

Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán

Rosela Pérez Ceballos¹ y Julia Pacheco Ávila²

RESUMEN

El estado de Yucatán, es una región conformada por rocas calcáreas lo que da lugar a fracturas y fisuras por donde se filtra rápidamente el agua, haciéndola vulnerable a la contaminación. Para determinar la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en el estado de Yucatán se analizaron las metodologías: AVI, GOD y DRASTIC. Los resultados mostraron que DRASTIC fue la metodología más adecuada para caracterizar la vulnerabilidad intrínseca en el estado de Yucatán en función de los datos hidrogeológicos de dominio público. Asimismo se determinó y realizó el mapa de distribución espacial de la concentración de nitratos. Tanto la vulnerabilidad como la distribución de los nitratos se clasificaron en cinco rangos: mínima, baja, moderada, alta y extrema, con el fin de realizar una comparación entre ambas. Con esta clasificación se realizaron los mapas mediante el Sistema de Información Geográfica Arc View para su análisis visual que a la vez, permita una evaluación autoexplicativa e intuitiva. Los resultados mostraron que la vulnerabilidad intrínseca se encontró entre los rangos alto y extremo para todo el estado de Yucatán y que la concentración de nitratos se encontró en los cinco rangos posibles. Las gráficas de dispersión y los diagramas de Box and Whiskers mostraron que no existe relación alguna entre la vulnerabilidad intrínseca y la distribución de los nitratos, por lo que se concluyó que se requiere aplicar metodologías de vulnerabilidad específicas para medios cársticos.

Palabras claves: Vulnerabilidad intrínseca, vulnerabilidad específica, nitratos, SIG, agua subterránea, estado de Yucatán.

INTRODUCCION

El estado de Yucatán se localiza en el sureste de la República Mexicana y sus coordenadas geográficas extremas son 21°36' y 19°30' de latitud norte; y, 87°32' y 90°25' de longitud oeste (García, 1981). Es una región conformada por rocas calcáreas y carece de corrientes superficiales debido a la carstificación extensa, la cual da lugar a fracturas y fisuras, por donde se filtra rápidamente el agua. La baja profundidad de los niveles freáticos y la falta de suelo, hacen que los solutos se infiltren al agua subterránea, haciéndola vulnerable a la contaminación (Doerfliger et al., 1999). Es por eso que la importancia del agua subterránea es incuestionable ya que este recursos hídricos proporcionan más de la

mitad del agua para el abastecimiento humano. Sin embargo, es frecuente no tomar en cuenta que para una administración ambientalmente segura, la mejor práctica es proteger este recurso de la contaminación, porque la descontaminación de un acuífero suele ser un proceso muy largo, costoso y a veces prácticamente irreversible o irrealizable. Como una medida para la protección de la calidad de las aguas subterráneas a nivel mundial, se sugiere la utilización de la cartografía de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación (Valcarce et al., 2001). La vulnerabilidad es una propiedad intrínseca de los sistemas de agua subterránea, depende de la sensibilidad de éstos a impactos humanos y naturales. Es función de factores hidrológicos que determinan la inaccesibilidad de la zona saturada a los contaminantes, la capacidad de atenuación de la

¹ *Maestra en Ingeniería Ambiental, egresada de la Maestría en Ingeniería Ambiental de la FIUADY*

² *Profesora Investigadora del Cuerpo Académico de Ingeniería Ambiental, FIUADY*

misma y los estratos por encima de ella. Las propiedades del medio varían de un punto a otro, lo que hace variable el potencial de un acuífero para protegerse, razón por la que algunas áreas son más vulnerables que otras (Bessouat et al., 2001). Por consiguiente, la vulnerabilidad se define como el riesgo de que las aguas subterráneas se contaminen con alguna sustancia en concentraciones por encima de los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la calidad del agua de consumo humano (Foster e Hirata, 1991). Se distinguen dos tipos de vulnerabilidad del agua subterránea:

Vulnerabilidad intrínseca, que es un término usado para definir la vulnerabilidad del agua subterránea frente a los contaminantes generados por actividades humanas. Toma en cuenta las características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas de un área, pero es independiente de la naturaleza de los contaminantes.

Vulnerabilidad específica, el cual es el término utilizado para definir la vulnerabilidad del agua subterránea frente a un contaminante particular o a un grupo de contaminantes. Toma en cuenta las propiedades de los contaminantes y su relación con los diversos componentes de la vulnerabilidad intrínseca (Morrell y Tuñón, 2001). El contaminante que se utilizó en este trabajo, son los nitratos, porque el consumo de agua con un alto contenido de nitratos puede causar metahemoglobinemia y contribuir a la formación de cáncer. El valor recomendado por la Secretaría de Salud y la Organización Mundial de la Salud es de 45 mg/l (NOM-127-SSA1, 1994; OPS, OMS, 1980). Además, debido a que el nitrato es la forma más oxidada, estable y móvil de la materia nitrogenada en solución, se puede encontrar en el agua en concentraciones por arriba del límite permisible. Generalmente provienen de la fijación natural realizada especialmente por las legumbres, de la degradación de materia orgánica, de la contaminación urbana, rural e industrial y de los abonos agrícolas (Auge, 2001).

