

**Este artículo puede ser usado únicamente para uso personal o académico. Cualquier otro uso requiere permiso del autor o editor.**

**El siguiente artículo fue publicado en *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(4): 235-248 (2013); y lo puede consultar en <http://www.revistascca.unam.mx/rica>**

## APLICACIÓN DEL MÉTODO SINTACS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA EN LA CUENCA DEL RÍO DUERO, MICHOACÁN, MÉXICO

Francisco ESTRADA GODOY<sup>1,2</sup>, José Teodoro SILVA GARCÍA<sup>2\*</sup>, Salvador OCHOA ESTRADA<sup>2</sup>, Rodrigo MONCAYO ESTRADA<sup>2</sup>, Gustavo CRUZ-CÁRDENAS<sup>2</sup>, Fabián VILLALPANDO BARRAGÁN<sup>2</sup>, Alfredo RAMOS LEAL<sup>3</sup> y Jaime NAVA VELÁZQUEZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Estudiante de Doctorado en Ciencias en Horticultura, Posgrado del Instituto de Horticultura, Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, 56230 Texcoco, Estado de México, México

<sup>2</sup> Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Instituto Politécnico Nacional, Michoacán, COFAA, Justo Sierra 28, 59510 Jiquilpan, Michoacán, México

<sup>3</sup> Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C., Presa San José 2055 Lomas 4a. Sección, 78216, San Luis Potosí, SLP, México

\*Autor responsable: tsilva09@hotmail.com

*(Recibido enero 2013, aceptado julio 2013)*

Palabras clave: acuífero, sensores remotos, SIG, hidrogeología

### RESUMEN

El concepto de vulnerabilidad acuífera se define como la probabilidad de que el agua subterránea se contamine con alguna sustancia en concentraciones por arriba de la normatividad para agua de consumo humano o de los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud. Aunque inicialmente se le relacionaba sólo a aspectos cualitativos de contaminación, actualmente puede incluir aspectos cuantitativos, mediante la aplicación de diferentes métodos. El objetivo de este estudio, fue determinar los niveles de vulnerabilidad acuífera para el agua subterránea en la cuenca del río Duero, Michoacán, mediante la utilización del método SINTACS. La cuenca, se localiza al noroeste del estado de Michoacán, dentro de la Región Hidrológica No. 12, Lerma-Santiago, específicamente en la Zona Hidrológica Río Lerma-Chapala. En la región, prevalece un ambiente volcánico sedimentario, destacando estructuras de tipo estratovolcán, depósitos aluviales y lacustres. La economía se sustenta en la producción de frutillas, muy demandante del recurso agua, lo cual hace que la extracción de agua subterránea se realice mediante la operación de aproximadamente 805 pozos, generando sobrexplotación en los valles principales. El comportamiento hidráulico de los acuíferos en la cuenca varía de libre a semiconfinado. Se determinaron primordialmente dos niveles de vulnerabilidad: baja, en el rango de 80-105 puntos, que cubre la mayor parte de la cuenca (50 %) y que se asocia con un acuífero en condiciones de semiconfinado constituido por los materiales arcillosos de baja conductividad hidráulica; y vulnerabilidad media (105-140 puntos) con el 25 % del área, para acuíferos en condición hidrogeológica de libres, asociados a depósitos aluviales. Sólo existen pequeñas porciones con vulnerabilidad muy baja y alta. La obtención de información enfocada hacia este ámbito, coadyuva en el establecimiento de políticas públicas orientadas a la protección del agua subterránea, zonificando sitios potenciales a ser contaminados por actividades antrópicas no planificadas.

Key words: acuífero, remote sensing data, GIS, hidrogeología

### ABSTRACT

The concept of aquifer vulnerability is defined as the probability of groundwater contamination by any substance in concentrations above the values established in the official Mexican Norms for drinking water or the values recommended by the World Health Organization. Although the concept was initially related to qualitative contamination aspects, nowadays it can include quantitative elements, by applying various methods. The main aim of this study was to determine the levels of aquifer vulnerability to groundwater in the Duero river watershed, Michoacán, by using the SINTACS method. The watershed is located northwest of the state of Michoacán, at the Hydrological Region No. 12, Lerma-Santiago, specifically in the Río Lerma-Chapala Hydrologic Area. In the region, volcanic sedimentary environment prevails, highlighting stratovolcano type structures, as well as alluvial and lacustrine deposits. The hydraulic behavior of the basin aquifers varies from free to semi-confined. The economy is based on the production of berries, a cultivation highly water demanding, aspects that promotes groundwater extraction by operating approximately 805 wells, and generating overexploitation in the main valleys. We determined two principal vulnerability levels: (1) low, 80-105 points, covering most of the watershed (50 %) and associated with semi-confined aquifer conditions and related to low hydraulic conductivity clay materials and (2) medium (105-140 points) in 25 % of the surface for aquifers in free hydrogeological condition, associated with alluvial deposits. Very low and high vulnerabilities were detected in few zones. Information focused on this area, helps the establishment of public policies for the protection of groundwater, by zoning potential sites to be contaminated as results of unplanned anthropogenic activities.

### INTRODUCCIÓN

La política hídrica se ha diseñado para lograr que el país cuente con agua en cantidad y calidad suficiente, se reconozca su valor estratégico, se utilice de manera eficiente y se protejan los cuerpos de agua para preservar el ambiente y garantizar un desarrollo sustentable (SEMARNAT 2010).

Sin embargo, podría decirse que la totalidad de las cuencas hidrológicas de México se encuentran en mayor o menor medida con verdaderos problemas de contaminación. Ejemplo de ello, es la cuenca del río Lerma considerada la más contaminada de México (Pacheco-Vega 2007). La cuenca del río Duero, localizada dentro de la Región Hidrológica No. 12, Lerma-Santiago, específicamente en la Zona Hidrológica Río Lerma-Chapala no escapa de esta situación. Problemas relacionados con la pérdida de suelo, disminución de la cubierta vegetal, tala clandestina de bosques, contaminación de suelos y acuíferos por residuos sólidos, descarga de aguas negras directas al río y desaparición de fauna silvestre, son el común denominador (CONAGUA 2009).

Dado el deterioro continuo en la calidad del agua superficial, el aprovechamiento del agua subterránea

en la cuenca se ha incrementado considerablemente. El Registro Público de Derechos de Agua (REPD) de la CONAGUA, asienta la existencia de un total de 100 pozos para el año 2000, pasando en el 2012 a 805, con volúmenes totales de extracción anual de aproximadamente 120 Mm<sup>3</sup>. En la cuenca, los acuíferos presentan condiciones de libre a semiconfinado, lo cual les hace altamente vulnerable a actividades antrópicas (CONAGUA 2002).

Las premisas anteriores son el soporte para impulsar la generación de mapas de vulnerabilidad acuífera a nivel de cuenca, a efecto de que los organismos gubernamentales encargados de su administración y manejo, consideren su eficacia para estructurar esquemas de explotación y de desarrollo urbano planificado. Las evaluaciones de vulnerabilidad del agua subterránea, mediante la aplicación de diversos métodos, 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, Draoui *et al.* 2008).

Existen diferentes metodologías que son utilizadas en la valoración de la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación. La mayoría de ellas coinciden en determinar la vulnerabilidad en fun-

ción de las características intrínsecas del medio. Se habla entonces de vulnerabilidad intrínseca, que Foster y Hirata (1991) definen como la sensibilidad del acuífero para ser adversamente afectado por una carga contaminante impuesta. En México y América Latina los métodos más utilizados son: DRASTIC, SINTACS, GOD y AVI (Castro *et al.* 1996, Báez 2002). En general, cada uno de ellos es similar, siendo la cantidad de variables su diferencia. Estos métodos 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).

