

Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero kárstico en Yucatán, considerando las anomalías gravimétricas de Bouguer

Intrinsic vulnerability to pollution of the Yucatán karstic aquifer, as determined by means of Bouguer gravimetric anomalies

Eduardo **Batllori**^{1*}, Sophia **Canto**²

¹ Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, Unidad Mérida. Departamento de Ecología Humana. Km 6 Carretera Antigua a Progreso. Mérida, Yucatán, México.

² Gestión para la Sustentabilidad e Impacto Ambiental, S.A.P. de C.V. Calle 17, No. 316, por 18 y 20, Colonia Montebello. 97113, CR-97101 Mérida, Yucatán, México.

* Autor para correspondencia: (E. Batllori) eduardo.batllori@hotmail.com

Cómo citar este artículo:

Batllori, E., Canto, S., 2022, Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero kárstico en Yucatán, considerando las anomalías gravimétricas de Bouguer: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 74 (1), A130921. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2022v74n1a130921>

Manuscrito recibido: 6 de Octubre de 2020
Manuscrito corregido: 7 de Enero de 2021
Manuscrito aceptado: 2 de Julio de 2021

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

RESUMEN

El análisis de las Anomalías Gravimétricas de Bouguer, basado en la densidad diferenciada de la roca, describe de mejor manera el sistema multianillos vinculado al Cráter de Chicxulub, sometido a diferentes tipos de clima y oscilaciones importantes de temperatura, favoreciendo el intemperismo. Para elaborar el mapa de vulnerabilidad intrínseca, se utilizó la metodología *DRASTIC* y variables derivadas del método *EPIK*. Los resultados obtenidos muestran que la vulnerabilidad baja corresponde a la porción sur del estado de Yucatán, con un 14 % de la superficie total estatal. La vulnerabilidad media se presenta en el eje sureste-noroeste con una superficie del 28 %. La vulnerabilidad alta se distribuye ampliamente en la región oriental, en la mayor zona de infiltración puntual en el Estado, con 28 % de la superficie estatal. La vulnerabilidad muy alta se asocia al sistema multianillos derivado del Cráter de Chicxulub debido a las diferencias de densidades de la roca y a la conductividad hidráulica. Esta zona radial se extiende en el 24 % del territorio estatal. Por último, la vulnerabilidad extrema, se presenta en forma de parches en el oriente del Estado, vinculado con la mayor permeabilidad del territorio, derivado de una importante presencia de cenotes, densidad de dolinas, fracturas, fallas, y un tipo de clima donde ocurre la mayor precipitación (1,000 – 1,200 mm/año), generando procesos kársticos muy dinámicos. Se extiende en el 6 % del territorio estatal.

Palabras clave: *acuífero kárstico, vulnerabilidad, anomalías de Bouguer, Yucatán, México, método DRASTIC y EPIK.*

ABSTRACT

The analysis of the Bouguer Gravimetric Anomalies, based on the differentiated density of the rock, better describes the multi-ring system linked to the Chicxulub Crater, subjected to different types of climate and significant temperature fluctuations, favoring weathering. To develop the intrinsic vulnerability map, were used the DRASTIC methodology and variables derived from the EPIK method. The results obtained show that the low vulnerability corresponds to the southern portion of the state of Yucatan, with 14% of the total state area. The average vulnerability occurs in the southeast-northwest axis with an area of 28%. High vulnerability is widely distributed in the eastern region, in the largest area of infiltration in the state, with 28% of the state surface. The very high vulnerability is associated with the multi-ring system derived from the Chicxulub Crater due to differences in rock densities and hydraulic conductivity. This radial zone extends to 24% of the state territory. Finally, extreme vulnerability occurs in the form of patches in the eastern part of the State, linked to the greater permeability of the territory, derived from an important presence of cenotes, density of sinkholes, fractures, faults, and a type of climate where it occurs, the highest precipitation (1,000 - 1,200 mm / year), generating very dynamic karst processes. It is spread over 6% of the state territory.

Keywords: *karstic aquifer, vulnerability, Bouguer anomalies, Yucatán, Mexico, DRASTIC and EPIK methodology.*

1. Introducción

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS)(2002) sólo un 2.5% aproximadamente del agua total de nuestro planeta corresponde al agua dulce. Esta se encuentra en ríos, lagos y debajo de la tierra y está amenazada por el impacto negativo de las actividades humanas, el cambio climático y el crecimiento poblacional, los cuales ejercen presión con respecto al aumento del consumo y calidad de agua dulce y pone en peligro el suministro para la población.

Por su parte, la Comisión Nacional del Agua (2015), señala que las estimaciones más aceptadas indican que el 97% del volumen de agua es salada y apenas el 3% es agua dulce o de baja salinidad, de los cuales el 75% se concentra en casquetes polares, nieves y glaciares; el 21% está almacenado en el subsuelo y el 4% corresponde a los cuerpos de agua superficial como lagos y ríos.

Con respecto al agua subterránea, el 38.7% del agua utilizada en el país proviene de sus 653 acuíferos distribuidos en el territorio (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2019). En este sentido, la importancia del agua subterránea es incuestionable a nivel mundial, ya que proporciona más de la mitad del agua para el abastecimiento humano, de ahí la necesidad de protegerlo de la contaminación, pues su recuperación suele ser, en muchos casos, un proceso muy largo, costoso y a veces irreversible o irrealizable (Valcarce *et al.*, 2001). Como una medida para la conservación de la calidad de las aguas subterráneas a nivel mundial, se sugiere utilizar herramientas cartográficas sobre la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, como una propiedad intrínseca de los sistemas de agua subterránea, independientemente del contaminante que se trate (Foster e Hirata, 1991). De acuerdo con Bessouat *et al.*, (2001), la vulnerabilidad depende de: 1). la función de factores hidrológicos que determinan la poca accesibilidad de la zona saturada a los contaminantes, 2). la capacidad de atenuación de ésta y 3). 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.

La vulnerabilidad se define como el grado de susceptibilidad a que las aguas subterráneas se contaminen con algún elemento, en concentraciones por encima de los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS)(2002), para la calidad del agua de consumo humano (Foster e Hirata, 1991).

El grado de vulnerabilidad intrínseca se puede expresar mediante un índice, y para determinarlo existen diversas metodologías, las cuales tienen por lo general un enfoque hidrogeológico, y consideran principalmente parámetros como la profundidad de la zona saturada y no saturada, la litología, la recarga neta, la infiltración y la pendiente del terreno.

Entre las metodologías más comunes destacan *DRASTIC*, *AVI*, *GOD*, *SINTACS* y *Pi*, que no son específicos para acuíferos kársticos (Báez, 2001; Espinoza y Ramírez, 2002; Vrba y Zoporezec, 1994). Bolio Barrios *et al.*, (2011), utiliza el método *EPIK*, desarrollado para acuíferos kársticos, particularmente europeos. Toma en cuenta variables como la alta permeabilidad en roca caliza, la profundidad del suelo, la infiltración y el grado de desarrollo del karst (Aguilar *et al.*, 2016a, 2016b; Delgado-Carranza *et al.*, 2011). Sin embargo, existe una gran subjetividad en las diversas metodologías que tienden a sesgar los resultados esperados cuando diferentes modelos se aplican en una misma área (Moreno-Gómez, *et al.*, 2018). La interpretación de los datos, el peso de los factores y las tasas de vulnerabilidad, varían entre los diferentes métodos, desplegando resultados espaciales diferentes cuando se aplican para un mismo sitio (Andreo *et al.*, 2006).

Una adecuación realizada para el Estado de Yucatán es el Índice de la Vulnerabilidad del Acuífero Kárstico Yucateco (IVAKY), considerando las formas del relieve, suelos y la precipitación total para identificar los diferentes niveles de la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación, como una derivación del método *EPIK* (Aguilar *et al.*, 2016a). Se cuenta también con el Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales

del Estado de Yucatán, del Servicio Geológico Mexicano (2013) que ofrece información sobre densidad de dolinas, espesor de suelos, fallas, fracturas, susceptibilidad de colapsos y hundimientos, entre otros temas.

Para el caso de Yucatán, los resultados demuestran que las diversas metodologías utilizadas, sólo son aplicables en casos concretos y deben ser adaptadas para ser congruentes con las características kársticas regionales de Yucatán (Moreno-Gómez *et al.*, 2018).

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es generar un mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero para el estado de Yucatán mediante la selección y el análisis minucioso de los atributos presentes en el Estado, con respecto a las formaciones geológicas, variables climáticas, usos y tipos de la vegetación, entre otros, incorporando el mapa de las Anomalías de Bouguer y considerando los métodos *DRASTIC* y *EPIK*, para identificar las zonas de mayor vulnerabilidad.

La hipótesis es demostrar la reconciliación de los métodos *DRASTIC* de Arcega (2018) y *EPIK*, en su versión *IVAKY* de Aguilar *et al.*, (2016), vinculados con la información de las anomalías gravitacionales de Bouguer, evaluadas por Arellano Catalán (2017). En este sentido, el presente trabajo ofrece una mayor congruencia con las características kársticas regionales, así como una alternativa para evaluar y analizar las zonas con mayor vulnerabilidad en el Estado. De igual forma, el mapa resultante podrá ser utilizado para investigaciones, trabajos y proyectos posteriores, ya que es una herramienta muy útil para incorporar en las evaluaciones, diagnósticos y resoluciones en materia de impacto social y ambiental.

