



IVAKY: ÍNDICE DE LA VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO KÁRSTICO YUCATECO A LA CONTAMINACIÓN

IVAKY: INDEX OF VULNERABILITY TO POLLUTION OF YUCATECAN KARSTIC AQUIFER

Y. Aguilar-Duarte^{1,2}, F. Bautista^{2*}, M. E. Mendoza², O. Frausto³, T. Ihl², C. Delgado⁴

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Calle 6 No.398 por 13 Av. Correa Rachó, Col. Díaz Ordaz, C.P. 97130. Mérida Yucatán.

²Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta. C.P. 58190. Morelia Michoacán México.

³Universidad de Quintana Roo, Boulevard Bahía s/n colonia del Bosque, Chetumal, C.P. 77019 Quintana Roo, México.

⁴Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Recibido 13 de abril de 2016; Aceptado 20 de septiembre de 2016

Resumen

Se propone el índice de la vulnerabilidad del acuífero kárstico yucateco (IVAKY). El IVAKY se construyó con base en un mapa geomorfopedológico escala 1:50000, que contiene la densidad y tipología de las depresiones kársticas y las asociaciones edáficas en cada unidad geomorfopedológica. El factor clima es incluido a través de la longitud del periodo de lluvias que considera cantidad, distribución e intensidad de la lluvia. Los tres factores (relieve, suelos y clima) se ponderaron con el proceso de análisis jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) utilizando ArcGis 9.1. Se identificó que el Anillo de cenotes y parte de la zona noreste del estado de Yucatán presentan el nivel extremo de vulnerabilidad, donde predominan dolinas en contacto con el acuífero y suelos como los Nudilithic Leptosols, Lithic Leptosols y Rendzic Leptosols, ocupando 19% de la superficie estatal. Los niveles bajos y muy bajos de vulnerabilidad se ubican en el sur de Yucatán en áreas de igual o mayor a 50 msnm, con una densidad baja a media de depresiones kársticas (úvalas y poljes) y Luvisols, Vertisols y Stagnosols, asociados con Leptosols (12% de la superficie estatal).

Palabras clave: depresiones kársticas, longitud del período de lluvias, Vertisols, Leptosols, Luvisols.

Abstract

The index of the vulnerability of the Yucatecan karstic aquifer (IVAKY) is proposed. The IVAKY was built based on a geomorphopedological map scale of 1:50 000, which contains the density and type of karst depressions and soil associations in each geomorphopedological unit. The climate factor is included through the length of the rainy period that considers amount, distribution and intensity of the rain. The three factors (topography, soils and climate) were weighted with the process of hierarchical analysis (AHP) using ArcGis 9.1. It was identified that the ring of sinkholes and part of the northeast of Yucatan state have the extreme level of vulnerability, where dominated sinkholes in contact with the aquifer and soil as Nudilithic Leptosols, Lithic Leptosols and Rendzic Leptosols, occupying 19% of the state surface. Low and very low levels of vulnerability are located in southern Yucatan in areas of equal or greater than 50 masl, with low to medium density of karstic depressions (uvala and poljes) and Luvisols, Vertisols and Stagnosols associated with Leptosols (12% of the state surface).

Keywords: karst depressions, length of rainy period, Vertisols, Leptosols, Luvisols.

1 Introducción

Se estima que el 25% de la población mundial es abastecida de aguas subterráneas de acuíferos kársticos (Perrin, 2003; Bakalowicz, 2005). Los acuíferos kársticos funcionan de manera diferente a

otros tipos de acuíferos, debido a su heterogeneidad y anisotropía (Antigüedad y col., 2007). Entre sus características particulares está la presencia de formas de absorción (dolinas, sumideros, hoyos) que

* Autor para la correspondencia. E-mail: leptosol@ciga.unam.mx
Tel. (443)-322-3869 ext. 32869, Fax (443) 322-3880

conectan directamente con las redes de conductos internos del acuífero, recibiendo grandes cantidades de agua que pueden transportarse a largas distancias o ser almacenadas temporalmente (Molerio-León, 2004; Antigüedad y col., 2007); por esta razón en un sistema kárstico los procesos de atenuación de los contaminantes (retención, mineralización, adsorción, etc.), son nulos o poco eficientes y la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos es mayor, principalmente con respecto a los desechos generados por las actividades humanas que no están debidamente planificadas en la superficie del terreno y/o se disponen inadecuadamente, afectando la calidad del agua subterránea (Veni, 1999; Davis y col., 2002).

La protección de las aguas subterráneas es un tema de interés desde que Albinet y Margat (1975) introdujeron el concepto de vulnerabilidad a la contaminación. Posteriormente, se presentaron enfoques, métodos e índices para la evaluación de la vulnerabilidad. Uno de los primeros y más populares es el DRASTIC, acrónimo de D (*Depth*, profundidad del agua fréatica), R (*Recharge*, recarga neta), A (*Aquifer*, litología del acuífero), S (*Soil*, tipo de suelo), T (*Topography*, topografía), I (*Impact*, litología de la zona no saturada) y C (*Hydraulic Conductivity*, conductividad hidráulica del acuífero), que fue desarrollado por Aller y col., (1987) para acuíferos porosos. Para zonas de karst existen una variedad de metodologías de evaluación (Tabla 1).

La mayoría de los métodos tienen un enfoque hidrogeológico considerando variables relacionadas con el comportamiento subterráneo del acuífero en cuestión, principalmente las propiedades físicas, como granulometría, conductividad hidráulica, porosidad, permeabilidad, infiltración, entre otros. Sin embargo, se insiste en que el estudio y la comprensión de la vulnerabilidad de un acuífero, requiere de una visión transdisciplinaria e integral, tanto de propiedades o atributos, como de procesos, incluyendo las funciones ambientales de los factores a diversas escalas espaciales y temporales (Lin, 2003; Ravbar y Goldscheider, 2009; Aguilar y col., 2013). Incluso, en el caso de los suelos también se insiste en involucrar su capacidad como filtro natural y de atenuación por actividad biológica (Aguilar y col., 2011; Ruíz-Marín y col., 2013). Los enfoques geomorfopedológico (Zinck, 2012) e hidropedológico (Lin, 2003; Bouma, 2006; Pachepsky y col., 2006) ofrecen diversas formas para transferir el conocimiento desde el nivel pedón (perfil del suelo) hasta el nivel de paisaje. El enfoque de evaluación de tierras incluye además los índices

agroclimáticos (De la Rosa y col., 2004; Díaz-Pereira y col., 2011).

Este estudio aborda el caso del estado de Yucatán, territorio que geológicamente es una zona kárstica dominando en su superficie diferentes tipos y tamaños de depresiones (Aguilar y col., 2016). En relación a su relieve kárstico también se encuentra la variabilidad de los grupos de suelos (Bautista y col., 2015). Los estudios previos sobre la vulnerabilidad del acuífero kárstico de Yucatán derivan de enfoques hidrogeológicos y no han considerado esta diversidad geomorfológica, edáfica y climática, (Pérez y Pacheco, 2004; Gijón-Yescas, 2007; Bolio-Barrios y col., 2011), por lo que existe la necesidad de complementar e incorporar otros enfoques que reflejen la geodiversidad del área de estudio y que permitan una mejor diferenciación de las zonas vulnerables.

Para lo anterior, recientemente se han reportado para Yucatán diversos estudios que mejorarían la interpretación de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, como: i) la tipología y distribución espacial de las depresiones kársticas de Yucatán (Aguilar y col., 2016); ii) una aproximación de la vulnerabilidad de acuerdo a las depresiones (Aguilar y col., en revisión); iii) modelos matemáticos que estiman funciones ambientales en los suelos (Aguilar y col., 2011) y su representación cartográfica (Aguilar y Bautista, 2011); iv) desarrollo de las unidades de Leptosol LP en las planicies (Bautista y col., 2011); y v) índices agroclimáticos que reflejan intensidad y distribución de la humedad (Delgado-Carranza y col., 2011).

Toda esta información previamente generada con enfoques geomorfopedológico y de evaluación de tierras (relieve, suelo y clima) está validada con técnicas estadísticas y espaciales, como los árboles de decisión, el análisis multicriterio y la geoestadística. En el presente trabajo se realizó una integración espacial de los elementos del ambiente (relieve, suelo y clima), validada matemáticamente con el proceso de análisis jerárquico (Marinoni, 2004), con el objetivo de la generación y propuesta de un índice de la vulnerabilidad del acuífero kárstico yucateco (IVAKY) considerando las formas del relieve, suelos y los climas para identificar los diferentes niveles de la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación.

Tabla 1. Metodologías para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos kársticos

Modelo	Descripción breve	Autor (es)
EPIK	Acrónimo de sus cuatro factores de evaluación: E (epikarst), P (protective cover), I (infiltration conditions) y K (karst network), probado por primera vez en Suiza	Doerfliger y col., 1999
PI	También llamado método dual considera dos factores: P (Protective cover) e I (Infiltration conditions) aplicado en una región kárstica de Alemania (Goldscheider, 2005) y Vietnam (Nguyet y Goldscheider, 2006).	Goldscheider y col., 2000
COPK	Conocido como el enfoque europeo y aplicado en distintas áreas piloto de Europa. Son las siglas de: C (flow Concentration), O (Overlying layers), P (Precipitation), K (Karst network).	Daly y col., 2002; Zwhalen, 2003.
KARSTIC	Es una adaptación del DRASTIC, considera los factores: K (Karst sinkholes), A (Aquifer), R (Recharge), S (Soil), T (Topography), I (Impact) y C (hydraulic conductivity) y propuesto para una región de Estados Unidos.	Davis y col., 2002
RISKE	Se deriva del método EPIK, considera, cinco criterios: R (Roche aquifère), I (Infiltration), S (Sol), K (Karstification) y E (Epikarst). Fue diseñado para una región, de Francia.	Dörfliger y col., 2004
Enfoque esloveno	Se basa en el enfoque europeo pero fue diseñado para las características del karst de Eslovenia y evalúa tanto el recurso hídrico como las fuentes de vulnerabilidad; el método integra la variabilidad temporal a partir de una mejora en el análisis del factor K	Ravbar y Goldscheider, 2007
PaPRIKa	Considera cuatro criterios: P (Protection aspects), R (Rock type), I (Infiltration) y Ka (Karstification degree). Se deriva de los métodos RISK y EPIK y fue desarrollado para evaluar la vulnerabilidad tanto del recurso agua como de las fuentes de captación para acuíferos kársticos en montañas	Kavouri y col., 2011
KAVI	Siglas de Karst Aquifer Vulnerability Index, propuesto, para un acuífero de Florida Estados Unidos, incluye la permeabilidad del suelo, profundidad de la tabla de agua, conductividad hidráulica del acuífero, depresiones cerradas y uso del suelo.	van Beynen y col., 2012
LEPT	Usa cuatro parámetros que pueden ser utilizados en regiones con datos escasos: L, (Lithology), E (Elevation, especialmente la distribución de dolinas basada en la elevación), P (Protective cover) y T (Topography). Fue diseñado para un acuífero kárstico en Irán.	Taheri y col., 2015
APLIE	Es una combinación de los métodos DRASTIC, PI y COPK; utiliza cinco variables: A (water Abundance), P (Protective cover), L (Land use), I (Infiltration amount of precipitation) y E (groundwater Exploitation) para un acuífero kárstico en una región de China.	Gluo y col., 2016