El método SINTACS es un derivado del DRASTIC, ambos, 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. En otras palabras, estos métodos definen rangos para cada uno de los factores que emplean y además, asignan un peso en función de la importancia relativa de ellos. 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 probabilidad de que el acuífero sea contaminado (Aller *et al.* 1987).

En general, puede destacarse que a los métodos DRASTIC y SINTACS se les critica la cantidad de variables que emplean, la dependencia entre algunas de ellas y que las ponderaciones que realiza a las mismas pueden ser subjetivas (Napolitano y Fabbri 1996, Valcarse y Rodríguez 2004) pero ambos métodos son más completos y robustos que los otros. En este trabajo se decidió utilizar el SINTACS, ya que considera la infiltración efectiva, o la precipitación efectiva que llega al acuífero, lo que hace necesario la cuantificación de datos climáticos (precipitación, temperatura y evapotranspiración) y conocer la condición geológica superficial (Civita y De Maio 2000). GOD es un método relativamente fácil de aplicar, sobre todo en condiciones de escasa información, ya que sólo considera la ocurrencia del agua subterránea, la litología del acuífero y la profundidad del nivel del agua subterránea (Draoui *et al.* 2008). AVI es una metodología sencilla pero que requiere conocer el espesor y la conductividad hidráulica vertical de las capas que sobreyacen al acuífero (Valcarse y Rodríguez 2004).

En el "1st International Workshop Aquifer Vulnerability and Risk" (2003) llevado a cabo en la ciudad de Salamanca, Guanajuato, México, se expusieron numerosos trabajos sobre el tema de vulnerabilidad de acuíferos. Una de sus conclusiones se refiere al

tema de los métodos, mismos que 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.

El objetivo principal de este estudio fue determinar los niveles de vulnerabilidad acuifera para la cuenca del río Duero, utilizando el método SINTACS, justificándose con ello, acciones de prevención de contaminación durante los procesos de desarrollo económico y social en la región.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La cuenca del río Duero, con una superficie de 2531.3 km<sup>2</sup>, se localiza al noroeste del estado de Michoacán, delimitada por las coordenadas 19° 40' y 20° 15' latitud norte y 101° 45' y 102° 45' longitud oeste a una altitud media de 2,000 msnm. El río Duero nace cerca del poblado de Carapan, pasa por el valle de Zamora y se une al río Lerma en los límites estatales de Michoacán y Jalisco (**Fig.1**).



**Fig. 1.** Mapa de localización de la cuenca del río Duero, Michoacán, México

La reducción de los caudales escurridos por el río de La Laja en Guanajuato, han contribuido a la disminución de las aportaciones del río Lerma al Lago de Chapala. Esto hace que el río Duero sea el único afluente continuo que alimenta este lago (CONAGUA 2009).

Se aplicó el método SINTACS, para medir el grado de vulnerabilidad al que puede estar sujeto el acuífero por actividades naturales o antrópicas (Ci-

vita y De Maio 2000). Este consiste en un análisis por cuadrantes de 0.25 km<sup>2</sup>, de los siete factores del método: profundidad del nivel piezométrico (S); infiltración efectiva (I); capacidad de atenuación de la zona no saturada (N); tipo de suelo (T); características hidrogeológicas del acuífero (A); conductividad hidráulica (C) y pendiente (S<sub>2</sub>).

Los datos utilizados para el cálculo de cada factor se detallan a continuación:

La profundidad del nivel piezométrico (factor S) se obtuvo con respecto al nivel del terreno y representa el espesor de los depósitos que el flujo contaminante tiene que atravesar antes de alcanzar el acuífero. En este trabajo se realizó una campaña de medición de niveles piezométricos en 105 pozos profundos durante el mes de mayo de 2010, utilizando una sonda eléctrica portátil.

La infiltración (factor I) se puede obtener por dos métodos. El primero, mediante el cálculo del balance hidrogeológico, que da como resultado la infiltración eficaz en mm/año y el segundo, calculando la precipitación eficaz (Q) en cada elemento de la retícula, utilizando la ecuación  $Q = P - E_r$  (mm/año), donde P es la precipitación y E<sub>r</sub> la evapotranspiración real. Los valores obtenidos se multiplican por el índice  $\chi$  reportado por el método correspondiente al tipo de suelo. En este trabajo, la infiltración se calculó mediante la ecuación:  $I = Q \times \chi$  (mm/año), donde Q = precipitación eficaz;  $\chi$  = coeficiente de infiltración potencial (Civita y De Maio 2000). El valor de Q, está en función de la temperatura y precipitación obtenidas de 10 estaciones meteorológicas (Purépero, Carapan, Zamora, Orandino, Chaparaco, Adjuntas, Urepetiro, San Cristóbal, Cumuato y Cumuatillo) del periodo 1970-1990.

Para el factor N (capacidad de atenuación de la zona no saturada), se obtuvo información de la carta geológica reportada por Garduño *et al.* (1999) y se realizó una correlación de la litología predominante y tablas proporcionadas por el método SINTACS.

La obtención del valor para el tipo de suelo (factor T), se soportó en cartas edafológicas (INIFAP-CONABIO 1995) y en la construcción de un mapa edafológico de la cuenca, realizando interpolaciones de las variables de los puntos de muestreo con el método de inverso de la distancia. Para obtener los mapas de las variables de suelos, se emplearon valores de cada una de ellas de los puntos de muestreo distribuidos al azar en el área de estudio. Se utilizó el método de IDW de ArcGis<sup>®</sup> como algoritmo de interpolación.

El factor A (características hidrogeológicas del acuífero), se definió principalmente con base en la información de cortes litológicos de pozos piloto de

la cuenca y valoraciones hidrogeológicas reportadas para la región (CONAGUA 2002, 2009).

Los datos de conductividad hidráulica (factor C) se obtuvieron por correlación directa con materiales cuyos valores son conocidos y que ofrecen similitud con el tipo de litología presente en la cuenca (Civita y De Maio 2000).

Para el parámetro S<sub>2</sub> (factor pendiente), se empleó el modelo digital de elevación del terreno y se generó el mapa de pendientes para el área de estudio.

El índice de vulnerabilidad acuífera SINTACS, se determinó aplicando la siguiente expresión (Civita y De Maio 2000):

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

Donde: I es el índice de vulnerabilidad SINTACS; P (1,7) es el puntaje de cada uno de los factores y W (1, N) son los pesos respectivos. La obtención de los valores de cada factor, se basa en los lineamientos establecidos por el método, mostrados en la **figura 2**, y en donde la puntuación de los factores varía de 1 a 10.

Para la asignación del peso (W) respectivo de cada factor, el método SINTACS considera en particular cinco condiciones específicas, asociadas con el nivel de desarrollo socio ambiental de una región y algunos aspectos hídricos; los mismos son: impacto normal (IN), impacto relevante (IR), drenaje (D), cástico (C) y fracturamiento (F). El puntaje del peso es distinto para cada condición, pero en un rango de 1 a 5 (**Cuadro I**). Para definir dentro de la cuenca cada condición específica se realizó un análisis de datos de sensores remotos, apoyados principalmente con cartas edafológicas (INIFAP- CONABIO 1995).

La vulnerabilidad acuífera (**Cuadro II**), está constituida por seis niveles, en un rango que varía de 26 a 260 puntos.

El proceso de la información implicó en cada caso, algebra de mapas, para obtener como producto final un mapa paramétrico. Se implementó ArcGis de ESRI<sup>®</sup> para la discretización de áreas, con los siguientes módulos y extensiones: Spatial Analyst, Geostatistical y 3D Analyst. El índice de vulnerabilidad acuífera SINTACS, resulta de la suma de los factores considerados.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se identificaron en la cuenca tres condiciones específicas: fracturamiento (F), impacto relevante (IR) e impacto normal (IN) (**Fig. 3**).

