226700	1522,9
7	741950	2226050	1523,2
8	742750	2224100	1523,4
9	743300	2222900	1523
10	743650	2222600	1523,5
11	745700	2221200	1500,7
12	747350	2220100	1522,4
13	749450	2218750	1522,4
14	750450	2218100	1522,5
15	746450	2225650	1530
16	745800	2224850	1525,5
17	746000	2222800	1523,5
18	747600	2222000	1523,3
19	750300	2221400	1523,4
20	748700	2222850	1525
21	752100	2220100	1523,3

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA EN LA CIÉNEGA DE CHAPALA, MICHOACÁN.

22	753200	2220450	1525,8
23	753150	2218650	1524,6
24	751950	2218250	1522,7
25	753050	2218000	1523,9
26	753100	2216850	1525,4
27	753300	2216050	1530,9
28	735000	2229250	1525,3
29	735100	2228450	1525
30	724400	2227050	1524,8
31	734700	2226400	1524,5
32	734400	2224650	1524,6
33	735300	2223400	1524,6
34	736750	2223300	1524,4
35	738350	2223450	1524,5
36	740000	2223250	1524,9
37	740600	2223250	1524,5
38	740800	2223250	1543,5
39	741050	2223550	1524,3
40	740650	2223600	1524,2
41	741200	2223150	1523,6
42	741150	2221600	1524,5
43	739850	2222650	1526
44	741150	2221000	1525,8
45	740150	2220400	1526,5

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA EN LA CIÉNEGA DE CHAPALA, MICHOACÁN.

46	740800	2218500	1524,6
47	742050	2218000	1524,2
48	743400	2216100	1524,1
49	744350	2217250	1523,2
50	745600	2216250	1523,8
51	746750	2215500	1524
52	748450	2215600	1524,1
53	749600	2215300	1524,4
54	750450	2215050	1524,1
55	750450	2214550	1525,5
56	750400	2214400	1543
57	749600	2212450	1535
58	749400	2212500	1532,7
59	747950	2213600	1527,4
60	746800	2214350	1524,6
61	746900	2213700	1545
62	747100	2214100	1545
63	749750	2214600	1526,7
64	743100	2214600	1525,3
65	742750	2210800	1529,6
66	742700	2212850	1532,2
67	742750	2211100	1546,2
68	742150	2213800	1533,4
69	740150	2214200	1570

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA EN LA CIÉNEGA DE CHAPALA, MICHOACÁN.

70	740050	2211950	1543,9
71	749900	2211000	1547,9
72	749000	2211500	1535,1
73	739050	2213100	1540,7
74	738400	2211800	1588
75	739000	2217200	1526,8
76	738400	2219250	1533
77	739050	2219250	1527,8
78	747000	2217200	1523,6
79	746550	2211900	1526,7
80	746700	2213200	1525,8
81	740400	2221450	1526,1
82	750400	2219500	1522
83	749950	2219400	1522
84	745500	2226450	1523,1
85	745400	2227500	1522,5
86	746750	2227900	1522,9
87	747750	2227500	1521,9
88	747950	2226450	1524,7
89	746000	2226100	1550
90	747000	2228150	1521,1
91	747900	2229100	1521,6
92	748150	2229950	1522,2
93	746300	2229500	1522,4

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA EN LA CIÉNEGA DE CHAPALA, MICHOACÁN.

94	745600	2228150	1521,7
95	744950	2228150	1522,5
96	744950	2228100	1521
97	748700	2230200	1523,3
98	749700	2231650	1524,8
99	750400	2231700	1523,8
100	748800	2233150	1523,1
101	747800	2231050	1523,2
102	744700	2231650	1522,3
103	751050	2234100	1523
104	749300	2235850	1523,3
105	750150	2234200	1522,9
106	751000	2235850	1522,3
107	751250	2234900	1523
108	754150	2234700	1523
109	752000	2235850	1523,5
110	752100	2240400	1523,8
111	752000	2241300	1523,7
112	752050	2239000	1522,6
113	752000	2238050	1521,4
114	754250	2238500	1523,1
115	752000	2237300	1521,3
116	751900	2236450	1521,4
117	748750	2229550	1534

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA EN LA CIÉNEGA DE CHAPALA, MICHOACÁN.

