

Determinación del índice de vulnerabilidad mediante el método DRASTIC

Caso: Acuífero del Valle de Tulancingo, Hidalgo, México

Ingrid Árcega¹, Elena Otazo¹, Eric Galindo², Otilio Acevedo³, Claudia Romo¹

Área Académica de Química¹, Instituto de Ciencias Agropecuarias²

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo^{1,3}, Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado del Estado de Hidalgo²

Mineral de la Reforma, Hgo.¹, Pachuca, Hgo.², Tulancingo, Hgo.³; México

ingridarcega@yahoo.com

Abstract— The Tulancingo Valley aquifer, meets the needs of drinking water for approximately 250,000 people. The objective of this research was to determine the aquifer vulnerability index and assess susceptibility to a possible contamination problem. The DRASTIC method is performed using geographic information systems (GIS) and has three assumptions: the pollutant is introduced on the surface, is transferred into the groundwater by precipitation and is moving in the water. Factors that take into account the DRASTIC method are: depth, recharge, geology, soil type, topography, vadose zone and hydraulic conductivity. The highest rates of vulnerability are located in the center of the valley where the land use is for anthropogenic activities.

Keyword— *Aquifer, vulnerability index, contamination, DRASTIC, anthropogenic activities, land use.*

Resumen— El acuífero del Valle de Tulancingo, satisface las necesidades de agua potable para aproximadamente 250,000 personas. El objetivo de esta investigación fue determinar el índice de vulnerabilidad del acuífero que permitió evaluar la susceptibilidad a un posible problema de contaminación. El método DRASTIC se realiza mediante sistemas de información geográfica (SIG) y posee tres supuestos: el contaminante es introducido sobre la superficie, es trasladado al agua subterránea por precipitación y es móvil en el agua. Los factores que toma en cuenta el método DRASTIC son: profundidad, recarga, geología, tipo de suelo, topografía, zona saturada y conductividad hidráulica. Los índices de vulnerabilidad más elevados se localizan en el centro del valle en donde el uso de suelo es para actividades antropogénicas.

Palabras claves— *Acuífero, índice de vulnerabilidad, contaminación, DRASTIC, actividades antropogénicas, uso de suelo.*

I. INTRODUCCIÓN

Dado que la población y la industrialización han aumentado, grandes cantidades de efluentes domésticos e industriales pueden estar siendo conducidos hacia el agua subterránea [1]. El acuífero del Valle de Tulancingo se localiza en la porción suroriental del Estado de Hidalgo en México, representa cerca del 4.98% del territorio estatal, comprende los municipios de Santiago Tulantepec, Cuautepec de Hinojosa, Tulancingo, Metepec, Acatlán, Agua Blanca, Singuilucan, Acaxochitlán, Tenango de Doria y Huasca de Ocampo. Tiene una superficie aproximada de 1,021 km² y satisface las necesidades de agua potable para aproximadamente 250,000 personas en las principales zonas urbanas (Figura 1).

Los títulos y número de la figura deben aparecer en la parte inferior de la figura. Deberá enviarnos en archivos por separado, formato TIFF, todas las figuras por si hubiese algún problema al momento de la edición final de la revista.