El grado de vulnerabilidad intrínseca se puede expresar mediante un índice y para determinarlos existen diversas metodologías como son: el Índice de vulnerabilidad de acuíferos (AVI), la metodología DRASTIC y la metodología GOD (Groundwater occurrence, Overall aquifer class, Depth to groundwater).

El AVI, es un índice utilizado para cuantificar la vulnerabilidad de un acuífero, por medio de la resistencia hidráulica "c" al flujo vertical

del agua al pasar por los diferentes materiales sobre el suelo. Esta metodología parte del supuesto que el contaminante viaja en dirección vertical (Baez, 2001; Canter, 1997; Espinoza y Ramírez, 2002; Vrba y Zoporezec, 1994).

DRASTIC, es un esquema de clasificación numérica desarrollado para evaluar la contaminación potencial del agua subterránea para un sitio dado. Esta metodología se basa en 7 factores: D = profundidad al agua subterránea, R = recarga neta, A = medio acuífero, S = tipo de suelo, T = topografía, I = impacto a la zona vadosa, C = conductividad hidráulica del acuífero (Armenta y Rodríguez, 2001; Canter, 1997; Espinoza y Ramírez, 2002; Martínez et al., 1998; Vrba y Zoporezec, 1994).

GOD, es un índice utilizado para determinar la vulnerabilidad intrínseca por lo que no toma en cuenta el tipo de contaminante. Este método establece la vulnerabilidad del acuífero, como una función de la inaccesibilidad de la zona saturada, desde el punto de vista hidráulico a la penetración de contaminantes y la capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada como resultado de su retención física y la reacción química con los contaminantes (Agüero y Pujol, 2002; Foster e Hirata, 1988; Vrba y Zoporezec, 1994).

Como resultado de la evaluación de la vulnerabilidad pueden obtenerse mapas que muestran zonas con mayor o menor sensibilidad a la contaminación, los que generalmente se construyen para el acuífero superior o freático. Estos niveles de sensibilidad permiten valorar la vulnerabilidad en forma relativa entre las regiones que integran un área (Bessouat et al., 2001). Para realizar estos se mapas se utiliza un Sistema de Información Geográfica (SIG), que es una herramienta diseñada para consultar, manipular y aplicar los datos de: información geográfica, cartografía digital, bases de datos de atributos y estadísticas, de una manera simultánea y automatizada (López y Granados, 2000). Un SIG, además de ser un eficiente gestor de bases de datos dispone de excepcionales capacidades gráficas y de análisis espacial. Todo ello resulta de gran utilidad para llevar a cabo la tarea de calibración y verificación de los modelos que permiten estudiar un sistema de agua subterránea. En general, los mapas de vulnerabilidad deben ser vistos como una de las herramientas principales para el manejo del medio ambiente y pueden ser usados con tres propósitos fundamentales (Baez, 2001): a) en procesos de toma de decisión concerniente a la protección y manejo de los recursos hídricos subterráneos, b) para identificar áreas susceptibles a la contaminación y decidir sobre

las investigaciones y redes de monitoreo necesarias, c) en planes informativos y educativos sobre la necesidad de proteger los acuíferos y evitar la contaminación del agua subterránea, insistiendo en que los acuíferos forman parte de un sistema ecológico interconectado que está siendo afectado por la actividad humana.

Debido a que el agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento en el estado de Yucatán, el objetivo de este trabajo fue determinar la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación por nitratos, mediante la relación de los índices de la vulnerabilidad intrínseca evaluada a través de diversas metodologías y la distribución espacial de la concentración de nitratos en el agua subterránea.

METODOLOGÍA

Los valores de las concentraciones de nitratos en el agua subterránea de los diferentes municipios del estado de Yucatán, se obtuvieron de los resultados de diversos proyectos de investigación realizados en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (FIUADY). Los datos faltantes de las concentraciones de nitratos, se completaron mediante muestreos de agua en los pozos de los municipios correspondientes.

En la aplicación de cada una de las metodologías (AVI, DRASTIC y GOD) para determinar la vulnerabilidad se requirieron datos geológicos e hidrogeológicos, etc., como por ejemplo: la profundidad al agua subterránea, la recarga neta, el medio acuífero, el tipo de suelo, la topografía y el impacto a la zona vadosa. La principal ventaja de estas metodologías, es que no es necesario obtener en campo dichos parámetros lo que implicaría mucho tiempo además de que son costosos; en lugar de esto se hace uso de los datos de dominio público. Los datos necesarios para la aplicación de las diferentes metodologías se encontraron principalmente en los bancos de información del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), en diversos trabajos de tesis y en otras publicaciones relacionadas al área.