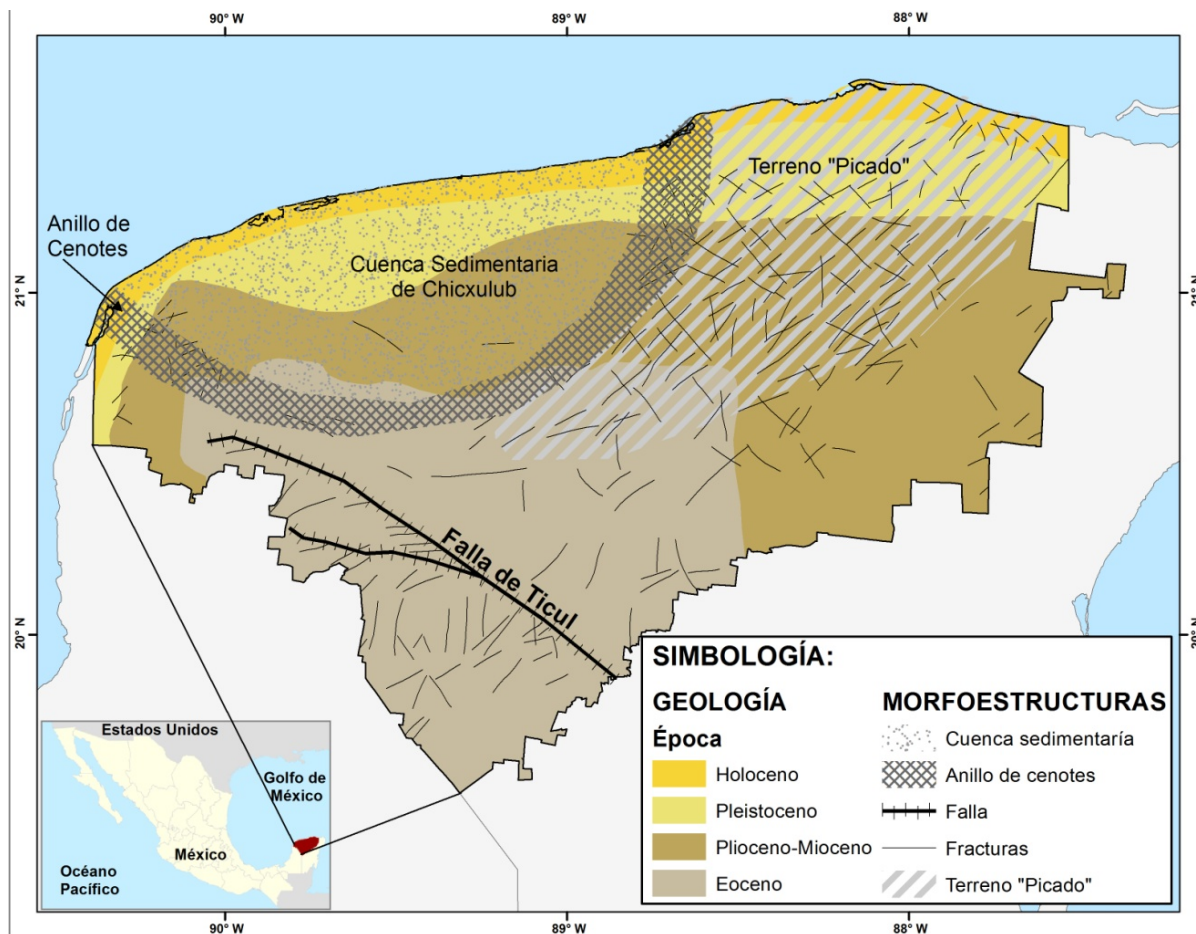


Fig. 1. Área de estudio: mapa del estado de Yucatán donde se presenta la geología (López-Ramos, 1973), las regiones hidrogeoquímicas y morfoestructuras principales (Perry y col., 2002).

2 Metodología

2.1 Descripción del área de estudio

El estado de Yucatán tiene una superficie de 39340 km². Geológicamente la zona costera es la más reciente, formada por sedimentos del Cuaternario, la litología se constituye por calizas de moluscos en la parte más reciente y arenas de playas, arcillas, turba y suelo residual en la zona del Pleistoceno. La mayor parte del Estado, principalmente centro-oriente, es caliza coquinoideal Terciaria (Plioceno-Mioceno), perteneciente a la Formación Carrillo Puerto y Bacalar. La sección que comprende del centro al sur es más antigua (Eoceno) y está formada por caliza cristalina fosilífera del miembro Pisté (López-Ramos, 1973) (Fig. 1). El suelo dominante reportado es del grupo Leptosols (LP), el cual se presenta en diferentes unidades de suelo asociado con otros grupos como

los Cambisols (CM), Luvisols (LV), Vertisols (VR) y Stagnosols (ST), entre otros (Bautista y col., 2007; 2011; 2015).

De manera general, el acuífero kárstico de Yucatán es una lente de agua dulce que flota sobre agua salada y desde el punto de vista hidráulico se le puede considerar un acuífero libre, excepto por la presencia de una capa geológica denominada “caliche” que confina al acuífero a lo largo de la costa norte, excluyendo las zonas de descarga, donde intercepta el Anillo de cenotes (Perry y col., 2002) (cenotes es el término local cuando una dolina contiene agua). Considerando las características hidrogeoquímicas y fisiográficas, Perry y col., (2002) identificaron regiones hidrogeológicas para Yucatán, todas desarrolladas en rocas carbonatadas (Figura 1): i) Cuenca sedimentaria de Chicxulub, se origina por subsidencia durante el Paleogeno, presenta menor

número de cenotes comparado con las áreas fuera del Anillo de cenotes, por lo tanto con menor permeabilidad; ii) Anillo de cenotes, es un sistemas de fallas de forma semicircular de 180 km de diámetro, desarrollado en rocas que recubren el impacto del cráter de Chicxulub sucedido hace 65 Ma K/T, presenta un gran número de dolinas; una característica hidrogeológica de esta zona es su alta permeabilidad que ejerce una importante influencia sobre los flujos subterráneos, actuando como un conducto principal que conduce las aguas del sur, las transporta y descarga hacia el norte en las costas noroeste y noreste; iii) Terreno con alta densidad de dolinas (*Pockmarked land* o terreno “picado”), es una amplia región en el noreste de Yucatán, presenta abundancia de cenotes que evidencia un karst maduro de alta permeabilidad, y iv) Falla de Ticul, es un levantamiento hacia el sur de Yucatán con una orientación NO-SE, una extensión de 110 km y una elevación máxima de 275 msnm; formado por evaporitas del Terciario y por roca sedimentaria detrítica conteniendo yeso y anhidrita, cerca de la superficie en bloques elevados que constituyen una cadena montañosa.

En cuanto al clima, los subtipos climáticos son: Aw₀, Aw₁, BS₀ y BS₁, correspondiendo el primero a cálido subhúmedo con lluvias en verano, el segundo cálido subhúmedo con lluvias en verano e invierno, el tercero en semiárido seco y el último el menos seco de los semiáridos (Orellana y col., 1999). La vegetación es de matorral de duna costera, selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia (Flores y Espejel, 1994).

2.2 Descripción de los factores

Para el diseño del IVAKY se utilizaron tres factores (relieve, suelos y clima); cada uno de ellos fue previamente evaluado por separado: i) Factor relieve kárstico (Aguilar y col., 2016), ii) Factor suelos (Aguilar y col., 2011; Aguilar y Bautista, 2011) y iii) Factor clima (Delgado-Carranza y col., 2011). A continuación, se describe brevemente cada uno de estos factores:

Factor Relieve kárstico

El relieve kárstico está relacionado con el drenaje subterráneo y, por lo tanto, la geomorfología y la hidrología están estrechamente interrelacionadas (De Waele y col., 2009). Diversos estudios hidrogeológicos enfatizan sobre la necesidad de incluir variables geomorfológicas, principalmente

densidad y tipo de depresiones como una aproximación para caracterizar el epikarst e incluirlo en las evaluaciones de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos kársticos (Daly y col., 2002; Davis y col., 2002; Huang, 2007; Plan y col., 2009; van Beynen y col., 2012).

Aguilar y col., (2014) reportaron en un mapa escala 1:50000 la distribución de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero kárstico considerando únicamente atributos del relieve: altitud, densidad y tipología de depresiones, forma dominante (dolina, úvala, polje), tipo de recarga y flujos preferenciales, así como la presencia o ausencia del contacto con el acuífero.

La altitud es un indicador de la zona no saturada. Se ha documentado que a menor altitud, el acuífero es menos profundo (Marín-Stillman y col., 2004) y por lo tanto, más vulnerable a la contaminación y viceversa. La densidad de depresiones, es un indicador del grado de karstificación así como de la presencia del epikarst. A mayor densidad de depresiones, principalmente del tipo dolina, la vulnerabilidad del acuífero es mayor (White y White, 1979; Plan y col., 2009; Lindsey y col., 2010; van Beynen y col., 2012). Si la forma dominante es polje, la vulnerabilidad es menor debido a la presencia de sedimentos (Aguilar y Bautista, 2011; Plan y col., 2009; Goepfert y col., 2011), las úvalas se consideraron como un caso intermedio. Asimismo, se presentará mayor vulnerabilidad cuando las dolinas están en contacto con el acuífero, debido a que la entrada de contaminantes al acuífero es de forma directa (Plan y col., 2009).

Factor edáfico

Como relieve y suelos evolucionan de manera paralela (Zinck, 2012), el mapa geomorfológico (Aguilar y col., 2014) se tomó como base cartográfica, para actualizar el mapa edáfico y redefinir las asociaciones edáficas contenidas en cada unidad geomorfológica, tomando en cuenta lo reportado por Bautista y col. (2011 y 2015), así como la información obtenida de la observación en campo, generando un mapa geomorfopedológico escala 1:50000.

Posteriormente, se recalcularon las funciones de pedotransferencia para cada grupo de suelo y el índice de aptitud por asociación edáfica (Aguilar y Bautista, 2011 y Aguilar y col., 2011). Las funciones de pedotransferencia utilizan atributos edáficos (materia orgánica, porcentaje de arcillas y capacidad de intercambio catiónico) para estimar la retención de materia orgánica y mineralización de nitrógeno (N) y

carbono (C) provenientes de aguas residuales con alta carga orgánica. Es decir, el modelo no únicamente considera propiedades físicas del suelo (espesor y textura), sino que también considera las funciones ambientales (retención y mineralización) de los suelos. Con el resultado de las funciones de pedotransferencia y considerando la profundidad total del perfil del suelo, se obtiene un índice de aptitud como filtro natural para cada grupo de suelo, es decir, un índice para el grupo LP, un índice para el grupo VR y así sucesivamente. A mayor aptitud del suelo como filtro natural, menor vulnerabilidad a la contaminación y viceversa. Detalles de la generación de las FPT pueden verse en Aguilar y col. (2011).

