

## VULNERABILIDAD ACUÍFERA COMO HERRAMIENTA DE POLÍTICA AMBIENTAL PARA LA PROTECCIÓN DE MANANTIALES EN MICHOACÁN, MÉXICO

José Teodoro SILVA<sup>1</sup>, Francisco ESTRADA<sup>1</sup>, Ramiro RODRÍGUEZ<sup>2</sup>, Salvador OCHOA<sup>1</sup>,  
Fabián VILLALPANDO<sup>1</sup> y Gustavo CRUZ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, CIIDIR-IPN-Michoacán-México. COFAA. Justo Sierra 28, 59510, Jiquilpan, Michoacán. tsilva09@hotmail.com

<sup>2</sup> Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. México

<sup>3</sup> Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Km. 36.5 Carretera México-Texcoco, Montecillo, Estado de México

*(Recibido abril 2008, aceptado mayo 2009)*

Palabras clave: riesgo ambiental, área natural protegida, SINTACS, gestión hídrica

### RESUMEN

En el estado de Michoacán se han impulsando las evaluaciones de vulnerabilidad acuífera para definir políticas ambientales de desarrollo sustentable en programas de protección de acuíferos y cuerpos de agua asociados a manantiales amenazados por distintas actividades de carácter antrópico. El estudio realizado en el Valle de Los Reyes, Michoacán, basado en el método SINTACS, permitió proponer la ampliación de la zona de amortiguamiento del área natural protegida Chorros del Varal, que es una superficie que rodea y protege la zona núcleo para evitar impactos ambientales. La ampliación se plantea en función del grado de vulnerabilidad y del papel que la región juega en el proceso de recarga del acuífero que le da origen, así como su importancia en el tránsito del flujo hídrico regional y local. El mapa de vulnerabilidad acuífera obtenido está representado por seis niveles de riesgo en el rango de 26-260 puntos. La zona muestra un esquema de vulnerabilidad mediana a alta; destaca el área colindante con Chorros del Varal, de muy alta vulnerabilidad (186-210 puntos). Los valores bajos reflejan zonas donde el ambiente acuífero es predominantemente arcilloso y de escaso fracturamiento. El mapa de vulnerabilidad se incorporó al Programa de Manejo del Parque de los Chorros del Varal, que se convierte en el instrumento de planeación estratégica que garantiza la adecuada administración del área natural mediante su aplicación y por tanto la permanencia a largo plazo de sus recursos.

Key words: environmental risk, aquifer vulnerability, SINTACS, water management

### ABSTRACT

In Michoacán State, México, the use of aquifer vulnerability assessment methods is growing. Their results can be incorporated in environmental public policies of sustainable development for aquifer protection programs as well as for protection of water bodies related to springs, especially when these bodies are been threatened by anthropogenic activities. The study carried out in Valle de Los Reyes, Michoacán, based on the SINTACS method, permitted the proposal of increasing the protection area of the

protected natural area Chorros del Varal. Such proposal was based on the vulnerability assessment, on the role of this area in the local aquifer recharge and on its relevance in the local and regional flow transit. The obtained aquifer vulnerability map shows six contamination risk levels in the range of 26-260 points. The area shows medium to high vulnerability. The surrounding area has a very high vulnerability (186-210 points). Low values reflected clayed aquifer environments and scarce fracturing. The vulnerability map was incorporated to the Management Program of the Chorros del Varal Park as a strategic planning tool. Its incorporation insures a more adequate administration of this protected area as well as its natural resources.

## INTRODUCCIÓN

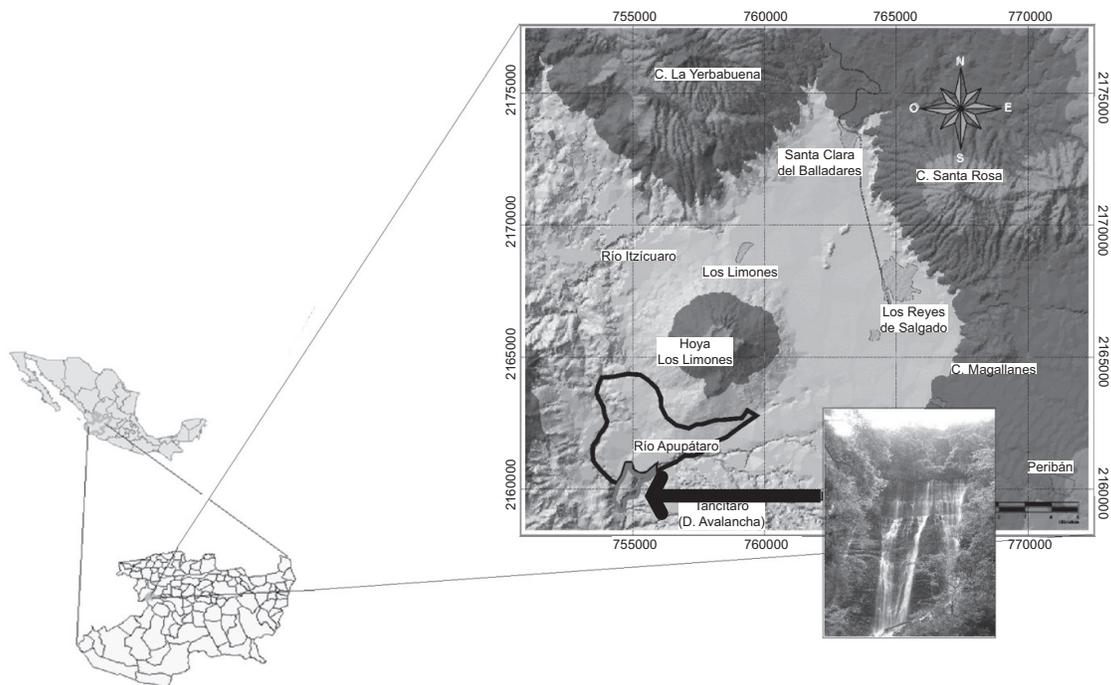
El riesgo de contaminación de un acuífero se puede definir como la probabilidad de que el agua subterránea se contamine con alguna sustancia en concentraciones por arriba de la normatividad para agua de consumo humano o de los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (Foster e Hirata 1991).

La premisa anterior es el soporte para impulsar la generación de mapas de vulnerabilidad acuífera a efecto de que los organismos gubernamentales encargados del manejo del agua en México consideren su eficacia para elaborar esquemas de explotación y de desarrollo urbano planificado. En consecuencia, no se pone en riesgo la calidad del agua subterránea, que representa la fuente de abasto principal para las poblaciones de la región noroeste de Michoacán.

Mediante los métodos de vulnerabilidad acuífera, se logra la zonificación del riesgo al que un acuífero puede estar sujeto por actividades naturales o antrópicas. Lo anterior se ha convertido en una herramienta de apoyo en la toma de decisiones relacionadas al manejo sustentable de acuíferos.