2. Descripción del área de estudio

La Figura 1, muestra las mediciones del campo gravitacional de la tierra en varios puntos de la

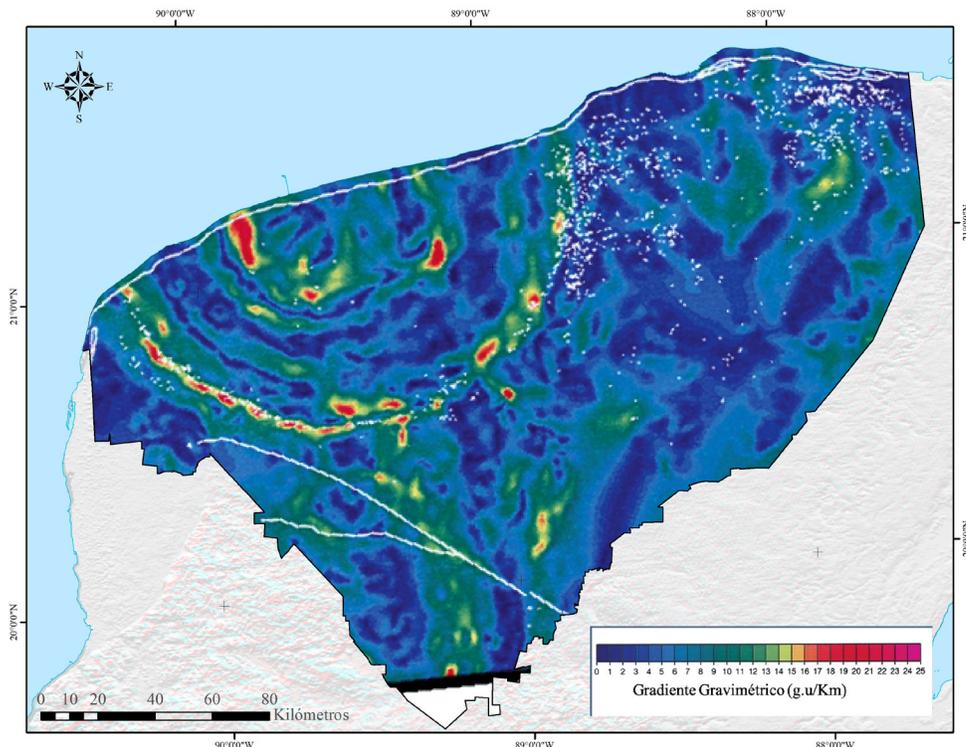


Figura 1 Mapa del gradiente horizontal de las anomalías gravimétricas de Bouguer (modificado de Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 2011).

superficie del Estado de Yucatán que genera el mapa de contornos de las fluctuaciones en las fuerzas de gravedad en un Datum dado. Estas fluctuaciones son causadas por las variaciones en la densidad de los diferentes tipos de roca, y permite identificar la localización y configuración de ciertos depósitos, en donde la estructura de la roca pueda presentar relación con el movimiento y almacenamiento del agua, como zonas puntuales de infiltración o áreas de infiltración difusa, u otros que afecten la ocurrencia de las aguas subterráneas, como conductos preferenciales de agua subterránea (Arellano Catalán, 2017).

Con el fin de profundizar sobre las características regionales del karst de Yucatán, tomaremos el ejemplo del Anillo de Cenotes que es el borde del conocido Cráter de Chicxulub. En este punto se destaca el trabajo de Urrutia-Fucuguchi *et al.*,

(2011) sobre cráter de impacto multi-anillo de Chicxulub, en la plataforma carbonatada.

Los valores gravitacionales de los estudios geofísicos muestran un patrón de anomalías concéntricas semicirculares amplias bien definidas por arriba de los 30 mGals con máximo en un diámetro central de 40 km y dos mínimos a casi 70 km y 120 km de diámetro. Las anomalías semicirculares concéntricas fueron inferidas a 52.5 ± 5 km, 77.1 ± 6.3 km, $99.6 \pm km$ y 139 ± 11 km de distancia radial, las cuales definen una estructura multi-anillos con la cumbre del anillo central limitado por el anillo 1, los anillos 2 y 3 se interpretan como los límites interior y exterior de la pared transicional del cráter, con su depresión externa al borde del cráter dado por el anillo 4.

La Península de Yucatán carece de afloramientos superficiales de litologías de impacto, sólo la

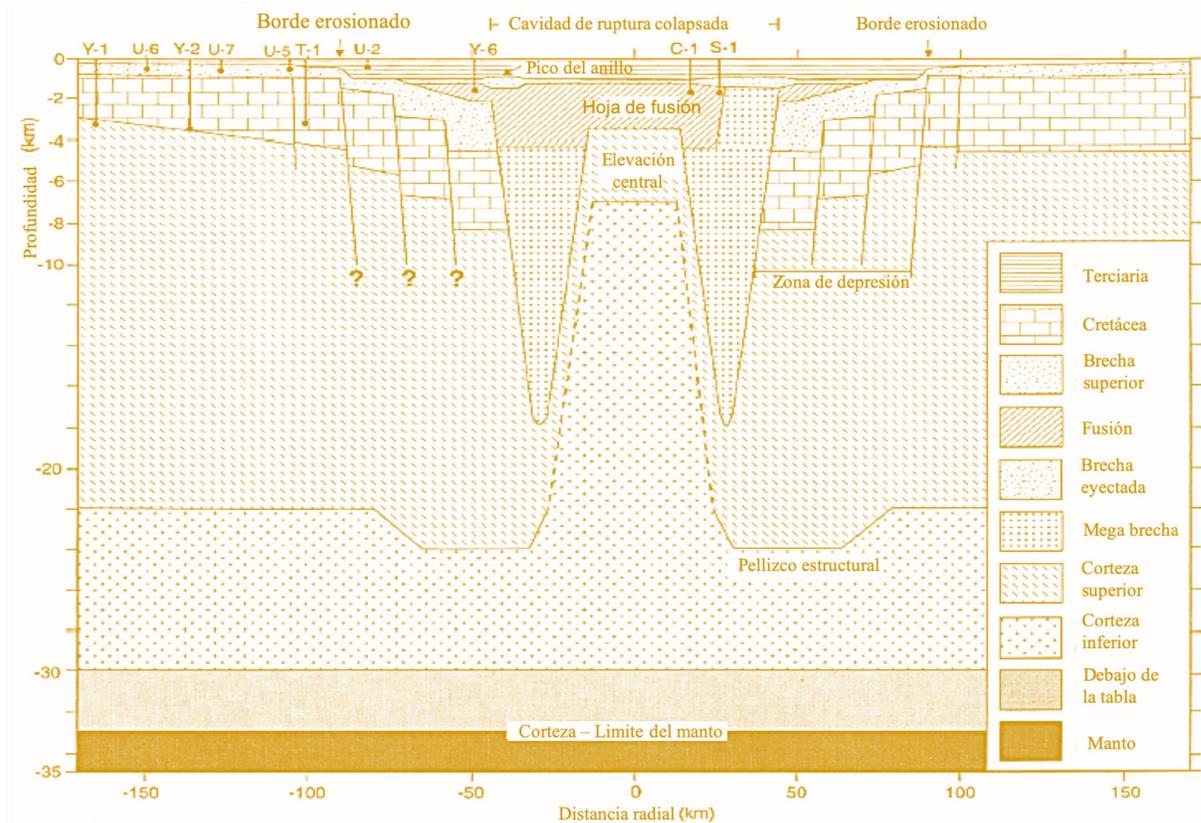


Figura 2 Modelo estructural del Cráter de Chicxulub, exagerando la línea vertical y mostrando los pozos S-1, Sacapuc; C-1, Chicxulub-1; Y-6, Yucatán-6; U-2, UNAM; -2; T-1, Ticul-I; U-5, UNAM-5; U-7, UNAM-7; Y-2, Yucatán-2; U-6, UNAM-6; Y-1, Yucatán-1. (modificada de Urrutia-Fucuguchi *et al.*, 2011).

presencia de la estructura enterrada que se indica por una depresión topográfica semicircular de baja amplitud (aproximadamente de 5 m) que puede observarse mediante imágenes de satélite con radar interferométrico de alta resolución (Hernández *et al.*, 2011). Esta ligera característica topográfica coincide con uno de los más conspicuos aspectos kársticos reconocidos en la Península de Yucatán, el arreglo semicircular de cenotes referidos como el anillo de cenotes, o en términos geomorfológicos como dolinas agrupadas, término utilizado por Aguilar *et al.*, (2016). El borde estructural del cráter enterrado se marca en superficie como resultado de la compactación diferencial de casi 5 m de las brechas y fracturamiento dentro del cráter y favorecido por los procesos de disolución a través de las fracturas y el terreno carbonatado (Hernández *et al.*, 2011).

El modelo conceptual de cómo este mecanismo de compactación de la secuencia sedimentaria del

Cenozoico, al interior del cráter, dio origen al anillo de cenotes indica que el fallamiento secundario, asociado a la compactación, genera porosidad secundaria, dando origen al sistema kárstico actual. En una siguiente fase, debido a la acción disolutiva de la circulación de agua acidificada con ácido carbónico, la disolución de la roca caliza se acelera dando origen a grietas y cuevas kársticas de mayor tamaño (Hernández *et al.*, 2011), que le confieren importantes atributos hidrogeológicos como una elevada transmisividad y conductividad hidráulica. La interpretación estructural de las secciones sísmicas de la porción norte del cráter de Chicxulub muestra que el intenso fallamiento normal, representa una zona de alta permeabilidad que favorece la circulación de agua subterránea (Urrutia-Fucugauchi, 2011).