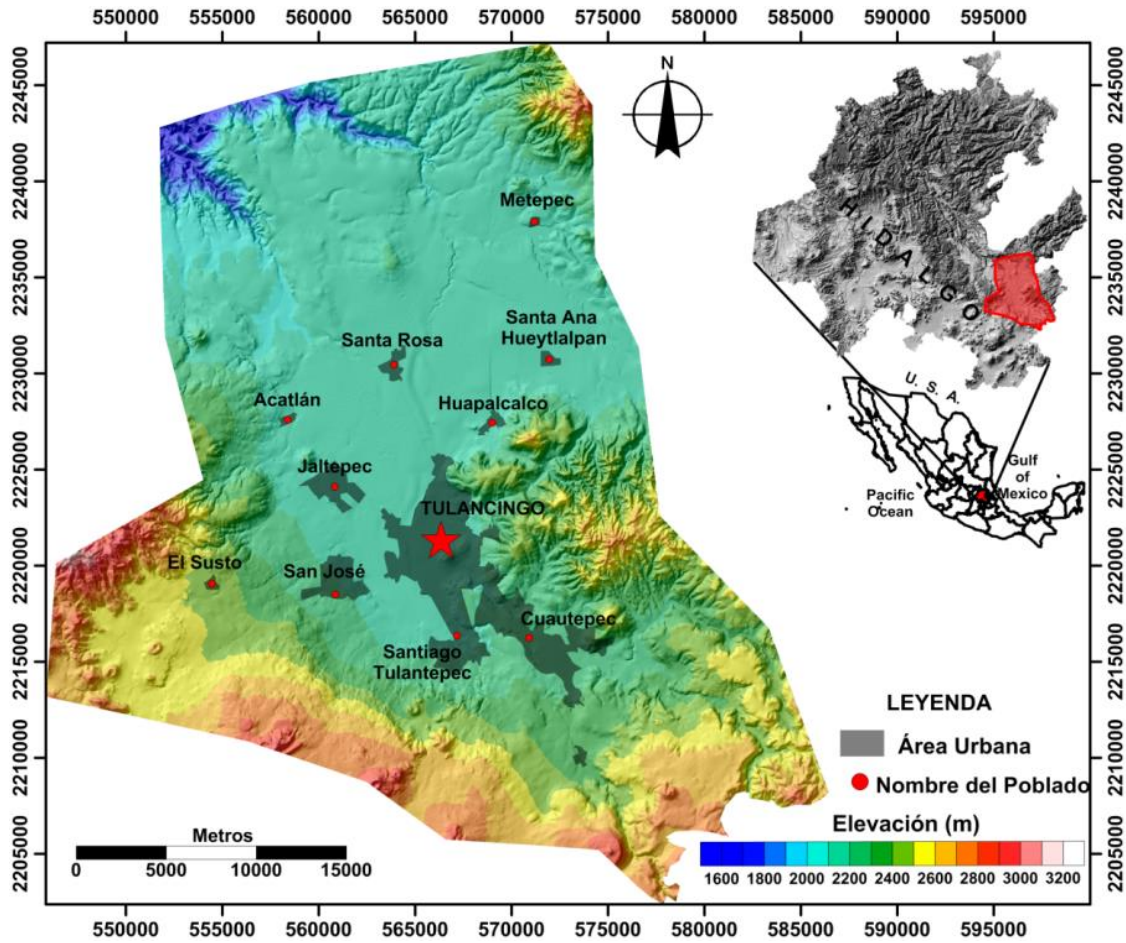


Fig. 1. Ubicación del área de estudio.

El volumen total extraído por bombeo en el año 2006 es de 111 Mm³/año, de los cuales 78.5% son para uso agrícola, 18.8% para uso público urbano, 1.85% para uso doméstico y 2.0% para uso industrial [2] (Figura 2).

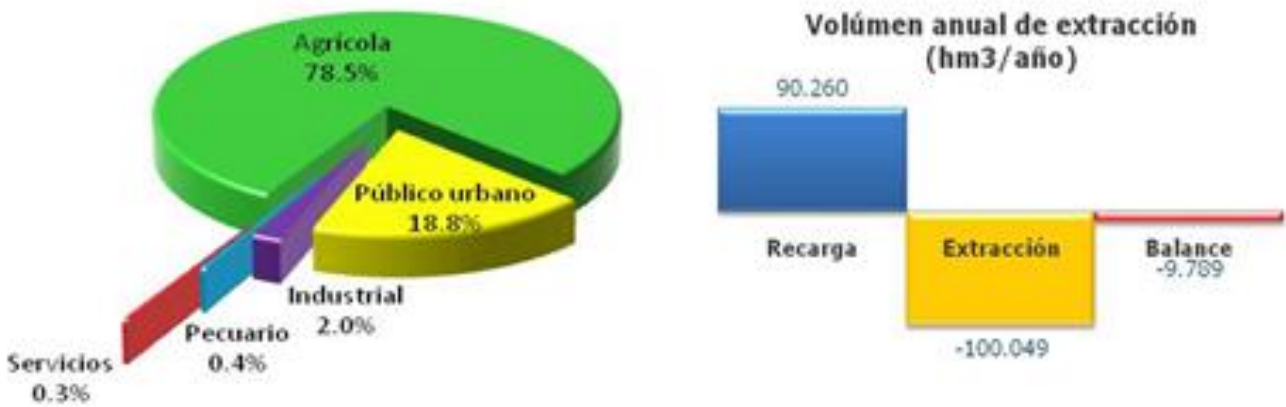


Fig. 2. Principales usos del agua subterránea y su balance hídrico.

Cuantificar los posibles riesgos en la calidad del agua subterránea es esencial para la implementación de leyes y políticas tanto nacionales, estatales como municipales para proteger las áreas más sensibles dentro de un acuífero a problemas de contaminación [3].