El objetivo principal de este estudio fue determinar los niveles de vulnerabilidad acuífera del Valle de Los Reyes, a efecto de proponer justificadamente la ampliación de la denominada zona de amortiguamiento del área natural protegida (ANP) Chorros del Varal.

La zona de estudio conocida como Chorros del Varal se localiza en la cuenca hidrológica del río Tepalcatepec, en las coordenadas  $19^{\circ} 30'$  de latitud norte y  $102^{\circ} 34'$  de longitud oeste, al noroeste del estado de Michoacán, México, en el borde suroeste del Valle de Los Reyes (**Fig. 1**).



**Fig. 1.** Localización del área de estudio. La flecha indica la ubicación de Chorros del Varal

Los ríos Apupataro e Itzicuaró se destacan como las corrientes superficiales más importantes, de tipo perene y cuya dirección de escurrimiento preferencial es E-W y N-S, respectivamente. Ambos ríos confluyen hacia la parte SW de la región, donde se unen para conservar el nombre de Itzicuaró, mismo que desemboca en el río Tepalcatepec. La altitud promedio del área es de 1050 m.

Los Chorros del Varal son la descarga del acuífero local denominado Cotija-Los Reyes (CNA 2002) y actualmente es considerado como ANP (GCMC 2004), amenazada por las distintas actividades antrópicas que se realizan en su entorno sin ningún control.

Las ANP en Michoacán son zonas del territorio que se encuentran sujetas al régimen de protección para preservar ambientes naturales, salvaguardar la diversidad genética de las especies silvestres, lograr el aprovechamiento racional de los recursos naturales y mejorar la calidad del ambiente en los centros de población y sus alrededores (LEEPAEM 2004).

Por lo anterior, se hace énfasis en la definición de las características y condiciones hidrogeológicas del sistema acuífero, a fin de contribuir en la conformación de un esquema de gestión sustentable de los recursos hídricos de la zona.

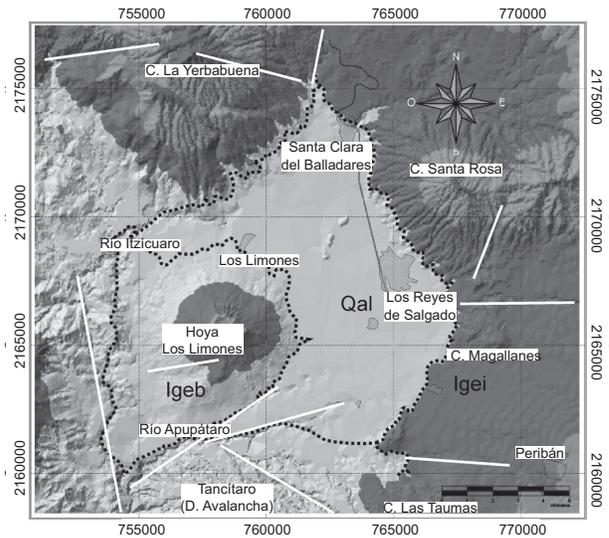
### Ambiente geológico

El área de estudio se localiza en la provincia geológica denominada Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), específicamente hacia el límite oeste del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG), ubicado en la porción central de la FVTM. Su edad, aceptada por la mayoría de los autores, es Mioceno Tardío - Pliocuatnario, que continúa hasta el Reciente (Nixon 1982, Negendank *et al.* 1985).

El CVMG, que se extiende aproximadamente 200 km N-S y 250 km E-W en México central, es una porción única de la FVTM, debido a la alta concentración volcánica presente en la que predominan conos volcánicos pequeños. Se inicia a 190 km de distancia de la trinchera mesoamericana y se extiende hasta casi 450 km de distancia de la misma (Hasenaka y Carmichael 1985).

Según Hasenaka y Carmichael (1987), la mayor densidad de volcanes se sitúa aproximadamente a 250 km de la trinchera, coincidiendo con la ubicación de la meseta Tarasca. Estos autores señalan que el sistema de fracturas y alineamientos volcánicos con orientación NE-SW, presente en la parte sur del CVMG, es concordante con el movimiento relativo Cocos-Norteamérica (NE-SW).

Los principales tipos de eventos geológicos identi-

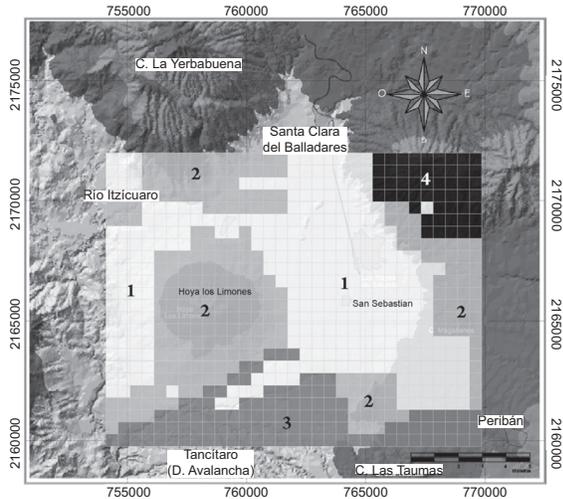


**Fig. 2.** Ambiente geológico regional. Vulcanismo basáltico (Igeb), vulcanismo andesítico-basáltico (Igei), depósitos aluviales de relleno (Qal)

ficados en la región (**Fig. 2**) son: vulcanismo basáltico (Igeb), ampliamente distribuido y representado por el volcán Hoya Los Limones, cuyo producto volcánico principal es basalto de olivino y piroxeno; vulcanismo andesítico (Igei), que conforma a los grandes aparatos volcánicos en la meseta Tarasca, siendo los cerros La Yerbabuena y Santa Rosa los más representativos para la región; depósitos de relleno (Qal), que constituyen al Valle de Los Reyes. Esta última unidad litológica está poco consolidada, se clasifica como toba volcánico arcillo-arenosa y conglomerado volcánico, y en menor proporción depósitos de tipo aluvial constituidos por material de acarreo cuya granulometría varía entre arena y grava subredondeada.

Las rocas volcánicas del Cuaternario y Plioceno que conforman las principales prominencias de la región presentan un alto grado de fracturamiento. Los rangos medidos luego de aplicar el método morfométrico denominado densidad de fracturamiento del relieve (Guerasimov 1970) varían de 0.6 a 2.8  $\text{km}^2/\text{km}^2$ , de los cuales se delimitan cuatro niveles de concentración para efectos interpretativos: <1 considerado como bajo; de 1.0-1.5 moderado; de 1.6-2.0 alto y >2.0 muy alto.

Destacan las zonas (**Fig. 3**) donde se localizan las principales prominencias volcánicas. El Cerro Santa Rosa registra el valor más alto, con 2.6  $\text{km}^2/\text{km}^2$ ; le sigue la porción SW y S, donde se sitúan el volcán Las Taumas y depósitos de avalancha provenientes del Cerro Tancitaro, con valores promedio de 2.0. La Hoya Los Limones se ubica en la disección intermedia o moderada.