Con la finalidad de seleccionar la metodología más adecuada a las condiciones del área de estudio, se evaluaron las posibilidades de aplicación de cada una de ellas con base en la información existente. Las metodologías GOD y DRASTIC fueron seleccionadas para determinar la

vulnerabilidad del agua subterránea. Posteriormente, se aplicaron los datos hidrogeológicos a estas metodologías con la finalidad de discernir cuál es la que mejor describe la vulnerabilidad del agua subterránea. Para esto, se hizo un análisis acerca del número de parámetros que intervienen en cada una de ellas, ya que algunos parámetros son constantes para toda el área de estudio, lo que hace difícil la diferenciación del grado de vulnerabilidad. Una vez seleccionada la metodología DRASTIC, como la más adecuada se determinó la relación entre las concentraciones de nitratos en el agua subterránea del estado de Yucatán y los parámetros e índices calculados con la metodología DRASTIC, mediante los diagramas de dispersión y los diagramas de Box and Whiskers (cajas y bigotes). Posteriormente se realizaron los mapas de distribución espacial para la vulnerabilidad DRASTIC y la distribución espacial de las concentraciones de nitratos, mediante el programa de Sistema de Información Geográfica (Arc View 3.2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentraciones de nitratos en el agua subterránea de los municipios del estado de Yucatán. Los datos de las concentraciones de nitratos que se usaron en este trabajo corresponden a los pozos de abastecimiento de los municipios durante la época de estiaje preferentemente (Pacheco, 1994; Pacheco, 2002; Pacheco, 2003 y Pacheco y Graniel, 2003). Los datos faltantes se completaron mediante muestreos de agua en los pozos de cada uno de los municipios. De los 106 municipios estudiados 21 superaron el límite permisible de 45 mg/l (Figura 1) destacando el municipio de Kopomá con 224.63 mg/l, esto puede deberse al aumento de fertilizantes nitrogenados comerciales empleados en la agricultura y al retorno de desechos derivados de la explotación pecuaria u otras fuentes al suelo.

Aplicación de las metodologías para la determinación de la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación.

Índice de vulnerabilidad de acuíferos (AVI). Esta metodología, utiliza la conductividad hidráulica y el espesor de las capas de diferente material que se encuentran sobre el nivel del agua para poder cuantificar el índice. Para el acuífero cárstico de Yucatán, los valores de la conductividad hidráulica para el área de la planicie, zona costera y semicírculo de cenotes es de 1.115 y para el área de los cerros y valles es de 5.5×10^{-3} (González, 1992).