Como la distribución espacial de los suelos no es homogénea, sino que depende de la forma del relieve -incluso en zonas de karst como nuestra área de estudio, los patrones de distribución del suelo atienden también a la variabilidad del meso relieve-, es común encontrar que los diferentes grupos de suelos se presentan en “parches” o asociaciones edáficas por unidad geomorfológica, por ejemplo en planicies kársticas en más de 20 msnm y con presencia de depresiones, se presentan LP en la parte con alta del relieve, CM en las pendientes y LV en las zonas bajas. Por esta razón, se calculó un “índice de aptitud total” para cada asociación edáfica (LP/CM/LV), pues también es necesario reflejar esta variabilidad en los procesos edáficos. Este índice de aptitud total se estimó considerando la proporción de dominancia de cada grupo y/o unidad del suelo en la asociación edáfica; por ejemplo, si la asociación de suelos consta de tres principales grupos de suelo (p. ej. suelo1/suelo2/suelo3), al primer grupo se le asigna un peso de 0.5 por ser el suelo dominante, al segundo un peso de 0.3 y al tercer grupo un peso de 0.2 (véase Aguilar y Bautista 2011). La actualización del mapa edáfico -y por consiguiente, de los índices de aptitud del suelo como filtros naturales- considera principalmente la variabilidad de las unidades del grupo LP de la zona norte y oriente del área de estudio, que van desde Nudilíthic Leptosols (menos de 5 cm de espesor), hasta Lithic Leptosols (hasta 10 cm de espesor), Hyperskeletal Leptosols (profundos pero con pedregosidad mayor al 80%) (Bautista y col., 2011 y 2015).

Factor climático

El agua se considera como principal agente de transporte de solutos y contaminantes hacia el agua

subterránea. En la mayoría de los índices de evaluación de la vulnerabilidad el factor clima se incluye a través de la precipitación; sin embargo, se ha mencionado la necesidad de evaluar la frecuencia, duración e intensidad de la misma, incluyendo los eventos extremos, la cual podría tener una mayor influencia sobre la cantidad y la tasa de infiltración (Daly y col., 2002).

Para este estudio, el factor climático se incluyó a través de la distribución espacial de la “duración del periodo de lluvias” (DPLL) reportada por Delgado-Carranza (2010). La DPLL se expresa en meses húmedos consecutivos, iniciando cuando la precipitación pluvial (PP) excede a la mitad de la evapotranspiración potencial (ETP) ($PP > 0.5 ETP$) y finaliza cuando la PP es menor a la mitad de la ETP ($PP < 0.5 ETP$). La duración del periodo de lluvias es un concepto propuesto por la misma autora, en lugar del uso del concepto “longitud del periodo de crecimiento” propuesto por la FAO (1996). La diferencia radica en que la duración del periodo de lluvias se estima usando el índice de humedad mensual para identificar el inicio y término del periodo lluvioso usando los valores de la ETP calculado con Thornthwaite (ETP-MT), que es un método que usa variables disponibles en las estaciones meteorológicas en países en vías de desarrollo (Delgado-Carranza, 2010).

La DPLL tiene mayor precisión que la precipitación total anual ya que considera el tiempo de la temporada de lluvias; es de gran utilidad cuando se buscan explicaciones a la presencia de las comunidades vegetales e incluso con el desarrollo del relieve kárstico (Delgado-Carranza, 2010). El mapa de la duración del periodo de lluvias se presenta en la Figura 2 con cinco niveles, con un patrón de distribución de menos de tres meses en la costa noroeste, hasta con más de seis a ocho meses de periodos de lluvia en el sureste y parte del noreste del Estado. Se consideró que a mayor duración del periodo de lluvias, mayor es la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero y viceversa (Pacheco y col., 2004).

Para ilustrar la utilidad de la DPLL, se presentan cuatro ejemplos gráficos, en los cuales también se puede estimar la duración del periodo húmedo, que se presenta cuando la precipitación pluvial es mayor que el total de la evapotranspiración potencial ($PP > ETP$).

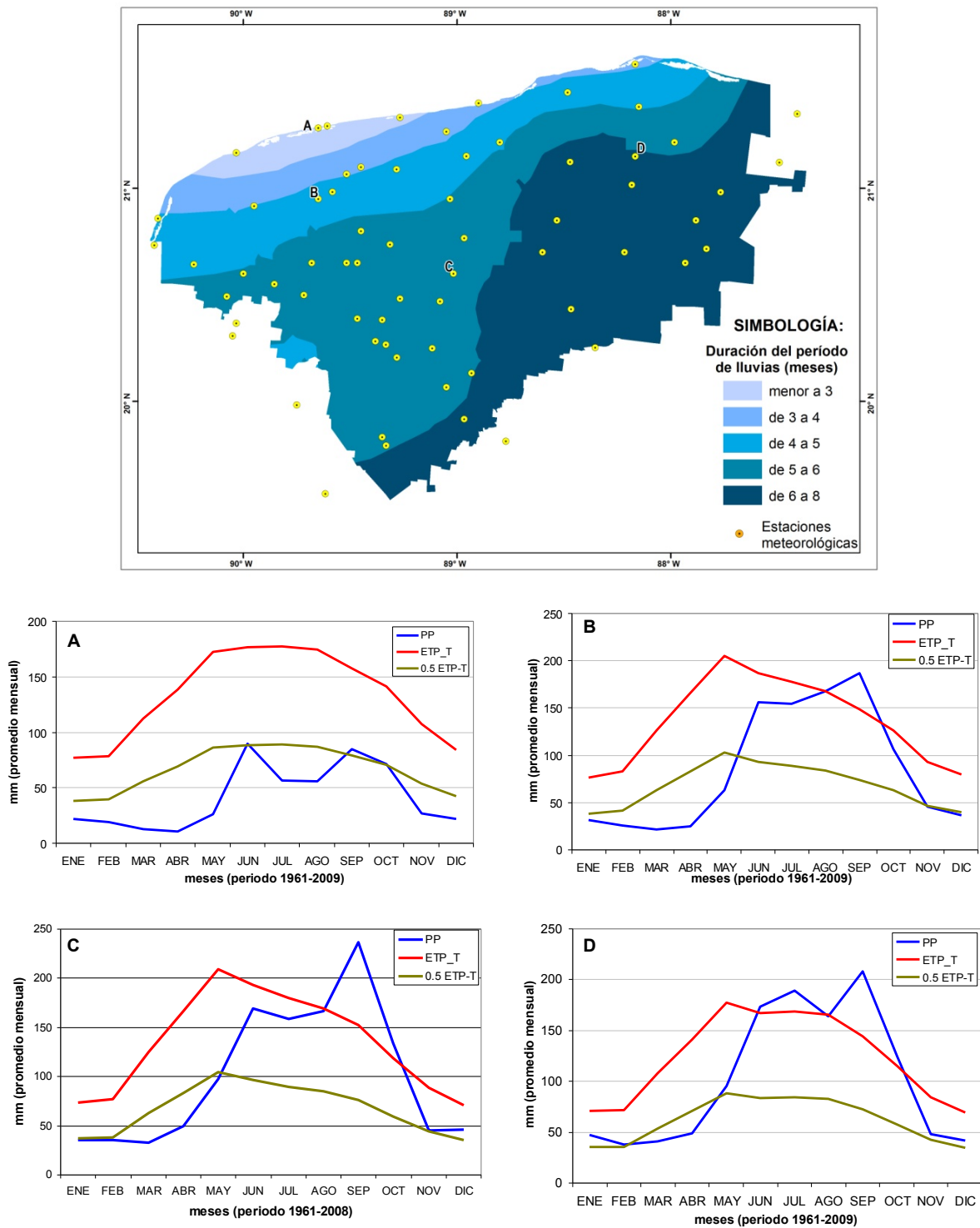


Fig. 2. Mapa de la duración del periodo de lluvias (Modificado de Delgado-Carranza, 2010) y ejemplos de las gráficas para estimar periodos húmedos, de cuatro diferentes estaciones meteorológicas: A) Progreso, B) Mérida, C) Sotuta y D) Tizimín.

En el punto A (Fig. 2 y Gráfica A), correspondiente a la estación del municipio costero “Progreso”, se observa una mayor evaporación –superior a 150 mm– y una menor precipitación que no excede los 100 mm, la duración del periodo de lluvias ($PP > 0.5$ ETP) es de un mes y no presenta período húmedo ($PP > ETP$). El punto B (Fig. 2 y Gráfica B) perteneciente al municipio de Mérida, presenta una PP de casi 200 mm. La DPLL es de seis meses y se presenta también un periodo húmedo de aproximadamente dos meses aunque también se ha reportado de cuatro meses (Delgado-Carranza y col., 2011). En el punto C (Fig. 2 y Gráfica C) presenta la estación del municipio de Sotuta, la PP alcanza un promedio de 250 mm y una DPLL de aproximadamente cinco meses, aunque se han reportado de hasta siete meses (Delgado-Carranza y col., 2011) y un período húmedo de tres meses. En el punto D (Fig. 2 y Gráfica D) correspondiente a la estación de Tizimín, se presenta hasta un promedio de PP de 200 mm, menor que en Sotuta (punto C); sin embargo, tanto la DPLL como el período húmedo son de mayor duración (ocho y cinco meses respectivamente).

2.3 Índice de vulnerabilidad del acuífero kárstico yucateco (IVAKY)

Los mapas utilizados de cada factor (relieve kárstico, suelos y clima) están en el sistema de proyección de coordenadas UTM-WGS-84. Fueron convertidos a formato raster con resolución de 500×500 m por pixel. Para obtener escalas comparables y realizar operaciones entre ellos, los archivos raster fueron normalizados por reclasificación, utilizando un método de asignación de fácil implementación denominado “escala de nueve puntos” donde a cada criterio se le asignó un valor de una escala de uno a nueve, siendo uno el menos vulnerable y nueve de mayor vulnerabilidad (Gómez y Barredo, 2005). Mientras mayor es la puntuación normalizada, mayor es la vulnerabilidad (Tabla 2).

Para la asignación de valores de preferencia y la obtención de los pesos para cada factor, se utilizó el proceso de análisis jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) aplicándose la extensión AHP 1.0 para ArcGis 9.1. El fundamento del AHP radica en ordenar estos factores o variables en un modelo jerárquico y realizar comparaciones por pares atribuyendo valores numéricos a los juicios (preferencias) realizados por los expertos (respecto de la importancia relativa de cada factor sobre otro factor). Estos valores

surgen de una escala de medición en términos de preferencia o importancia, que va desde uno hasta nueve (Saaty, 2008) (Tabla 3). Finalmente, los valores los sintetiza agregando las soluciones parciales en un índice sintético (Marinoni, 2004; Molero-Melgarejo y col., 2007). Banai-Kashani (1989) menciona que una contribución esencial del método AHP como alternativa entre los métodos existentes, es el desarrollo de un procedimiento interno para detectar las inconsistencias de juicio. Las matrices con un índice de consistencia mayor a 0.10 deben ser reevaluadas (Fernández-Henao, 2011).