Eventualmente, la disolución de la caliza se acelera por la presencia de la intrusión salina en las zonas donde la interfase agua dulce y agua

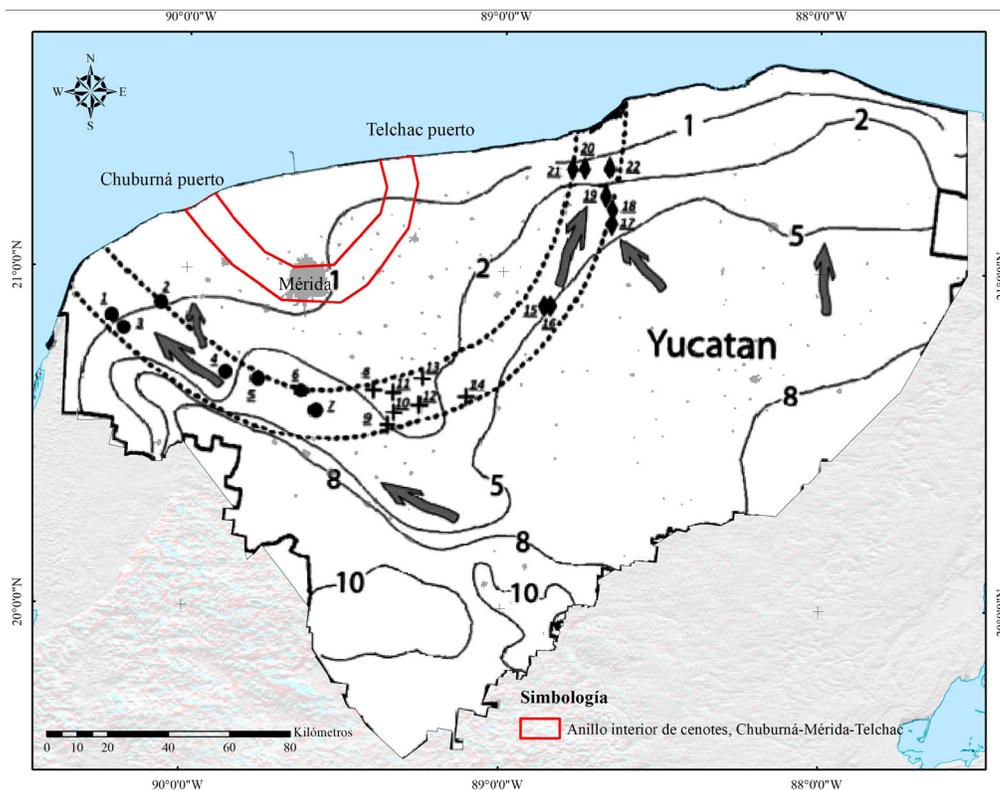


Figura 3 Grupos de cenotes basado en las tendencias espaciales y temporales de las variables físicas y químicas del agua de los cenotes y modelo hidrogeoquímico de los procesos de disolución y precipitación de los minerales del acuífero para la temporada de secas (modificada de Pérez-Ceballos *et al.*, 2011, 2012).

salada llega. Cabe destacar que la acción de la intrusión salina juega un papel primordial, ya que, la disolución de la caliza se presenta en un plano horizontal, y no vertical como se hubiese esperado. Se ha asociado este fenómeno a la acción horizontal de la interfase salina (agua dulce – agua salada), producto de la acción de mareas astronómicas (Perry *et al.*, 2002), de las oscilaciones marinas y de bombeos intensos cerca de la costa. Durante este proceso, la Península de Yucatán experimentó periodos de ascenso y descenso del nivel del mar, y es evidente como demuestra la presencia de espeleotemas subaéreos en algunas cavernas inundadas en la actualidad. Estos periodos de ascenso del nivel del mar, probablemente, también jugaron un papel importante en la formación del anillo de cenotes (Hernández *et al.*, 2011).

Los diversos programas de perforaciones, como los realizados por PEMEX, como parte de sus programas de exploración, así como los del Programa Chicxulub de la UNAM, el Proyecto Científico de Perforación “Chicxulub” y el Programa de exploración de la Comisión Federal de Electricidad, han permitido conocer a profundidad la estratigrafía de las secuencias del Mesozoico y Cenozoico dentro y fuera del Cráter de Chicxulub (Figura 2).

De acuerdo con Pérez-Ceballos *et al.*, (2012), el Anillo de Cenotes concentra y conduce el agua subterránea hacia la costa de Celestún, al poniente, y Dzilam, por el oriente, por lo que entender y conocer la influencia del agua subterránea en la zona costera es de gran importancia. Hacia el sur de la entidad, el drenaje es mínimo y desaparece en resumideros o en cuerpos de agua superficial llamados aguadas. En la parte norte, la descarga de esta agua se realiza por medio de manantiales y en forma difusa hacia el mar, alimentando las ciénagas y lagunas costeras.

Los autores realizaron un estudio de modelación inversa que permitió cuantificar los minerales y su comportamiento en temporada de secas, lluvias y nortes. En la Figura 3 se muestra la ubicación de los diversos cenotes estudiados.

Con base en las características hidroquímicas como el pH, la conductividad eléctrica y los iones mayores, aplicando técnicas de estadística multivariada, los autores identificaron tres regiones en el Anillo de Cenotes, determinando que el comportamiento hidroquímico entre cada región fue independiente a la temporada climática. Los resultados sugieren que las Regiones 1 (zona poniente) y 2 (zona centro) están influenciadas por un mismo

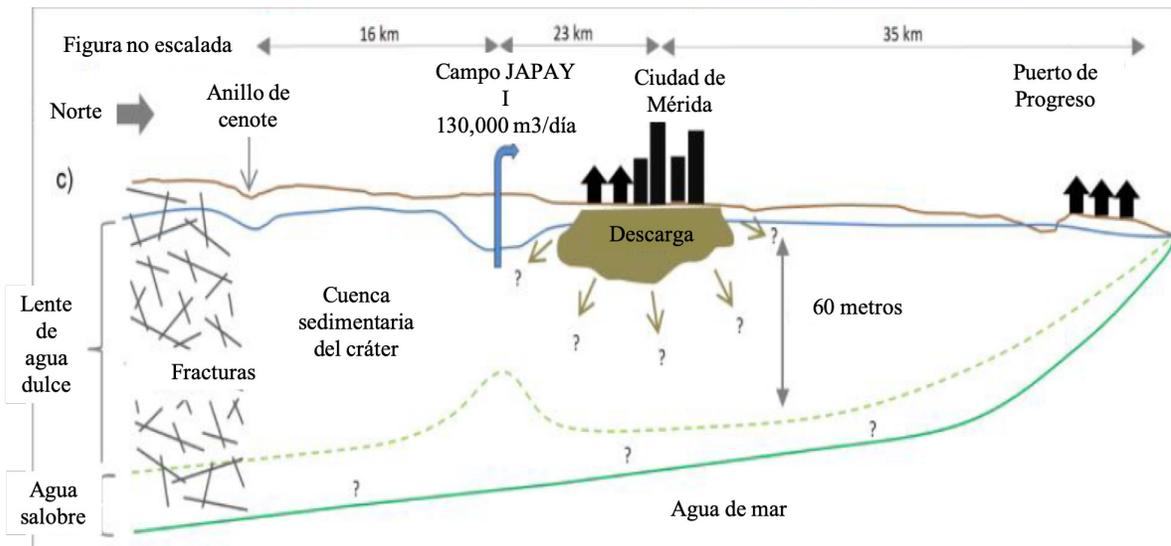


Figura 4 Modelo Conceptual del agua subterránea (representación hidrogeológica básica del subsuelo de la ciudad de Mérida) (modificada de Martínez *et al.*, 2019).

flujo regional y con penetración de aguas azufradas del sur de la entidad, ambas regiones se comportan de manera similar en cuanto a la química el agua y a los índices de saturación, sin embargo, la Región 3 (zona oriente) parece estar influenciada por otra fuente de agua subterránea que se incorpora al Anillo de Cenotes por la parte oriental de Dzilam de Bravo y no del sur del estado de Yucatán. Es decir, los resultados de la modelación hidrogeoquímica inversa, corroboraron la entrada de agua subterránea cercanas a los cenotes 7 y 4 (al oeste), proveniente del sur de Estado de Yucatán; y hacia el lado Este (Dzilam) se identificó otra entrada de agua subterránea cercana al cenote 18 la cual es de un origen diferente a la que ingresa en los cenotes 7 y 4 (Pérez-Ceballos, 2012).

Otro anillo interior de cenotes se aprecia también desde el área de Chuburná Puerto - Sisal, por el occidente, bordeando la Ciudad de Mérida y sale por el área de Telchac Puerto - San Crisanto, al oriente (Figura 3). En estos puntos, el agua subterránea aflora a manera de manantiales y fluye hacia la laguna de Chuburná Puerto y la laguna Rosada de Telchac Puerto. Al centro los escurrimientos subterráneos son principalmente por infiltraciones en manto poroso, por lo que su descarga es más estable con aperturas temporales al mar. En la localidad se les conoce con el nombre de ciénagas, como en Progreso y San Bruno (Figura 4).

Según los Consultores en Agua Potable, Alcantarillado, Geohidrología e Hidráulica Costera (CAPAGHC) todas las aguas subterráneas del planeta se dirigen hacia las zonas costeras y es el nivel medio del mar (nmm) el que sirve como base para la existencia de los flujos hacia las zonas de descarga, debido a esto se van originando los gradientes hidráulicos, obteniendo mediante las alturas piezométricas la red de flujo del territorio.