**Fig. 3.** Grado de fracturamiento regional en km/km<sup>2</sup> y por áreas de 500 x 500 m. 1. Bajo (<1.0); 2. Moderado (1.0-1.5); 3. Alto (1.6-2.0); 4. Muy alto (>2.0)

Estructuralmente, la FVTM se divide en tres sectores (Pasquare *et al.* 1987): el occidental activado en el Plioceno presenta un sistema de grabens orientados en dirección NW-SE, asociado a la apertura del Golfo de México; el sector central está representado por un sistema de bloques a fallados y basculados en dirección NE-SW y ENE-WSW, que rodean a una depresión central; el sector oriental se caracteriza por un sistema de fallas en dirección N-S relacionadas con la formación de los grandes estratovolcanes de la FVTM.

La zona de estudio se localiza estructuralmente en el sector central, en lo que los autores Pasquare *et al.* (1987) definen como unidad Meseta Tarasca y cuyo sistema de fallas alimentadoras de la actividad volcánica está orientado en dirección WSW-ENE y NW-SE.

La alineación de conos volcánicos y la orientación de los sistemas de fracturamiento presentes en la región objeto de este estudio, son evidencias directas del ambiente regional de esfuerzos que prevalecen en la zona para tiempos cuaternarios, donde los reservorios magmáticos deben ser aparentemente de pequeñas dimensiones, como lo sugieren Hasenaka y Carmichael (1985) para el área de Michoacán-Guanajuato.

### El sistema acuífero

Tomando en consideración las características de porosidad, permeabilidad, litología y posición estratigráfica de cada una de las unidades geológicas reconocidas en la región, se definió el sistema acuífero del Valle de Los Reyes.

En la parte superficial se presentan depósitos aluviales constituidos por material de acarreo cuya granulometría varía de arena a grava subredondeada, intercaladas con toba arcillosa y conglomerado volcánico de alta porosidad, baja permeabilidad y heterogeneidad en su constitución. Su comportamiento hidráulico es el de un acuífero libre en gran parte del valle y sólo localmente (hacia las márgenes de las principales estribaciones) como acuitardo, que en ocasiones está fuera del área de estudio. Su espesor promedio es de 10 m.

Bajo el paquete granular se encuentran los depósitos volcánicos predominantes en la zona, cuyos productos son principalmente basalto de olivino, piroxeno y andesita. Estas rocas están muy fracturadas, por lo que a profundidad pueden ser consideradas como conducto preferencial del flujo regional manifiesto en el área de estudio; sin embargo, cuando afloran en superficie, asumen el papel de unidades permeables de recarga, siendo excelentes acuíferos cuando se encuentran sepultadas en partes bajas.

Los principales factores que influyen en el proceso de recarga del acuífero de la región de Los Reyes son: a) el aporte de la infiltración de la precipitación a través de las zonas de recarga consideradas preferenciales, que en este caso es todo el relieve montañoso que circunda y delimita el valle; b) la circulación del agua relativamente rápida, ya que se da a través de un medio fracturado para fluir después por formaciones de porosidad variable.

La comunicación hidráulica entre la superficie y el acuífero es típica de un acuífero libre, lo que lo hace altamente vulnerable a actividades antrópicas.

La descarga se lleva a cabo principalmente por medio de manantiales, norias y pozos de profundidades someras (<100 m), cuyo caudal no fue medido en esta ocasión; sin embargo, la escasa presencia de pozos en la región, debido a la existencia de abundante agua superficial, permite suponer que en términos de abatimientos altos, el estrés hídrico local es bajo, no así su régimen de vulnerabilidad acuífera.

## METODOLOGÍA

Como apoyo para la definición del esquema de funcionamiento hidrológico regional se efectuó un muestreo hidrogeoquímico de agua subterránea en nueve sitios. Al momento de recolectar las muestras, se midieron datos como temperatura, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos con un conductímetro portátil marca Hanna Instruments, HI 9635.

**CUADRO I.** ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS DISPONIBLES

Muestra	Localidad	Tipo	Coordenadas UTM		CE	STD	CI
			x	y			
1	Chorros	M	754725	2159800	190	150	12.4
2	Pozo Cerrito	P	762500	2168240	160	135	23.8
3	San Sebastián	P	763780	2165500	155	120	23.3
4	Plan de Aya	M	763700	2162900	150	130	26.8
5	San Sebastián	M	764060	2166150	160	128	19.8
6	La Calera	M	761750	2172915	130	110	18.6
7	Los Reyes	P	764250	2167890	140	118	21.3
8	Santa Clara	M	763498	2173150	160	120	21.8
9	Las Majadas	M	770100	2166250	130	110	24.0
				máx.	190	150	26.80
				min.	130	110	18.61
				prom.	152.78	124.55	22.44
				desv.	18.56	12.78	2.60
				CV	12.15	10.26	11.59

Las determinaciones analíticas de los elementos químicos ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4$ ) se realizaron en el laboratorio del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional-Michoacán, siguiendo la metodología de Standard Methods (APHA 1998). Asimismo, se elaboraron los planos de curvas de igual concentración iónica para los casos de sólidos totales disueltos, conductividad eléctrica y cloruros.

El análisis estadístico (**CUADRO I**) de los datos disponibles indica que el coeficiente de variación es menor a 15; éstos son valores normales que pueden interpolarse usando Kriging.

Se aplicó el método paramétrico SINTACS (Civita y De Maio 2000) para obtener el grado de vulnerabilidad a que el acuífero puede estar sujeto por actividades naturales o antrópicas. El método consiste en un análisis por cuadrantes ( $0.25 \text{ km}^2$ ) de cada uno los siete factores del método: 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 y S topografía.

El índice de vulnerabilidad acuífera SINTACS se obtiene aplicando la siguiente expresión:

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

Donde:

I= índice de vulnerabilidad SINTACS

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

W (1, N) = pesos en función de la situación hidrogeológica

La obtención de los rangos de cada parámetro se basa en los lineamientos establecidos por el método, mostrados en la **figura 4**, puntuación que varía de 1 a 10.

El peso respectivo (P), que representa el grado de influencia en términos de vulnerabilidad, estará en función del diagnóstico preliminar de la situación hidrogeológica o condición antrópica del área (**Fig. 5**).

En particular, SINTACS considera cinco condiciones: Impacto Normal (IN), Impacto Relevante (IR), Drenaje (D), Cárstico (C) y Fisurado (F). En todos los casos el puntaje varía entre 1 y 5 (**Cuadro II**).

El plano de vulnerabilidad acuífera (**Cuadro III**) está representado por seis niveles de vulnerabilidad, en rangos de 26 a 260 puntos.