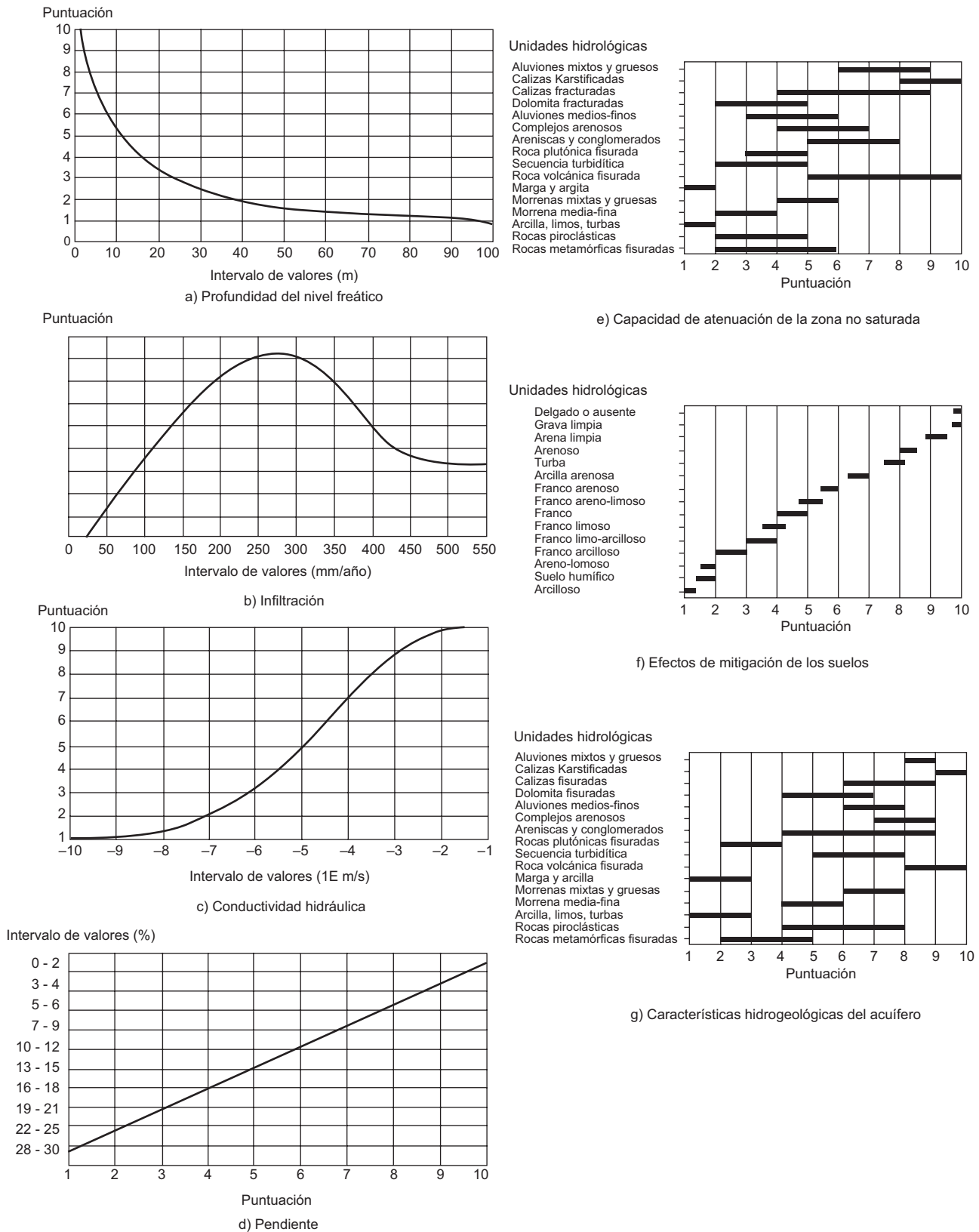


Fig. 2. Rangos paramétricos del método SINTACS (Civita y De Maio 2000)

**CUADRO I.** VALORES DE PESO ASIGNADO A CADA FACTOR EN FUNCIÓN DE CADA CONDICIÓN ESPECÍFICA (CIVITA Y DE MAIO 2000)

Factor	Impacto normal (IN)	Impacto relevante (IR)	Drenaje Cárstico (D)	Fisurado (C)	Fisurado (F)
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

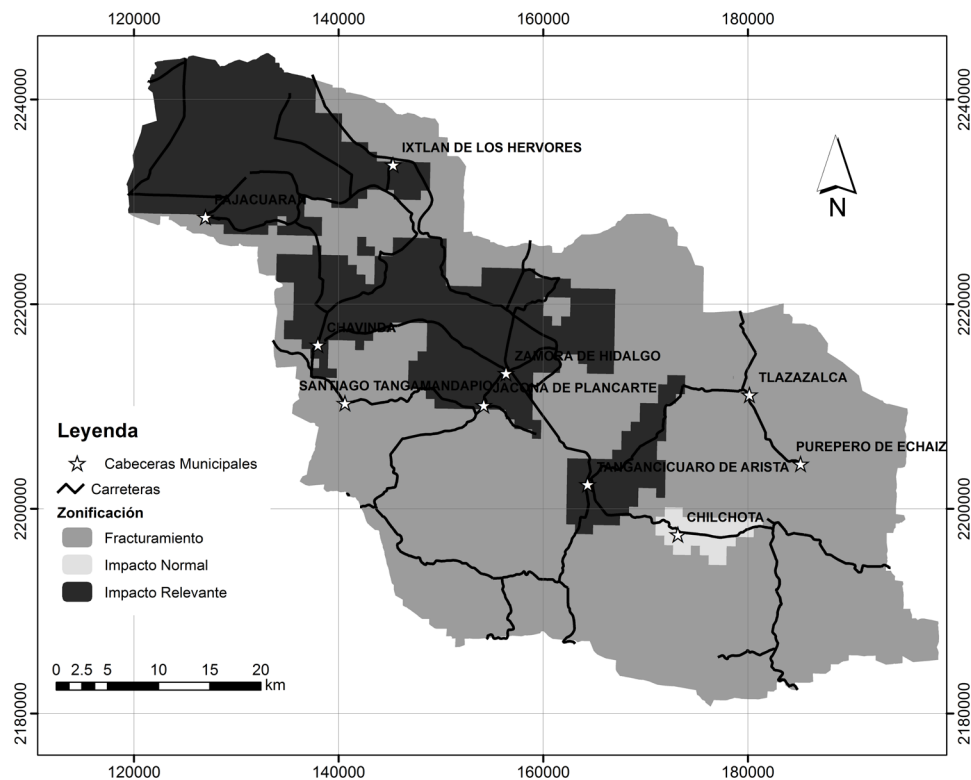
**CUADRO II.** CLASIFICACIÓN DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD SINTACS (CIVITA Y DE MAIO 2000)

Simbología	Clases	Rango de valores del Índice SINTACS
EA	Extremadamente alta	210-260
MA	Muy alta	186-210
A	Alta	140-186
M	Media	105-140
B	Baja	80-105
MB	Muy baja	26-80

El área de fracturamiento (F), constituye el 55 % de la región, caracterizado por un ambiente volcánico, destacando estructuras de tipo estratovolcán como son el cerro La Beata, San Isidro y volcanes en escudo como es el cerro Patamban, y conos cónicos representados por los cerros Curutarán, La Ladera y La Cantera; todos ellos con un alto grado de fracturamiento (Silva y Ramos 1998). Hay que tener presente que la cuenca se ubica dentro de la provincia geológica Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), específicamente hacia el límite occidental del denominado Campo Volcánico Michoacán – Guanajuato (CVMG), caracterizada por su alta densidad volcánica (Hasenaka y Carmichael 1985).