3. Metodología

Para la elaboración de mapa de vulnerabilidad intrínseca se consideró la metodología *DRASTIC*

desarrollada por Aller *et al.*, (1987) y aplicada para Yucatán por Arcega (2018), la cual permite el análisis de la vulnerabilidad de un sistema por medio de la superposición de índices mediante el análisis de sus características geográficas. Sus siglas en inglés corresponden a D = depth (profundidad a la lámina de agua freática), R = recharge (recarga neta), A = aquifer (litología del acuífero), S = soil (tipo de suelo), T = topography (topografía), I = impact (naturaleza de la zona no saturada) y C = hydraulic conductivity (conductividad hidráulica del acuífero). El método asume que el contaminante es introducido sobre la superficie de la tierra, que es trasladado al agua subterránea por precipitación, filtración y percolación y que el contaminante es móvil en el agua.

Este modelo es el más utilizado y suele ser muy útil cuando se quiere construir mapas de vulnerabilidad con diversos datos, basándose en la asignación de índices que van de 1 (vulnerabilidad mínima) a 10 (vulnerabilidad máxima), de acuerdo a las características y al comportamiento de las variables consideradas en el acrónimo *DRASTIC*, además de lo expresado, se pondera su influencia dentro de la evaluación de la vulnerabilidad mediante la asignación de unos pesos de 1 a 5. Ambos índices se multiplican y luego se suman los diferentes resultados, para obtener un valor final o índice de vulnerabilidad, cuyos extremos resultantes en este caso son 354 (mínimo) y 496 (máximo), según se indica en la siguiente fórmula:

$$DRASTIC = (Dr * Dw) + (Rr * Rw) + (Ar * Aw) + (Sr * Sw) + (Tr * Tw) + (Ir * Iw) + (Cr * Cw)$$

Donde:

r: indica el factor de clasificación o valoración

w: indica el factor de ponderación

El método *EPIK*, es un método paramétrico desarrollado por Doerfliger y Zwahlen (1998) para evaluar acuíferos kársticos y aplicado a Yucatán en su versión *IVAKY* por Aguilar, Y. (2016) y se presenta en la Tabla 3. Sus siglas en inglés equivalen a E = Epikarst, P = Protective cover (cobertura), I = Infiltration conditions (condiciones de infiltración) y K = Karst network development (grado de desarrollo kárstico).

Tabla 1. Variables utilizadas para la elaboración del mapa de vulnerabilidad en este estudio y las utilizadas por otros autores.

Subsistemas del Paisaje Kárstico	Variables	Método DRASTIC ¹	Método IVAKY ²	Este estudio
Relieve kárstico	Profundidad del Nivel freático	X	X	X
	Densidad de Dolinas		X	X
	Presencia de Cenotes ³		X	X
	Fallas y fracturas	X		X
	Unidad cronoestratigráfica, Geología (tipo de roca)	X		X
	Gravimetría conductividad hidráulica			X
	Imagen gravimetría, densidad de la roca			X
	Dureza del agua	X		
	Topografía		X	
Asociaciones edáficas	Espesor del suelo		X	X
	Tipo de suelo	X	X	X
	Uso y tipo de vegetación	X		X
	Humedad Promedio (meses) del suelo	X	X	X
Factores Climáticos	Precipitación Acumulada anual (mm)	X		X
	Tipo de Clima			X
	Variación de Temperatura			X
	Evapotranspiración			X

¹ Arcega, F., 2018.

² Aguilar, Y. et al., 2016.

³ Existencia de cenotes en el territorio Yucateco.

En este estudio se tomaron en cuenta las variables de los modelos *DRASTIC* utilizadas por Arcega (2018), excepto las variables de dureza del agua y topografía, pues resultan muy homogéneas, así como aquellas utilizadas en el método *EPIK*, en cuanto a las características del relieve kárstico, como la densidad de dolinas, presencia de depresiones húmedas (cenotes).

En este caso en particular, el estudio incorpora el mapa de anomalías gravimétricas de Bouguer, en donde las diferencias de densidad de las rocas subyacentes conllevan a generar incrementos en la conductividad hidráulica de algunas áreas del relieve kárstico, siendo ésta una característica

particular regional del cráter multianillos de Chicxulub, sometido a largo plazo a cierto tipo de clima, seco o subhúmedo, con fuertes o ligeras oscilaciones de temperatura. El humedecimiento favorece los procesos de disolución de la roca calcárea, las diferencias fuertes de temperatura pueden intemperizar y resquebrajar la capa de caliche superficial, favoreciendo la infiltración.

En la Tabla 1 y Figuras 7 y 8 se muestran las variables utilizadas y los mapas resultantes, así como la de los otros autores. Para elaborar el mapa de vulnerabilidad del presente estudio se utilizaron un total de 15 variables.

Después de haber analizado y seleccionado las variables a utilizar con base a sus características y en relación con la vulnerabilidad intrínseca se procedió a la clasificación y valoración de vulnerabilidad, de acuerdo a los valores de cada variable.

Para establecer los valores de vulnerabilidad del 1 al 10, como se indica en la Tabla 2, fue necesario realizar un análisis por cada capa de información y llevar a cabo la ponderación correspondiente. Posteriormente, los valores obtenidos se distribuyeron en rangos y grados de vulnerabilidad para representar el grado de vulnerabilidad en los mapas de manera individual. Finalmente, se obtuvo la sumatoria de los valores de todas las capas generadas obteniendo así, el mapa de vulnerabilidad intrínseca del Estado. Los valores que adoptan los factores de clasificación y de ponderación para cada parámetro se resumen en la Tabla 2 de Matriz de vulnerabilidad y ponderación que se presenta más adelante.

La integración de los pesos de cada factor y obtención del mapa de vulnerabilidad con la variable de la anomalía de Bouguer se realizó mediante una suma ponderada con la herramienta “Spatial

analyst” de ArcGis 9.1. Este método es uno de los más fáciles de implementar, obteniéndose el valor de la vulnerabilidad como resultado de la sumatoria ponderada para cada píxel de cada factor (Molero *et al.*, 2007). Por lo tanto, en la Tabla 3 se muestra la suma de los valores distribuidos en “RANGOS” y su grado de vulnerabilidad para generar la clasificación correspondiente de cada una de las variables y su representación en un mapa (Figura 7).

A continuación, se describen las variables adicionales utilizadas para el presente estudio, la información sobre las otras variables se encuentra en Arcega (2018) y Aguilar *et al.*, (2016a).

3.1. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

El proceso geomorfológico denominado karst, está gobernado por factores intrínsecos y extrínsecos, los cuales actúan en diferentes escalas de tiempo y espacio, generando una amplia gama de formas y grados de karstificación (Arcega, 2018).

Los factores intrínsecos incluyen la litología, el grado de porosidad de la matriz y la fractura de

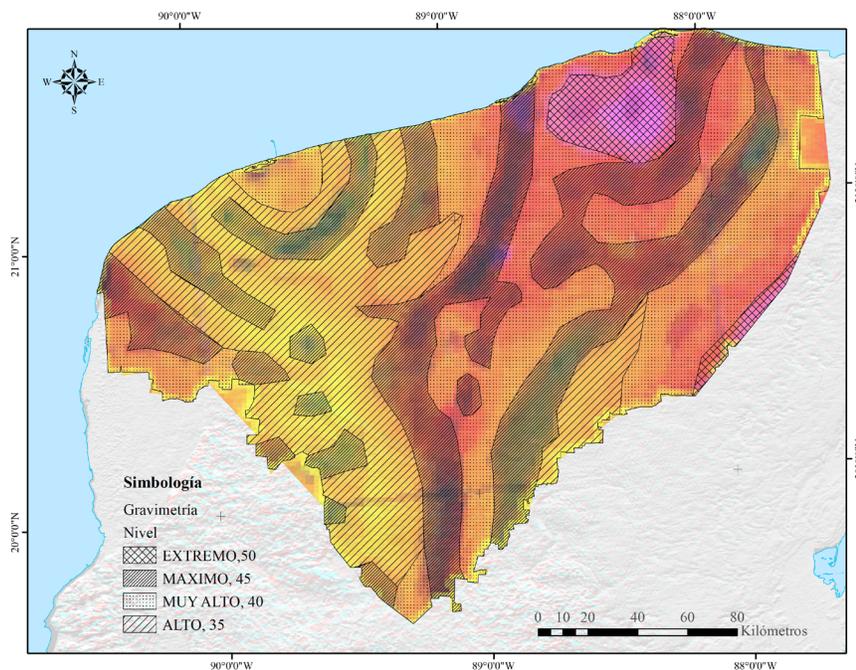


Figura 5 Anomalías gravimétricas de Bouguer de la península de Yucatán, que muestra el Cráter de Chicxulub, el resultado del impacto de un asteroide hace 65 años, que llevó a una extinción masiva. (modificada de Hernández (s/f).

Tabla 2. Matriz de vulnerabilidad y ponderación.