El uso del término "vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos" se inició en la década de 1970 en Francia y más ampliamente en la década de 1980, cuando se hizo cada vez más evidente a través de la investigación de que muchos acuíferos sufrían de contaminación antropogénica significativa, que resulta en la degradación que pone en peligro la utilidad del recurso [4].

La vulnerabilidad se define generalmente como la sensibilidad de un acuífero a ser afectado negativamente por un contaminante, se refiere a la probabilidad de que las aguas subterráneas en un acuífero se contaminen en concentraciones que suponen un riesgo para la salud humana o para el medio ambiente [5].

El objetivo de este estudio es obtener un mapa en donde se integre toda la información del acuífero para localizar las zonas más susceptibles mediante el método DRASTIC a problemas de contaminación. Las zonas con los valores más altos de índice de vulnerabilidad se localizan en el centro del valle debido a la ubicación del municipio de Tulancingo, el cual es el que tiene mayor número de habitantes y su uso de suelo es totalmente urbano, por lo que los riesgos a algún percance de origen antropogénicos son muy altos.

II. METODOLOGÍA

DRASTIC fue desarrollado en el año de 1987 para la EPA por Aller, se basa en el concepto de evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos, es un método muy utilizado debido a que sirve tanto para dar resultados cualitativos como cuantitativos [6]. Los datos que utiliza son los siguientes:

- D Profundidad del nivel estático
- R Recarga neta
- A Geología del acuífero
- S Uso de suelo
- T Topografía
- I Material geológico de la zona no saturada
- C Conductividad hidráulica

El método posee tres supuestos importantes: el contaminante es introducido sobre la superficie de la tierra, el contaminante es trasladado al agua subterránea por precipitación y el contaminante es móvil en el agua.

Los índices de cada variable son los siguientes para cada uno de los factores a evaluar en el método DRASTIC (w):

El número y título de una tabla aparece como encabezado. No permita que una tabla aparezca en dos páginas. Debe estar centrada.

Tabla I. Pesos para cada variable del método DRASTIC.

	Tipo de Variable						
	D _w	R _w	A _w	S _w	T _w	I _w	C _w
Pesos	5	4	3	2	1	5	3

La información para llevar a cabo el método DRASTIC fue proporcionada por COTAS Tulancingo A.C. (Comité Técnico de Aguas Subterráneas Asociación Civil), la Comisión Nacional del Agua (CNA) y la Comisión Estatal de Agua y Alcantarillado del Estado de Hidalgo (CEAAH).

Depth (profundidad del nivel estático): se utilizaron datos de Lesser 2006, en donde el nivel estático más profundo es de 182 metros y el más somero de 40 metros, originalmente este parámetro fue desarrollado para acuíferos que no sobrepasaban los 30 metros de profundidad en su nivel estático, sin embargo en situaciones como las que se tienen en México se conocen casos de contaminación en acuíferos con profundidades mayores a 30 metros [6], para el caso de nuestra área de estudio la clasificación de los rangos es de 1-5 [8].

Tabla II. Valores de profundidad y rangos de la variable depth (D).

Profundidad (m)	Valoración D _r
30-50	5
50-75	3
75-100	2
>100	1

Recharge (recarga): indica la cantidad de agua por unidad de área que penetra en el interior de la tierra y alcanza el nivel freático, considerando tanto el agua de lluvia como la procedente del riego. La capacidad de infiltración estará en relación con el material geológico, por ejemplo una arenisca tendrá mayor capacidad de infiltración a comparación de una arcilla [9]. Para la realización del mapa del área de estudio se tomaron los datos del estudio Hidrogeológico de Lesser 2006, se estableció la ecuación de balance volumétrico del acuífero en el cual las entradas de agua subterráneas son iguales a las salidas más el cambio de almacenamiento. Las entradas corresponden a recarga por flujo subterráneo y a la infiltración, tanto aquella procedente de la lluvia dentro de la zona, como la infiltración generada por retornos de riego. Las salidas se dividen en el flujo subterráneo que sale del sistema acuífero al norte, la salida por manantiales y la extracción a través de pozos [2].

Tabla III. Datos de entradas y salidas para el balance geohidrológico.

