

**Este artículo puede ser usado únicamente para uso personal o académico. Cualquier otro uso requiere permiso del autor y del Instituto Panamericano de Geografía e Historia**

**El siguiente artículo fue publicado en Revista Geográfica del IPGH, 145 (2009) 169-181.**

# Mapeo del riesgo a la contaminación del agua subterránea en los Valles Centrales de Oaxaca, México

I. Sandoval Montes<sup>\*</sup>  
J. A. Ramos Leal<sup>\*\*</sup>

## Abstract

The Central Valleys of Oaxaca, Mexico, are practically located in the center of Oaxaca State. They formed a “Y” depression inside the Sierra Madre del Sur, where the NW branch represents the Etna Valley aquifer and the NE branch represents the Tlacolula Valley aquifer, both of them are joined in the south part of Oaxaca city to form the aquifer of Zimatlan Valley. These aquifers are constituted by alluvial formations with thicknesses of up to several hundreds of meters, delimited in their base by mylonitic rocks of the Sierra Juarez from the Mesozoic and metamorphic rocks from the Precambrian. There is an important amount of groundwater extraction from the three aquifers; basically for potable water service to the communities settled around the area and for the irrigation of their small agriculture lands causing the increase in the hydraulic gradients, the deepening of the extraction and the depletion of the resource in some wells. The use of the DRASTIC method allows identifying the aquifer vulnerability to contamination of the aquifers Etna, Tlacolula and Zimatlan (Central Valleys of Oaxaca State) in an integral way. The influence of local superficial streams polluted with waste water from the communities is analyzed. A contamination index was determined using a INEGI GIS made for water quality.

*Key words: DRASTIC, Groundwater Vulnerability, Contamination Index, Central Valleys Oaxaca State, INEGI.*

\* Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI, México, correo electrónico: ismael.sandoval@inegi.org.mx

\*\* Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, IPICYT, San Luis Potosí, México.

## Resumen

Los Valles Centrales de Oaxaca, México, se localizan prácticamente en el centro del estado de Oaxaca, es una depresión en forma de "Y" ubicada en la Sierra Madre del Sur, donde el brazo NW representa el acuífero del Valle de Etna, el brazo NE al acuífero del Valle de Tlacolula, se unen al sur de la ciudad capital para formar el acuífero del Valle de Zimatlán. Las formaciones acuíferas se encuentran constituidas por rellenos aluviales con espesores de hasta varios cientos de metros, delimitados en su base por milonitas de la Sierra Juárez del Mesozoico y rocas metamórficas del Precámbrico; de los tres acuíferos se extraen importantes cantidades de agua subterránea, principalmente para el servicio de agua potable de las comunidades asentadas en la zona y para el riego de pequeñas parcelas, lo que ha originado el incremento en los gradientes hidráulicos, la profundización de la extracción y el agotamiento del recurso en algunos pozos. La aplicación del método DRASTIC permitió identificar la vulnerabilidad a la contaminación que presentan los acuíferos de Etna, Tlacolula y Zimatlán de manera integral, así como la influencia que tienen las corrientes superficiales que discurren por la zona y que son utilizadas para descargar las aguas residuales de las comunidades; se determinó un índice de contaminación a partir de un SIG de la calidad del agua levantado por el INEGI.

Palabras clave: *DRASTIC, vulnerabilidad acuífera, índice de contaminación, Valles Centrales de Oaxaca, INEGI.*

## Introducción

El área de estudio se ubica prácticamente en el centro del estado de Oaxaca, entre los paralelos 16° 35' 15" y 17° 23' 20" de latitud Norte y 96° 18' 20" a 97° 00' 15" al Oeste del meridiano de Greenwich (Figura 1<sup>a</sup>), morfológicamente son cuencas intramontañas alargadas en dirección de los patrones de fallamiento que controlan el comportamiento tectónico de la región, cuyas elevaciones oscilan desde los 1,500m en las planicies aluviales, hasta los casi 3,000m en las partes altas que delimitan las cuencas hidrológicas donde nacen los escurrideros que alimentan las corrientes superficiales.