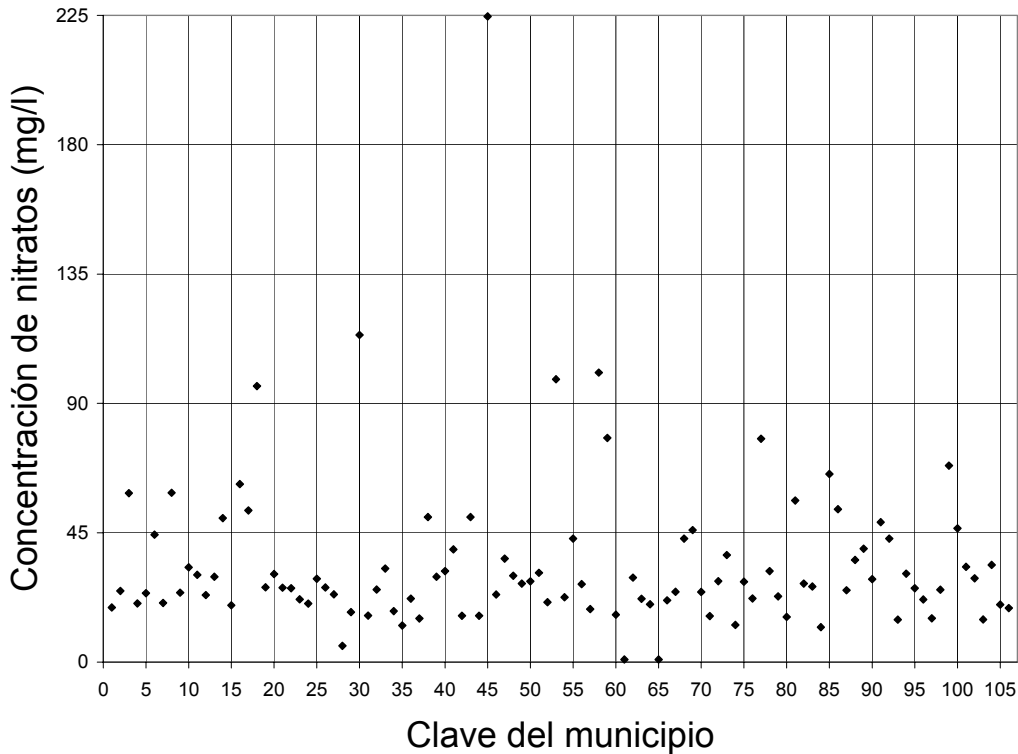


Figura 1. Concentración de nitratos para los municipios del estado de Yucatán

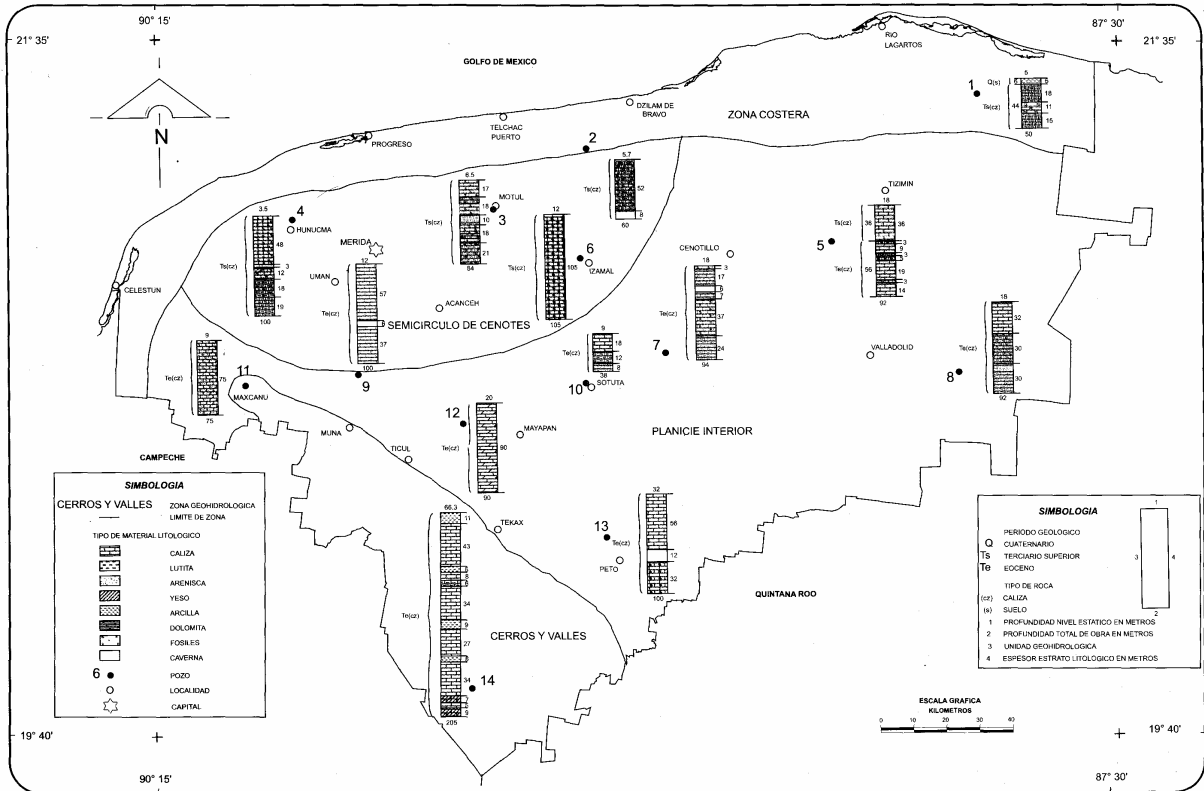
Al aplicar esta metodología, se observó que este índice no es adecuado para calcular la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en el estado de Yucatán, ya que los valores usados para el cálculo son relativamente constantes para todo el estado de Yucatán. Con respecto al espesor de las diferentes capas (Figura 2), se observó que prevalecen en el estado las rocas calizas, por lo que no se verían claramente los cambios en la vulnerabilidad.

Metodología DRASTIC. Para aplicar esta metodología, se recopilamos los valores para cada una de las variables relacionadas (profundidad al nivel estático, recarga, tipo de acuífero, tipo de suelo, zona vadosa y conductividad hidráulica) correspondientes a cada uno de los municipios del estado de Yucatán (Pérez, 2003). Para el cálculo de la pendiente (%) se consideraron los variables “X” como la distancia de cada municipio hasta la costa (m), y “Y” como la altura sobre el nivel del mar (m). Los resultados de la metodología DRASTIC para cada uno de los municipios del estado de Yucatán mostraron que los municipios con clave 44 y 87 que corresponden a los municipios de Kinchil y Tetiz son los más vulnerables con un índice de 217 y el menos vulnerable es el

municipio con clave 66 y corresponde al municipio de Santa Elena con un índice de 175 (Figura 3). Los valores se consideran altos en la escala de DRASTIC y corresponden a la vulnerabilidad alta, muy alta y extrema.

Metodología GOD. Para la aplicación de esta metodología, se recopilamos los valores para cada una de las variables relacionadas y se observó que dos de las tres variables (el tipo de acuífero y la litología de la cobertura) fueron constantes para todo el estado. Los valores del índice GOD variaron entre 0.45 y 0.9 (Figura 4); por lo que los valores del índice se debieron únicamente a la profundidad al nivel estático.

En la selección de la metodología más adecuada, se analizaron el número de parámetros que intervinieron en cada una de ellas y su importancia para el cálculo de los índices. Los resultados mostraron que DRASTIC es la metodología mas adecuada para describir la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en el estado de Yucatán.



Fuente: INEGI, 2002.