El proceso de la información implicó, en cada caso, álgebra de mapas para obtener como producto final un mapa paramétrico. Se implementó Arc Gis de ESRI® para la discriminación de áreas con los siguientes módulos y extensiones: Spatial Analyst, Geostatistical y 3D Analyst.

En la definición de los diferentes elementos lineales del relieve se tomaron en cuenta algunos indicadores mencionados por Ramírez-Herrera (1990), como son:

- Tramos lineales de cauces de ríos.
- Lineamiento de valles fluviales.
- Límites de forma lineal de distintos tipos de paisajes.
- Cambios de pendientes que originan grandes escalones en el relieve.
- Cambios fuertes de altura de un sector a otro.

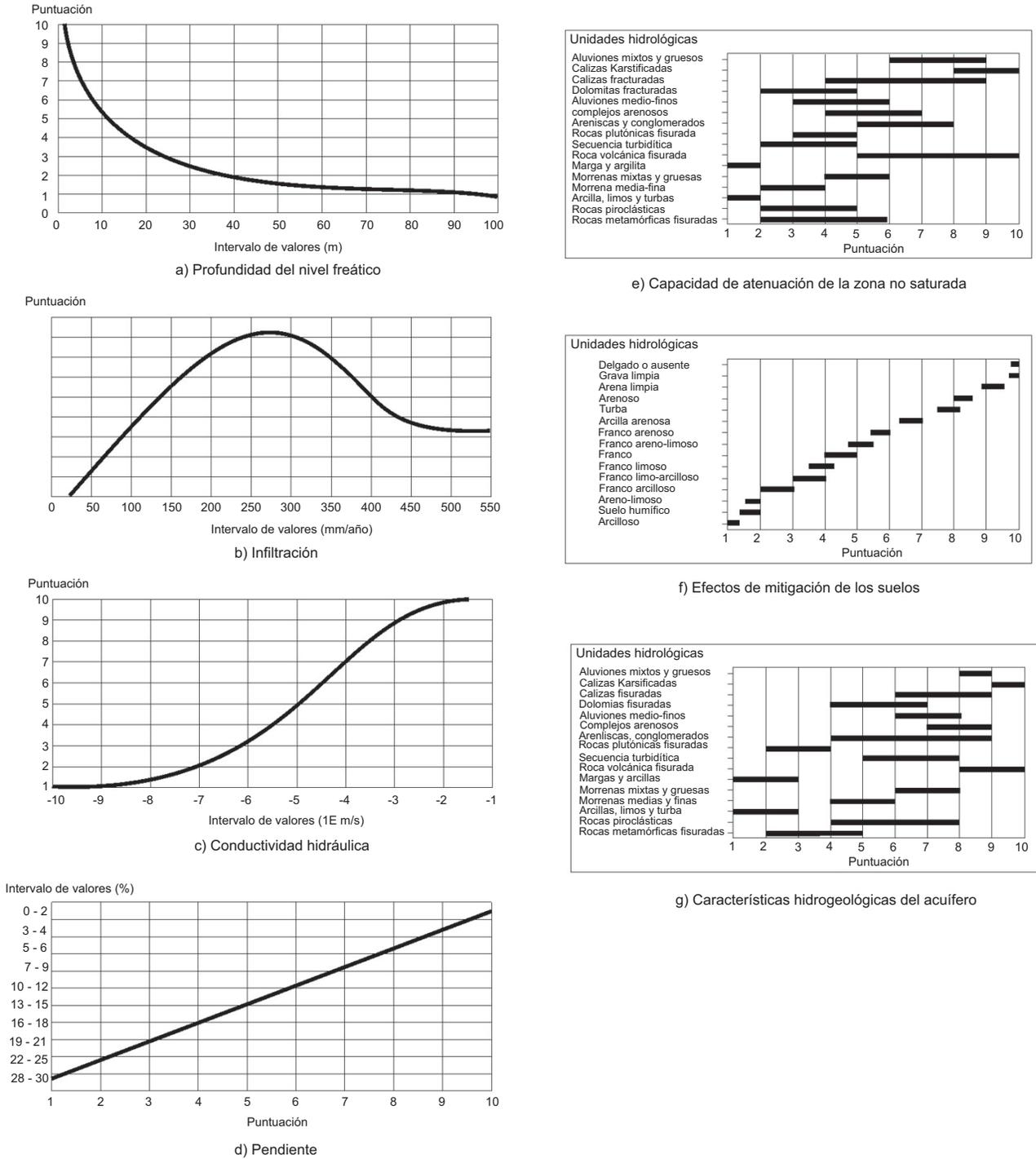


Fig. 4. Rangos paramétricos de SINTACS (Civita y De Maio 2000)

Una vez obtenido el mapa de lineamientos, se dividió en cuadrantes de 2 km<sup>2</sup> cada uno, y se midió la longitud de cada uno de ellos por cuadrante, por lo que la relación será de km/km<sup>2</sup>.

La correcta interpretación de este tipo de mapas contribuye a entender el relieve, no sólo en su mor-

fología, sino también en su evolución y dinámica actual, lo que es de suma importancia en estudios relacionados con la hidrogeología. Esto se explica porque a la erosión, en primer término, se exponen las zonas debilitadas o de fallas, de agrietamientos, bandas de milonización y otras.

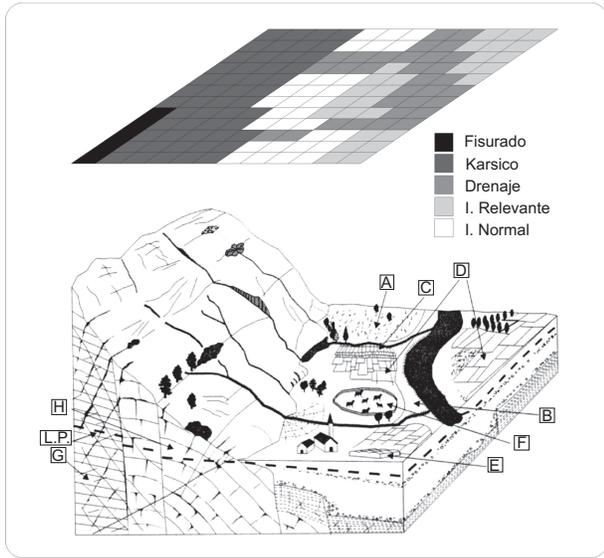


Fig. 5. Esquema representativo de los distintos ambientes hidrogeológicos y de impacto (Civita y De Maio 2000)

Se ha señalado que la totalidad de estos elementos de forma lineal del paisaje (megagrietas) refleja en términos cualitativos y cuantitativos la red de grietas y fallas de las rocas (Guerasimov 1970). Por lo anterior, la mayor o menor densidad de fracturamiento bien puede asociarse con zonas virtuales de recarga o descarga respectivamente.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Para la definición del esquema de funcionamiento hidrológico regional, se determinó apoyarse en la construcción de curvas de isovalores de parámetros fisicoquímicos, como son STD, conductividad eléctrica y cloruros. Lo anterior se debe a la escasez de pozos profundos en la zona que permitieran medir niveles piezométricos de todo el valle y definir así

**CUADRO III. NIVELES DE RIESGO DE VULNERABILIDAD SINTACS (CIVITA Y DE MAIO 2000)**

Simbología	Índice	Rango
Bb	Extremadamente alta	210-260
B	Muy alta	186-210
M	Alta	140-186
A	Mediana	105-140
E	Baja	80-105
Ee	Muy baja	26-80

un mapa piezométrico para soportar aún más las direcciones de flujo local. Es importante mencionar la relevancia de contar con dicho mapa para futuras investigaciones.