FACTORES	VARIABLES (Fuente)	VULNERABILIDAD (w)										P.P. (r)	
		MÍNIMA					MÁXIMA						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Relieve kárstico	Profundidad del Nivel freático m ¹			100	60	40	20	10	4	2	1	5	
				15	20	25	30	35	40	45	50		
	Densidad de Dolinas D/km ² 2							Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	3
								18	21	24	27	30	
	Presencia de Cenotes ³						INEXISTENCIA					EXISTENCIA	3
							15					30	
	Presencia de fallas y fracturas ²						0					Fallas, fracturas, dolinas y lineamientos interpretados	3
							15					30	
	Unidad cronostratigráfica Geología (tipo de roca) ²									Eoceno	Terciario	Cuaternario	3
										24	27	30	
Conductividad hidráulica por Gravimetría ⁴						Medio Bajo					Muy Alto	4	
						20					40		
Imagen gravimetría, cambios de densidad ⁴								Alto	Muy Alto	Máximo	Extremo	5	
								35	40	45	50		
				16	20	24	28	32	36	40			

la roca; los extrínsecos, el clima, la temperatura, la vegetación, la mezcla de agua dulce y salada, y el tiempo de duración de la exposición al proceso en cuestión (Arcega, 2018). La península de Yucatán tiene una compartimentación de acuíferos kársticos donde la conductividad hidráulica es una combinación de la permeabilidad primaria de la roca, el grado de fracturamiento, los conductos de disolución y la alta precipitación. En este sentido, existe una mayor vulnerabilidad en las zonas donde existe mayor fracturamiento y mayor permeabilidad e incremento de la conductividad hidráulica. En este sentido se interpretan las anomalías de Bouguer (Figura 5).

De la revisión de los cortes litológicos, de los estudios Geohidrológicos, con piezometría e hidroquímica, podemos concluir la caracteri-

zación de 2 estructuras principales (Anónimo, FI-UADY, 1989; Bauer, 2011; Escolero *et al.*, 2000, 2005; Casáres Salazar, 2006; Marín, 1990; Marín *et al.*, 1988; Consultores en Agua Potable, Alcantarillado, Geohidrología e Hidráulica Costera, I.C., 2008; Pérez-Ceballos *et al.*, 2012, Valle-Levinson *et al.*, 2011; Andrade-Gómez *et al.*, 2019; Atlas de Peligros en el Estado de Yucatán, elaborado por el Servicio Geológico Mexicano, 2013; Arellano-Catalán, 2017:

- a). Sitios en donde predominan las calcarenitas y rocas calizas con conchas de alta permeabilidad primaria y secundaria, con elementos de mayor permeabilidad primaria y secundaria, como coquinas y rocas calizas recristalizadas con conchas y fósiles, con estratos semi-impermeable de caliche pero con presencia de

Tabla 2. (Continuación) Matriz de vulnerabilidad y ponderación.

FACTORES	VARIABLES (Fuente)	VULNERABILIDAD (w)										P.P. (r)
		MÍNIMA					MÁXIMA					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Asociaciones edáficas	Espesor del suelo ²						Muy alto 18	Alto 21	Medio 24	Bajo 27	Muy bajo 30	3
	Tipo de suelo ¹	<i>Vertisol</i>	<i>Nitosol</i>	<i>Luvisol</i>	<i>Histosol y Geysol</i>	<i>Cambisol</i>	<i>Rendzina y castañozem</i>	<i>Litosol y Feozem Haplico</i>	<i>Solonchak</i>	<i>Regosol</i>	<i>Cuerpos de agua y asentamientos</i>	2
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	
	Uso y tipo de vegetación ⁵							<i>Selva baja y mediana subperenifolia</i>	<i>Bosque cultivado, selva baja y mediana caducifolia y selva subcaducifolia</i>	<i>Urbano construido, Área desprovista de vegetación Pastizal, Agricultura, Palmar inducido vegetación secundaria</i>	<i>Acuícola, agua, vegetación halófila hidrófila, duna costera, vegetación secundaria arbustiva de manglar, manglar, Petén, tular, sabana</i>	5
									35	40	45	50
	Humedad Promedio (meses de humedad) ⁶		0M	1M	2M	3M	4M	5M	6M	7M	H2O (Lagunas costeras)	4
		8	12	16	20	24	28	32	36	40		
Factores Climáticos	Precipitación Acumulada anual (mm) ²						550-625	626-777	778-928	929-1080	1081-1232	4
							24	28	32	36	40	
	Tipo de Clima ²			<i>SEC-EST/>SEC-SEM-AR/5-10.2</i>	<i>SEC-EST/>SEC-SEM-AR/10.2-18</i>	<i>SEC-EST/<SEC-SEM-AR/5-10.2</i>	<i>SEC-EST/<SEC-SEM-AR/10.2-18</i>	<i>C-H-T/SEC-SBH/5-10.2</i>	<i>C-H-T/SEC-SBH/10.2-18</i>	<i>C-H-T/SH/LLUVIA 5-10.2</i>	<i>C-H-T/SH/LLUVIA 10.2-18</i>	4
				12	16	20	24	28	32	36	40	
	Variación de Temperatura (MAX-MIN) ²						35.30-36.70	36.71-38.30	38.31-39.60	39.61-40.90	40.91-42.40	4
						24	28	32	36	40		
Evapo transpiración ⁷				1000-1100	900-1000	800-900	700-800	600-700	500-600	400-500	4	
				16	20	24	28	32	36	40		

P.P.= Pesos de Ponderación.

¹ POETY, 2007

² Atlas de peligros Por Fenómenos Naturales de Yucatán, 2013

³ SEDUMA, 2018

⁴ Arellano-Catalán, O. 2017

⁵ INEGI, 2015. SERIE VI

⁶ INEGI, 1981; Thornthwite, C. W., 1948

⁷ CONABIO, 2002

Tabla 3. Distribución de rangos y grado de vulnerabilidad por variable.

Id	Rangos	Grado de vulnerabilidad	Color
1	2 - 5	Mínima	Blanco
2	6 - 10	Muy baja	Yuca
3	11 -15	Baja	Olivine
4	16 -20	Media baja	Lemongrass
5	21 - 25	Media	Autunite
6	26 - 30	Media alta	H=47, s=58, v=97
7	31 - 35	Alta	Electrongold
8	36 - 40	Muy alta	Cantaloupe
9	41 - 45	Máxima	Mars red
10	46 - 50	Extrema	Flamered

fósiles, lo que le confiere cierta permeabilidad secundaria en forma de oquedades y cavernas. Se observa también el caliche superficial, aunque con presencia de fósiles. Todos estos pozos evaluados se ubican cercanos a valores altos gravimétricos (mayores a 30 mGal/km), se presentan asociados a caídas del nivel freático, con elevaciones de la interfase salina por lo que predomina agua salobre en un reducido espesor, particularmente en áreas cercanas a la costa, a través de una caliza dura y fracturada, interestratificada con capas conductoras, denotando roca con porosidad secundaria, con bajos gradientes y una alta conductividad hidráulica. Algunos sitios están asociados a Celestún, Dzilám de Bravo y San Felipe, así como el anillo de cenotes exterior e interior (90 y 20 Km).

b). Sitios donde predominan estratos permeables que están siendo confinados por dos estratos impermeables de caliche (roca caliza) en los primeros metros de profundidad, seguidos por calcarenitas de baja permeabilidad. En algunos casos se pueden encontrar por debajo de ellos cavidades y oquedades de disolución. Los pozos se ubican en valores gravimétricos bajos (menor

a 20 mGal/km), y se han presentado hasta ahora asociados al ascenso del nivel freático, y a grandes espesores de agua dulce, manteniendo la interfase salina a profundidad. Son también del tipo de calizas duras y fracturadas con grandes gradientes y una baja conductividad hidráulica. Algunos sitios asociados son Progreso, el Cuyo, y las reservas hidráulicas propuestas para Celestún, y la zona occidental de Hunucmá y Umán, y al centro de Telchac Puerto - Telchac Pueblo.

3.2. GRAVIMETRÍA

La gravimetría indica la densidad o porosidad del suelo, en una zona donde existe mayor fracturamiento, mayor porosidad y menor densidad de la roca, habrá siempre una mayor vulnerabilidad. De esta manera se observa diferencias de densidades interesantes a nivel regional, particularmente en el anillo de cenotes, y de igual forma el valle kárstico al sureste de Dzilám de Bravo, muy bien representados en el análisis de Arellano-Catalán (2017), sobre los datos gravimétricos obtenidos por Sharpton *et al.*, (1993), mediante la vectorización de sus resultados. El gradiente horizontal total (GHT) que realiza Arellano-Catalán (2017), enfatiza el efecto de los cambios laterales de densidad y suprime los gradientes regionales que enmascaran la firma gravimétrica originada por las litologías de impacto. En el mapa del gradiente horizontal también es posible apreciar la disposición circular de las fuentes que dominan la expresión gravimétrica en la zona de estudio, las estructuras en este mapa parecen ser más regulares, con el máximo que se localiza a 90 Km del centro del cráter, y coincide con el anillo de cenotes y se define de mejor manera, en donde se asume una fuerte karstificación en la zona (Figura 6).