Figura 2. Zonas geohidrológicas y perfiles litológicos de pozos

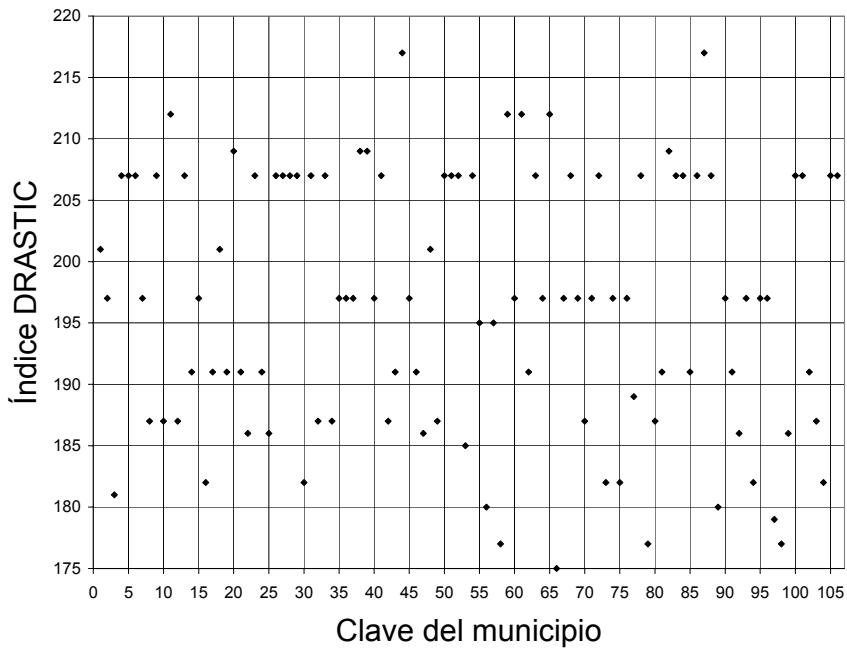


Figura 3. Índice DRASTIC para los municipios del estado de Yucatán

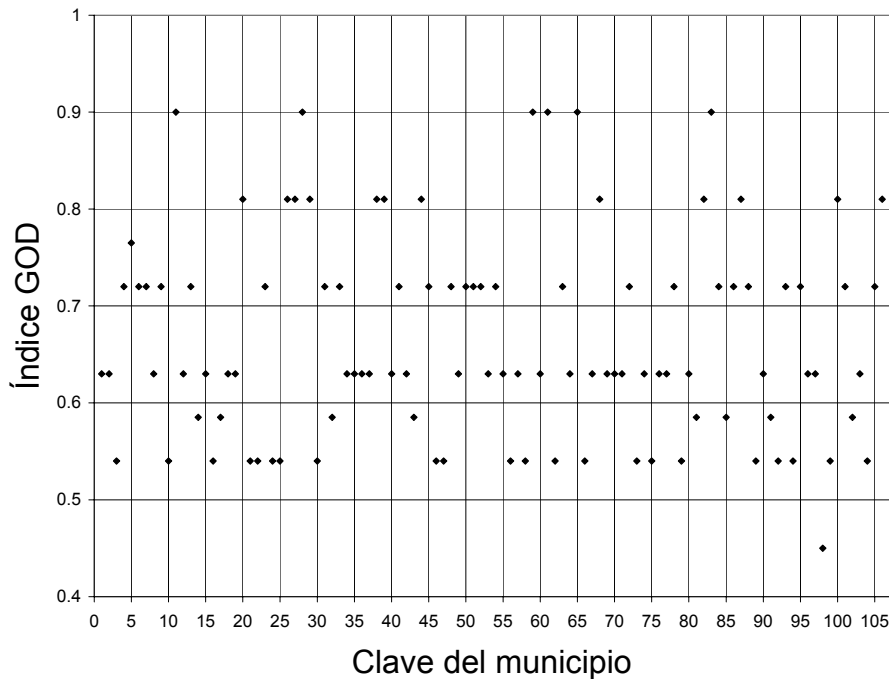


Figura 4. Índice GOD para cada municipio del estado de Yucatán

Clasificación de la concentración de nitratos y del índice DRASTIC. Las concentraciones de nitratos y los resultados del índice DRASTIC, fueron clasificados en intervalos con la finalidad de evaluar la vulnerabilidad en términos equivalentes (Tabla 1). La vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación para cada municipio de acuerdo con la

clasificación equivalente propuesta para la concentración de nitratos y el índice DRASTIC de vulnerabilidad, mostró que los valores del índice DRASTIC se clasificaron como alta y extrema y la de la concentración de nitratos como: mínima, baja, moderada alta y extrema. También se observó que de los 106 municipios estudiados solo 11 municipios coinciden en sus clasificaciones.

Tabla 1. Clasificación de la vulnerabilidad del agua subterránea

Valor	Concentración de nitratos mg/l	Índice DRASTIC	Vulnerabilidad
1	0-11.25	0-120	Mínima
2	11.26-22.5	120-139	Baja
3	22.6-33.7	140-159	Moderada
4	33.8-45	160-199	Alta
5	>45	>200	Extrema

Relación entre las concentraciones de nitratos y los parámetros e índices de la metodología DRASTIC
Para determinar la existencia de alguna relación entre la variación espacial entre las concentraciones de nitratos y los valores tanto para el índice como para los parámetros del DRASTIC, se realizaron las gráficas de dispersión y los diagramas de Box and Whiskers (Figuras 5 y 6). Estas gráficas mostraron que no existe alguna relación entre las

concentraciones de nitratos en el agua subterránea y los valores el índice DRASTIC.