118	749200	2229400	1522,3
119	749100	2229850	1523
120	749200	2228150	1521,2
121	752350	2228300	1522,2
122	747750	2234600	1523
123	746350	2234900	1522,6
124	751300	2228150	1522,1
125	753500	2228150	1521,6
126	754400	2229150	1522,4
127	736950	2228300	1522,6
128	736350	2228900	1560
129	737550	2229400	1522,7
130	739000	2229400	1522,2
131	739150	2229200	1545
132	739450	2228350	1521,9
133	758500	2232350	1521
134	757600	2232350	1522,8
135	760000	2232400	1522,2
136	751150	2241300	1523,1
137	763400	2237300	1524,9
138	764150	2236550	1523,7
139	758200	2235000	1522,8
140	759550	2234900	1522,8
141	759850	2234150	1523,4

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA EN LA CIÉNEGA DE CHAPALA, MICHOACÁN.

142	761100	2235400	1522,4
143	758200	2235000	1523,2
144	745600	2237500	1524,4
145	745300	2236900	1522,8
146	745450	2236100	1523,6
147	748600	2239000	1524
148	751300	2239000	1523,2
149	749100	2239650	1523,6
150	747950	2238300	1524,8
151	746800	2235850	1523,4
152	748200	2235950	1523,2
153	748150	2237050	1523,4
154	764250	2231450	1523,8
155	764300	2230600	1540
156	762100	2237750	1523,6
157	761450	2236700	1522,2
158	761300	2236200	1522,2
159	760950	2237900	1522,8
160	760400	2237550	1521,8
161	759200	2236450	1522,4
162	757400	2237150	1522,6
163	757400	2240200	1522,8
164	757700	2237150	1522
165	758450	2239100	1523,2

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA EN LA CIÉNEGA DE CHAPALA, MICHOACÁN.

166	759250	2238100	1522,2
167	759650	2238950	1522,7
168	763550	2233700	1523,6
169	764250	2232300	1524
170	765300	2234150	1524,2
171	763450	2232500	1523,8
172	744050	2237800	1523,4
173	742150	2237400	1523
174	744100	2236750	1524
175	742200	2237350	1522,8
176	742300	2236350	1522,1
177	765050	2236150	1524,7
178	764550	2235450	1523,6
179	764600	2235450	1524,6
180	768150	2234200	1525,7
181	767400	2233950	1525,4
182	766900	2234350	1525
183	754800	2240550	1524,8
184	755650	2240550	1524
185	757100	2240200	1523,4
186	759700	2225750	1523,2
187	759550	2228400	1523,2
188	757450	2229000	1522,6
189	757500	2229000	1522,8

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA EN LA CIÉNEGA DE CHAPALA, MICHOACÁN.

190	753900	2232500	1523,4
191	752400	2232750	1523,4
192	752400	2233900	1522,7
193	752450	2230350	1522,6
194	753450	2230750	1523
195	744200	2235400	1523
196	744150	2234150	1523,2
197	742600	2234100	1523
198	756500	2232250	1523,4
199	754800	2232750	1523,6
200	757050	2233850	1523
201	744200	2233600	1522,8
202	742800	2233650	1522,8
203	745100	2233200	1522,4
204	742750	2232000	1522,8
205	745150	2232200	1523
206	749050	2237250	1523,4
207	749200	2236700	1523
208	749700	2240000	1523,8
209	755800	2238650	1522,6
210	755650	2238150	1522,3
211	757100	2238050	1522
212	755100	2238200	1522,6
213	755250	2229100	1522,3

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA EN LA CIÉNEGA DE CHAPALA, MICHOACÁN.

214	756450	2228200	1522,1
215	764150	2228200	1524,5
216	761650	2228450	1523
217	761800	2228300	1530
218	762000	2228450	1524
219	761800	2228650	1523,8
220	762800	2230000	1523,8
221	762050	2230000	1523,6
222	757100	2231200	1522,8
223	755800	2231050	1522,4
224	756000	2235150	1523
225	756200	2234850	1527
225	756550	2234500	1522,6
226	755400	2234600	1523,4
227	760050	2230800	1522
228	758700	2230600	1523
229	759150	2231800	1522,2
230	757050	2231500	1523
231	747450	2233600	1523,2
232	747150	2232250	1523,5
233	746600	2233000	1523,2
234	739000	2221750	1528,8
235	738450	2220750	1530
236	739000	2220150	1529,6

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA EN LA CIÉNEGA DE CHAPALA, MICHOACÁN.

237	738150	2219800	1533
238	757500	2226000	1522,4
239	758500	2225400	1523,5
240	759200	2225150	1538
241	755000	2226400	1523
242	756000	2227550	1523,6
243	757350	2227350	1540
244	757150	2226550	1522
245	754800	2226150	1525,3
246	754700	2227100	1521,9
247	757400	2227350	1522,6
248	761900	2225950	1555
249	753800	2226200	1522,1
250	752100	2227150	1521,8
251	752350	2226550	1528,9
252	753400	2226400	1527
253	749200	2226450	1540
254	750350	2226250	1539,8
255	750200	2226900	1528,8
256	750250	2227000	1578,2
257	750350	2227150	1522
258	749250	2227400	1521,4
259	750500	2227450	1522
260	764250	2227400	1528,4

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA EN LA CIÉNEGA DE CHAPALA, MICHOACÁN.