Entradas	54.8 hm ³ /año
Infiltración	19.7 hm ³ /año
Extracción	80.6 hm ³ /año
Salidas Subterráneas	4.4 hm ³ /año
Cambio de almacenamiento	10.5 hm ³ /año

Aquifer Media (geología del acuífero): se refiere al medio material, consolidado o no, en el que se localiza el acuífero. El tipo de roca que constituye el acuífero ejerce un notable control sobre la trayectoria que los contaminantes siguen para llegar al agua subterránea. La dirección que un contaminante puede seguir para alcanzar la superficie del agua subterránea, está fuertemente influenciado por las fracturas o grietas presentes en las rocas y que muchas veces pueden proporcionar

un fácil acceso para que alcance el agua subterránea [10]. En general, cuanto mayor sea el tamaño del grano y más fracturas existan en el medio, mayor será la permeabilidad, menor la capacidad de atenuación del contaminante y mayor la posibilidad de contaminación de las aguas subterráneas. Los valores que se le asignó a cada campo de la geología están dentro de los rangos de 2-9 debido a que todas son rocas volcánicas [11].

Tabla IV. Valores de tipo de roca y rangos para la variable Acuífero media (A).

Tipo de material	Clase (Ar)
Ígnea-Metamórfica	2-5
Ígnea-Metamórfica alterada	3-5
Arenisca masiva	4-9
Caliza masiva	4-9
Arena y grava	4-9
Basaltos	2-10
Caliza cárstica	9-10

Soil (suelo): es la parte superior de la zona no saturada. Para evaluar este parámetro se utilizó el uso de suelo poder relacionar los posibles problemas de contaminación, con eventos antropogénicos generados en la superficie [12].

Tabla V. Valores uso de suelo y rangos para la variable Soil (S).

Uso de suelo	Clase (Sr)
Forestal	1
Urbano	5
Tierra desnuda	2
Agricultura	3

Topography (topografía): es la pendiente del terreno y será la probabilidad de que un contaminante permanezca en el sitio donde ha sido depositado o se aleje del lugar por efecto de la escorrentía superficial, y por consiguiente no se infiltre.

Tabla VI. Valores porcentaje pendiente y rangos para la variable Topography (T).

% Pendiente	Clase (Tr)
0-7	9
7-15	6
15-23	3
23-33	2
>33	1

Impact (geología de la zona no saturada): es aquella que se encuentra por encima de la superficie del agua subterránea y por debajo del nivel del suelo. Esta definición se puede aplicar tanto a los acuíferos libres como a los confinados. El tipo de zona no saturada determina las características que van a condicionar la atenuación de los contaminantes en el espacio comprendido entre el suelo y el nivel

freático. En esta zona pueden ocurrir procesos tales como biodegradación, neutralización, filtración mecánica, reacción química y dispersión.

Para el área de estudio la zona no saturada se encuentra entre el acuífero superior y el inferior, por lo tanto el acuífero del Valle de Tulancingo es semiconfinado, los pozos de extracción se localizan en el acuífero inferior, y la zona no saturada es la que sirve como división entre los dos acuíferos, los datos para realizar este mapa fueron tomados de los sondeos de geofísica: sondeos eléctricos verticales (SEV), mediciones electromagnéticas (TEMS) y gravimetría, los cuales indican la resistividad y la densidad de las diferentes unidades geológicas del acuífero entre 50 y 100 metros de profundidad [2]. La correlación entre la zona no saturada y el uso de suelo son una herramienta importante para la localización de las áreas con mayor vulnerabilidad [13], por lo que sí determinada área tiene menor espesor en la zona vadosa y tiene un uso de suelo por ejemplo industrial, existirá mayor riesgo de vulnerabilidad. Los valores de I_r son de 5 e $I_w=5$ debido a que todo el terreno está comprendido por rocas volcánicas, principalmente basaltos.

Hydraulic Conductivity (conductividad hidráulica del acuífero): es la capacidad de los materiales del acuífero para transmitir agua [14], el contaminante está controlado bajo la acción de un gradiente hidráulico. En general, conductividades elevadas están asociadas a una vulnerabilidad alta, debido a que el contaminante se puede mover más fácilmente de un punto a otro una vez que ha sido introducido en el acuífero.

Los datos que se procesaron fueron a partir del estudio de Lesser 2006, en donde tiene pruebas de bombeo de 42 pozos, los datos de transmisibilidad fueron interpretados por los métodos de Theis y Hantush [2].

Tabla VII. Valores de conductividad hidráulica y rangos para la variable Hydraulic conductivity (C).