Del subsuelo se extrae el 90% del agua para uso y consumo humano a través de pozos profundos, 8% por medio de norias y sólo el 2% es llevada de manantiales y galerías filtrantes (CNA, 2001), lo que ha originado la sobreexplotación del recurso con la consecuente disminución de los gastos de extracción, profundización de los niveles estáticos y degradación de la calidad del agua subterránea debido a la contaminación de los cuerpos de agua superficiales por las descargas de aguas residuales domiciliarias sin tratamiento y de la incipiente industria, que descargan de manera directa a los ríos Atoyac y Salado. Actualmente se construyó una planta de tratamiento para aguas residuales en la intersección de los ríos Atoyac y Salado.

El objetivo del presente trabajo es evaluar y mapear de manera integral, el riego a la contaminación acuífera por medio de mapas de vulnerabilidad acuífera (método DRASTIC) de los acuíferos en los Valles Centrales de Oaxaca, así como valorar mediante un índice de contaminación, la calidad química del agua subterránea a través de los SIG's que levanta el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para la elaboración de los conjuntos de datos hidrológicos de aguas subterráneas que publica.

### **Geología del área**

Al poniente de los Valles Centrales de Oaxaca (Sierra Oaxaca), afloran rocas metamórficas de tipo Gneis del Precámbrico, cubiertas en algunas zonas por secuencias sedimentarias carbonatadas Paleozoicas y Mesozoicas; en la bibliografía especializada se menciona la presencia de la Falla Etna, con una dirección preferencial NW-SE, que dio origen al graben en donde se han acumulado los sedimentos que alojan al acuífero de los valles de Etna y Zimatlán. Al NE se ubica la Sierra Juárez, cuya unidad principal es una kataclasita, secuencia metavolcánica en donde se aprecia el protolito que es una roca volcánica intermedia, así como rocas sedimentarias del Cretácico; en los límites prácticamente entre el aluvial y la roca se ubica la Falla Oaxaca, con un dirección NW-SE, que muy posiblemente influye en el régimen hidrológico de la zona. Al Norte del Valle de Tlacolula y Sur de la ciudad de Oaxaca, se presentan una serie de rocas volcanosedimentarias del Oligoceno, cubriendo a rocas sedimentarias del Cretácico; en esta zona también se identifica la Falla Donají con dirección (E-W), que influyó en la formación de la secuencia sedimentaria reciente. Los tres valles se encuentran asociados a estructuras geológicas de tipo graben (Figura 1c).

Las secuencias sedimentarias de los valles se encuentran delimitadas por un basamento de rocas metamórficas del Complejo Oaxaqueño del Precámbrico, en donde se han depositado una serie de materiales residuales constituidos por suelos arcillosos lacustres y aluviales, producto de los procesos denudatorios de las rocas existentes en el área.

### **Hidrología superficial**

Son dos las corrientes principales que discurren por la zona de estudio, el Río Atoyac, que nace al Norte de Telixtlahuaca en la Sierra de Sedas, circula por el Valle de Etna en dirección NW-SE, donde recibe el aporte de numerosos arroyos y llega al Valle de Zimatlán por su extremo Norte, donde se le incorpora el Río Salado, corriente principal del Valle de Tlacolula (Figura 1b), para continuar hacia el Sur e internarse en la Sierra Madre del Sur y desfogar en el Océano Pacífico.