3.3. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DE LA REGIÓN

3.3.1. TIPO DE CLIMA

El clima es el estado promedio de la atmósfera de las capas de aire más cercanas a la superficie de la tierra y varía de un lugar a otro. Se caracteriza por tener una alta variabilidad a largo plazo, la

que se ve reflejada en las magnitudes de los dos elementos más importantes del estudio: temperatura y precipitación pluvial. Los elementos del clima están influenciados por la celda anticiclónica de las Bermuda – Azores, por la presencia de vientos alisios, vaguadas polares, masas de aire polar, corrientes marítimas cálidas, depresiones y tormentas tropicales, huracanes (Orellana, 1999; Servicio Geológico Mexicano, 2013). Se consideró la clasificación climática de Koeppen modificado por García (1973), en donde para la Península de Yucatán se representan dos grupos climáticos que se dividen en varios grupos y subtipos. Así, el grupo A tiene clima cálido – húmedo; con temperatura media del mes más frío mayor a 18° C; y el grupo B, en donde se presenta clima seco. Para el procesamiento de esta información, se consideró que la mayor vulnerabilidad se encuentra en el tipo de clima Aw, particularmente el subtipo Aw1 (x'), el cual presenta una temporada húmeda más

amplia, pues se extiende hasta noviembre, y la temporada seca es más reducida porque los montos de precipitación en ellos son relativamente más altos. Es decir, los meses secos son menos secos que en el caso de los climas Awo (x'). En este último subtipo, las influencias marinas en algunas localidades vecinas a la costa hacen su aparición en el extremo nororiental, permitiendo que las aportaciones pluviales debidas a los “nortes” hagan de enero un mes húmedo, cuando tierra adentro en las más de las veces es un mes seco. En el primer subtipo, es característica general la poca oscilación térmica anual, con tendencia a incrementarse hacia la zona de la sierrita de Ticul en la porción sur de Yucatán; y en el segundo, la presencia del mes más caliente, también mayo, antes del solsticio de verano, coincidiendo con el inicio de la temporada de lluvias regulares. La capa utilizada se tomó del Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales del Estado de Yucatán (Servicio Geológico Mexicano,

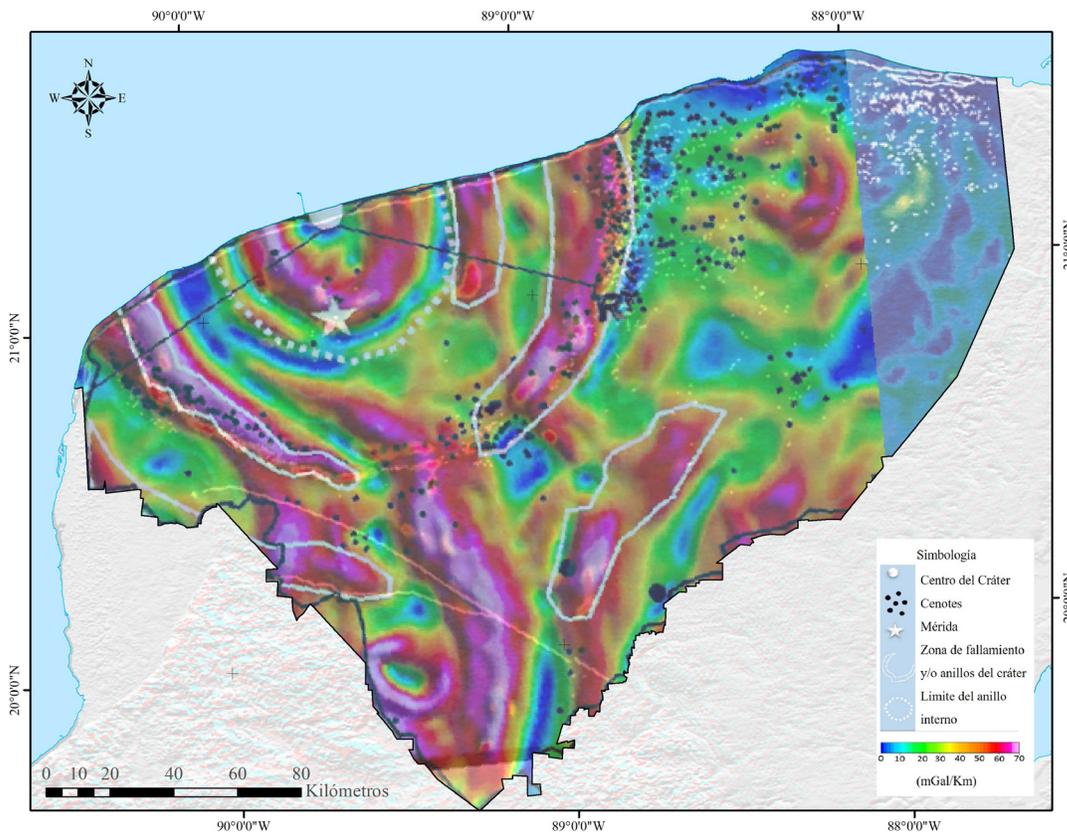


Figura 6 Mapa del Gradiente Horizontal Total de la anomalía de Bouguer (modificado de Arellano-Catalán, 2017 y Urrutia-Fucugauchi et al., 2011).

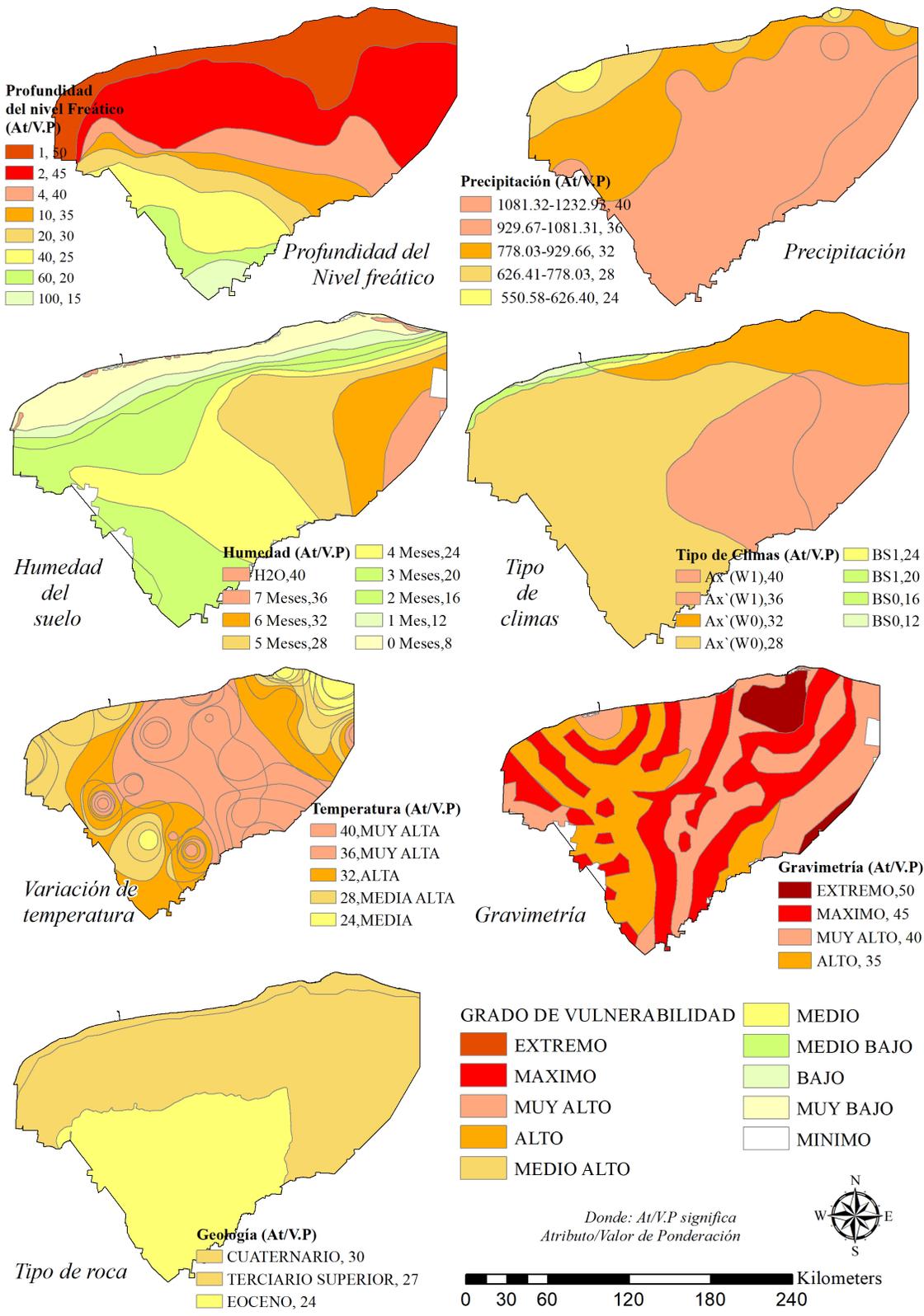


Figura 7 Conjunto de Mapas para la obtención del cálculo del grado de vulnerabilidad.