Conductividad Hidráulica m/día	Clase (Cr)
0-4	1
4-8	1
8-13	1
13-18	2
18-22	2
22-28	2
28-37	6
37-50	8
50-90	9

Para cuantificar cada uno de los factores DRASTIC se aplica un sistema de evaluación en el que se establecen tres parámetros significativos: pesos, rangos y valores. La determinación de los índices de vulnerabilidad involucra multiplicar cada uno de los parámetros (r) por el peso que se le asigna (w) y se suma el total, posteriormente se realiza una reclasificación a cada mapa con los nuevos valores y por último se aplica la herramienta algebra de mapas mediante el software QGIS en donde se suman los parámetros obteniendo el mapa final de índice de vulnerabilidad. Los pesos de cada criterio en específico están dados de acuerdo a su importancia y su aplicabilidad [15] (Figura 3).

Para realizar el mapa final de Vulnerabilidad, se lleva a cabo el álgebra de mapas el cual consiste en una sumatoria de cada una de las variables por sus pesos, obteniendo el índice de vulnerabilidad.

$$DrDw \text{ (profundidad)} + RrRw \text{ (recarga)} + ArAw \text{ (geología)} + SrSw \text{ (suelo)} + TrTw \text{ (topografía)} + IrIw \text{ (zona saturada)} + CrCw \text{ (conductividad hidráulica)} = \text{Índice de vulnerabilidad}$$

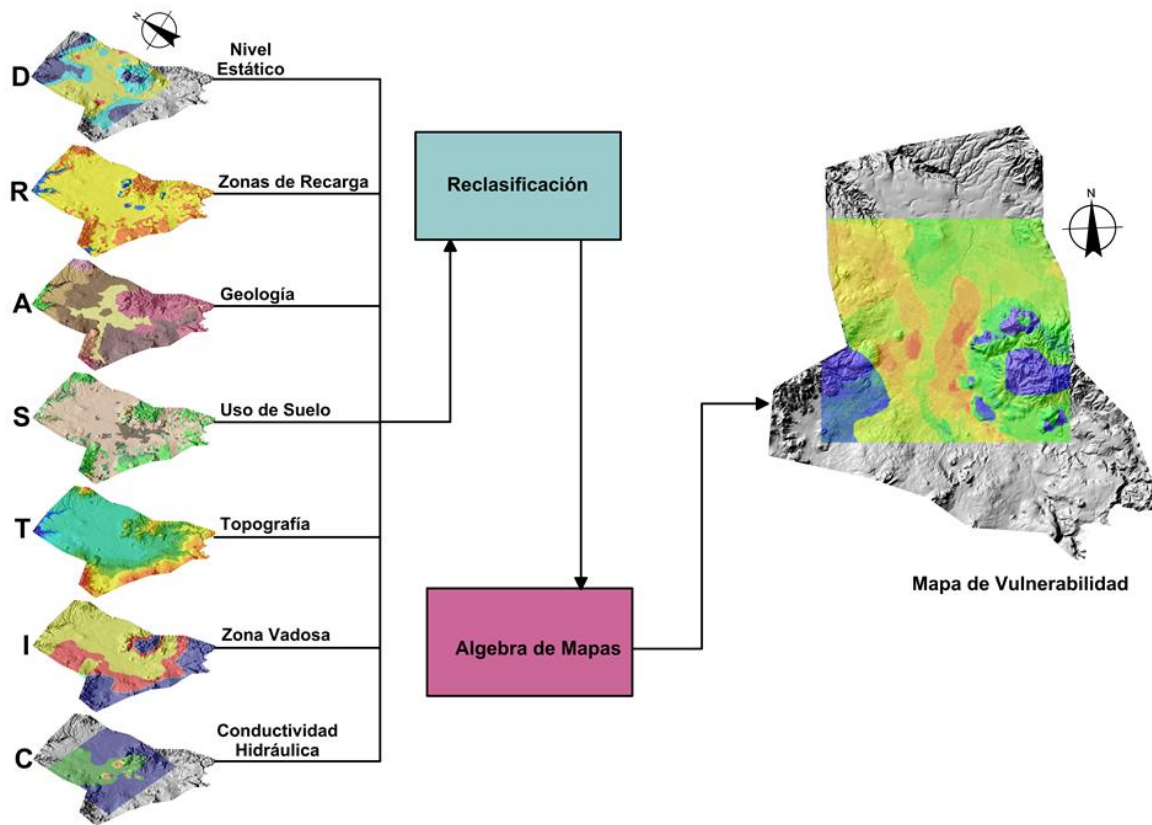


Fig. 3. Parámetros que utiliza el método DRASTIC.