Se obtuvieron rangos de valores para sólidos totales disueltos de 110 a 150 mg/L, coincidiendo los valores más bajos con las estribaciones de los cerros de mayor altitud, así como con los principales cuerpos de agua superficial (Fig. 6); lo anterior es indicativo de que éstos pudieran corresponder con potenciales zonas de recarga del acuífero regional.

En términos de conductividad eléctrica (Fig. 7), se registraron datos de 130 a 190 µS/cm; se aprecia la misma relación en términos de recarga que los STD, ya que los valores mínimos igualmente coincidieron con las principales estribaciones volcánicas de la zona y con los cuerpos superficiales de agua.

La distribución espacial de los valores obtenidos para cloruro se observa en la figura 8, oscilando entre 14 y 24 meq/L.

La configuración obtenida evidencia un flujo que va de las altitudes mayores hacia las menores, como es el caso del volcán Hoya Los Limones, donde los valores aumentan de 16 hasta 22 meq/L en la porción baja, infiriendo así un esquema de flujo regional en esa misma dirección.

En términos de vulnerabilidad acuífera, se identificaron tres ambientes hidrogeológicos: IR, F y D (Fig. 9).

**CUADRO II. VALORES DE PESO ASIGNADO A CADA FACTOR EN FUNCIÓN DEL AMBIENTE HIDROGEOLOGICO (CIVITA Y DE MAIO 2000)**

Parámetros	Impacto normal (IN)	Impacto relevante (IR)	Drenaje (D)	Cárstico (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

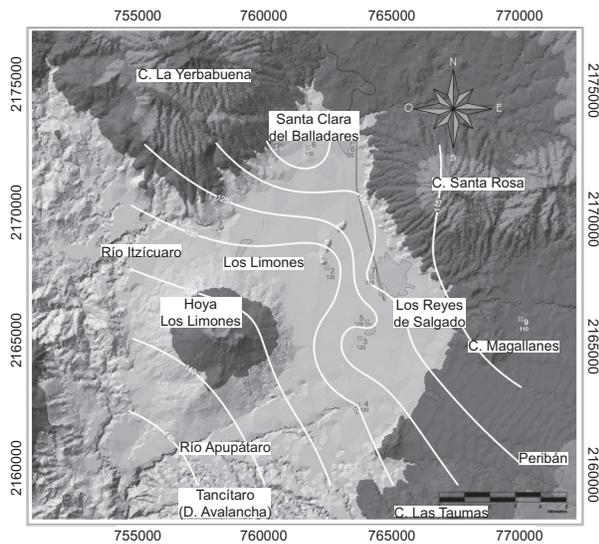


Fig. 6. Esquema de distribución de isovalores de STD

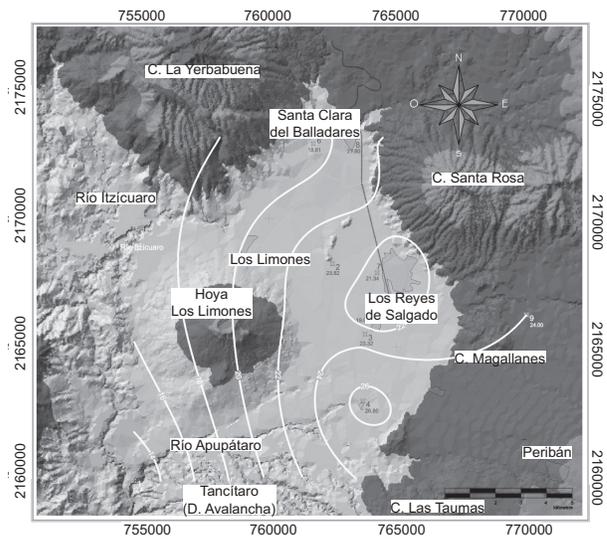


Fig. 8. Distribución de isovalores para cloruros

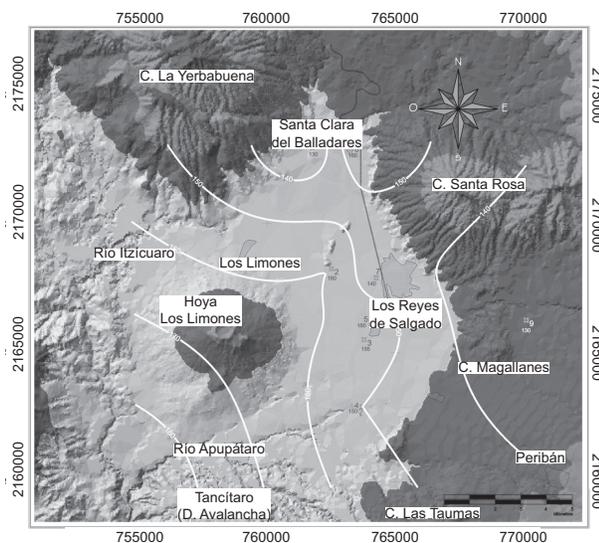


Fig. 7. Distribución de isovalores de conductividad eléctrica

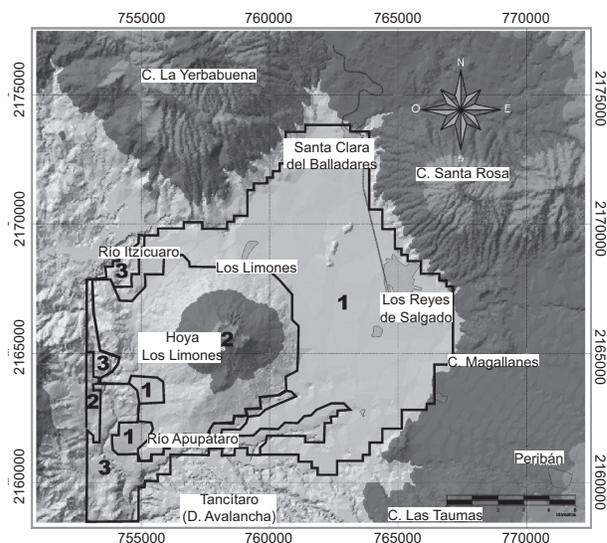


Fig. 9. Situación hidrogeológica y de impacto para el valle de Los Reyes: 1. Impacto relevante (IR), 2. Fracturamiento (F), 3. Drenaje (D)

El primero y que domina el área de estudio es el de Impacto Relevante (IR), que ocupa la porción topográfica del Valle de Los Reyes, y en el cual se presenta intensa actividad económica, destacando el sector agrícola.