**Figura 1a.** Localización del área de estudio.



**Figura 1b.** Delimitación de la red hidrográfica de la cuenca.

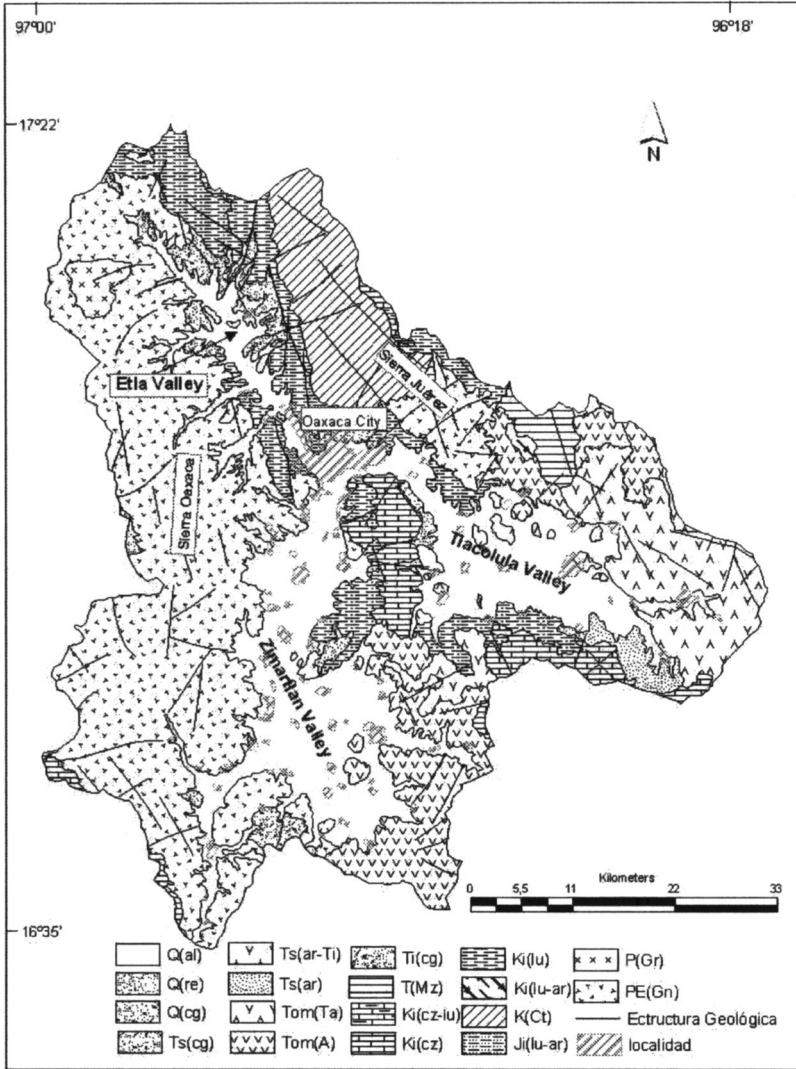


Figura 1c. Mapa Geológico de los Valles Centrales de Oaxaca, México (INEGI, 2007).

### Método DRASTIC

Este método fue desarrollado por Aller *et al.*, 1985, para evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos, de acuerdo a las características y el comportamiento de las variables consideradas en el acrónimo DRASTIC: **D** (depth – profundidad del agua freática) **R** (recharge – recarga neta) **A** (aquifer – litología del acuífero) **S** (soil – tipo de suelo) **T** (topography – topografía) **I** (impact – Impacto a la zona vadosa) **C** (hydraulic conductivity) – conductividad hidráulica del acuífero. Se basa en una clasificación numérica para evaluar la potencial contaminación del agua subterránea y se expresa como:

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

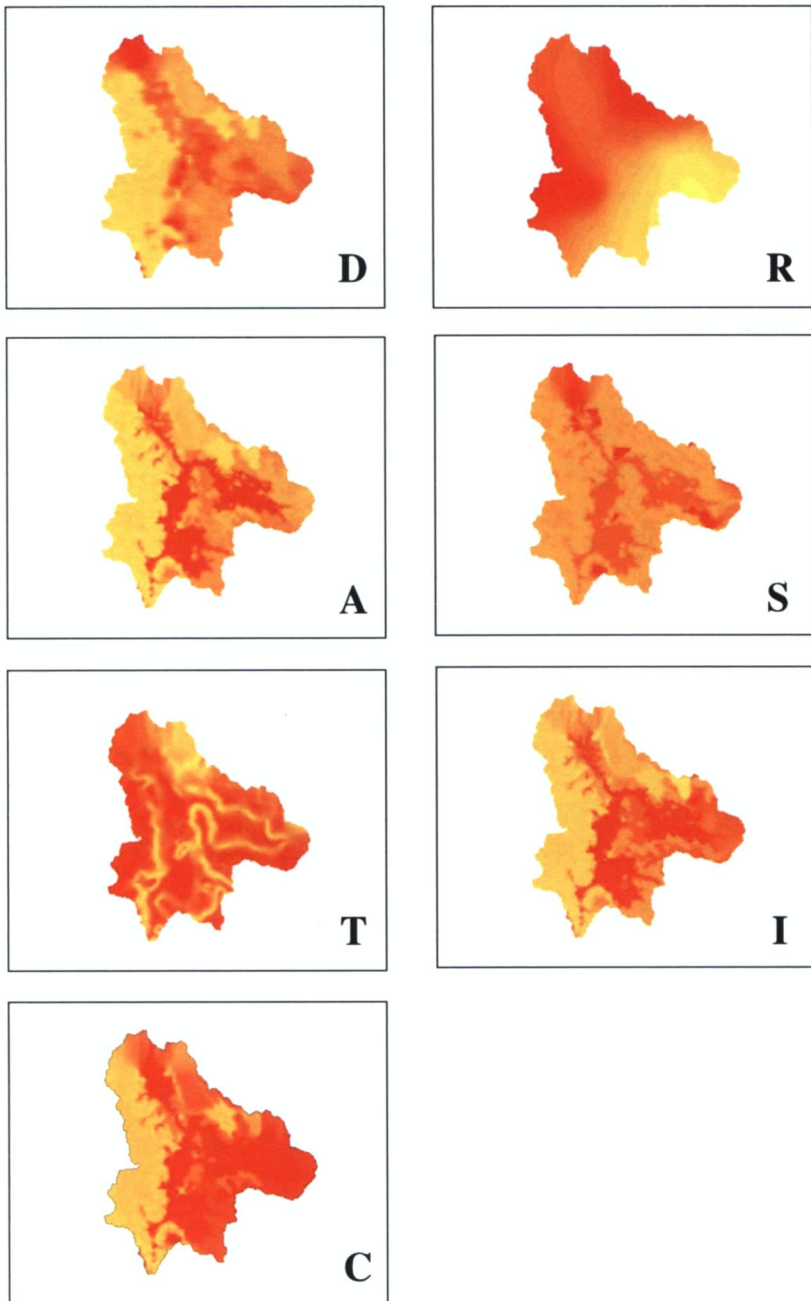
donde  $I$  es el índice potencial de contaminación,  $P_j$  es el valor de cada parámetro y  $W_j$  es el peso asignado a cada parámetro.

La obtención de los parámetros con los que se determinó la vulnerabilidad acuífera por el método DRASTIC, se obtuvieron a partir de la información proporcionada por el Organismo de Cuenca Pacífico Sur de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), e información extraída de la cartografía del INEGI (Figura 2). El levantamiento de la información de campo se llevó a cabo en dos etapas, comprendidas entre los meses de mayo y octubre del año 2007, con lo que se afinaron los valores de ponderación de las características físicas y químicas de las rocas y suelos que se presentan en la zona de estudio y que se utilizaron para adecuar el modelo.