261	763600	2226400	1524
262	762200	2226250	1523,4
263	762300	2227750	1523,4
264	763550	2226400	1523,8
265	760800	2227250	1532,2
266	759000	2226350	1522
267	758050	2227250	1524,6
268	757350	2227250	1524,4
269	744550	2227400	1522,6
270	744600	2226150	1523
271	744100	2226050	1524,4
272	744450	2226250	1524,6
273	763750	2225700	1525
274	762900	2225500	1545
275	762900	2225900	1523,2
276	756850	2237550	1522,2
277	756450	2236700	1522,4
278	754850	2236000	1522
279	762800	2230500	1524,4
280	763400	2232150	1523,6
281	761300	2230850	1523
282	760700	2230850	1523
283	762050	2233850	1522,6
284	760900	2234050	1523

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA EN LA CIÉNEGA DE CHAPALA, MICHOACÁN.

285	760650	2233150	1522,4
286	760500	2232450	1522,2
287	739150	2225800	1524,2
288	737800	2226750	1524
289	737200	2226950	1524,2
290	736600	2227300	1524,2
291	751700	2216450	1522,6
292	752150	2216000	1522,8
293	751750	2215500	1524,7
294	754300	2218200	1550
295	753200	2219500	1523,4
296	754000	2220350	1550
297	751650	2221750	1525
298	750100	2220250	1522
299	750050	2219950	1522
300	750300	2219900	1522
301	750150	2219550	1522
302	749900	2219600	1522
303	749300	2220950	1522,8
304	750000	2220450	1523,4
305	748900	2220150	1522,6
306	750000	2222150	1535
307	749150	2222600	1525

Anexo 3. Geoposicionamiento de sitios

1	Gasolinera	738817	2212973	37	Gasolinera	753628	2226301
2	Panteón	738719	2213131	38	Panteón	752681	2220438
3	Gasolinera	738882	2213233	39	Gasolinera	751657	2215068
4	Gasolinera	738900	2215707	40	Panteón	750781	2214695
5	Gasolinera	738927	2217052	41	Panteón	748705	2212957
6	Gasolinera	238908	2217659	41	Gasolinera	749855	2211009
7	Gasolinera	738899	2217875	42	Panteón	742261	2211186
8	Panteón	739170	2219189	43	Descarga	739400	2212350
9	Gasolinera	738906	2219744	44	Descarga	743150	2212700
10	Gasolinera	738910	2220038	45	Descarga	756100	2235100
11	Gasolinera	738910	2220395	46	Descarga	762600	2230500
12	Gasolinera	739225	2221959	47	Descarga	768150	2232950
13	Gasolinera	744555	2225229	48	Descarga	761600	2228300
14	Tiradero	750165	2221764	49	Descarga	753400	2226550
15	Tiradero	741461	2225847	50	Descarga	750000	2227200
16	Tiradero	742100	2225859	51	Descarga	748000	2229300
17	Establo	742542	2224169	52	Descarga	745650	2226400
18	Establo	742707	2223749	53	Descarga	746700	2214400
19	Agroindustria	741935	2223635	54	Descarga	756100	2235100
20	Establo	739212	2225494	55	Descarga	750850	2233500
21	Gallinero	738249	2226553	56	Descarga	751250	2215550
22	Panteón	734640	2227420	57	Descarga	744100	2233950
23	Establo	743394	2224527	58	Descarga	759100	2225600

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA EN LA CIÉNEGA DE CHAPALA, MICHOACÁN.

24	Panteón	746267	2225468	59	Descarga	762050	2226150
25	Panteón	756615	2235259	60	Descarga	756200	2226000
26	Tiradero	746161	2237627	61	Descarga	751250	2215550
27	Panteón	745464	2237580	62	Descarga	753450	2216350
28	Establo	745733	2237747	63	Descarga	753200	2220150
29	Gallinero	750781	2240913	64	Descarga	748500	2222900
30	Tiradero	752377	2241154	65	Descarga	752100	2235950
31	Gasolinera	755750	2241989	66	Descarga	747800	2238100
32	Panteón	755973	2242094	67	Descarga	739850	2219050
33	Gasolinera	755973	2242094	68	Descarga	740600	2216600
34	Panteón	756354	2225943	69	Descarga	739400	2227400
35	Panteón	755682	2225998	70	Descarga	749400	2212950
36	Tiradero	752314	2227247	71	Descarga	738600	221750