Un segundo nivel lo ocupa el área de Fracturamiento (F), delimitado principalmente por el volcán Hoya Los Limones. El último nivel corresponde al Drenaje (D), delimitado por las dos principales corrientes superficiales que se encontraron en la zona y que son los ríos Apupátaro e Itzicuaró. En el **Cuadro II** se muestran los pesos asignados a cada factor.

El índice de vulnerabilidad acuífera SINTACS será la suma de los factores considerados, mismos que se describen a continuación:

S, profundidad del nivel estático. Para esa temporada, la profundidad osciló entre 1 y 12 m, registrándose los valores menores hacia el norte del valle y áreas aledañas a las estribaciones volcánicas existentes.

Tomando en consideración los rangos establecidos en la **figura 4a**, los valores obtenidos predominantes estuvieron entre 5 y 10 puntos.

La **figura 10** muestra la distribución de los índices SINTACS para este factor; los niveles mayores coinciden de manera significativa con la periferia de las principales estribaciones volcánicas, predominando en la zona un rango entre 20 y 35 puntos.

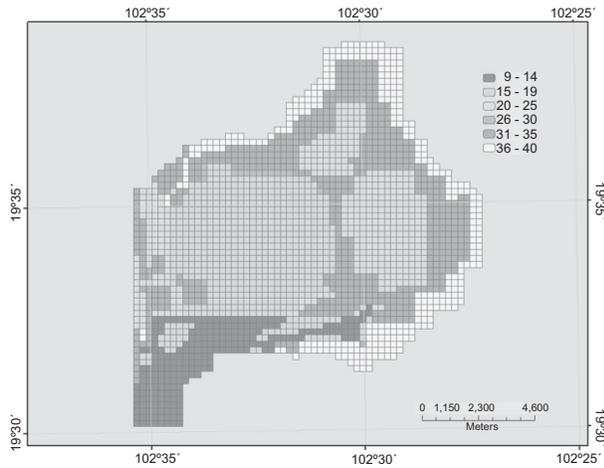


Fig. 10. Mapa del índice de vulnerabilidad para el parámetro S

**I**, infiltración. Proceso por el cual el agua penetra a través de la superficie del suelo y queda retenida por él, o alcanza un acuífero, incrementando así el volumen almacenado anteriormente. Este factor involucra aspectos relacionados con la temperatura y la precipitación y estará en función de la condición geológica y la textura del suelo.

El análisis de los datos obtenidos de la estación meteorológica de la Comisión Nacional del Agua revela un incremento de un grado en la temperatura para la última década, manteniendo un promedio regional de 24 °C. Para el caso de la precipitación, refleja un ligero decremento para la década de los noventa con respecto a la década anterior (100 mm), siendo el valor promedio regional de 800 mm.

El rango de infiltración calculado osciló entre 200 y 420 mm/año, correspondiendo a una puntuación de entre 5 y 9 de acuerdo a la escala de referencia (Fig. 4b). Predominan los índices de 15-19 y 31-35 puntos, destacándose los valores mínimos (Fig. 11) en la zona próxima al ANP de 9-14 puntos.

**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.

Para la región se consideraron ambientes como depósitos piroclásticos, rocas volcánicas fracturadas, aluviones de granulometría media y fina, cuyos rangos estuvieron entre 3 y 9 puntos. Los índices predominantes obtenidos al multiplicar el rango por el peso estuvieron entre 19 y 31 puntos (Fig. 12). Los valores máximos se presentaron en la zona aledaña al ANP (33-36).

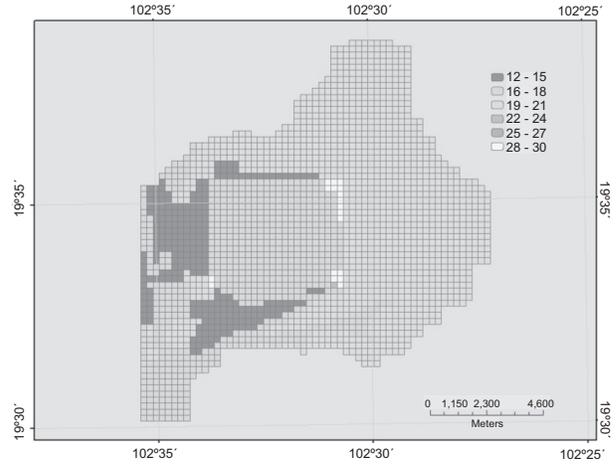


Fig. 11. Mapa del índice de vulnerabilidad para el parámetro I

**T**, tipo de suelo. Esta es la “primera línea de defensa” del acuífero. Dentro de la región se acumulan suelos de tipo areno-arcillosos, en tanto que en las periferias del valle predominan los suelos arenosos y hacia las partes montañosas su distribución superficial representa un porcentaje mínimo. Este hecho se refleja en los índices obtenidos para este parámetro, en el que los valores predominantemente altos (44-50) se encuentran en la zona de menor pendiente (Fig. 13), donde la agricultura es intensiva.

**A**, características hidrogeológicas. De acuerdo con las características geológicas de la región, el acuífero se comporta predominantemente como libre. 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, piroclásticas, depósitos aluviales y depósitos de caída. Los índices obtenidos