### Aplicación del índice de contaminación

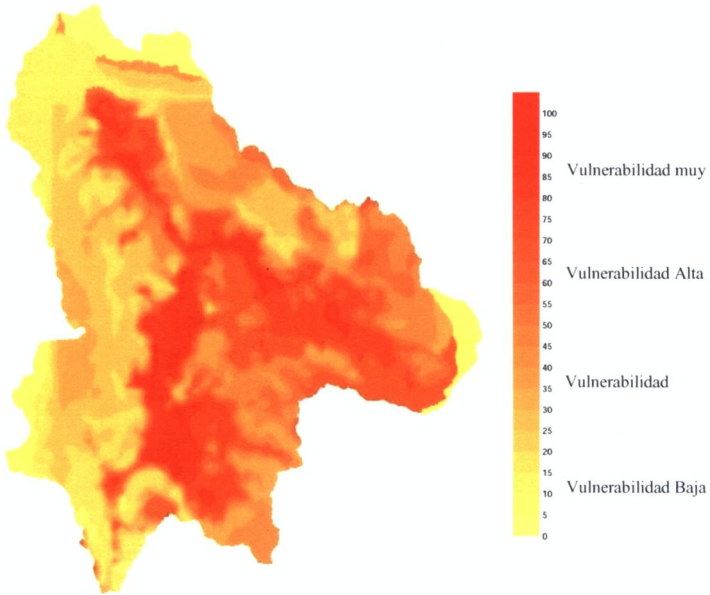
El índice de contaminación representa la suma de los factores individuales de los componentes presentes en las aguas subterráneas, que exceden los valores permisibles de alguna normativa para agua de consumo humano u otros servicios (Backman *et al.*, 1998). La determinación del índice de contaminación se lleva a cabo mediante la expresión:

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_{fi}$$

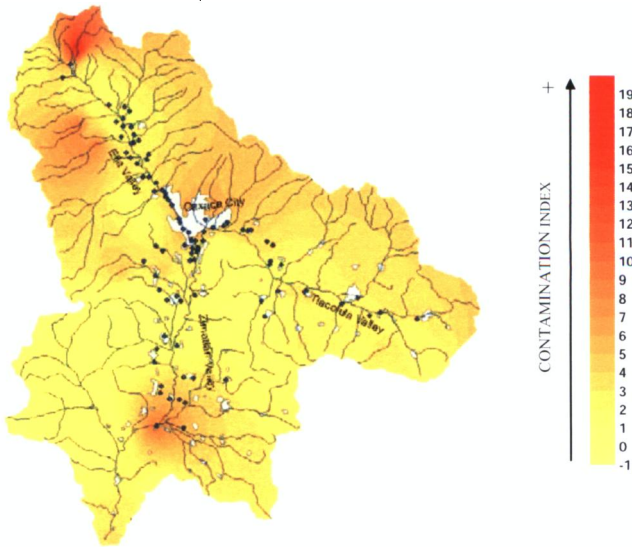


**Figura 2.** Configuraciones de cada uno de los parámetros DRASTIC, para los Valles Centrales de Oaxaca, México.

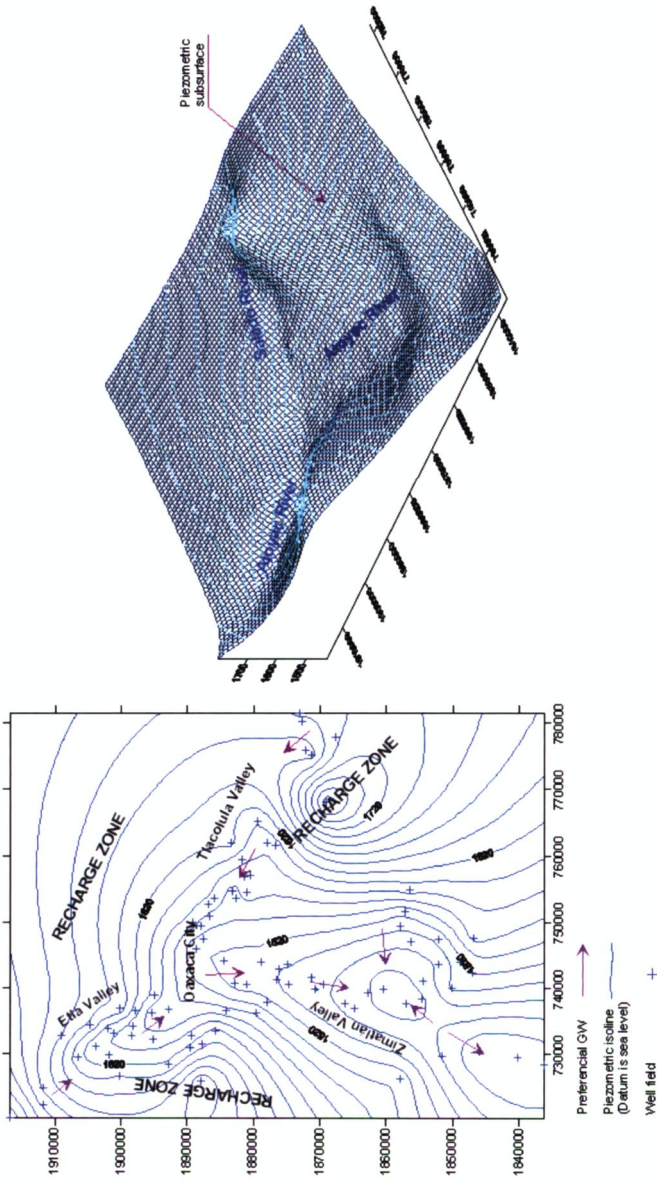




**Figura 3.** Vulnerabilidad acuifera para los Valles Centrales de Oaxaca, México, con base en el método DRASTIC.



**Figura 4.** Localización de los aprovechamientos muestreados y analizados, red hidrográfica e Índice de Contaminación Determinado en los Valles Centrales de Oaxaca, México.



**Figura 5.** Superficie piezométrica referida al nivel medio del mar, en los acuíferos de los Valles Centrales de Oaxaca, México, 2007.  
**Fuente:** CONAGUA.

donde:

$$C_{fi} = \frac{C_{Ai}}{C_{Ni}}$$

$C_{fi}$  = factor de contaminación para el  $i$ ésimo componente,

$C_{Ai}$  = valor analítico del  $i$ ésimo componente,

$C_{Ni}$  = concentración máxima permisible del  $i$ ésimo componente (N indica el valor normativo).

La determinación del índice de contaminación para los Valles Centrales de Oaxaca se realizó con base en el resultado de 89 muestras de agua subterránea levantadas entre los meses de mayo y octubre del 2007 por personal del INEGI; a éstas se les determinaron los aniones y cationes principales en el Laboratorio de Análisis de Materiales del INEGI; así mismo, en la etapa de campo, los aprovechamientos muestreados fueron georeferenciados mediante un multinavegador marca Brunton y a las muestras de agua se les determinó mediante un conductivímetro marca Oakton los parámetros de campo: pH, temperatura y conductividad eléctrica.

Los elementos y especies iónicas con valores analíticos menores a las concentraciones permisibles, no fueron tomados en consideración para su graficado; así mismo, los valores más altos de  $C_d$  son los que indican mayor grado de contaminación del recurso.

En el presente trabajo se utilizó en su mayoría los valores de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, aunque fue necesario usar algunos valores de otras normativas para su complemento.

### Resultados y conclusiones

1. El uso del método DRASTIC permitió identificar la vulnerabilidad intrínseca de los materiales que conforman los acuíferos de manera gráfica e integral en los valles de Etna, Tlacolula, Zimatlán y la zona centro de la ciudad de Oaxaca, en donde se puede apreciar que los Valles Centrales de Oaxaca presentan un grado de vulnerabilidad de media a muy alta (Figura 3).
2. La vulnerabilidad acuífera se encuentra asociada a las zonas por donde discurren los escurrimientos superficiales de la zona, de donde llega parte de la recarga de los acuíferos y que restituyen parte de la extracción, por lo que influyen de manera directa en la calidad fisicoquímica del agua subterránea.
3. La determinación del índice de contaminación con base en los resultados de los análisis fisicoquímicos del agua subterránea, permitió conocer el grado de alteración que presenta el agua subterránea en los Valles Centrales de Oaxaca; así como también, asociar la presencia de las concentraciones mayores de aniones y cationes principales a las fuentes potenciales de contaminación (Figura 4).
4. El uso de ambos métodos, permitió identificar las zonas con mayor riesgo a la contaminación acuífera y que se encuentran bien identificadas por las descargas