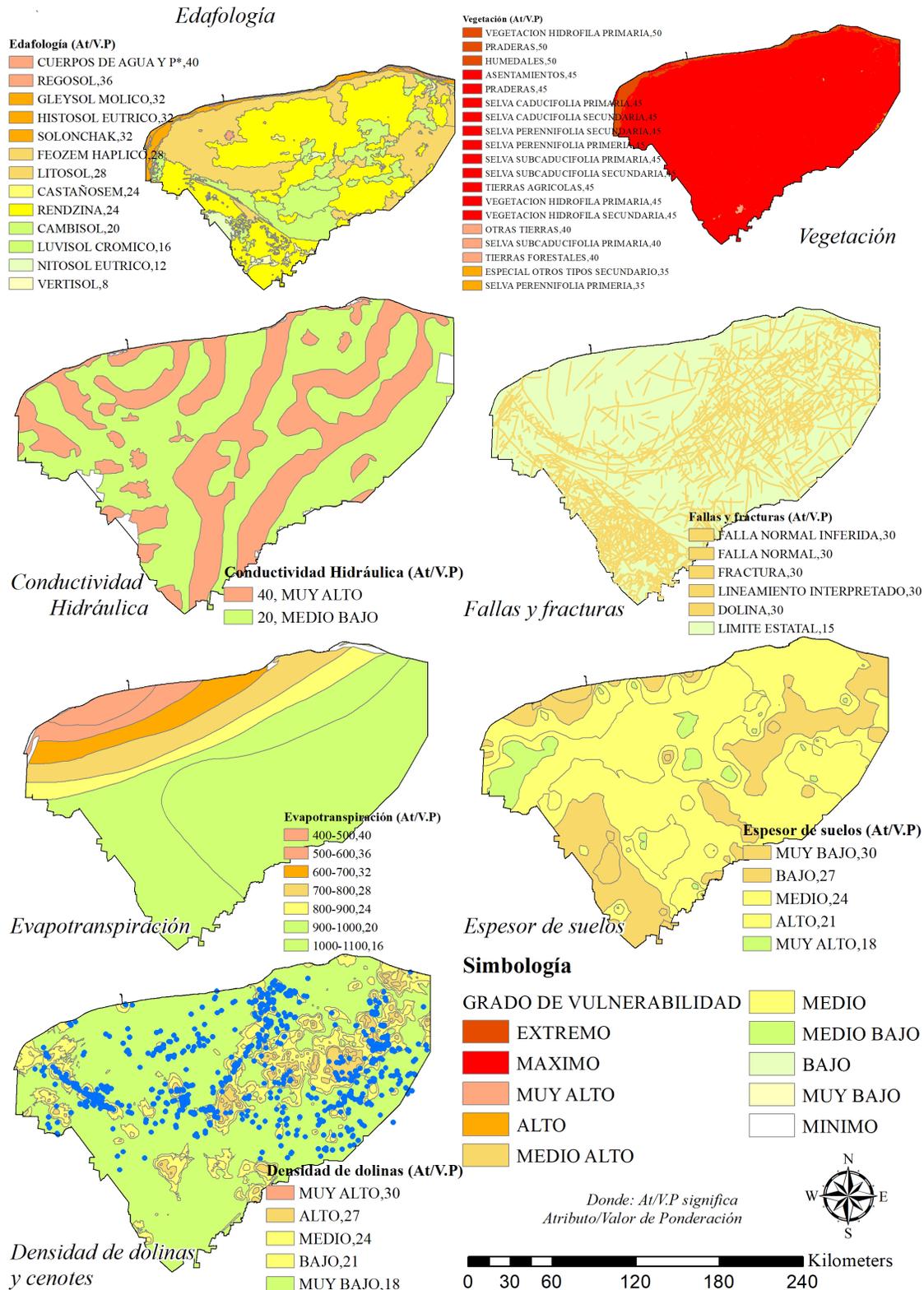


Figura 7 (Continuación) Conjunto de Mapas para la obtención del cálculo del grado de vulnerabilidad.

2013). Así, los tipos de clima húmedos o subhúmedos serán los más vulnerables por favorecer procesos de karstificación y disolución de la roca.

3.3.2. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA

Un rasgo morfológico importante de la roca calcárea es su tendencia al resquebrajamiento y la fragmentación y esta característica es independiente de la edad geológica del material que constituye la plataforma carbonatada, aunque generalmente la intensidad de fragmentación aparece en los sitios donde la edad geológica es mayor. La fragmentación de la roca puede darse por varias circunstancias (Duch, 1988):

- a). Por efecto mecánico de la vegetación que crece sobre ella mediante la presión que ejerce el crecimiento radicular de los arbustos y árboles que conforman la selva, al introducir las raíces leñosas por las fisuras y oquedades de la coraza y actuar como palancas que presionan lateralmente a la roca hasta fracturarla y convertirla en múltiples fragmentos;
- b). En cuanto al relieve, se observa que en los promontorios (altillos, montículos, lomas, etc.), la roca calcárea presenta un mayor grado de fracturas y fragmentación que cuando se localiza en las áreas planas circundantes, con mayor suelo;
- c). Otro factor que propicia el resquebrajamiento de la roca son los cambios relativamente bruscos de temperatura que sufre al final de la temporada de sequía e inicio de las lluvias y con mayor afectación en las partes altas del terreno, y donde el suelo es somero.

Es importante mencionar que el mar tiene un efecto regulador del clima local y zonal, ya que el agua absorbe y desprende calor de manera más lenta y diferente a las rocas. Esto origina una variación de temperatura en la costa, dentro del territorio y donde se ubican cenotes o cuerpos de agua. El mar se comporta como un regulador de la temperatura durante todo el año ya que en la época calurosa el agua absorbe mayor energía y el

proceso de evaporación es muy fuerte originando que se reduzca la temperatura del aire, por ello las temperaturas cerca del mar suelen ser más suaves que en el interior del territorio. Por el contrario, en época de frío el calor acumulado del mar se va desprendiendo, templando la temperatura del aire (La guía, 2008).

Las diferencias de las temperaturas máximas y mínimas extremas dan una idea de la vulnerabilidad debido a los procesos geomorfológicos de intemperismo físico, de tal forma que, en Yucatán, los índices de mayor variación de temperaturas extremas se registran al centro del estado, es en esta zona donde se presenta la mayor variación de la temperatura, lo que hace que esta área sea de mayor vulnerabilidad (Servicio Geológico Mexicano, 2013).

3.3.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN

El agua regresa a la atmósfera a través de los procesos conocidos como evaporación y transpiración. La evaporación tiene lugar a partir de las superficies hídricas, edáficas y vegetales, como las hojas que detienen la lluvia (Duch, 1988). La atmósfera está casi siempre lo suficientemente seca como para permitir la evaporación de estas superficies libres, y se incrementa con la temperatura, el viento y la baja humedad relativa. Este poder evaporante afecta la transpiración e influye en la humedad del suelo. Cuando el sol brilla sobre un suelo húmedo, éste pierde agua por evaporación con mayor rapidez que una superficie acuosa, como una ciénaga, debido al incremento de área superficial expuesta en los poros del suelo, sin embargo, la cantidad de agua que se evapora en la superficie acuosa es mucho mayor dada la gran disponibilidad de ella. La evaporación edáfica puede desecar un suelo a gran profundidad, de tal manera que el agua que no puede penetrar con rapidez sólo se encuentra disponible para las plantas por muy poco tiempo (Bautista *et al.*, 2005).

La transpiración es un proceso más complejo donde la superficie de las hojas de las plantas suele estar varios grados más caliente que el aire del entorno, debido a la radiación del sol. De

esta manera se establece un gradiente de presión de vapor de agua, el cual permite que las plantas transpiren con libertad y es el único medio a través del cual pueden transportar los nutrientes minerales desde las raíces hasta los vástagos en desarrollo, además de ser un excelente mecanismo de enfriamiento para las hojas (Vickery, 1992). Estos procesos combinados se conocen como evapotranspiración y su tasa de flujo depende del poder evaporante de la atmósfera y de ciertas características estructurales de la propia planta.

La marchitez temporal es un fenómeno común en la selva caducifolia, ya que su equilibrio hídrico durante el día y en la temporada de secas es fundamentalmente negativo. La capacidad de campo del suelo en esta porción de la Península es muy baja, es decir, la cantidad máxima de agua que pueda permanecer como una película y en el espacio poroso del suelo, que no tiene contacto con el nivel freático, es poca.

Es así que, en el mapa la menor vulnerabilidad se presenta en las áreas donde la evapotranspiración

es mayor (Catálogo de Metadatos Geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, CONABIO, 2013).

Sin embargo, en la figura 7 se distinguen las capas de información utilizadas para generar el mapa de vulnerabilidad intrínseca objeto de este trabajo, con sus respectivos valores de ponderación.

En la figura 7 se puede observar que cada mapa cuenta con la simbología de los atributos que le corresponden a la capa de información respectiva y el valor de ponderación aplicando la fórmula *DRASTIC* ($At/V.P$). Los colores distribuidos en cada mapa corresponden al grado de vulnerabilidad de acuerdo a la Tabla 3. Distribución de rangos y grado de vulnerabilidad por variable, por ello, esta simbología es común y aplica para todos los mapas.

Por ejemplo, en el mapa de humedad de suelo, se puede notar en su simbología, que en Yucatán la humedad del suelo se distribuye de acuerdo al número de meses donde hay mayor humedad, por lo tanto, se puede observar que en la zona costera

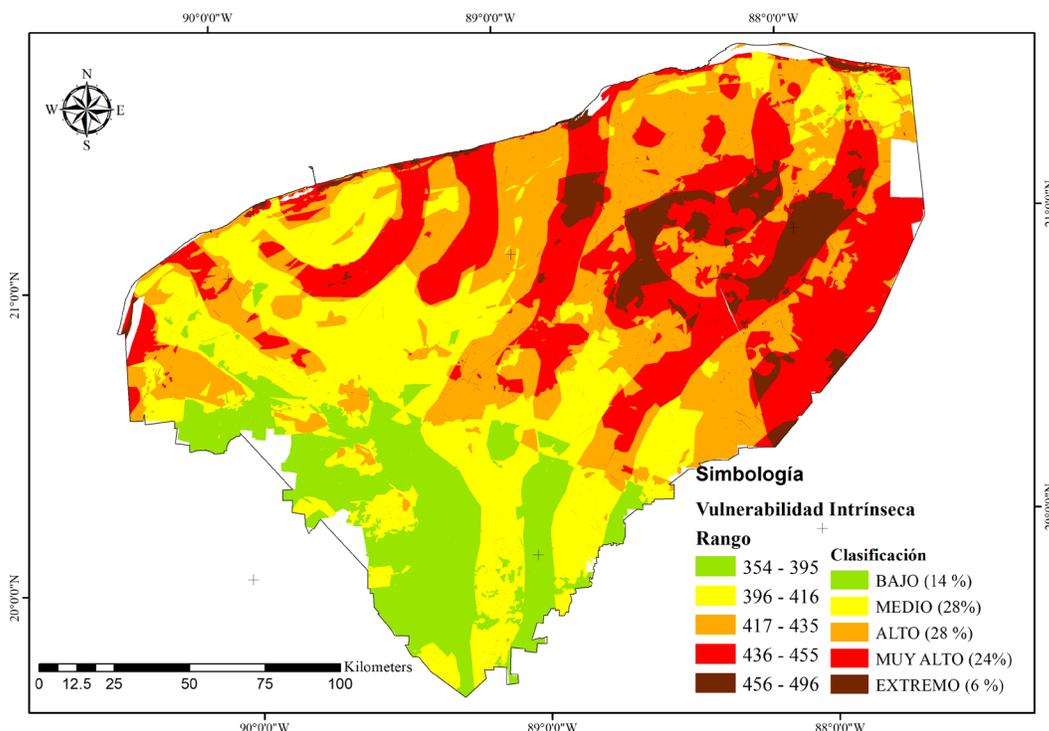


Figura 8 Mapa de vulnerabilidad intrínseca del estado de Yucatán utilizando las anomalías de Bouguer, el tipo de clima y la variación de temperatura.