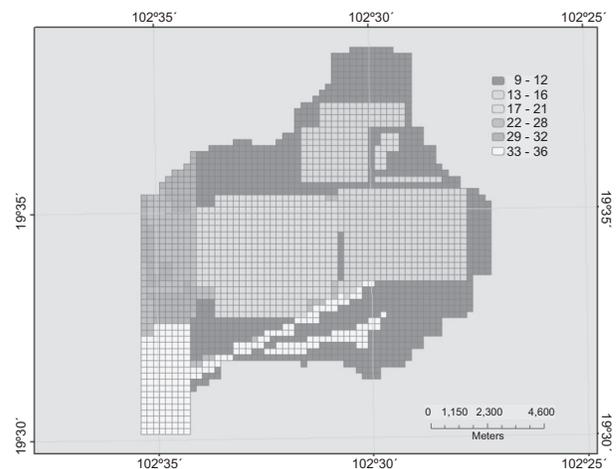


Fig. 12. Mapa del índice de vulnerabilidad para el parámetro N

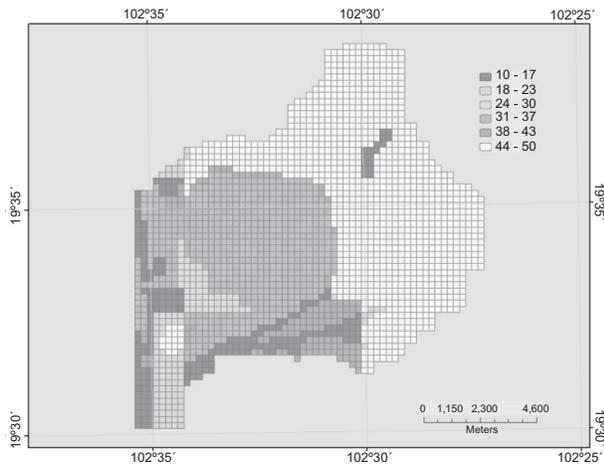


Fig. 13. Mapa del índice de vulnerabilidad para el parámetro T

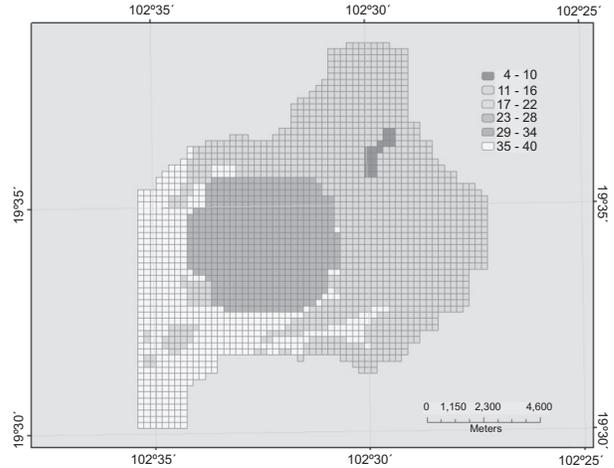


Fig. 15. Mapa del índice de vulnerabilidad para el parámetro C

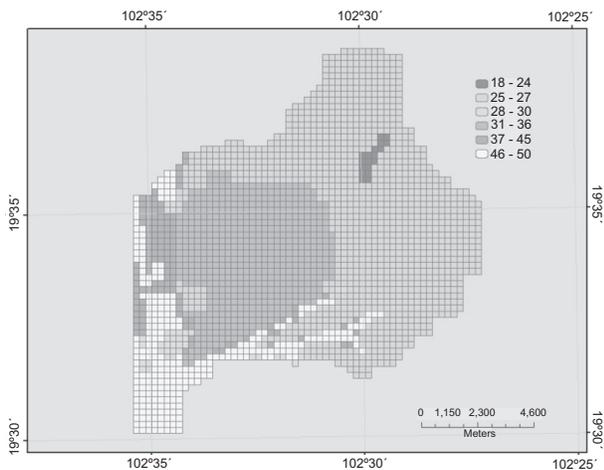


Fig. 14. Mapa del índice de vulnerabilidad para el parámetro A

(Fig. 14), una vez multiplicado el rango por el peso, fueron de 46-50 puntos hacia el área de estudio.

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. Algunas estructuras permeables, como son las fallas regionales, tienen fuerte influencia en los valores altos de este parámetro.

Silva y Estrada (2005) calcularon valores de K mediante un permeámetro Gelph, obteniendo rangos entre 5 (1E-5m/s) y 8(1E-34 m/s); predominan índices de 11-16 puntos hacia las partes planas (Fig. 15), localizándose nuevamente los valores mayores hacia la zona próxima al ANP (35-40).

S2, topografía. Con base en el modelo digital de elevación, se generó el mapa de pendientes para el área de estudio. Por ser una región muy abrupta, se obtuvieron valores superiores a 30 %, nivel máximo en la escala del método.

Las áreas de menor pendiente (Fig. 16) estuvieron entre 5 y 8 %. 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. Los índices dominantes oscilaron entre 13-16 puntos.

Índice SINTACS. El plano de vulnerabilidad es el resultado de la suma aritmética de los siete parámetros; los valores altos son proporcionales a los valores de cada uno.

La figura 17 muestra la distribución de cada rango; en la región predominan vulnerabilidades de altas

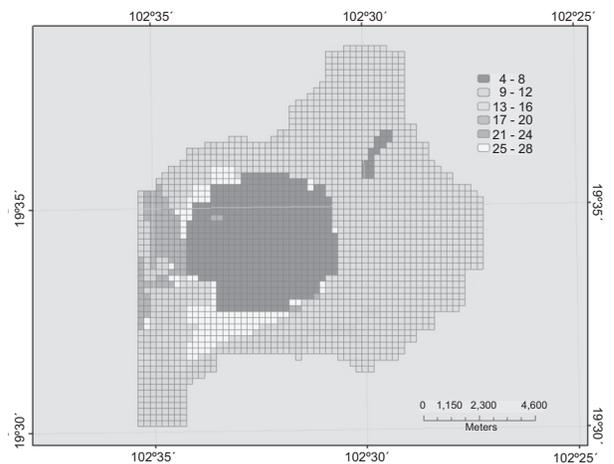
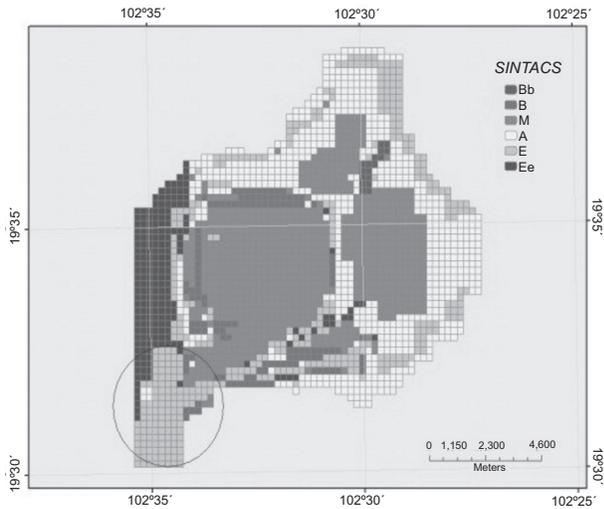


Fig. 16. Mapa del índice de vulnerabilidad para el parámetro S2



**Fig. 17.** Mapa de vulnerabilidad SINTACS para el valle de Los Reyes. El círculo señala la ubicación del ANP Chorros del Varal. Bb-Extremadamente alta, B-Muy alta, M-Alta, A-Mediana, E-Baja, Ee-Muy baja

a medias, destacando el área aledaña al acceso al ANP como de muy alta vulnerabilidad. Los valores bajos reflejan zonas donde el ambiente acuífero es predominantemente arcilloso y de escaso fracturamiento.