Asimismo se realizaron las gráficas de dispersión para cada uno de los parámetros que involucra la metodología DRASTIC con la concentración de nitratos y se observó que no existe relación alguna entre cada uno de los parámetros y las concentraciones de nitratos en el agua subterránea.

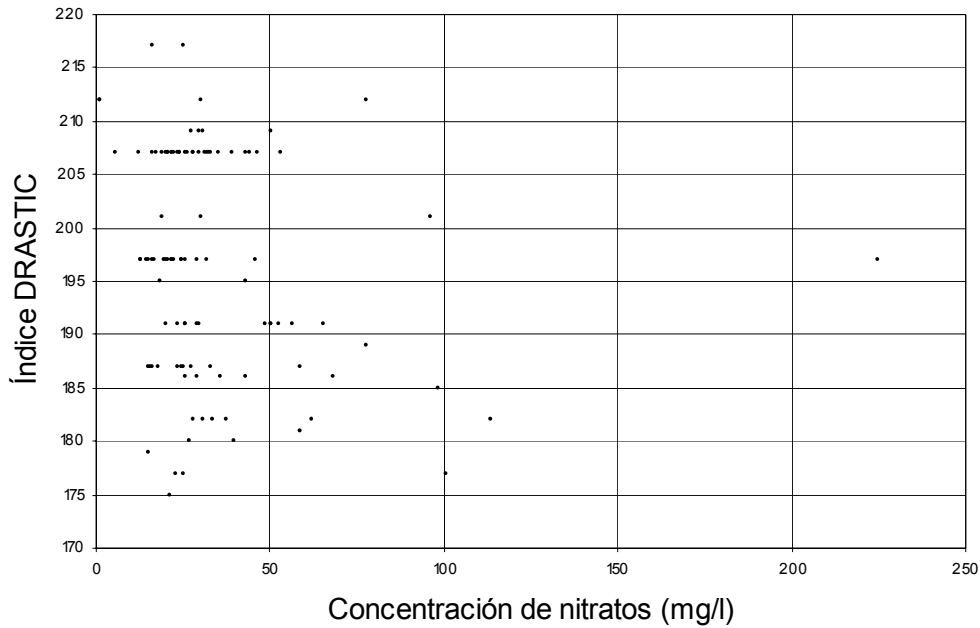


Figura 5. Dispersión entre la concentración de nitratos y el índice DRASTIC

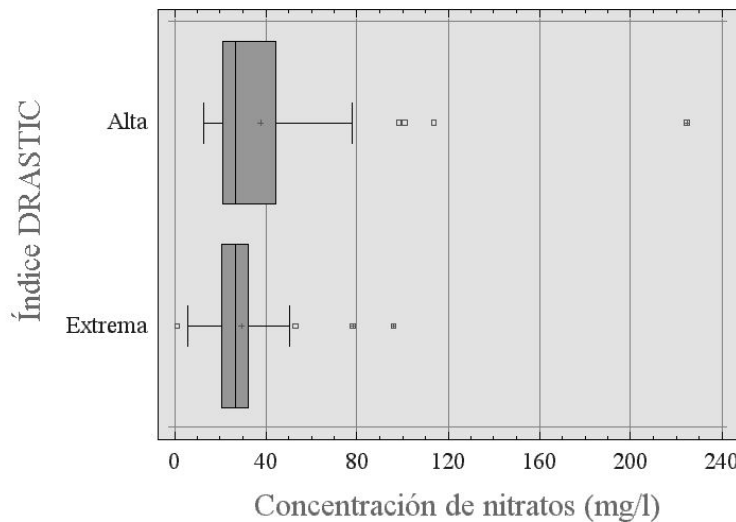


Figura 6. Diagrama de Box and Whiskers para la concentración de nitratos y la clasificación del índice DRASTIC

Mapas de la vulnerabilidad y distribución espacial de las concentraciones de nitratos para el agua subterránea del estado de Yucatán, utilizando el Sistema de Información Geográfica (Arc View)

Se elaboraron mapas mediante el SIG Arc View para mostrar la clasificación de la vulnerabilidad intrínseca y la concentración de nitratos para cada uno de los municipios del estado de

Yucatán. La distribución espacial de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero calculada por la metodología DRASTIC, mostró que existe únicamente dos valores; la vulnerabilidad alta en la mayor parte del estado y la vulnerabilidad extrema localizada principalmente en la zona costera (Figura 7), por lo que este mapa puede ser utilizado en los procesos de toma de decisiones concerniente a la protección y manejo del agua subterránea.