de aguas residuales domiciliarias sin tratamiento, que son arrojadas a los cuerpos de agua superficiales, así como a la proliferación de tiraderos a cielo abierto (basureros), lo que ha originado problemas sociales entre las comunidades vecinas.

5. Con base en los resultados obtenidos, se hace necesario diseñar una red de monitoreo de calidad del agua y darle continuidad a la red piezométrica con que cuenta la Comisión Nacional del Agua, a fin de contar con datos precisos sobre el incremento de los gradientes hidráulicos y la posible reversión de los flujos subterráneos (Figura 5).
6. El abatimiento de los niveles estáticos ha impactado de manera directa en los gastos de extracción de las comunidades que utilizan este recurso, especialmente del municipio de Oaxaca de Juárez, que no satisface su requerimiento con los aprovechamientos con que cuenta.
7. La extracción de agregados para la construcción (arena y grava) de los cauces de los escurrideros y de las zonas de inundación del Río Atoyac que se lleva a cabo sin ningún control, incrementa la vulnerabilidad de los acuíferos, al exponerlos a la evaporación, precipitación de sales minerales y a la posible infiltración de aguas de mala calidad fisicoquímica.
8. Es importante proponer una solución integral a las descargas de aguas residuales domiciliarias e industriales de todas las comunidades que se asientan en los Valles Centrales de Oaxaca, con la finalidad de evitar las descargas directas sin previo tratamiento.
9. Se propone llevar a cabo un inventario de los tiraderos a cielo abierto, así como de las presas de oxidación en donde se almacenan las aguas residuales de las comunidades que cuentan con este servicio, con la finalidad de identificar los efectos que están ocasionando al agua subterránea.

### **Bibliografía**

- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F. and Ortega-Gutiérrez, F. O., "Structural evolution of the Sierra de Juárez mylonitic complex, state of Oaxaca, México", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 11, núm. 2, pp. 147-156, 1994.
- Alaniz-Álvarez, S. A. y Nieto-Samaniego, A. F., "Representación gráfica de los dominios de ruptura y deslizamiento-aplicación a la falla de Oaxaca, México", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 14, núm. 1, pp. 26-37, 1997.
- Aller, L. T., Bennett, J. H., Lehr, Petty, R. J. and Hackett, G., *DRASTIC; a Standard System for evaluation groundwater pollution using hydrogeologic setting*, EPA/600/2-85/018 US EPA, 1985.
- Auge, M., "Vulnerabilidad de Acuíferos", *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, núm. 4, pp. 85-103, 2004.