Se conformó una matriz de 3×3 para la aplicación del AHP. De manera general se considera que el factor karst debe reflejar una mayor importancia debido a que diversos estudios acentúan que esta característica representa la mayor vulnerabilidad pues pueden omitir la función protectora de los suelos (Davis y col., 2002; Plan y col., 2009; van Beynen y col., 2012). Jiménez-Madrid y col. (2013) reportan que la configuración del relieve es un factor determinante en el análisis de los sistemas hidrogeológicos carbonatados, ya que controlan el gradiente hidráulico, la karstificación y las zonas de transferencia vertical y subhorizontal.

Sin embargo, como el relieve (factor karst) y suelos están estrechamente asociados (Zinck, 2012), al factor karst se le asignó un valor de tres sobre el factor suelo. Pero se le asignó un valor de nueve sobre el factor clima. Asimismo y siguiendo el orden de la relación relieve-suelos, el factor suelo también se considera como más importante sobre el factor clima, por lo que se le asignó un valor de siete (Tabla 3).

La integración de los pesos de cada factor y obtención del IVAKY, se realizó mediante una suma ponderada con la herramienta “*Spatial analyst*” del ArcGis 9.1. Este método es uno de los más intuitivos y fáciles de implementar, obteniéndose el valor de la vulnerabilidad como resultado de la sumatoria ponderada para cada píxel de cada factor (Molero-Melgarejo y col., 2007).

3 Resultados

Las unidades geomorfopedológicas se presentan definidas tanto por atributos del relieve (altitud y densidad de depresiones), como de las asociaciones edáficas presentes en cada unidad (Figura 3). Se incluye el resultado del índice de aptitud total (IAT) del suelo como filtro natural, la clase de aptitud y por lo tanto su nivel de vulnerabilidad (Tabla 4).

Tabla 2. Resumen de los factores, atributos e indicadores para la evaluación de la vulnerabilidad (puntuación de 1 a 9 de menor a mayor vulnerabilidad respectivamente)

Factor	Atributos	Indicador(es)	Evaluación	Nivel de vulnerabilidad	Puntuación
Relieve kárstico (Aguilar y col., 2016; Aguilar y col., 2014)	Altitud	Espesor de la zona no saturada	Diversas condiciones: desde las extremas (densidad alta de depresiones, tipo dolina en contacto con el acuífero) hasta las muy bajas (altitud > 70 msnm, densidad baja de depresiones tipo polje)	Extrema	9
	Densidad de depresiones	Karstificación, tipo de recarga y flujo preferencial		Muy alta	8
	Tipo de depresiones			Alta	7
	Contacto con el acuífero	Zonas de entradas directas		Media	5
Asociaciones edáficas (Aguilar y Bautista, 2011 y Bautista y col., 2011b)	Materia orgánica	Retención y mineralización de materia orgánica contenida en aguas residuales integrados en un índice de aptitud (IUSS, 2006)	3 a 11	Muy alta	9
	% de arcillas		12 a 20	Alta	7
	CIC		21 a 29	Media	5
	Espesor		30 a 38	Baja	3
	Grupo y/o unidad edáfica (IUSS, 2006)		> 38	Muy baja	1
Clima (Delgado-Carranza, 2010; Delgado y col., 2011)	Distribución, duración y cantidad de humedad	Duración del período de lluvia, como principal vector para el transporte de agua y contaminantes hacia el acuífero (meses)	>6 a 8	Muy alta	9
			5 a 6	Alta	7
			4 a 5	Media	5
			3 a 4	Baja	3
			<3	Muy baja	1

Los mapas de vulnerabilidad del factor kárstico (Fig. 4A) y edáfico (Fig. 4B), presentan similitudes en los patrones de vulnerabilidad principalmente en las planicies, que van de mayor a menor de las regiones noroeste hacia sureste; sin embargo, el factor karst refleja la existencia del Anillo de cenotes que continúa con una extensa zona en el noreste (vulnerabilidad extrema) y el campo de dolinas en el este (nivel muy alta) a diferencia del factor edáfico donde este patrón no es evidente. La superficie del nivel medio de vulnerabilidad es mayor en el mapa del factor edáfico (40%) debido al efecto de la presencia de Cambisols y Luvisols en depresiones como las úvalas y poljes, que se presentan en esta zona (Fig. 4B). En el mapa del factor kárstico, la superficie del nivel medio es menor (16%) debido al efecto de la densidad de depresiones en gran parte de la zona este (Fig. 4A).

Considerando únicamente los atributos del relieve, el sur del Estado presenta los niveles bajos y muy bajos de vulnerabilidad que ambos suman el 12% de la superficie estatal, esto es debido a que en estas zonas se presenta baja densidad de depresiones de tipo principalmente úvalas y poljes (Fig. 4A). En el mapa del factor edáfico, el sur es ligeramente diferente, pues aún se observan zonas de vulnerabilidad media, debido a la presencia de los Leptosols en las asociaciones edáficas que disminuyen ligeramente el índice de aptitud total por asociación edáfica. De acuerdo con el mapa del factor edáfico, en la zona sur se tienen áreas de baja y muy baja vulnerabilidad con un total del 6% de la superficie estatal (Fig. 4B) por la presencia de suelos más profundos y arcillosos como los Luvisols, Vertisols y Stagnosols.

Tabla 3. Escala de medición de preferencias (Tomado de Saaty, 2008)

Escala	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio
3	Moderadamente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro
5	Fuertemente más importante un elemento que en otro	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro
7	Mucho más fuertemente la importancia de un elemento que la del otro	Un elemento domina fuertemente. Su dominancia está probada en la práctica
9	Importancia extrema de un elemento frente al otro	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible

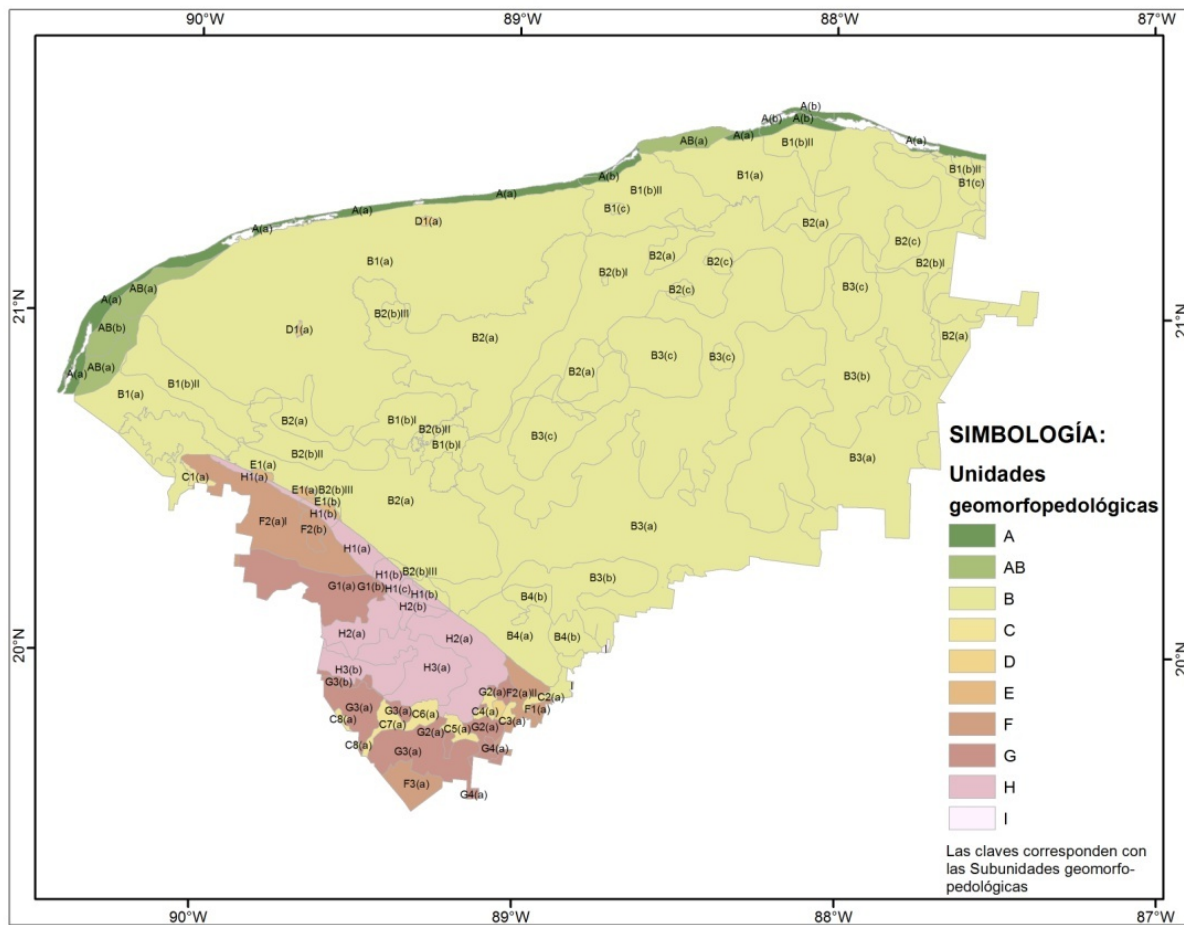


Fig. 3. Mapa geomorfológico de Yucatán (Modificado de Aguilar y col., 2014), el significado de la leyenda puede leerse en la Tabla 4.