El área definida como impacto relevante (IR), representa el 40 % de la superficie de la cuenca. Aquí, la actividad agrícola es predominante, destacando la producción de frutillas de exportación como son la fresa, zarzamora y frambuesa, demandantes de caudales importantes de agua de buena calidad y se encuentran los principales asentamiento humanos de la región como son Zamora, Jacona y Tangancicuaro.

Finalmente, el ambiente de tipo impacto normal (IN), ocupa un 5 % de la región; definido por un bajo nivel de desarrollo agrícola, escaso drenaje hídrico



**Fig. 3.** Mapa de ubicación de cada condición específica en la cuenca, de acuerdo con el método SINTACS.

y escaso desarrollo urbano; todo lo cual la convierte en una región de bajo impacto antrópico.

En relación con los resultados paramétricos a continuación se describe cada factor:

**Profundidad del nivel piezométrico (S).** Tomando como base datos medidos en campo en mayo de 2010, así como información proporcionada por los organismos operadores de agua potable alcantarillado y saneamiento de cada municipio de la región y la CONAGUA, se elaboró un mapa de profundidades de los niveles de agua subterránea en la cuenca. Los niveles medidos fluctuaron de 10 m hacia las porciones más cercanas a las principales prominencias volcánicas de la región, hasta 34 metros al adentrarse a los valles, definiendo así, el flujo subterráneo local con dirección preferencial S-SW. Con estos datos, los valores obtenidos para el factor S, referidos a los rangos SINTACS, estuvieron entre 3 y 6 puntos, y al asociar estos valores con el valor del peso, se obtuvieron puntajes entre 20 y 45 (**Fig. 4**).

Los puntajes mayores (36-45), se localizan hacia la periferia de las principales estribaciones volcánicas de la cuenca, donde el acuífero presenta condiciones de libre y alto fracturamiento. Una segunda zona se asocia con valores de entre 26 y 35 puntos, princi-

palmente hacia los valles de Zamora y Guadalupe, donde el acuífero presenta condiciones de libre a semiconfinado. Un tercer nivel (20-25) se encuentra hacia la ciénega, aquí, los niveles estáticos son más profundos y la condición del acuífero es predominantemente semiconfinado, por efecto de la presencia de niveles de arcillas lacustres.

**Infiltración (I).** La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo, a través de la superficie de la misma y queda retenida por él o alcanza una zona saturada incrementando el volumen de agua almacenado anteriormente. Este factor involucra aspectos relacionados con la temperatura y la precipitación y estará en función de la textura del suelo. Los datos climáticos del periodo 1970-1990, revelan, para la última década, un incremento en la temperatura de un grado, manteniendo un promedio regional de 20 °C. Para el caso de la precipitación, registra un ligero decremento en la década de los noventa con respecto a la década anterior (100 mm), siendo el valor promedio regional de 811 mm. Los índices de infiltración están referidos a la escala señalada por el método (**Cuadro III**).

El valor de infiltración calculado osciló entre 200 y 420 mm/año, correspondiendo, de acuerdo con la escala de referencia, a valores de 5 y 9. El método

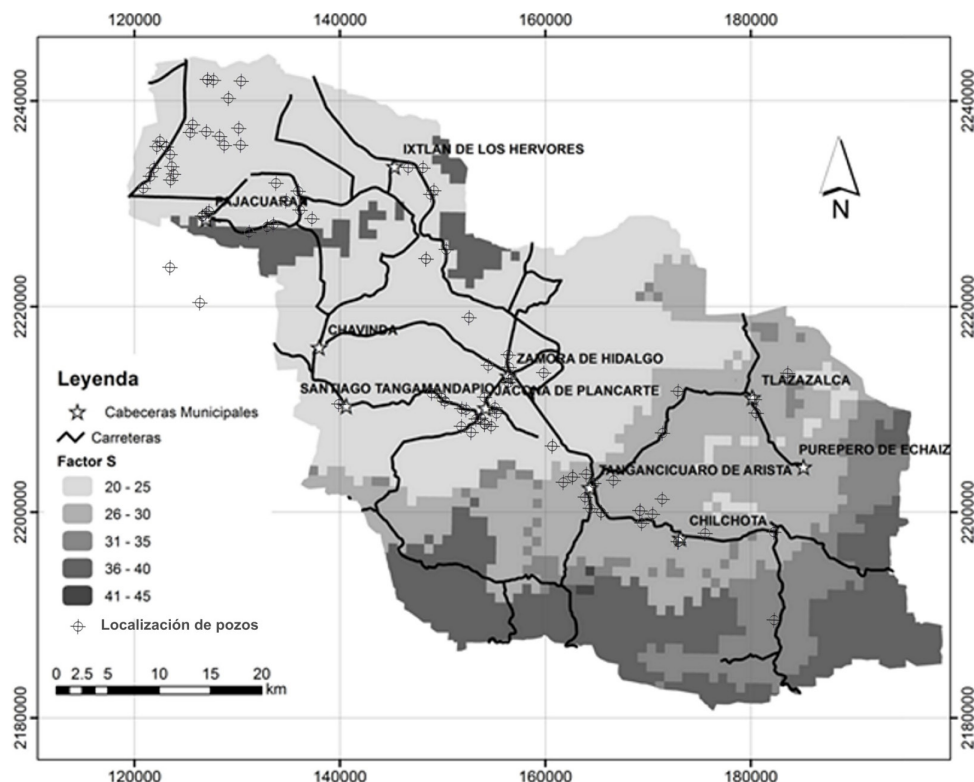


Fig. 4. Mapa de profundidad del nivel freático (S) con valores según el método SINTACS



**CUADRO III. VALORES DE COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN EN FUNCIÓN DEL TIPO DE COBERTURA DE SUELO (CIVITA Y DE MAIO 2000)**

Tipo de cobertura	Valor de $\chi$
Suelos arcillosos	0.1
Depósitos detríticos	0.5
Suelos arenosos	0.4

otorga un puntaje máximo a intervalos de 220 a 300 mm. Al asociar este valor con el peso, se obtuvo el valor respectivo para este factor.

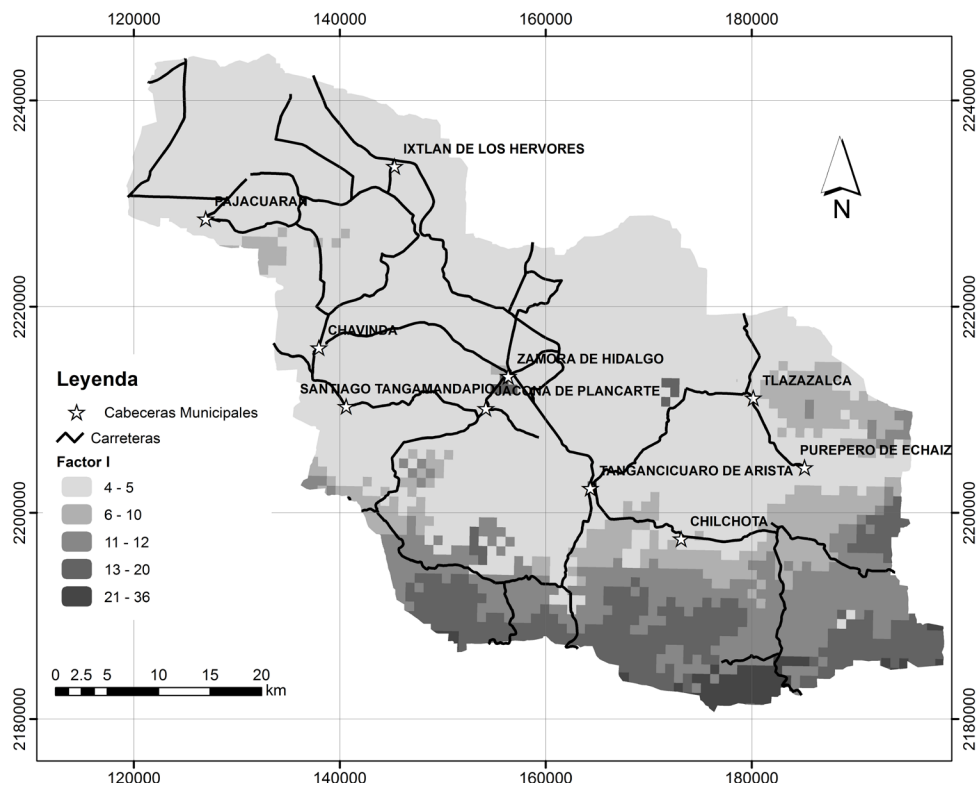
En la cuenca los rangos alcanzados oscilaron entre 4 y 36 puntos. Predominan los valores de 4-5 y 11-12 puntos, específicamente hacia los valles de Zamora y Guadalupe (**Fig. 5**). Este factor es muy importante en el grado de vulnerabilidad del acuífero, ya que es indicativo de la posibilidad por lixiviación de que algún soluto pueda llegar a contaminar el agua subterránea desde la superficie del suelo.