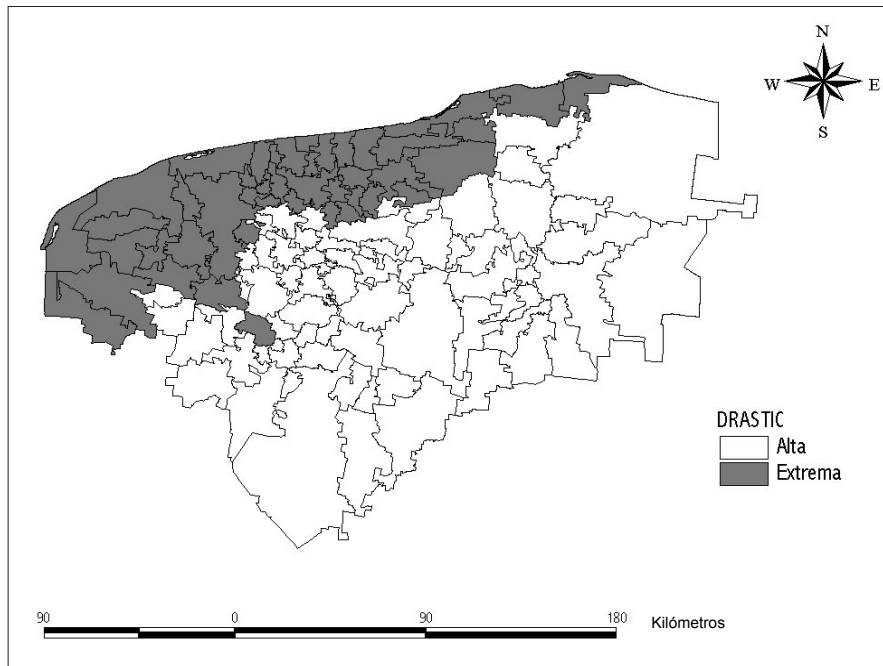


Figura 7. Distribución de la vulnerabilidad intrínseca en el estado de Yucatán clasificado en alta y extrema

La distribución espacial de las concentraciones de nitratos mediante la clasificación equivalente considerada, mostró que existe gran variación entre la concentración, con valores que van desde mínimos a extremos sin mostrar alguna asociación aparente con su distribución espacial (Figura 8). Esto, puede deberse a que la presencia de

los nitratos tiene diversos orígenes que son difíciles de discernir por lo que se relación con la vulnerabilidad intrínseca es prácticamente nula. El mapa puede ser de utilidad en la elaboración de planes informativos y educativos, sobre la necesidad de proteger los acuíferos y evitar la contaminación del agua subterránea.

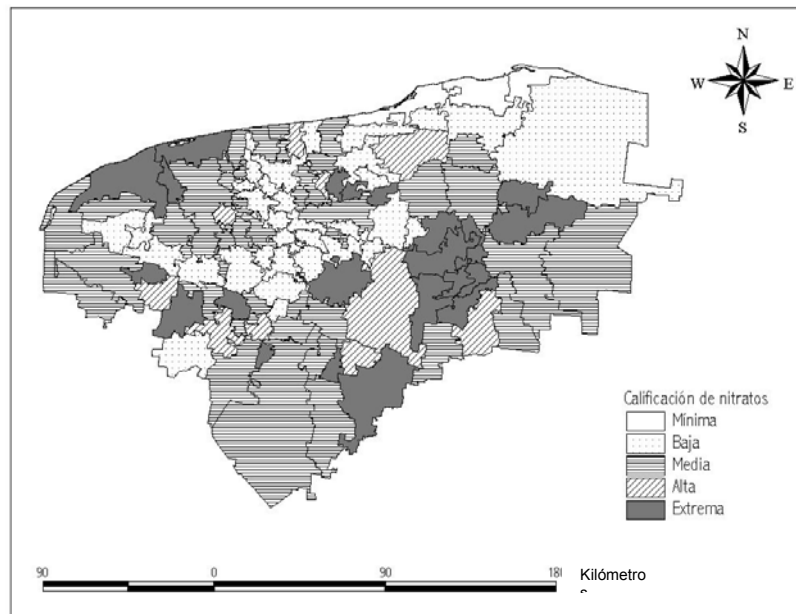


Figura 8. Mapa de la contaminación por nitratos en el estado de Yucatán clasificada en mínima, baja, media, alta y extrema

CONCLUSIONES

Una de las ventajas en utilizar las metodologías para evaluar la vulnerabilidad del agua subterránea, es que utilizan datos existentes con lo que el ahorro en tiempo y dinero es importante. La metodología DRASTIC presentó la mejor aproximación de la vulnerabilidad intrínseca para el estado de Yucatán. Dos de las variables que presentaron mayor incertidumbre por la escasez de información fueron la recarga y la conductividad hidráulica, por lo que se optó trabajar con los pocos datos disponibles. Los valores del índice DRASTIC calculados variaron de 175 hasta 217 puntos; sin embargo, esta metodología no presentó relación alguna con la distribución espacial de las concentraciones de nitratos en el agua subterránea. Las concentraciones de nitratos en el agua subterránea del estado de Yucatán presentaron valores que variaron de 0.90 hasta 224.63 mg/l.

El uso del Sistema de Información Geográfica (Arc View) en la elaboración de los mapas de la vulnerabilidad y de la distribución espacial de las concentraciones de nitratos, permitieron observar que la mayor vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea se presentó en la zona costera y la menor, en la zona de cerros y la

planicie interior. El mapa de las concentraciones de nitratos mostró las regiones del estado en las que es evidente una contaminación por nitratos, sin embargo, esta situación no tiene relación alguna con el mapa de vulnerabilidad intrínseca.