Tabla 4. Características principales de las unidades geomorfo-pedológicas (Figura 3)

Región geomorfológica	Altitud (msnm)		DD	Unidad geomorfo-pedológica	Asociación edáfica	IAT	Clase de aptitud	Vulnerabilidad	
								relieve	suelos
A. Planicies costeras	A1	menos de 10	(a)	A1(a)	AR/SC	26	NA	A	MA
			(b)	A1(b)	AR/SC	26	NA	E	MA
AB. Planicies de transición	AB1	menos de 10	(a)	AB1(a)	GL/HS/SC	16.9	NA	A	MA
			(b)	AB1(b)	GL/HS/SC	16.9	NA	E	MA
B. Planicies kársticas	B1	menos de 10	(a)	B1(a)	LPnt/LPli	3.6	MB	A	MA
			(b)	B1(b)I	LPnt/LPli	3.6	MB	E	MA
			(b)	B1(b)II	LPrz/LPli/CM	14.3	B	E	A
	B2	10-20	(c)	B1(c)	LPrz/LPli/CM	14.3	B	E	A
			(a)	B2(a)	LP/CM	20.5	B	A	A
			(b)	B2(b)I	LPrz/LPli/CM	14.3	B	E	A
			(b)	B2(b)II	LP	12.8	B	E	A
			(b)	B2(b)III	LP/CM	20.5	B	E	A
			(c)	B2(c)	LPrz/CM	20.5	B	E	A
	B3	20-30	(a)	B3(a)	LP/CM/LV	25.7	Me	M	Me
			(b)	B3(b)	LP/CM/LV	25.7	Me	MA	Me
			(c)	B3(c)	CM/LP/LV	29.5	Me	MA	Me
B4	30-40	(a)	B4(a)	CM/LP/LV	29.5	Me	Me	Me	
		(b)	B4(b)	CM/LP/LV	29.5	Me	Me	Me	
C. Planicies interiores	C1	menos de 30	(a)	C1(a)	LP/LV	27	Me	Me	Me
	C2	30-40	(a)	C2(a)	VR/LP	33.9	A	Me	B
	C3	40-50	(a)	C3(a)	VR/LP	33.9	A	B	B
	C4	50-60	(a)	C4(a)	CM/ST/LP	33.6	A	B	B
	C5	60-70	(a)	C5(a)	ST/LP	35.3	A	B	B
	C6	70-80	(a)	C6(a)	VR/LP	33.9	A	MB	B
	C7	80-100	(a)	C7(a)	VR/LP	33.9	A	MB	B
	C8	100-120	(a)	C8(a)	LV/LP	34.1	A	MB	B
D. Elevaciones aisladas	D1	10	(a)	D1(a)	LPli	5.1	MB	Me	MA
	D2	10-70	(a)	D2(a)	LP	12.8	B	B	A
E. Piedemonte	E1	30	(a)	E1(a)	LP/CM	20.5	B	Me	A
			(b)	E1(b)	LP/CM	20.5	B	Me	A
F. Planicies colinosas	F1	hasta 50	(a)	F1(a)	CM/LP/VR	29.4	Me	B	Me
	F2	50-70	(a)	F2(a)I	CM/LP/LV	29.5	Me	B	Me
			(b)	F2(a)II	CM/LP/VR	29.4	Me	B	Me
	(b)	F2(b)	CM/LP/LV	29.5	Me	B	Me		
F3	70-100	(a)	F3(a)	CM/LP/LV	29.5	Me	MB	Me	
G. Lomeríos	G1	hasta 90	(a)	G1(a)	LV/LP/NT	47.2	MA	MB	MB
			(b)	G1(b)	LV/LP/NT	47.2	MA	B	MB
	G2	más de 90	(a)	G2(a)	LV/LP/VR	37.6	A	MB	B
			(a)	G3(a)	LV/LP/ST	38.1	A	MB	B
	G3	hasta 110	(b)	G3(b)	LP/VR/ST	30.8	A	B	B
(a)			G4(a)	VR/LP	33.9	A	MB	B	
H. Montañas	H1	hasta 100	(a)	H1(a)	LP/CM	20.5	B	MB	A
			(b)	H1(b)	LP/LV/CM	27.3	Me	B	Me
			(c)	H1(c)	LP/LV/CM	27.3	Me	Me	Me
	H2	100-150	(a)	H2(a)	LP/LV	27	Me	MB	Me
			(b)	H2(b)	LP/LV	27	Me	B	Me
	H3	150-200	(a)	H3(a)	LP/VR/ST	30.8	A	MB	B
(b)			H3(b)	LP/VR/ST	30.8	A	B	B	
I. Laguna		20		I	laguna	0	NA	E	NA

DD= densidad de depresiones, (a) alta, (b) media, (c) baja, IAT= índice de aptitud total; NA= no aplica, E= extrema, MA= muy alta, A= alta, Me= media, B= baja, MB= muy baja.

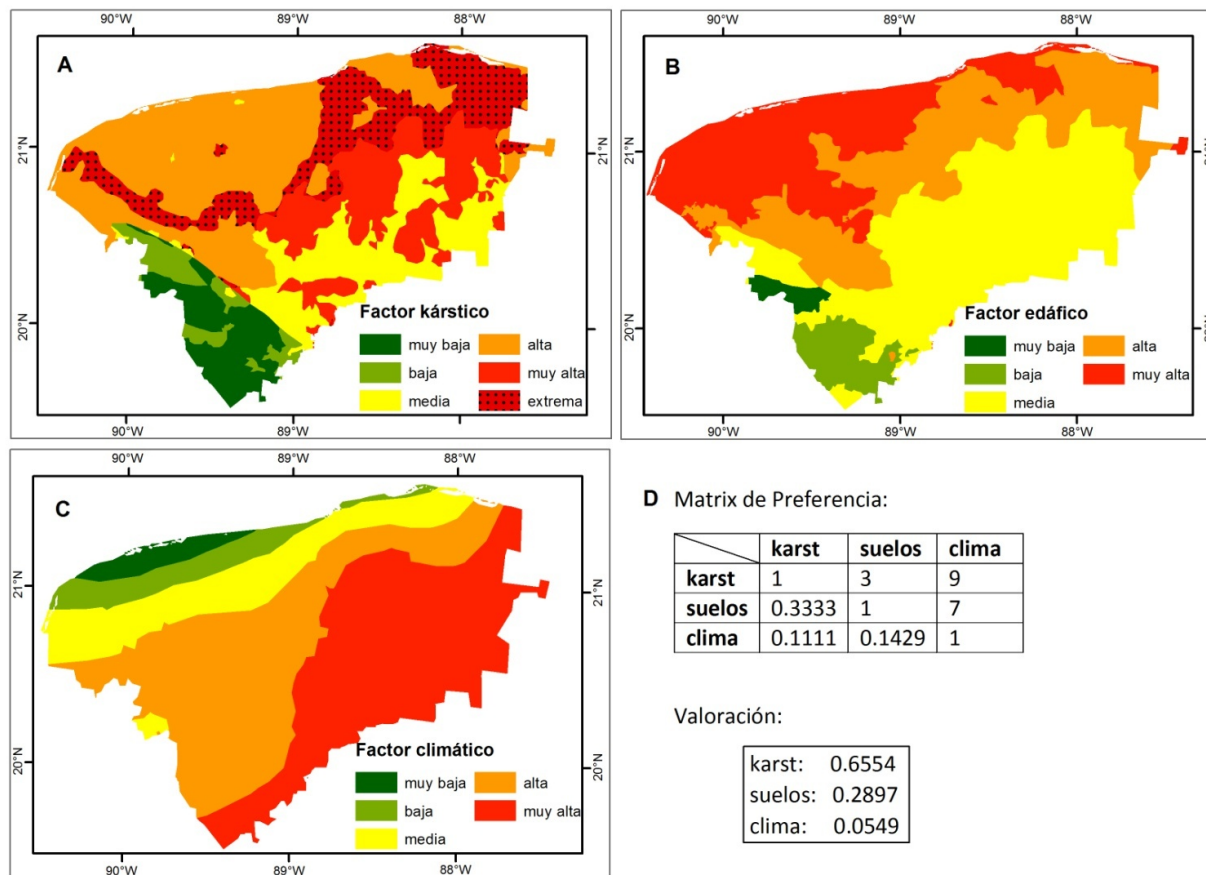


Fig. 4. Vulnerabilidad a la contaminación por el factor kárstico (A), el factor edáfico (B) y el factor climático (C). También se presenta la matriz de preferencias y los pesos obtenidos con el AHP (D).

El factor climático presenta un patrón inverso a los factores karst y suelos, las áreas con muy baja, baja y media vulnerabilidad se ubican en los extremos noroeste y parte del centro de Yucatán, y las zonas con mayor vulnerabilidad, desde el centro hacia el sureste y la costa noreste, cerca de los límites con Quintana Roo (Fig. 4C). Al igual que los factores karst y suelos, en el factor clima, los niveles bajos y muy bajos siguen presentando los menores porcentajes de la superficie estatal.

La matriz de preferencias, así como los pesos obtenidos con el AHP, se presentan en la Figura 4D. Los pesos generados en la aproximación definitiva fueron 0.65 (karst), 0.29 (suelos) y 0.05 (clima). El índice de consistencia presentó un valor de 0.07. La ecuación para el cálculo del IVAKY es:

$$IVAKY = (0.65 * karst) + (0.29 * suelo) + (0.05 * clima)$$

Esta ecuación expresa la importancia del karst sobre

los otros dos factores, lo cual es importante pues como se había mencionado anteriormente, el factor karst puede omitir la función filtrante de los suelos.

La clase de vulnerabilidad con nivel extremo a la contaminación representa el 19% de la superficie de la entidad y se caracteriza por: a) densidad media y alta de depresiones; b) dominancia de dolinas en contacto con el acuífero; c) baja altitud; d) dominan suelos Leptosol (LP nudilíticos, líticos, réndzicos) y e) alta variabilidad climática con zonas desde tres hasta ocho meses de DPLI (Figura 5).

La clase de vulnerabilidad muy alta que ocupa el 19% de la superficie del Estado obtuvo esa calificación debido a: a) baja altitud; b) posee menor densidad de depresiones, principalmente dolinas en contacto con el acuífero; c) los suelos dominantes del grupo Leptosol (Leptosols nudilíticos y líticos) y d) 3 a 5 meses de DPLL.

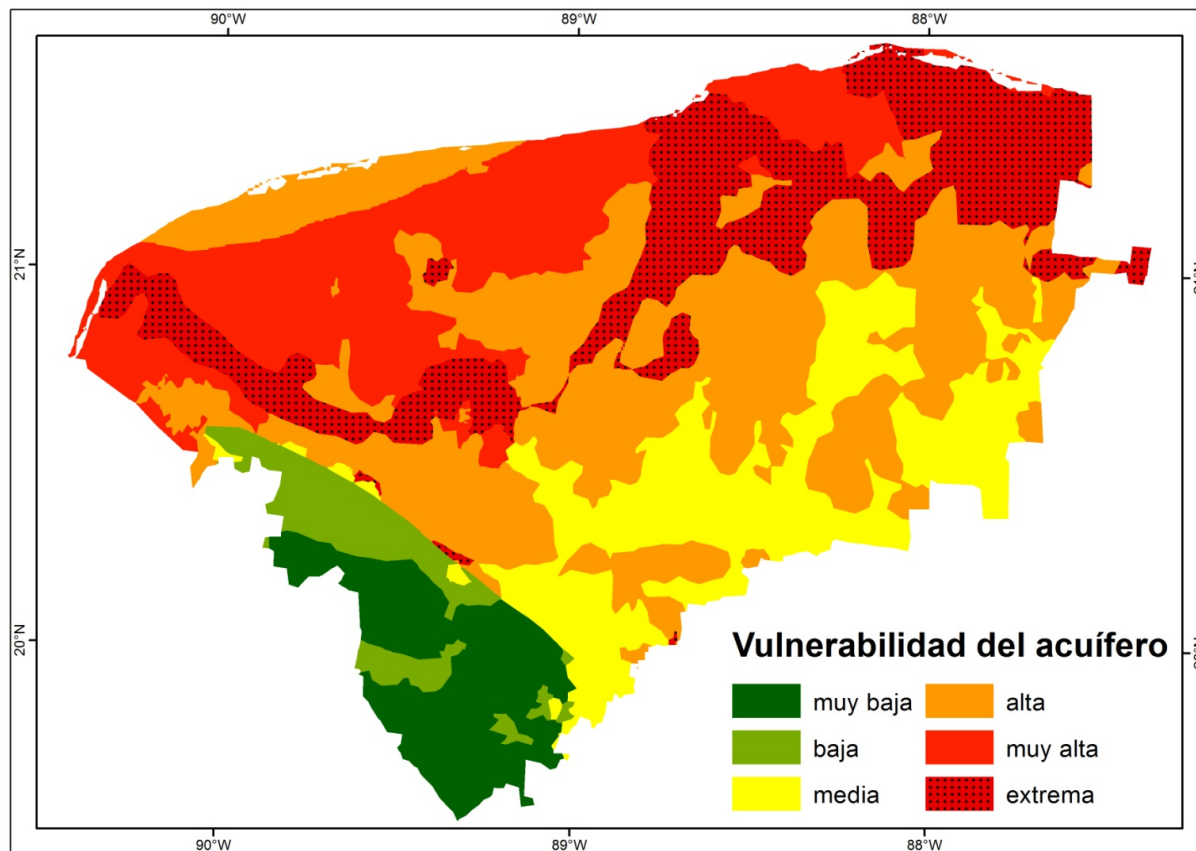


Fig. 5. Mapa de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero kárstico yucateco a la contaminación.