III. RESULTADOS

Los mapas obtenidos de cada variante se verificaron mediante métodos geoestadísticos como IDW, Spline y Kriging para obtener mapas significativos con el mínimo grado de error; para el caso del mapa topográfico se calculó a partir del modelo digital de elevaciones para obtener las pendientes debido a que el método DRASTIC maneja porcentajes. Se realizó la reclasificación de cada mapa a) Depth (Profundidad del nivel estático), b) Recharge (Recarga), c) Aquifer Media (Geología del acuífero), d) Soil (Suelo), e) Topography (Topografía), f) Impact (Geología de la zona no saturada), g) Hydraulic Conductivity (Conductividad hidráulica del acuífero) para llevar a cabo la ecuación de álgebra de mapas (Figura 4).

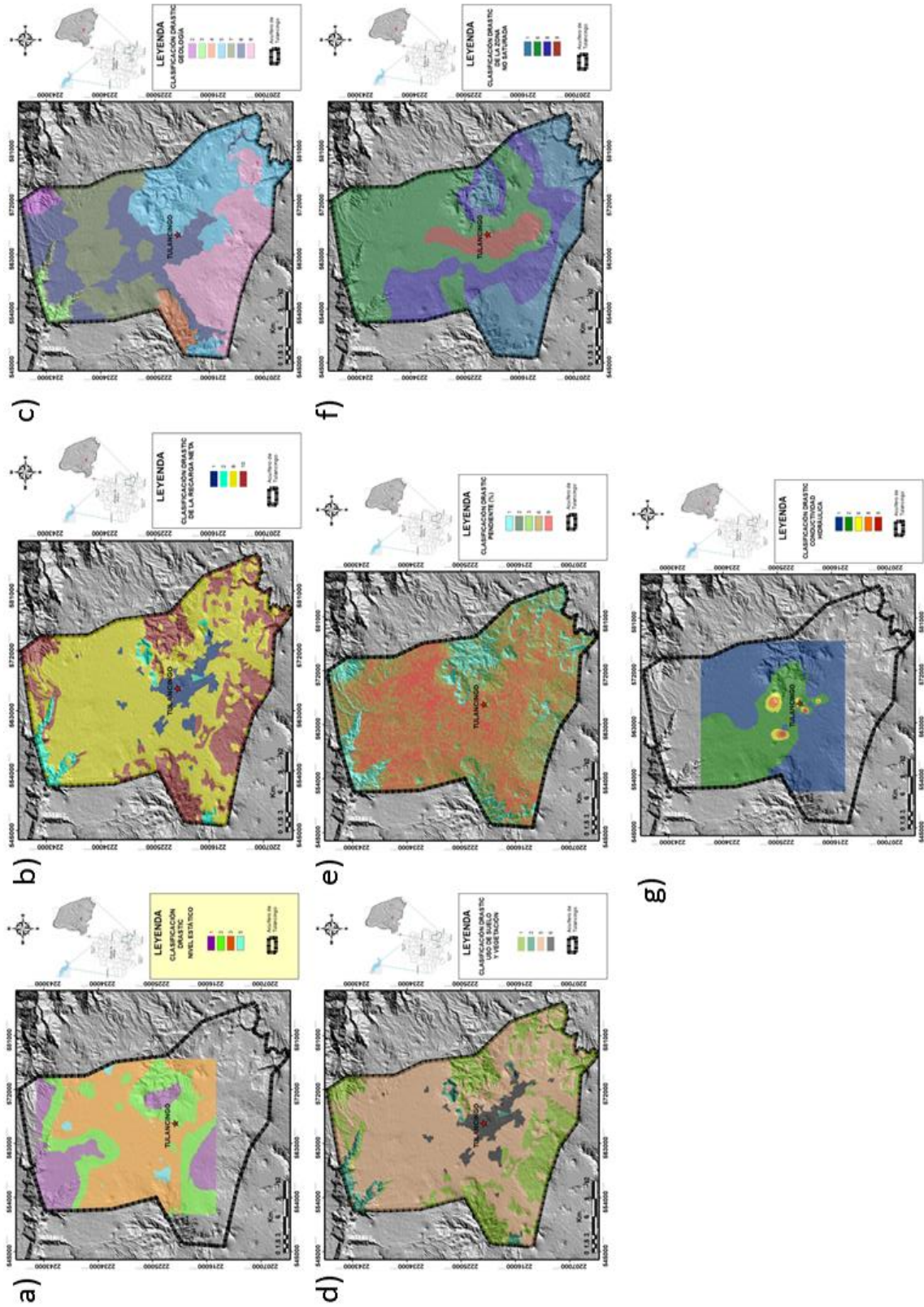


Fig. 4. Mapas reclasificados de los parámetros para el método DRASTIC.