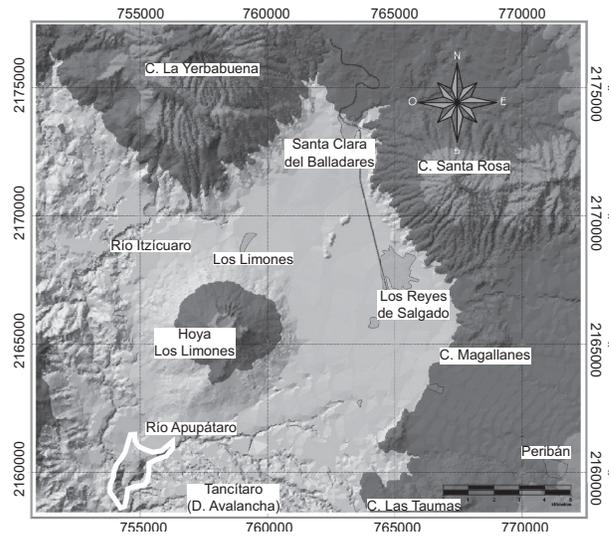
**DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

Actualmente el Colegio de Michoacán está realizando el Programa de Manejo del ANP Chorros del Varal, efectuando para ello un estudio detallado de su entorno natural. El presente estudio hidrogeológico forma parte del arriba mencionado, siendo uno de sus objetivos principales determinar justificadamente la ampliación del área de amortiguamiento a través de índices de vulnerabilidad.

En la **figura 18** se muestra la propuesta original de zona de amortiguamiento realizada por el Colegio de Michoacán, que es una superficie de terreno que rodea y protege la zona núcleo para evitar impactos ambientales.

Se propone ampliar la zona de amortiguamiento en función del papel preponderante que esta región juega en el proceso de recarga del acuífero que da origen a los Chorros del Varal, así como su importancia en el proceso de tránsito del flujo hídrico regional y local; esto la hace coincidente con el área aledaña al acceso al ANP, cuyos niveles de vulnerabilidad son muy altos (**Fig. 19**).

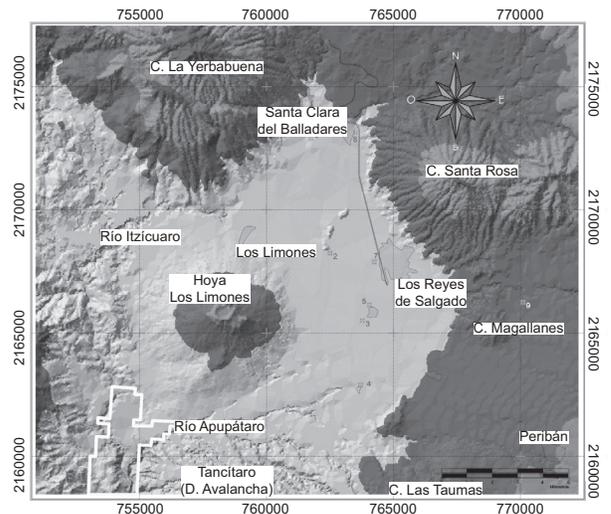
A diferencia del método DRASTIC, el SINTACS incluye cinco escenarios hidrogeológicos con diferentes pesos para cada uno de los parámetros, lo que



**Fig. 18.** Esquema original de la zona de amortiguamiento del ANP Chorros del Varal, según El Colegio de Michoacán A.C.

hace que los resultados sean más representativos. Su manejo en un SIG facilita la incorporación de otros elementos como tipo, densidad y estado de la vegetación, esenciales en los programas de manejo del ANP.

El mapa de vulnerabilidad está representado por seis niveles de riesgo, en rangos de 26-260 puntos. De manera preponderante, la región muestra un esquema de vulnerabilidad alta a mediana debido principalmente a la predominancia de materiales volcánicos de media a alta permeabilidad; destaca el área aledaña al acceso al Parque de los Chorros



**Fig. 19.** Propuesta de ampliación para la zona de amortiguamiento, haciéndola coincidente con el área aledaña al acceso hacia el ANP, cuyos niveles de vulnerabilidad son muy altos

del Varal como de muy alta vulnerabilidad (186-210 puntos). Los valores bajos reflejan zonas donde el ambiente acuífero es predominantemente arcilloso y de escaso fracturamiento.

El mapa de vulnerabilidad se incorporó al Programa de Manejo de dicho Parque, que se convierte en el instrumento de planeación estratégica que garantiza la administración del Área Natural mediante su adecuada aplicación, y por tanto la permanencia a largo plazo de sus recursos.

Los métodos de vulnerabilidad en general presentan desventajas metodológicas, principalmente en lo relacionado con la asignación de valores de peso y rango de cada parámetro. Tal asignación surgió de la experiencia de los más de 200 hidrogeólogos norteamericanos que Aller reunió cuando propuso el método DRASTIC, predecesor del SINTACS. Por ello, se recomienda que como punto de comparación se apliquen al menos dos métodos de vulnerabilidad (AVI, GOD, EPIK, GALDIT), que ayudarían a precisar los mapas obtenidos.

## AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue realizado gracias al apoyo económico recibido por el Colegio de Michoacán A.C. y el Instituto Politécnico Nacional.

## REFERENCIAS

- APHA (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20<sup>a</sup> ed. American Public Health Association. Washington, EUA. 1325 pp.
- Civita M. y De Maio M. (2000). *Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico SINTACS R5*. Pitagora, Boloña, 248 pp.
- CNA (2002). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Cotija, Estado de Michoacán. Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. Informe. México, D.F., 26 pp.
- Foster S. e 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.
- GCMC (2004). Decreto administrativo. Declaración de área natural protegida "Los Chorros del Varal". Gobierno Constitucional de Michoacán de Ocampo. Periódico Oficial. Tomo CXXXII, Número 64.
- Guerasimov I. P. (1970). *Iz polzovanie geomorfologicheskij metodov pri structurnogeologicheskij issledovanii*. Iadro, Moscú, 296 pp.
- 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.
- Hasenaka T. y Carmichael I.S.E. (1987). The cinder cones of Michoacán-Guanajuato central México: petrology and chemistry. *J. Petrol.* 28, 241-269.
- Negendank J.F.W., Emmermann R., Krawczyk R., Mooser F., Tobschall H., Werle D. (1985). Geological and geochemical investigations on the Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geofis. Int.* Vol. 24, 477-575.
- Nixon G.T. (1982). The relationship between quaternary volcanism in central México and the seismicity and structure of subducted ocean lithosphere. *Geol. Soc. Am. Bull.* 93, 514-523.
- Pasquare G., Ferrari L., Perazzoli V., Tiberi M. y Turchetti, F. (1987). Morphological and structural analysis of the central sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geofis. Int.* Vol. 26-2, 177-193.
- Ramírez-Herrera M.T. (1990). Análisis morfoestructural de la Faja Volcánica Transmexicana (centro-oriente). Tesis de maestría. Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- LEEPAEM (2004). Reglamento de la Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente del Estado de Michoacán de Ocampo. Periódico Oficial Gobierno Constitucional de Michoacán de Ocampo. Tomo CXXXIII, Número 56, Morelia, Michoacán.
- Silva J.T. y Estrada F. (2005). Caracterización hidrogeológica de los Chorros del Varal, Michoacán. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Michoacán. Reporte Técnico. 32 pp.