La clase de vulnerabilidad alta presentó mayor superficie (33% de la superficie estatal). Está representada por planicies costeras con suelos arenosos (AR/SC) con menos de tres meses de DPLL y sin períodos húmedos y planicies kársticas entre 10 a 30 msnm con más de tres meses de DPLL y presencia de períodos húmedos. Es un área heterogénea de condiciones, pero las principales características que imprimen la alta vulnerabilidad son: a) zonas con densidad baja y media de depresiones, tipo dolinas y asociación edáfica de Leptosols y Cambisols; b) zonas con densidad alta de depresiones pero con asociaciones de Leptosols, Cambisols y Luvisols.

La zona con vulnerabilidad media ocupa un 17% de la superficie estatal y está representada por planicies kársticas y otras geoformas con características como: a) altitud mayor a 20 msnm; b) con menor densidad de depresiones, principalmente úvalas y pequeños poljes; c) suelos LP, CM y LV y d) DPLL de cinco a ocho meses.

Las zonas con baja vulnerabilidad, corresponde a unidades geomorfopedológicas que presentan: a) 50

msnm hasta 100 msnm de altitud, b) poseen densidad baja o media de depresiones, tipo úvalas y/o poljes, c) suelos LP asociados con CM, LV y VR, éstos dos últimos son más profundos (mayor a 100 m de profundidad) y arcillosos. En total, ocupa un área de 1607 km² (4% de la superficie estatal).

Las zonas con muy baja vulnerabilidad, también son diferentes unidades geomorfopedológicas que tienen: a) en promedio 70 msnm o más de altitud, b) densidad baja de depresiones tipo úvala y/o polje; c) suelos LV, VR, ST asociados con LP y CM. En total ocupan 3 050 km² (8% de la superficie estatal).

Aunque en ambas zonas (baja y muy baja vulnerabilidad), la duración del periodo de lluvias sea de 5 o más meses, la mayor altitud que indica un mayor espesor de la zona no saturada, la menor densidad de depresiones con dominancia de úvalas y poljes, así como la presencia de suelos más profundos y arcillosos (LV, VR, ST), son las variables que más influyen para definir una menor vulnerabilidad a la contaminación del acuífero kárstico.

4 Discusión

4.1 Importancia del IVAKY para la zona de estudio

A diferencia de otros modelos anteriores aplicados a la zona que como variables incluían el nivel freático, la litología del acuífero, recarga, espesor del suelo, topografía, pendiente del terreno y conductividad hidráulica (Pérez y Pacheco, 2004; Gijón-Yescas, 2007; Bolio-Barrios y col., 2011), el IVAKY incluye las depresiones kársticas, suelos y climas, espacialmente integrados por lo que el mapa resultante tiene mayor detalle. Es decir, el IVAKY incorpora por primera vez la distribución de unidades geomorfológicas de mayor detalle (escala 1:50000) como base cartográfica donde se incorpora una evaluación semicuantitativa de las depresiones y su tipología (Aguilar y col., 2016; Aguilar y col., 2014), tal como recomienda Plan y col., (2009), quienes introdujeron datos cuantitativos y cualitativos de las características morfológicas kársticas para una mejor diferenciación de las áreas más vulnerables.

El análisis geomorfológico apoya el reconocimiento de las asociaciones edáficas correspondientes en cada unidad geomorfológica, principalmente en las planicies kársticas menos de 20 msnm, donde se presentan una variabilidad de las unidades del grupo Leptosol. Ambos factores -relieve kárstico y asociaciones edáficas- aportaron elementos que permitieron diferenciar niveles de vulnerabilidad de una manera más acorde a las características del medio.

Aunado a la variabilidad espacial edáfica, en el IVAKY se plasma la importancia de las funciones ambientales de los suelos, que pueden funcionar como filtros naturales y como transformadores de desechos (con cierto límite), debido a que luego pueden convertirse en focos de contaminación (Díaz-Pereira y col., 2011). Además, independientemente de la cantidad de precipitación, el reconocimiento de la aptitud de los suelos como retenedores y transformadores, sirve para dosificar insumos en las prácticas agrícolas (riego, abonos, plaguicidas, etc.), principalmente si la actividad está cercana a alguna dolina o sobre un polje. El factor antrópico es determinante en el uso del territorio, por lo que se debe enfatizar en la adecuada gestión de suelos y geoformas, como medida de prevención de contaminación de suelos y acuíferos (Aguilar y col., 2014).

Es importante subrayar que el mapa del IVAKY

únicamente presenta la vulnerabilidad intrínseca del sistema kárstico y es de utilidad como base cartográfica para realizar diferentes escenarios de riesgos de contaminación dependiendo del tipo de amenaza (o peligro), así como la carga de contaminante y si es de tipo puntual o difusa (Daly y col., 2002), lo que aportaría elementos más precisos para la gestión del territorio ya que se ha detectado la presencia de plaguicidas organoclorados que exceden los límites establecidos por las normas mexicanas en veinte cuerpos de agua situados en el Anillo de cenotes (Polanco-Rodríguez y col., 2015); los mismos autores mencionan que el 30% de la población de las zonas rurales beben agua directamente de pozos o sumideros.

En las zonas de extrema y muy alta vulnerabilidad se requieren los esfuerzos para implementar medidas de protección, prevención y mitigación ya que en ellas se localizan las principales zonas urbanas. En el 2015, la encuesta intercensal del INEGI reportó un total de 2'097175 habitantes en Yucatán en el cual la ciudad de Mérida concentra el 42% de la población, Kanasín con 4.03%, Valladolid concentra 3.80 y Tizimín el 3.74%.

4.2 Sobre la combinación de enfoques metodológicos

El método propuesto en este estudio es un ejemplo de los "métodos híbridos" que surgen de la combinación de métodos y enfoques (Antonakos y Lambrakis, 2006) y que actualmente cobran mayor importancia debido a la complejidad de los problemas ambientales, que deben ser vistos y atendidos con múltiples enfoques, para dar soluciones más acordes a esta complejidad. Diversos reportes resaltan la significancia de los estudios integrados del suelo y agua, en el contexto agrícola, la vulnerabilidad de las aguas subterráneas, manejo de cuencas, ciencias de la tierra, recursos hídricos y ciencias ambientales (Lin, 2003). El IVAKY hace énfasis del componente edáfico como un sistema natural, y no únicamente como un sustrato. Los análisis de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos deben incluir procesos ambientales y no únicamente propiedades físicas.

Con respecto a la integración y la asignación de pesos -al igual que en este trabajo- diversos estudios le han asignado las mayores ponderaciones a la variable de las depresiones kársticas (Plan y col., 2009; Lindsey y col., 2010; van Beynen y col., 2012). Incluso van Beynen y col., (2012) asignaron un 25% de ponderación a la densidad de depresiones en tres niveles (ausente, moderada y alta) y por medio de un

análisis de sensibilidad, se validó la importancia de este atributo. Gogu y Dassargues (2000) obtuvieron el mismo resultado con el atributo del epikarst, al aplicar un análisis de sensibilidad al método EPIK. De esta manera, se refleja que las formas de absorción son las principales características que determinan la alta vulnerabilidad de los acuíferos kársticos. Estas formas del relieve son designadas como el factor I (condiciones de infiltración) por Goldscheider (2005) o como el factor C (concentración de flujo) por Daly y col., (2002), que describe el grado en el cual la función protectora de los suelos y regolito, es omitida. En el enfoque de Plan y col., (2009), la evaluación de la vulnerabilidad de las dolinas, dependía principalmente de la presencia o ausencia de sedimentos o cubierta de suelos. Así, dolinas activas o secas pero sin sedimentos, son clasificadas como de extrema vulnerabilidad y dolinas con sedimentos, con vulnerabilidad alta.

El origen y evolución espacio-temporal de las formas kársticas dependen de factores geológicos, tectónicos, hidráulicos, físico-químicos y biológicos, y como resultado de la actuación de estos factores -cambiantes en el tiempo- es una amplia variedad de tipos de terrenos kársticos (Antigüedad y col., 2007). Por estas razones, cada región kárstica posee sus propias características y por lo tanto, es necesario diseñar un modelo propio de vulnerabilidad o realizar adaptaciones de modelos previos.

4.3 Perspectivas a seguir

Las evaluaciones de la vulnerabilidad de un acuífero pueden ser tan extensas como se deseen, dependiendo de varios tópicos como el nivel de detalle para precisar flujos horizontales (Andreo y col., 2004), el objeto a evaluar (recurso hídrico en general, captaciones, zonas de abastecimiento) (Andreo y col., 2009), algunos incluyen también los riesgos y la importancia o usos potenciales tanto del recurso hídrico como de las fuentes de abastecimiento (Ravbar y Goldscheider, 2007) o específicamente para el consumo humano (Ravbar y Goldscheider, 2009; Jiménez-Madrid y col., 2013).

Uno de los principales objetivos de los mapas de vulnerabilidad es identificar y delimitar perímetros de protección para fuentes de abastecimiento y recarga (Andreo y col., 2004; Jiménez-Madrid y col., 2013), otro aspecto recomendable es realizar mapas de vulnerabilidad a escalas mayores. Lo anterior podría incluir la identificación de los patrones de distribución de las depresiones kársticas (al azar,

regular, agrupamientos) (Gracia-Prieto, 1987; 1991) y establecer su relación con los ejes de drenaje (Huang, 2007).