Capacidad de atenuación de la zona no saturada (N). Este factor es considerado como la “segunda línea de defensa” del sistema acuífero y depende esencialmente de las características texturales, minerales, granulométricas, fracturamiento y del espesor de esta zona no saturada.

La actividad volcánica del Pleistoceno (1.3-0.83 m.a.) es la más ampliamente distribuida en la cuenca, y posiblemente se inició con cortas fases andesítico-basálticas que evolucionaron posteriormente a basaltos de hiperstena y formaron conos de lava y pequeños volcanes en escudo representativos de la zona como La Beata, Tamándaro y San Ignacio (Garduño *et al.* 1999). También afloran unidades sedimentarias en los valles de Guadalupe y Zamora de granulometría media y fina, así como, depósitos lacustres hacia la ciénega de Chapala.

Al correlacionar dichas unidades geológicas con la escala de referencia del método, los puntajes obtenidos oscilaron entre 3 y 9. Los valores del índice de vulnerabilidad, alcanzados al multiplicar el rango por el peso, fueron de 14-18 puntos, presentándose los valores máximos en los valles de Guadalupe y Zamora (19-22) (**Fig. 6**).

Tipo de suelo (T). Esta es la “primera línea de defensa” del acuífero. Los suelos más ampliamente distribuidos dentro de la cuenca fueron los andosoles, cambisoles y luvisoles, localizados en las zonas serranas hacia el sur-suroeste, coincidiendo con altitudes que rebasan los 1750 msnm. También se presentan suelos vertisoles y fluvisoles dispersos entre los lomeríos de los cerros y planicies de los valles



**Fig. 5.** Mapa de infiltración (I) con valores según el método SINTACS

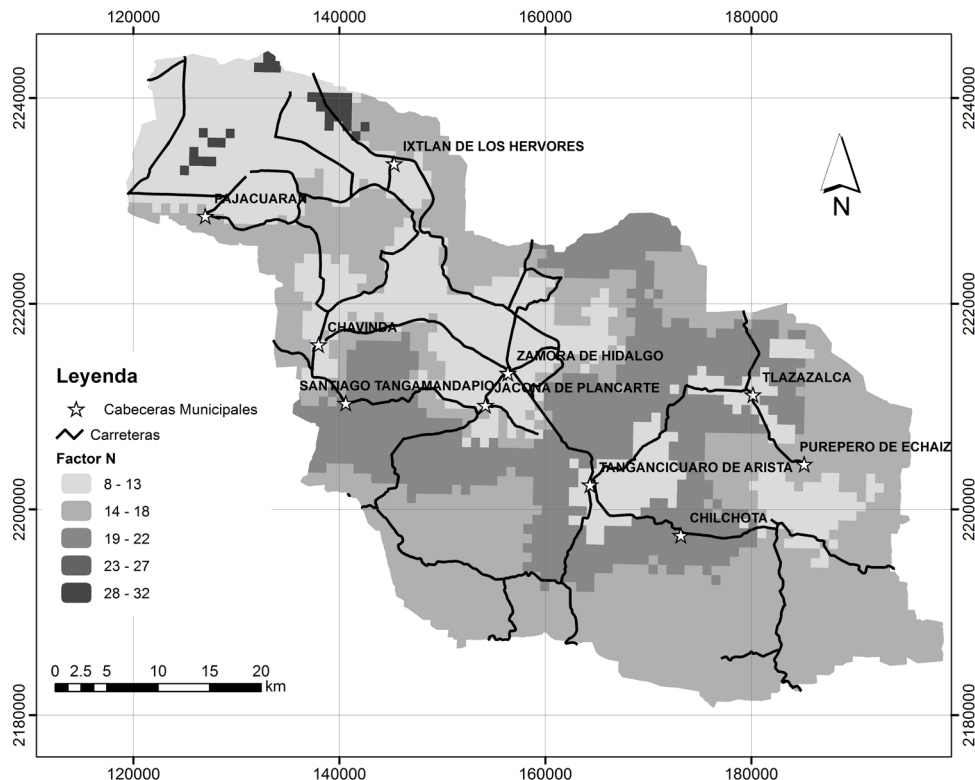


Fig. 6. Mapa de capacidad de atenuación de la zona no saturada (N) con valores según el método SINTACS

agrícolas de la cuenca. Estos suelos se ubican entre los 1520 y los 1750 msnm, y están distribuidos desde la parte media de la cuenca hasta los límites con el río Lerma. Existe un grupo de suelos (luisol, feozem y cambisol) que se presentan en la parte media de la cuenca, aguas arriba del valle de Guadalupe, y que sirve como transición entre los suelos más importantes de la región. El grupo de suelos de los litosoles, se asocia con las zonas más altas de algunas montañas.

Esta distribución de las distintas unidades edafológicas se refleja en los valores obtenidos para dicho factor, cuyos niveles son muy variables, desde 2 a 50 puntos. Sin embargo, en la cuenca los valores de entre 2 y 12 son los más predominantes y se encuentran en la zona de menor pendiente, en donde la agricultura es intensiva (Fig. 7).

Características hidrogeológicas (A). En la cuenca se identifican cuatro ambientes hidrogeológicos: la cañada de los Once Pueblos, valles de Guadalupe y Zamora y ciénega de Chapala (CONAGUA 2002). Cada región presenta condiciones particulares.

En la cañada de los Once Pueblos destaca para el ámbito de vulnerabilidad, un paquete de características areno-arcillosas que se corresponde con depósitos aluviales recientes de alta porosidad y baja

conductividad hidráulica y de gran heterogeneidad en su constitución cuyo espesor promedio es cercano a los 8 m. Esta unidad representa un sistema con condiciones de semiconfinado a libre en las márgenes de la cañada.

En el valle de Guadalupe se presenta un estrato superficial con características areno-arcillosas no mayor a 2 metros de espesor, que se corresponde con los depósitos aluviales recientes cuyo comportamiento hidráulico es el de un acuitardo actuando como una unidad de semiconfinante a libre en las márgenes del valle y presentan comunicación hidráulica con la secuencia volcánica fracturada que la infrayace, como lo evidencia el termalismo de pozos ubicados hacia la porción oriental (Silva *et al.* 2004).

En el valle de Zamora aflora un paquete de características areno-arcillosas que se corresponde con los depósitos aluviales y lacustres recientes de alta porosidad y baja conductividad hidráulica y de gran heterogeneidad en su constitución. Su comportamiento es el de un acuitardo que actúa como una unidad semiconfinante en gran parte del valle. Infrayaciendo a esta unidad se tienen antiguos depósitos lacustres pliocénicos constituidos por intercalaciones de areniscas, limolitas, diatomitas y depósitos volcánicos piroclásticos (Silva *et al.* 2004).