- Backman, B., Bodis, D. Lahermo, P., Rapant, S., Tarvainen, T., "Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia", *Environmental Geology* 36 (1-2), pp. 55-64, 1998.
- Belmonte-Jiménez, S. I.; Campos-Enríquez, J. O. and Alatorre-Zamora, M. A., "Vulnerability to contamination of the Zaachila aquifer, Oaxaca, Mexico", *Geofísica Internacional*, vol. 44, núm. 3, pp. 283-300, 2005.
- Comisión Nacional del Agua (CNA) (Gerencia Regional Pacífico Sur)-COPEI INGENIERIA, S.A. de C.V., "Estudio de actualización geohidrológica del acuífero de Valles Centrales, estado de Oaxaca", Contrato SGT-GRPS-OAX-01-059-CE-I3, 2001.
- , "Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valles Centrales", Estado de Oaxaca, México, 2001.
- Corniello, A.; Ducci, D. and Monti, G. M., "Aquifer pollution vulnerability in the Sorrento peninsula, southern Italy, evaluated by SINTACS method", *Geofísica Internacional*, vol. 43, núm. 4, pp. 575-581, 2004.
- Cusimano, G., De Maio, M., Gatto, L. Hauser, S. and Pisciotta, A., Application of SINTACS method to the aquifers of Piana di Palermo, Sicily, Italy, *Geofísica Internacional*, vol. 43, núm. 4, pp. 661-670, 2004.
- Estándares del Reglamento Nacional Primario de Agua Potable (EPA), [www/EPA/Estándares del Reglamento Nacional Primario de Agua Potable.htm](http://www/EPA/Estándares del Reglamento Nacional Primario de Agua Potable.htm)., 2000.
- Flores-Márquez, E. L. Chávez, R. E., Martínez-Serrano, R. G., Herrera-Barrientos J., Tejero-Andrade, A. and Belmonte, S., "Geophysical Characterization of the Etna Valley Aquifer, Oaxaca, México", *Geofísica Internacional*, vol. 40, núm. 4, pp. 245-257, 2001.
- Flores-Márquez, E. L., Martínez-Serrano, R. G. Chávez, R. E., Crusillo, Y., Jiménez, G. and Campos-Enríquez, O., "Numerical modeling of Etna Valley aquifer, Oax., Mexico: Evolution and remediation scenarios", *Geofísica Internacional*, 47 (1), 27-40, 2008.
- Gaceta Ecológica núm. 6, "Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua", CE-CCA-001/89, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, México, enero de 1990.
- Heinrich, S. C., Duncan, K. J., Ortega-Rivera, A., Ortega-Gutiérrez, F., and K. W. Lee, J., "Mid-Tertiary cooling in the Precambrian Oaxaca Complex of southern Mexico: indication of exhumation and inland arc migration", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 21, núm. 2, pp. 203-211, 2004.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), *Carta Geológica E14-9 (Oaxaca)*, escala 1:250 000, Impresa y digital, México, 2007.
- , *Carta Geológica E14-11 (Zaachila)*, escala 1:250,000, Impresa y digital, México, 2007.

- , *Carta Topográfica E14-9 (Oaxaca)*, escala 1:250,000, Impresa y digital, México, 2007.
- , *Carta Topográfica E14-11 (Zaachila)*, escala 1:250,000, Impresa y digital, México, 2007.
- Martínez-Serrano, R. G., Solís-Pichardo, G., Flores-Márquez, E. L., Macías-Romo, C. and Delgado-Durán, J., “Geochemical and Sr-Nd isotopic characterization of the Miocene volcanic events in the Sierra Madre del Sur, central and southeastern Oaxaca, Mexico”, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 25, núm. 1, pp. 1-20, 2008.
- Ramos, L. J. A., Barrón, R. L. E., Sandoval M. I., “Combined use of aquifer contamination risk maps and contamination indexes in the desing of water quality monitoring networks in Mexico”, *Geofísica Internacional*, vol. 43, núm. 4, pp. 641-650, 2004.
- Secretaría de Gobernación, “Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”, México, 1994.
- SEMARNAT-IMTA-Gobierno del Estado de Oaxaca, “Estudio para el mejoramiento del sistema de agua potable y saneamiento de la ciudad de Oaxaca, Oax. (tomo 1 y 2)”, Contrato de prestación de servicios IMTA: HC-0562-3. CEA: 12R100-PAFEF-U9-01-IMTA01/05, 2005.
- Urrutia-Fucugauchi, J. and Ferrusquía-Villafranca, I., “Paleomagnetic results for the Middle-Miocene continental Suchilquitongo Formation, Valley of Oaxaca, southeastern Mexico”, *Geofísica Internacional*, vol. 40, núm. 3, pp. 191-205, 2001.
- World Health Organization (WHO), *Guidelines for Drinking-water Quality. First addendum to third edition*, vol. 1, Recomendations, 2006.