De acuerdo con el mapa final, el índice de vulnerabilidad más alto se observa en la zona urbana del municipio de Tulancingo, así como en la región del municipio de Acatlán. Las zonas con la vulnerabilidad más baja (60-100) se observan al suroeste del mapa y al sureste en donde se localizan las zonas de recarga del acuífero. Una vulnerabilidad media (130-160) se observa en la zona se descarga localizada hacia el norte del acuífero. Además se hizo la correlación indicando en el mapa las principales industrias e actividades antropogénicas que podrían afectar la calidad del agua subterránea en un futuro, debido a un mal manejo de sus residuos (Figura 5).

Tabla VIII. Valores del grado de vulnerabilidad para el Acuífero del Valle de Tulancingo.

Grado Vulnerabilidad	Valor DRASTIC	Calificación
Nula	23-64	1
Bajo	64-105	2
Moderado	105-146	3
Alto	146-187	4
Muy Alto	187-230	5

Tomando en cuenta que la zona de recarga del acuífero es en las sierras del sur y que la dirección de flujo es sur-norte, es importante verificar que ninguna industria este desechando sus residuos a algún cuerpo de agua de la zona, debido a que esto ocasionaría que la dirección de flujo transportara ese contaminante hacia el centro del valle y tener expuesta a la población de Tulancingo principalmente.

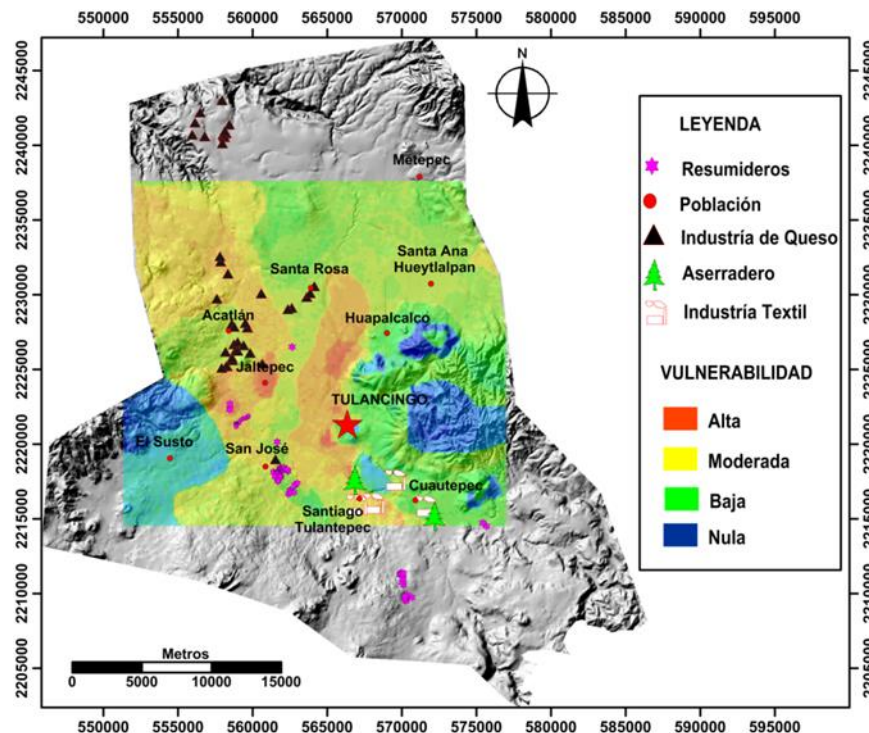


Fig. 5. Mapa de Índice de vulnerabilidad del Acuífero del Valle de Tulancingo.

IV. CONCLUSIONES

El método DRASTIC es una herramienta importante para evaluar la vulnerabilidad con las características del acuífero profundo del Valle de Tulancingo ya que los datos que se tienen cumplen con los requisitos del método.

La metodología empleada por Awawdeh, 2010 de cambiar el parámetro de suelo (cubierta edáfica), por uso de suelo, da una mejor representación de lo que se pretende evaluar de la vulnerabilidad del acuífero, ya que se hace una correlación de lo que ocurre en superficie con lo que puede llegar al agua subterránea.