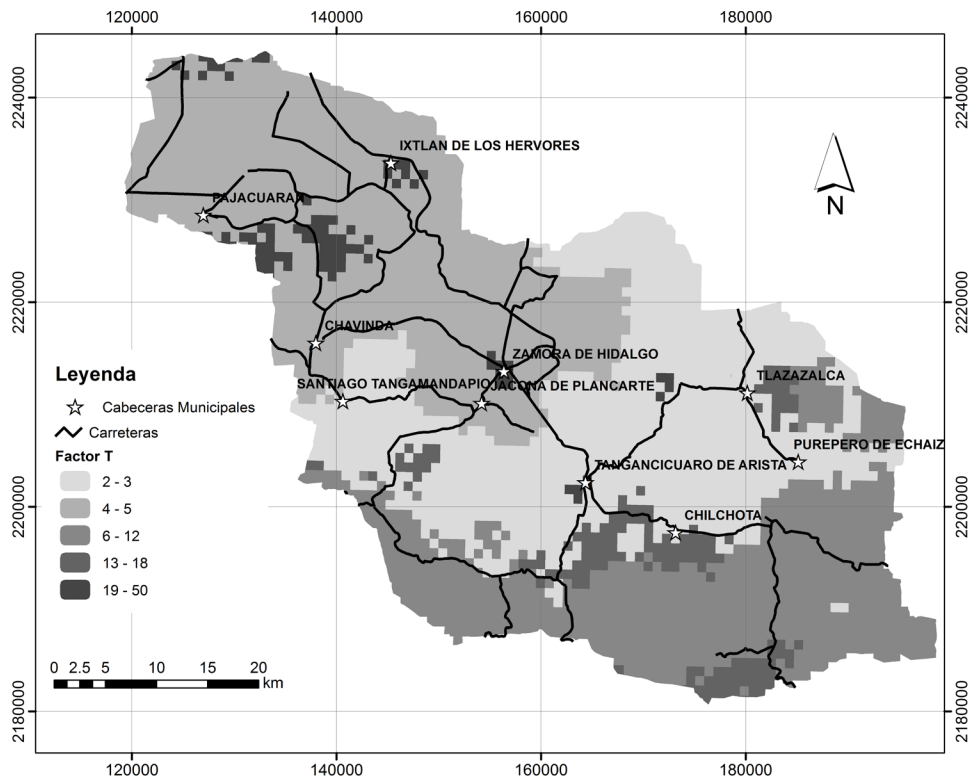


Fig. 7. Mapa de tipo de suelo (T) con valores según el método SINTACS

En la Ciénega existen depósitos aluviales y lacustres recientes, de características areno-arcillosas, cuyo comportamiento hidráulico es de un acuitardo que funciona como una unidad semiconfinante. Su espesor promedio es de 3 m. Subyaciendo a esta unidad se encuentran los antiguos depósitos lacustres pliocénicos constituidos por intercalaciones de areniscas, limolitas, diatomitas y depósitos volcánicos piroclásticos. Su espesor llega a ser de 300 a 450 m hacia la zona de Los Negritos y de Ixtlán de los Hervores (Rosas 1997), disminuyendo considerablemente hacia las prominencias volcánicas que delimitan la región.

De acuerdo con las características geológicas de la región, el acuífero se comporta predominantemente de libre a semiconfinado. El método presenta una clasificación de cada condición, asignándole un rango numérico. En este caso, los valores asignados están entre 6 y 10, para ambientes de rocas volcánicas fracturadas, piroclastos, depósitos aluviales y depósitos de caída. Los puntajes más altos obtenidos una vez multiplicado el valor por el peso fueron de 41-45 (Fig. 8).

Conductividad hidráulica (C). En hidrogeología, los medios permeables de mayor relevancia están constituidos por depósitos sedimentarios no consolidados o escasamente consolidados y por rocas altamente fracturadas. Los materiales con mejor conductividad hidráulica son los depósitos sedi-

mentarios fluviales, aluviales, coluviales, lacustres y lagunares. La conductividad hidráulica de éstos depende básicamente de la cantidad de arcilla que se presente y secundariamente del grado de compactación y cementación que tengan (CONAGUA 2009).

En la cuenca, los medios porosos y fracturados dominan la región. Los materiales arcillosos de origen lacustre sólo coexisten en la región de la ciénega. A efecto de obtener el mapa de distribución de conductividades hidráulicas se realizó una correlación directa del tipo de unidad litológica presente referida a valores ya reportados (Silva y Estrada 2005), así como por los indicados en el método SINTACS.

Los valores obtenidos en el área han sido mayores para medios fracturados que para medios granulares (Fig. 9). Por otro lado, algunas estructuras permeables como son las fallas regionales, tienen fuerte influencia en los valores altos de este parámetro. Los valores de 8-20 puntos predominan hacia las mayores altitudes y de 6-9 en partes llanas, lo que es coincidente con la extensión de depósitos fracturados y rocas no consolidadas, respectivamente.

Pendiente ( $S_2$ ). Las pendientes del terreno son un factor importante en la velocidad de infiltración del agua y de cualquier soluto disuelto en ella. Con base en el modelo digital de elevación de la cuenca se generó el mapa de pendientes para el área de estudio. Aproximi-

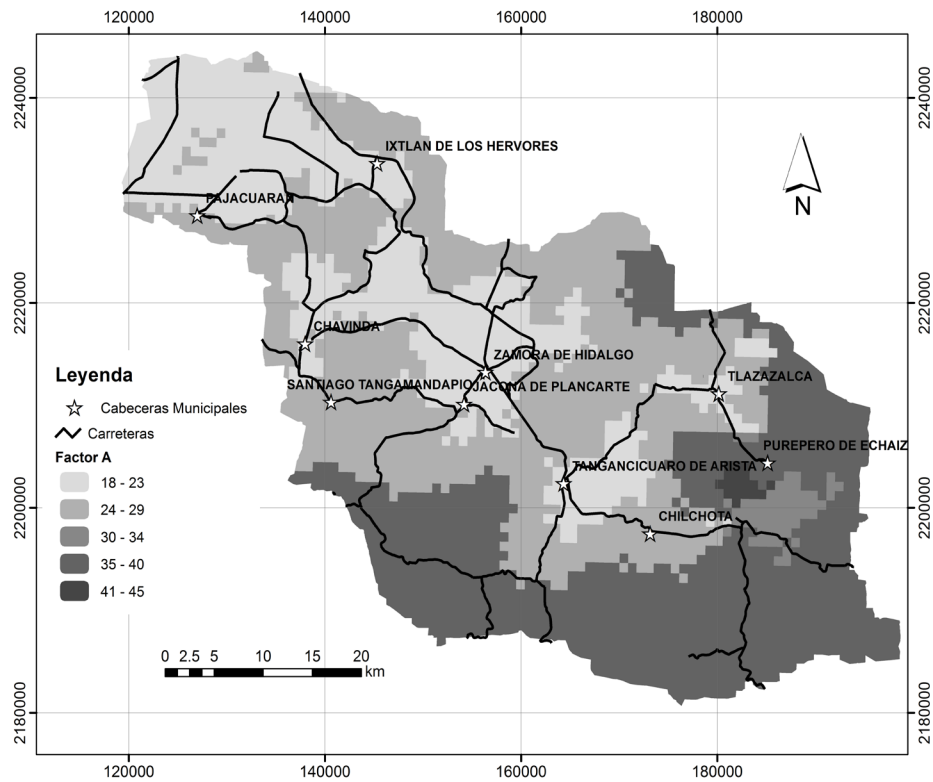


Fig. 8. Mapa de características hidrogeológicas (A) con valores según el método SINTACS