RECOMENDACIONES

Los mapas de vulnerabilidad son una guía para los tomadores de decisiones, por lo que el trabajo que representa lograrlos debe de realizarse con el debido cuidado. Es por esto, que se requiere estar informado de nuevas metodologías que cada vez puedan simular con mayor exactitud y precisión entornos ambientales que como el nuestro son “casi únicos” dadas sus características de carsticidad. De igual manera, se sugiere para trabajos futuros de vulnerabilidad específica, considerar todos y cada uno de los factores humanos y ambientales relacionados con el contaminante a estudiar.

RECONOCIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado mediante los proyectos: 38493-U; 27912-T; YUC-2002-COI-8721 y a través del Programa Integral de Fortalecimiento para el Postgrado.

REFERENCIAS

- Agüero V.J. y Pujol M. R. (2002). Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica. Proyecto de Graduación. (En red). Disponible en: http://gis.esri.com/library/userconf/latinproc00/costa_rica/analisis_vulnerabilidad/vulnerabilidad_acuiferoscr.htm. (2003-05-02).
- Armienta H.M. y Rodríguez C.R. (2001). Contaminación y vulnerabilidad acuífera (notas del curso taller), UNAM.
- Auge M. (2001). Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación con nitratos, presentado en ponencias del taller: Protección de acuíferos frente a la contaminación metodología. (En red). Disponible en: <http://tierra.rediris.es/hidrored/> (2002-05-9).
- Baez A. (2001). Validación de mapas de vulnerabilidad en medios urbanos, presentado en ponencias del taller: Protección de acuíferos frente a la contaminación metodología. (En red). Disponible en: <http://tierra.rediris.es/hidrored/> (2002-05-9).
- Bessouat C., Castagnino G., De los Santos J., Robano M. (2001). Vulnerabilidad de un acuífero somero en medio poroso, presentado en ponencias del taller: Protección de acuíferos frente a la contaminación metodología. (En red). Disponible en: <http://tierra.rediris.es/hidrored/> (2002-05-09).
- Canter L.W. (1997). Nitrates in groundwater. CRC Press Inc. Lewis Publisher, Boca Ratón, Florida, USA.
- Doerfliger N., Jeannin P., Zwahlen F. (1999). Water vulnerability assessment in karst environments : a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method), Environmental Geology 39 (2), December 1999, Springer Verlag.

- Espinoza C. y Ramírez J. (2002). Análisis comparativo de técnicas de evaluación de vulnerabilidad de acuíferos. Aplicación a la zona norte de la ciudad de Santiago, presentado en II Seminario-taller: Protección de acuíferos frente a la contaminación: caracterización y evaluación. (En red). Disponible en: <http://tierra.rediris.es/hidrored/ponencias/C.Espinoza.html> (2003-05-02)
- Foster S. e Hirata R. (1988): Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, CEPIS, Lima Perú.
- 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.
- García E. (1981). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 3ª. Edición, México, D.F.
- González H.R. (1992). Evolution of Grounwater Contamination in the Yucatan karstic Aquifer. Tesis de Maestría. University of Waterloo, Canadá.
- INEGI. (2002). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Estudio Hidrológico del estado de Yucatán. Gobierno del estado de Yucatán. México.
- López M. y Granados R. (2000). Utilización de los Sistemas de Información Geográfica para la gestión de los recursos hídricos. (En red). Disponible en: http://agua.rediris.es/conferencia_iberdrola_2000/conferencia/documentos/edurne.doc, (2002-11-11)
- Martínez M., Delgado P., Fabregat V. (1998). Aplicación el método DRASTIC para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal. Valencia. Jornadas sobre las aguas subterráneas: un problema pendiente, pags. 413-420.
- Morell I., Tuñón J. (2001). Vulnerabilidad de acuíferos costeros en el área Mediterránea, presentado en ponencias del taller: Protección de acuíferos frente a la contaminación metodología, Toluca, México.
- NOM-127-SSA1 (1994). Norma Oficial Mexicana. Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- OPS, OMS. (1980). Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. Nitratos, nitritos y compuestos N-nitroso.
- Pacheco A.J. (1994). Impacto del uso del suelo en la concentración de nitratos del agua subterránea en el estado de Yucatán. Informe técnico final.
- Pacheco A.J. (2002). Delimitación de una zona de reserva hidrogeológica para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Mérida, Yucatán. Cuarto informe parcial.
- Pacheco A.J. (2003). Determinación y prueba de un índice de contaminación por nitratos en el acuífero cárstico de Yucatán, México. Informe técnico final.
- Pacheco A.J. y Graniel C.E. (2003). Evaluación de la calidad del agua subterránea en los sistemas de abastecimiento, en los municipios que conforman la ruta crítica del huracán Isidoro, en el estado de Yucatán. Informe técnico en revisión.
- Pérez C.R. (2003). Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Yucatán. México.
- Valcarce O.R., Carrasco P.H., Jiménez H.S. (2001). Aplicación de la metodología GOD modificada, para el estudio de la vulnerabilidad del acuífero cárstico cuenca sur de la Habana, presentado en ponencias del taller: Protección de acuíferos frente a la contaminación metodología, Toluca, México.
- Vrba J. y Zoporezec A. (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability. Verlag Heinz Heise.