El parámetro de uso de suelo en la metodología DRASTIC, es una importante herramienta para valorar y comparar lo que está ocurriendo en superficie y correlacionarlo con las actividades antropogénicas principalmente, ya que éstas puede afectar las condiciones del acuífero, por ejemplo los contaminantes originados en zonas residenciales, agricultura, ganadería, panteones, tiraderos municipales por ejemplo pueden afectar de manera directa la calidad del agua subterránea debido a un mal uso de sus residuos o a los lixiviados generados.

El acuífero de Tulancingo tiene la ventaja de ser un acuífero semiconfinado, por lo que tiene la posibilidad de que algún contaminante entre en contacto primero con el acuífero superior que con el acuífero inferior en donde están perforados todos los pozos de extracción, es por eso que los valores son relativamente bajos en comparación con otros acuíferos del mundo. Al tener los valores más elevados de vulnerabilidad en el centro del valle es imperante que se realice un mapa de vulnerabilidad cada década, para así observar como el crecimiento poblacional podría estar afectando la calidad del agua, además de poner mayor énfasis en las nuevas zonas industriales así como en todas las actividades que generen algún tipo de lixiviados.

REFERENCIAS

- [1] Al-Zabet, T. (2002). "Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the DRASTIC method." *Environmental Geology* 43(1-2): 203-208.
- [2] Awawdeh, M. M. and R. A. Jaradat (2009). "Evaluation of aquifers vulnerability to contamination in the Yarmouk River basin, Jordan, based on DRASTIC method." *Arabian Journal of Geosciences* 3(3): 273-282.
- [3] Coello, X. (2002). "Metodología para el análisis de la vulnerabilidad de acuíferos en medios urbanos, el caso de Quito Ecuador." *Groundwater and Human Development*.
- [4] Chitsazan, M. and Y. Akhtari (2009). "A GIS-based DRASTIC Model for Assessing Aquifer Vulnerability in Kherran Plain, Khuzestan, Iran." *Water Resources Management* 23(6): 1137-1155.
- [5] Hallaq, A. and B. Elaiash (2012). "Assessment of aquifer vulnerability to contamination in Khanyounis Governorate, Gaza Strip—Palestine, using the DRASTIC model within GIS environment." *Arabian Journal of Geosciences* 5(4): 833-847.
- [6] Hancox, J., J. Gárfias, et al. (2010). "Assessing the vulnerability of over-exploited volcanic aquifer systems using multi-parameter analysis, Toluca Basin, Mexico." *Environmental Earth Sciences* 59(8): 1643-1660.
- [7] Lesser, y A. (2006). "Estudio Hidrogeológico del Acuífero del Valle de Tulancingo." Author.
- [8] Rahman, A. (2008). "A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India." *Applied Geography* 28(1): 32-53.
- [9] Ramos Leal, J. (2005). "Curso de Vulnerabilidad Acuífera e Índices de Calidad del Agua." Author.
- [10] Ramos Leal, J. (2005). "Informe vulnerabilidad IPICyT." Author
- [11] Sener, E. and A. Davraz (2012). "Assessment of groundwater vulnerability based on a modified DRASTIC model, GIS and an analytic hierarchy process (AHP) method: the case of Egirdir Lake basin (Isparta, Turkey)." *Hydrogeology Journal* 21(3): 701-714.

- [12] Sener, E., S. Sener, et al. (2009). "Assessment of aquifer vulnerability based on GIS and DRASTIC methods: a case study of the Senirkent-Uluborlu Basin (Isparta, Turkey)." *Hydrogeology Journal* 17(8): 2023-2035.
- [13] Shirazi, S. M., H. M. Imran, et al. (2013). "Groundwater vulnerability assessment in the Melaka State of Malaysia using DRASTIC and GIS techniques." *Environmental Earth Sciences* 70(5): 2293-2304.
- [14] Stefano Lo Russo, G. T. (2012). "Aquifer vulnerability assessment and Wellhead protection areas to prevent groundwater contamination in agricultural áreas: an integrated approach." *Water Resource and Protection*: 12.
- [15] Umar, R., I. Ahmed, et al. (2009). "Mapping groundwater vulnerable zones using modified DRASTIC approach of an alluvial aquifer in parts of central Ganga plain, Western Uttar Pradesh." *Journal of the Geological Society of India* 73(2): 193-201.