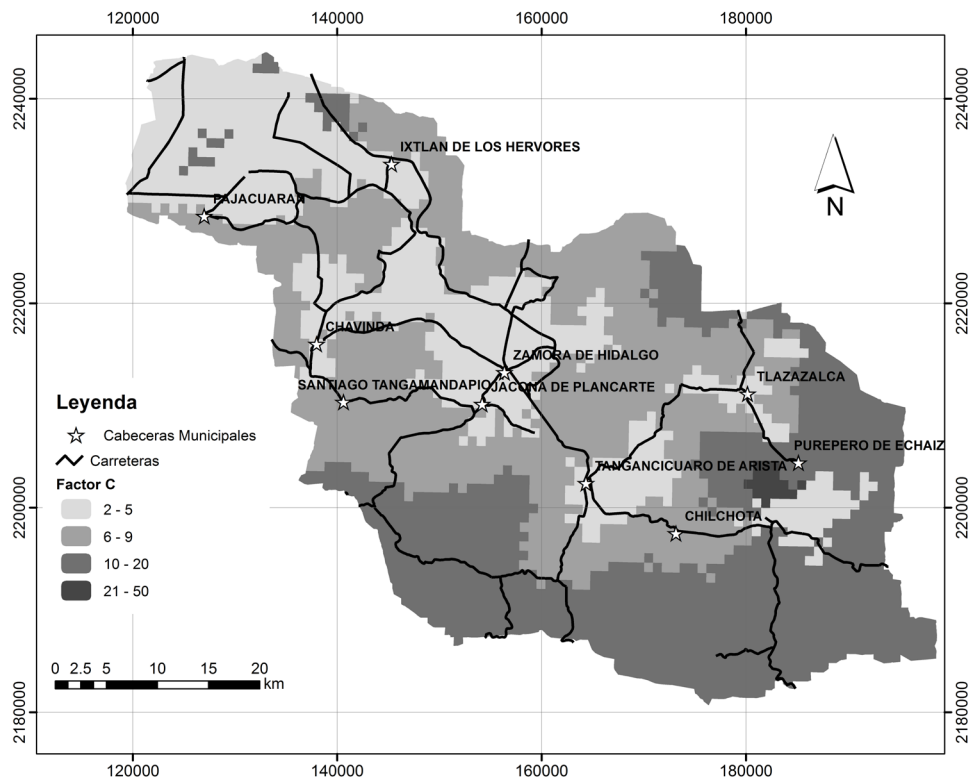


Fig. 9. Mapa de conductividad hidráulica (C) con valores según el método SINTACS

madamente, el 60 % de la cuenca, por ser una región muy abrupta, presenta valores de pendiente superiores a 30 % (nivel máximo en la escala del método). Los valores de menor pendiente estuvieron entre 5 y 8 %.

Para este factor, los valores dominantes oscilaron entre 2 y 4 puntos, coincidiendo en las partes montañosas con pendientes mayores, mientras que los valores más altos en rangos de 17 a 30, se encuentran hacia los valles y ciénega de Chapala, topográficamente con pendientes menores a 3 % (Fig.10).

**Índice SINTACS**

La vulnerabilidad en acuíferos semiconfinados está controlada por las propiedades físicas y geométricas del acuitardo que conforma su techo (conductividad hidráulica, porosidad y espesor) y también por la diferencia de potencial hidráulico con el libre sobrepuesto.

El mapa obtenido está representado por seis categorías de vulnerabilidad, en rangos de 26 a 260 puntos. En la cuenca predominan tres: vulnerabilidad muy baja (26-80 puntos) coincidente con el ambiente lacustre de la ciénega de Chapala, característico de un medio de granulometría fina arcillosa y de escaso fracturamiento; vulnerabilidad baja (81-105 puntos), ocupando aproximadamente el 50% del área, coincidiendo con los valles de Zamora y Guadalupe con predominio de medios granulares heterogéneos

y acuíferos semiconfinados a libres; y finalmente vulnerabilidad media (105-140 puntos) en el 25% del territorio, localizándose hacia las zonas ocupadas por las mayores prominencias volcánicas, destacando la cañada de los Once Pueblos, donde los medios fracturados predominan. La figura 11 muestra la distribución de los valores del índice de vulnerabilidad acuífera para la cuenca del río Duero.

Dicha información puede ser utilizada con múltiples propósitos tal como lo mencionan Bessouat y colaboradores (1999) y González y colaboradores (2003) quienes refieren que estos mapas deberán servir como guía en la planificación de actividades relacionadas con el ambiente y el ordenamiento territorial, siendo una herramienta fundamental para definir el uso que pueden tener determinadas áreas y definir políticas de protección para las aguas subterráneas subyacentes a la superficie.

El factor que es determinante en la vulnerabilidad del acuífero es la profundidad del nivel del agua; mismo que se encuentra somero en la mayoría de la zona de estudio. Este factor es el de mayor peso en la obtención de rangos altos de vulnerabilidad en la cuenca. Una topografía plana también favorece la obtención de valores de vulnerabilidad altos; en un terreno plano el agua tendrá mayor oportunidad de infiltrarse y habrá más facilidad