Los mapas geomorfológicos a mayor detalle, también aporta una mejor caracterización en la tipología de las depresiones kársticas, ya que según Molerio-León (2004), el rasgo distintivo de la vulnerabilidad en ellos es que cada forma es un sistema de flujo local y, por ende, un ente de vulnerabilidad particular, exclusiva e independiente de los demás. Por ejemplo, las dolinas de disolución son depresiones comunes que generalmente están conectadas con un sistema de drenaje subvertical. Las dolinas de colapsamiento, no necesariamente tienen una conexión directa con el sistema de conductos activos hidrológicamente (Plan y col., 2009). Tomar en cuenta las particularidades de cada tipo de depresión, es necesario para identificar los flujos horizontales (procesos de la zona saturada).

También se reconoce que la calidad de las aguas subterráneas y la vulnerabilidad de un acuífero pueden presentar una variabilidad temporal y en este sentido Butscher y Huggenberger (2009), mencionan que esta dependencia, en función del tiempo, hasta ahora no ha sido mostrada en mapas estáticos de vulnerabilidad, por esta razón, introdujeron los términos de “vulnerabilidad transitoria” y “vulnerabilidad persistente” con el objetivo de incluir una evaluación temporal de la vulnerabilidad, sumada a la evaluación espacial. Este tipo de vulnerabilidad transitoria versus persistente, es dependiente del tipo de recarga y los tiempos de residencia en los diferentes sistemas de flujo. Se ha demostrado que la calidad temporal o los niveles de contaminación, pueden ser dependientes de la intensidad de uso del suelo (Medina-Moreno y col., 2015).

En las áreas que presentan niveles muy alta y alta vulnerabilidad, la población en general –incluidos productores, empresarios y tomadores de decisiones– deben ser informados y concientizados para que el uso del suelo sea adecuadamente gestionado, debido a que los malos manejos o las actividades intensamente productivas representarían amenazas potenciales y altos riesgos de contaminación. Es necesario el tratamiento de desechos de manera específica, por ejemplo, para aguas residuales domésticas en zonas urbanas es importante el diseño adecuado de fosas sépticas con el apoyo de las nuevas tecnologías (Lucho-Constantino y col., 2015), principalmente cuando se ubican en zonas de muy alta vulnerabilidad como la ciudad de Mérida. En zonas rurales, una alternativa de bajo costo son los humedales artificiales

(Marín-Muñiz, 2016). Otros ejemplos es para los lixiviados de rellenos sanitarios (San Pedro-Cedillo y col., 2015) y para talleres mecánicos (Ramos y col., 2015), que representan serias amenazas de contaminación. Por el contrario, en las áreas con nivel baja y muy baja vulnerabilidad, las actividades antrópicas representan menor riesgo de contaminación del acuífero.

En general y al igual que se realiza en otros países, es urgente establecer un listado de “mejores prácticas de manejo” (Veni y col., 2001) para el estado de Yucatán. Estas prácticas cubren una amplia lista de tópicos tales como la recuperación de agua de riego, recuperación de tierras, manejo de nutrientes, sellado de pozos abandonados, recolección de residuos, condiciones específicas para desarrollos urbanos, industriales y caminos, entre otros. Se requieren acciones coordinadas entre los diferentes actores (gobierno, académicos, empresarios, comunidades) para fomentar la participación social en el buen uso y aprovechamiento de los ecosistemas kársticos.

Insistir en una agricultura de precisión, el manejo específico del tipo de suelo, cultivo y condiciones de riego (cuando aplique), principalmente si la actividad está cercana a alguna dolina o sobre un polje, se debe incitar en la adecuada gestión de suelos y geoformas como medidas de prevención (Aguilar y col., 2014). Para lo anterior, también sería importante recuperar el conocimiento de los antiguos mayas en relación al cuidado de sus cenotes y aguadas (como zonas de abastecimiento), una de las estrategias de protección que utilizaban era el establecimiento de “el toolché” una franja arbolada con mínimo 50 m de ancho o más que los campesinos dejaban alrededor de los cenotes y aguadas para evitar que se azolven con tierra arrastrada por las lluvias (Morales, 2009). Para cenotes que tienen un uso turístico, vigilar y mantener el equilibrio ambiental y cultural mediante la capacitación de los guías, así como a las comunidades y propietarios.

Conclusiones y recomendaciones

El índice de la vulnerabilidad del acuífero kárstico yucateco o IVAKY incluye las formas del relieve, suelos y los climas del estado de Yucatán, lo cual permite una diferenciación del territorio de acuerdo con su nivel de vulnerabilidad a la contaminación. El resultado es un mapa con seis clases de vulnerabilidad.

a) La clase de extrema vulnerabilidad a la contaminación que corresponde al Anillo de cenotes

y continúa hacia la zona noreste.

b) La clase de muy alta vulnerabilidad a la contaminación localizada en la planicie kárstica baja (menor de 10 m) al interior del Anillo de cenotes, con predominancia de Leptosols.

c) La clase de alta vulnerabilidad a la contaminación localizada en la planicie costera y las planicies kársticas (20 y 30 m de altitud), alrededor de la zona de extrema vulnerabilidad a la contaminación.

d) La clase de media vulnerabilidad a la contaminación localizada en la planicie kárstica de 40 m de altitud al sur y sureste del estado de Yucatán, con alta precipitación pluvial.

e) La clase de baja vulnerabilidad a la contaminación localizada en las planicies interiores con suelos de baja infiltración; los lomeríos y en la montaña que son las partes más altas del territorio.

f) La clase de muy baja vulnerabilidad a la contaminación localizada al sur del estado en los lomeríos con suelos de muy baja infiltración.

Los resultados alcanzados sugieren que la investigación en los temas estudiados debe incrementarse hasta una escala de detalle 1:25000, con lo cual podrían establecerse mejores recomendaciones de uso del territorio.

El enfoque propuesto es replicable y podría usarse para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos en regiones con características ambientales similares no sólo en México, sino en Guatemala, Belice, Cuba, o la península de la Florida.

Agradecimientos

Agradecemos a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México por el financiamiento otorgado al proyecto PAPIIT IN223110-3. YAD agradece al CONACYT la beca doctoral. FB agradece el financiamiento de la DGAPA-UNAM para la estancia sabática en el CEBAS-CSIC.

Referencias

- Aguilar, D. Y., Bautista, F., Mendoza, M.E., Ihl, T. y Frausto, O. (2014). Propuesta del IVAKY: índice de vulnerabilidad del acuífero kárstico yucateco a la contaminación. En: *10 soluciones para el manejo sustentable del agua, Península de Yucatán*, Pp. 113-135. Fundación ICA. México D. F.

- Aguilar, Y., Bautista, F., Mendoza, M. E., Frausto, O. y Ihl, T. (2016). Density of karstic depressions in Yucatan State, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies* 78, 51-60.
- Aguilar, Y., Bautista, F., Mendoza, M. E. y Delgado-Carranza, C. (2013). Vulnerabilidad y riesgos de contaminación de acuíferos kársticos. *Tropical & Subtropical Agroecosystems* 16, 243-263.
- Aguilar, Y. y Bautista, F. (2011). Extrapolating the suitability of soils as natural reactors using an existing soil map: application of pedotransfer functions, spatial integration and validation procedures. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 13, 221-232.
- Aguilar, Y., Bautista, F. y Díaz-Pereira, E. (2011). Soils as natural reactors for swine wastewater treatment. *Tropical and subtropical agroecosystems* 13, 199-210.
- Albinet, M. y Margat, J. (1975). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Actes du Colloque de Moscou, Août, IAHS-AISH Publ., 103: 58-70. *Groundwater Pollution – Symposium – Pollution des Eaux Souterraines*.
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J., Petty, R. y Hackett, G. (1987). DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. EPA/600/2-87-035. Oklahoma. Disponible en: http://www3.epa.gov/region5/waste/clintonlandfill/PDFClintonLFChemicalWaste_USEPAApplication/cl_130.pdf Accesado: 30 septiembre 2015.
- Andreo, B., Ravbar, N. y Vías, J. M. (2009). Source vulnerability mapping in carbonate (karst) aquifers by extension of the COP method: application to pilot sites. *Hydrogeology Journal* 17, 749-758.
- Andreo, B., Vadillo, I., Carrasco, F., Neukum, C., Jiménez, P., Goldscheider, N., Hötzl, H., Vías, J. M., Pérez, I. y Göppert, N. (2004). Precisiones sobre el funcionamiento hidrodinámico y la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero kárstico de la Sierra de Líbar (Provincias de Málaga y Cádiz, sur de España) a partir de un ensayo de trazadores. *Revista de la Sociedad Geológica de España* 17, 87-197.
- Antigüedad, I., Morales, T. y Uriarte, J. A. (2007). Los acuíferos kársticos. Casos del País Vasco. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 15, 325-332.
- Antonakos, A. y Lambrakis, N. (2006). Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the DRASTIC model, an example from NE Korinthia, Greece. *Journal of Hydrology* 333, 288-304.
- Bakalowicz, M. (2005). Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology Journal* 13, 148-160.
- Banai-Kashani, R. (1989). A new method for site suitability analysis: The Analytic Hierarchy Process. *Journal of Environmental Management* 13, 685-693.
- Bautista, F., Frausto, O., Ihl, T. y Aguilar, Y. (2015). Actualización del mapa de suelos del estado de Yucatán México: enfoque geomorfopedológico y WRB. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 2, 303-315.
- Bautista, F., Palacio-Aponte, G., Quintana, P. y Zinck, A.J. (2011). Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from Peninsula of Yucatan, Mexico. *Geomorphology* 135, 308-321.
- Bautista, F., Aguilar, Y., Rivas, H. y Páez, R. (2007). Los suelos del estado de Yucatán. En: *Importancia del binomio "suelo materia orgánica" en el desarrollo sustentable*, (M. Sánchez-Monedero y D. Cabañas, eds.), Pp. 11-42. CSIC, Agencia Española de Cooperación Internacional, Murcia, España.
- Bolio-Barrios, E. R., Cabrera-Sansores, A., Bautista, F. y Pacheco-Ávila, J. (2011). Uso de la metodología EPIK para determinar la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en Yucatán, México. *Teoría y Praxis* 9, 55-72.
- Bouma, J. (2006). Hydrogeology as a powerful tool for environment police research. *Geoderma* 131, 275-286.
- Butscher, C. y Huggenberger, P. (2009). Enhanced vulnerability assessment in karst areas by combining mapping with modeling approaches.