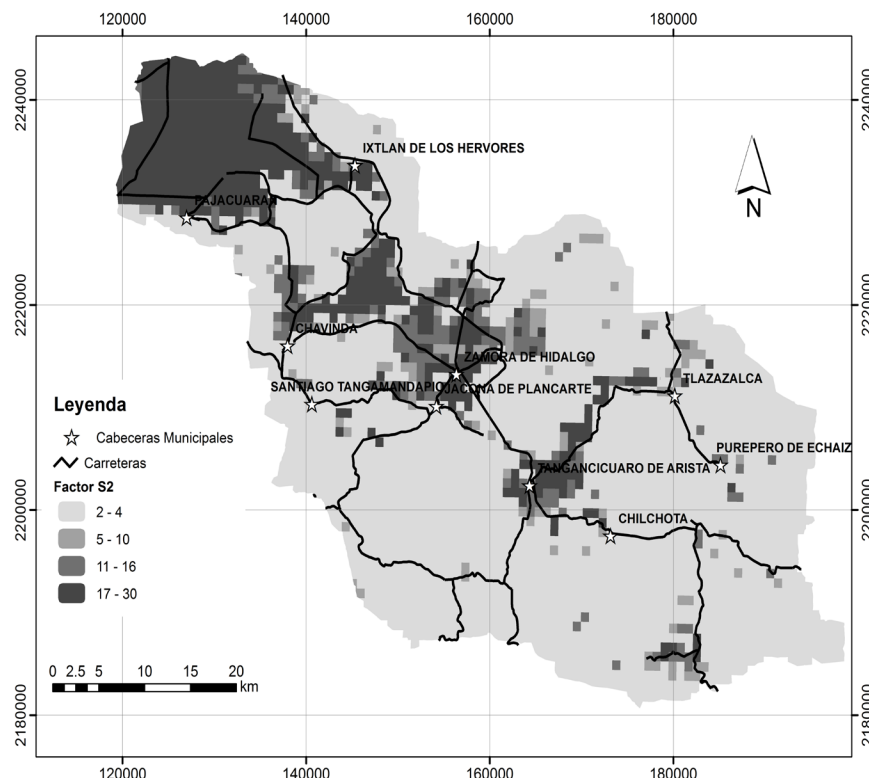


Fig.10. Mapa de pendientes (S<sub>2</sub>) con valores según el método SINTACS

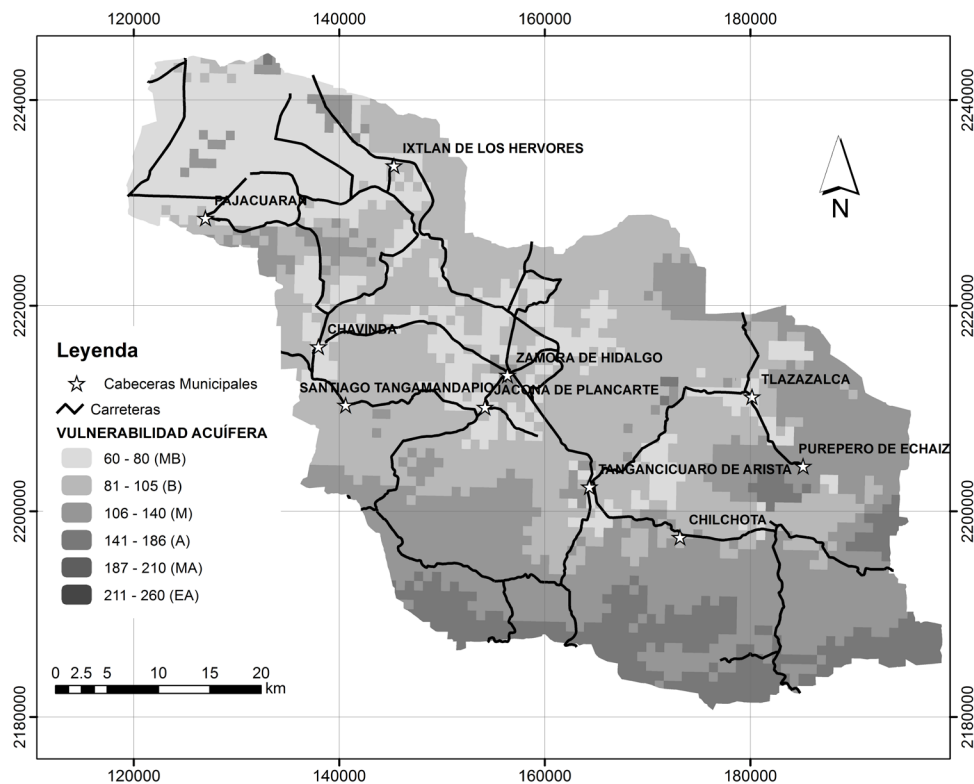


Fig. 11. Mapa del índice de Vulnerabilidad Acuifera SINTACS para la cuenca del río Duero

de encontrar almacenamientos mayores de aguas subterráneas, ahí se encuentra tanto agua infiltrada localmente como la de descargas de regiones montañosas vecinas.

Por otra parte, las características texturales condicionan la velocidad de flujo en la zona no saturada, este factor es conocido como la conductividad hidráulica y para la cuenca del río Duero es baja. Además, los materiales arcillosos funcionan como una barrera para los contaminantes que pueden migrar a través la zona no saturada, ya que hay que tener presente su alta capacidad de retención (Rangel 2001).

## CONCLUSIONES

Los valores obtenidos de vulnerabilidad mediante la aplicación del método SINTACS muestran para la cuenca dos niveles principales: una vulnerabilidad baja que cubre la mayor parte de la cuenca y se localiza en los principales valles fluviales, y otra media, localizada en la zona de ambiente volcánico. En menor proporción se identifican zonas con la vulnerabilidad muy baja y alta, que coinciden con el ambiente lacustre de la ciénega de Chapala.

Los niveles de vulnerabilidad resultantes están

directamente relacionados con las condiciones hidrogeológicas, de tal manera que los rangos mayores obtenidos están asociados a sitios donde las condiciones del acuífero son libres; los rangos de vulnerabilidad menores se relacionan con áreas donde el acuífero es semiconfinado, representados por materiales arcillosos de baja conductividad hidráulica.

Con la generación de mapas de vulnerabilidad acuifera, se pueden apoyar acciones enfocadas a la planeación ordenada de las distintas actividades antrópicas con enfoque de protección al acuífero, estableciendo estrategias de defensa del agua subterránea, preservando y garantizando su calidad.

## AGRADECIMIENTOS

Este proyecto se realizó gracias al financiamiento otorgado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Instituto Politécnico Nacional.

## REFERENCIAS

Agüero V.J. (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.
- Aller L., Bennett T., Lehr J.H., Petty R.H. y Hackett G. (1987) DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings, US EPA Report 600/2-87/035, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, Oklahoma, 622 pp.
- Báez A. (2002). Validación de mapas de vulnerabilidad en medios urbanos. <http://tierra.rediris.es/hidrored/ponencias/baez.html>. 14/02/2008
- Bessouat C., Constagnino G., de Los Santos J., Oleaga A. y Pacheco F. (1999). Carta preliminar de Vulnerabilidad del Acuífero Raigón. En: II Encuentro de las Aguas. Montevideo, Uruguay.
- Castro E., Tullio J. y Schulz C. (1996). Vulnerabilidad del acuífero de intendente Alvear (La Pampa), Argentina. Riesgo de contaminación por actividades agropecuarias. En: 1er. Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. San Luis Potosí. México.
- Civita M. y De Maio M. (2000). Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico SINTACS R5, Pitagora, Bologna, Italia, 226 pp.
- CONAGUA (2002). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Zamora, Estado de Michoacán. Subgerencia Evaluación y Modelación Hidrogeológica. Comisión Nacional del Agua, México. 25 pp.
- CONAGUA (2009). Programa detallado de acciones para el proyecto emblemático saneamiento integral de la cuenca del río Duero. Comisión Nacional del Agua, México. 142 pp.
- Cortes B.J., Samaniego M.L., Monroy N.A. y López M.A (2004). Vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación. [http://www.uaaan.mx/DirInv/Resul\\_PI](http://www.uaaan.mx/DirInv/Resul_PI). 18/02/2008.
- Draoui M., Vias J., Andreo B., Targuisti K. y El Messari J.S. (2008). A comparative study of four vulnerability mapping methods in a detritic aquifer under mediterranean climatic conditions. *Environ. Geol.*, 54, 455-463.
- Foster S. y Hirata R. (1991). *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Lima, Perú, 81 pp.
- Garduño V.H., Corona Ch., Israde A., Mennella L., Arreygue E., Bigioggero B. y Chiesa S. (1999). Carta Geológica del Estado de Michoacán, Esc: 1: 250 000. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo-Instituto de Investigaciones Metalúrgicas.
- González L.N., González A. y Mardones M. (2003). Evaluación de la vulnerabilidad natural del acuífero freático en la cuenca del río Laja, centro-sur de Chile. *Rev. Geol. Chile* 3, 3-22.
- Hasenaka T. y Carmichael I.S.E. (1985). The cinder cones of Michoacán-Guanajuato, central México: their age, volume and distribution, and magma discharge rate. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 25, 105-124.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) - Comisión Nacional Para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1995. "Edafología". Escalas 1:250000 y 1:1000000. México.
- Napolitano P. y Fabbri A.G. (1996) *Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS*. IAHS Publ. No. 235, 559 pp.
- Pacheco-Vega R. (2007). Construyendo puentes entre la política ambiental y la política de tratamiento de aguas en la cuenca Lerma-Chapala. *Econ. Soc. Territorio* 7, 995-1024.
- Rangel A. (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.
- Rosas E.J. (1997). Tectónica extensional en el occidente de la faja volcánica transmexicana. Tesis doctoral, postgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica-UNAM. 110 pp.
- SEMARNAT (2010). *Aspectos relevantes de la gestión ambiental en México 2007-2009*. Primera Edición, México, 98 pp.
- Silva G.J.T. y Ramos L.J.A. (1998). Elementos de vulnerabilidad de acuíferos para la protección de manantiales. Caso lago de Camécuaro, Michoacán, Memorias. Unión Geofísica Mexicana, congreso anual, Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- Silva G.J.T., Ramos L.J.A., Ochoa E.S. y Estrada G.F. (2004). Morphometric and vulnerability methods in the selection of landfill sites in active tectonic areas: Tangancicuaro valley, Michoacán, Mexico. *Geofis. Int.* 43, 629-640.
- Silva J.T. y Estrada F. (2005). Caracterización hidrogeológica de los Chorros del Varal, Michoacán. CIIDIR-IPN-MICH. Reporte Técnico (Inédito), 32 pp.
- 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, Perú.