- Science of the Total Environment* 407, 1153-1163.
- Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S., Goldscheider, N., Neale, S., Popescu, I.C. y Zwahlen, F. (2002). Main concepts of the "European approach" to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal* 10, 340-345.
- Davis, A.D., Long, A.J. y Wireman, M. (2002). KARSTIC: a sensitivity method for carbonate aquifer in karst terrain. *Environmental Geology* 42, 65-72.
- De la Rosa, D., Mayor, F., Díaz-Pereira, E., Fernández, M. y De la Rosa, D. Jr. (2004). A land evaluation decision support system (MicroLEIS DSS) for agricultural soil protection with special reference to the Mediterranean region. *Environmental, Modelling and Software* 19, 929-942.
- Delgado-Carranza, C., Bautista, F., Orellana-Lanza, R. y Reyes Hernández, H. (2011). Clasificación and agroclimatic zoning using the relationship between precipitation and evapotranspiration in the state of Yucatán, México. *Investigaciones Geográficas* 75,51-60.
- Delgado-Carranza, C. (2010). Zonificación agroecológica del estado de Yucatán con base en índices agroclimáticos y calidad agrícola del agua subterránea. Tesis de Doctorado en Ciencias y Biotecnología de Plantas, Centro de Investigación Científica de Yucatán, México.
- De Waele, J., Plan, L. y Audra, P. (2009). Recent developments in surface and subsurface karst geomorphology: an introduction. *Journal of Geomorphology* 106, 1-8.
- Díaz-Pereira, E., Anaya-Romero, M. y De la Rosa, D. (2011). Modelos de evaluación agroecológica de tierras: erosión y contaminación en el entorno MicroLEIS. *Teoría y Praxis* 9, 91-107.
- Dörfliger, N., Jauffret, D. y Loubier, S. (2004). Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques en Franche-Comté, avec la collaboration de V. Petit, rapport BRGM RP-53576-FR. Disponible en <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-53576-FR.pdf> Accesado 30 noviembre 2015.
- Doerfliger, N., Jeannin, P. Y. y 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, 165-176.
- Fernández Henao, S. A. (2011). Implementación del análisis jerárquico analítico. *Scientia et Técnica Año XVI, No. 49*, 45-49.
- Flores, S. e Espejel, I. (1994). *Tipos de vegetación de la Península de Yucatán. Etnoflora Yucatanense*. Universidad Autónoma de Yucatán, México.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 1996. Agro-ecological zoning: Guidelines. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Italy. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/W2962E/W2962E00.htm> Accesado 1 junio 2006.
- Gijón-Yescas, N. (2007). Análisis especial de la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en el estado de Yucatán, México. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería-Universidad Autónoma de Yucatán, México.
- Gluo, Y., Zhai, Y., Wu, Q., Teng, Y., Jiang, G., Wang, J., Guo, F., Tang, Q. y Liu, S. (2016). Proposed APLIE method for groundwater vulnerability assessment in karst-phreatic aquifer, Shandong Province, China: a case study. *Environmental Earth Sciences*, 75-112.
- Gogu, R. C. y Dassargues, A. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology* 39, 549-559.
- Goeppert, N., Goldscheider, N. y Scholz, H. (2011). Karst geomorphology of carbonatic conglomerates in the Folded Molasse zone of the Northern Alps (Austria/Germany). *Geomorphology* 130, 289-298.
- Goldscheider, N. (2005). Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany. *Hydrogeology Journal* 13, 555-564.

- Goldscheider, N., Klute, M., Sturm, S. y Hötzl, H. (2000). The PI method - a GIS – based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. *Zeitschrift für angewandte Geologie* 46, 157-166.
- Gómez, M. y Barredo, J. I. (2005). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Editorial Ra-Ma, Madrid.
- Gracia-Prieto, F.J. (1987). Controles morfométricos de los campos de dolinas en el sector central de la cordillera ibérica. *Cuaternario y Geomorfología* 1, 119-134.
- Gracia-Prieto, F. J. (1991). Criterios de clasificación morfométrica de campos de dolinas. *Cuaternario y Geomorfología* 5, 65-76.
- Huang, H.H. (2007). Geomorphologic investigations on karst terrain: a GIS-assisted case study on the island of Barbados. Thesis of Master of Science. Macdonald Campus, McGill University, Montreal, Canada.
- INEGI, 2015. Encuesta intercensal 2015. Disponible en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/tabulad osbasicos/default.aspx?c=33725& s=est> Accesado: 4 abril 2016.
- IUSS (International Union of Soil Science). 2006. WRBSR World Soil Reports, FAO (103). Italy.
- Jiménez-Madrid, A., Martínez, C., Luque, J. A., Rubio-Campos, J. C. y Carrasco, F. (2013). Estrategias de protección del agua subterránea destinada al consumo humano en la cuenca del Guadalquivir. *Boletín Geológico y Minero* 124, 3-19.
- Kavouri, K., Plagnes, V., Tremoulet, J., Dörfliger, N., Reijiba, F. y Marchet, P. (2011). PaPRIKA: a method for estimating karst resource and source vulnerability application to the Ouyse karst system (southwest France). *Hydrogeology Journal* 19, 339–353.
- Lin, H. (2003). Hydrogeology: Briding disciplines, scales, and data. *Vadose Zone Journal* 2,1-11.
- Lindsey, B.D., Katz, B.G., Berndt, M.P., Ardis, A.F. y Skach, K.A. (2010). Relations between sinkhole density and anthropogenic contaminants in selected carbonate aquifers in the eastern United States. *Environmental Earth Sciences* 60, 1073-1090.
- López-Ramos, E. (1973). Estudio geológico de la Península de Yucatán. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros* 25, 23-76.
- Lucho-Constantino, C. A., Medina-Moreno, S. A., Beltrán-Hernández, R. I., Juárez-Cruz, B., Vázquez-Rodríguez, G. A., y Lizárraga-Mendiola, L. 2015. Diseño de fosas sépticas rectangulares mediante el uso de la herramienta FOSEP. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 14, 757-765.
- Marín-Muñiz, J. L. 2016. Remoción de contaminantes de aguas residuales por medio de humedales artificiales establecidos en el municipio de Actopan, Veracruz, México. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 15, 553-563.
- Marín-Stillman, L.E., Pachecho-Ávila, J.G. y Méndez-Ramos, R. (2004). Hidrogeología de la Península de Yucatán. En: *El agua en México, vista desde la Academia*, (B. Jiménez y L. Marín, eds.), Pp. 159-176. Academia Mexicana de Ciencias. México, D. F.
- Marinoni, O. (2004). Implementation of the analytical hierarchy process with VBA in ArcGIS. *Computers & Geosciences* 30, 637-646.
- Medina-Moreno, S. A., Jiménez-González, A., Gutiérrez-Rojas, M. y Lizardi-Jiménez, M. A. (2015). Hydrocarbon pollution studies of underwater sinkholes along Quintana Roo as a function of tourism development in the Mexican Caribbean. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 13,509-516.
- Molero Melgarejo, E., Grindlay Moreno, A. L. y Asensio Rodríguez, J. J. (2007). Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio. *GeoFocus* 7, 120-147.
- Molerio-León, L. F. (2004). Indicadores de vulnerabilidad de acuíferos kársticos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Vol. XXV, No. 3, 56-64.

- Morales, J. J. (2009). La Península que surgió del mar. Secretaría de Educación del Gobierno del Estado de Yucatán.
- Nguyet, V.T.M. y Goldscheider, N. (2006). A simplified methodology for mapping groundwater vulnerability and contamination risk, and its first application in a tropical karst area, Vietnam. *Hydrogeology Journal* 1, 1-10.
- Orellana, R., Balam, M., Bañuelos, I., García, E., González-Iturbe, J. y Vidal, F. J. (1999). Evaluación climática. En: *Atlas de procesos territoriales en Yucatán*, (A. García de Fuentes, C. Córdoba y Ordoñez y P. Ponce de León, eds.), Pp. 163-177. UADY, Mérida Yucatán México.
- Pacheco, J., Cabrera, A. y Pérez, R. (2004). Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el Estado de Yucatán, México. *Revista académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán UADY* 8, 165-179.
- Pachepsky, Y.A., Rawls, W. J. y Lin, H. S. (2006). Hydropedology and pedotransfer functions. *Geoderma* 131, 308-316.
- Pérez, C. R. y Pacheco, A. J. (2004). Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. *Ingeniería* 8, 33-42.
- Perrin, J. (2003). A conceptual model of flow and transport in a karst aquifer based on spatial and temporal variations of natural tracers. Thesis PhD Degree of Doctor of Philosophy in Science. University of Neuchâtel. Switzerland.
- Perry, E., Velazquez-Oliman, G. y Marín, L. (2002). The Hydrogeochemistry of the Karst Aquifer System of the Northern Yucatan Peninsula, Mexico. *International Geology Review* 44, 191-221.
- Plan, L., Decker, K., Faber, R., Wagreich, M. y Grasmann, B. (2009). Karst morphology and groundwater vulnerability of high alpine karst plateaus. *Environmental Geology* 58, 285-297.
- Polanco-Rodríguez, A. G., Navarro Alberto, J. A., Solorio Sánchez, J., Mena Rejón, G. J., Marrufo, Gómez J. y Valls Casillas, T. A. (2015). Contamination by organochlorine pesticides in the aquifer of the Ring of Cenotes in Yucatán, México. *Water and Environment Journal* 29, 140-150.
- Ramos, C., García, A. y Díez, V. (2015). Caracterización hidrodinámica de un biorreactor anaerobio de membranas que depura aguas residuales con distintos niveles de aceites y grasas. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 14, 453-465.
- Ravbar, N. y Goldscheider, N. (2009). Comparative application of four methods of groundwater vulnerability mapping in a Slovene karst catchment. *Hydrogeology Journal* 17, 725-733.
- Ravbar, N. y Goldscheider, N. (2007). Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia. *Acta Carsológica* 36, 397-411.
- Ruíz-Marín, A., Zavala-Loria, J. C., Canedo-López, Y., y Cordova-Quiroz, A. V. (2013). Tropical bacteria isolated from oil-contaminated mangrove soil: bioremediation by natural attenuation and bioaugmentation. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 12, 553-560.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences* 1, 83-98.
- San Pedro-Cedillo, L., Méndez-Novelo, R. I., Rojas-Valencia, M. N., Barceló-Quintal, M., Castillo-Borges, E. R., Sauri-Riancho, M. R., y Marrufo-Gómez, J. M. (2015). Evaluation of adsorption and fenton-adsorption processes for landfill leachate treatment. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 14, 745-755.
- Taheri, K., Taheri, M. y Mohsenipour, F. (2015). LEPT, a simplified approach for assessing karst vulnerability in region by sparse data: a case in Kermanshah Province, Iran. Conference paper 483-492, October. 14th Sinkhole conference, NCKRI Symposium .
- van Beynen, P.E., Niedzielski, M.A., Bialkowska-Jelinska, E., Alsharif, K. y Matusick, J. (2012). Comparative study of specific groundwater vulnerability of a karst aquifer in central Florida. *Applied Geography* 32, 868-877.

Veni, G. (1999). A geomorphological strategy for conducting environmental impact assessments in karst areas. *Geomorphology* 31, 151-18.

White, E. L. y White, W. B. (1979). Quantitative morphology of landforms in carbonate rock basins in the Appalachian Highlands.

Geological Society of America Bulletin, 90, 385-396.

Zinck, J. A. (2012). *Geopedología*. Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales. ITC. The Netherlands.