Tabla 4. Porcentajes de las superficies definidas por una clase de vulnerabilidad específica para los métodos revisados.

Método	Vulnerabilidad % superficie estatal						Autor
	Extrema alta	Muy alta	Alta	Media	Bajo	Muy Bajo	
<i>DRASTIC</i>	19	20	21	20	20		Arcega (2018)
IVAKY	19	19	33	17	4	8	Aguilar (2016)
Este estudio	6	24	28	28	14		Este estudio

no hay mucha humedad (0 meses), por lo tanto, su valor fue de 8 puntos (menor vulnerabilidad) de acuerdo a la Tabla 2. Matriz de vulnerabilidad y ponderación. Por el contrario, en la zona Este del Estado la vulnerabilidad es mayor ya que la humedad va de 7 a 5 meses y es en donde hay mayor humedad en el suelo. Para el caso de H₂O, donde el valor de ponderación es 40 (el valor máximo de vulnerabilidad para este atributo) corresponde a las lagunas costeras.

4. Discusión y resultados

4.1. ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD

Utilizando los resultados generados de las 15 variables, se procedió a elaborar el mapa de vulnerabilidad intrínseca (Figura 8 y Tabla 4). El mapa muestra que más del 50% del Estado se encuentra en una vulnerabilidad entre alta y extrema. Este resultado se obtuvo debido al grado de karstificación de las calizas presentes en Yucatán, así como la poca pendiente de la zona, al hecho de que funcione como un acuífero libre y debido a que el uso social del suelo no haya sido designado de acuerdo con la aptitud del mismo (Arcega, 2018).

La clasificación de vulnerabilidad baja corresponde a la porción sur del estado de Yucatán, con un 14 % de la superficie total estatal. La vulnerabilidad media se presenta en el eje sureste-noroeste

con una superficie del 28%. La vulnerabilidad alta se distribuye ampliamente en la región centro-oriental del Estado, en la mayor zona de infiltración puntual en el Estado, con 28 % de la superficie estatal. La vulnerabilidad muy alta se asocia al sistema multianillos derivado del Cráter de Chicxulub y a las diferencias de densidades de la roca y de mayor conductividad hidráulica. Esta zona radial se extiende en el 24 % del territorio estatal. Por último, la vulnerabilidad extrema, se presenta en el oriente del estado vinculado con la permeabilidad del territorio, derivado de la mayor presencia de cenotes, densidad de dolinas, fracturas y fallas, y la mayor precipitación, generando procesos kársticos muy dinámicos. Se extiende en el 6 % del territorio estatal.

La inclusión del mapa de anomalías gravimétricas de Bouguer, como un factor de conductividad hidráulica y diferencias de densidad de la roca por donde el agua transita de manera subterránea, así como el tipo de clima que caracteriza el régimen de humedad y temperatura, el espesor del suelo y por supuesto la presencia de fallas, fracturas y dolinas, promueve que la clase de vulnerabilidad muy alta y extrema en el territorio se desarrolle en el estado de Yucatán proveniente del sureste y se vaya con dirección noroeste, y esto es congruente con el método *DRASTIC* aplicado por Arcega, 2018.

De igual manera, el reflejo de la caracterización kárstica vinculado con zonas de alto flujo

hidráulico por conductos preferenciales descritas en el método IVAKY como dolinas agrupadas, refiriéndose al Anillo de Cenotes, guarda relación con el método gravimétrico para definir y detallar este contexto. Debido al sistema multianillos del Cráter de Chicxulub y de otros procesos kársticos, se presentan como oleadas concéntricas de vulnerabilidad muy alta y extrema en la dirección sureste-noroeste, alineadas con densidades de roca diferenciales y flujos preferenciales. Estas oleadas concéntricas de muy alta y extrema vulnerabilidad se extienden sobre un gradiente que va desde vulnerabilidad extrema al sureste del estado a vulnerabilidad muy alta, alta y media, al noroeste, cubriendo muy bien los factores edáficos, humedad de suelo y climáticos principalmente, descritos en el método IVAKY.

En la Tabla 4 se presentan las superficies definidas por cada metodología y por clase de vulnerabilidad, y se observa la presencia o el uso de 6 clases de vulnerabilidad: extrema alta, muy alta, alta, moderada, bajo y muy bajo. Se observa que la clase de Vulnerabilidad extrema alta se presenta en los 3 métodos revisados, pero en el mapa resultante en este estudio tiene un valor menor que el presentado por los otros métodos, disminuyendo de 19 a 6% de la superficie estatal y es donde abunda el relieve kárstico y la presencia de dolinas y fracturas. Le sigue la clase de Vulnerabilidad muy alta y media y se presenta en los tres métodos, en este caso con un valor superior a los otros métodos (24 % y 28 % de la superficie estatal respectivamente). En ambos casos, las discrepancias entre métodos son muy importantes, asociadas con áreas de muy alta karstificación. Por último, las clases de Vulnerabilidad bajo y muy bajo son muy diferentes en los casos de referencia, sin embargo, su mayor presencia en este estudio es en el sur del estado, con superficie de 14%. En este estudio no se presentó la clase de muy bajo.

5. Conclusiones

El mapa muestra que más del 50% del Estado se encuentra en una vulnerabilidad entre alta

y extrema, distribuyéndose en la región centro-oriental del estado, donde existe la mayor zona de infiltración. La vulnerabilidad muy alta se asocia al sistema multianillos derivado del Cráter de Chicxulub y a las diferencias de densidades de la roca y de mayor conductividad hidráulica. Por su parte, la vulnerabilidad extrema se presenta en el oriente del Estado y está vinculada con la permeabilidad del territorio, derivado de la mayor presencia de cenotes, densidad de dolinas, fracturas y fallas, y la mayor precipitación, generando procesos kársticos muy dinámicos.

En este trabajo se resalta la incorporación de las anomalías de Bouguer, en donde las diferencias de densidad de las rocas subyacentes conllevan a generar incrementos en la conductividad hidráulica de algunas áreas del relieve kárstico, lo que incrementa el nivel de vulnerabilidad en el estado.

En el mapa resultante de este estudio se pueden observar las variaciones de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de acuerdo con las metodologías consideradas. La vulnerabilidad de extrema a media en el territorio se desarrolla proveniente del sureste hacia el noroeste, y esto es congruente con el método *DRASTIC*, mientras que se presentan oleadas concéntricas de muy alta y extrema vulnerabilidad que se extienden sobre este gradiente, cubriendo muy bien los factores geomorfológicos y edáficos, humedad de suelo y climáticos principalmente, descritos en el método IVAKY.

El presente trabajo ofrece una mayor congruencia con las características kársticas regionales, así como una alternativa para evaluar y analizar las zonas con mayor vulnerabilidad en el estado en la perspectiva de elaborar políticas públicas para su conservación.

Contribuciones de los autores

En este trabajo la contribución es: (1) Conceptualización: Batllori, S. (2) Análisis o adquisición de datos: Batllori, S y Canto, M. (3) Desarrollo metodológico/técnico: Batllori, S y Canto, M. (4) Redacción del manuscrito original:

Batllori, S y Canto, M. (5) Redacción del manuscrito corregido y editado: Canto, M. (6) Diseño gráfico: Canto, M.

Financiamiento

Este trabajo se realizó sin financiamiento.

Conflictos de interes

Este escrito no presenta algún conflicto de intereses.

Referencias

- Aguilar, Y., Bautista, F., Mendoza, M. E., Frausto, O., Ihl, T., 2016a, Density of karstic depressions in Yucatan State, Mexico: *Journal of Cave and Karst Studies*, 78, 51-60. <https://doi.org/10.4311/2015es0124>
- Aguilar, Y., Bautista, F., Mendoza, M. E., Frausto, O., Ihl, T., Delgado, C., 2016b, Ivaky: índice de la vulnerabilidad del acuífero kárstico yucateco a la contaminación: *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(3), 913-933.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., Hackett, G., 1987, DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic setting. U.S. Environmental Protection Agency, U.S. Environmental Protection Agency report. EPA/600/2-85/018. Washington, D.C.
- Andrade-Gómez, L., Rebolledo-Vieyra, M., Andrade, J.L., López, P., Estrada-Contreras, J., 2019, Karstic aquifer structure from geoelectrical modeling in the Ring of Sinkholes, Mexico: *Hydrogeology Journal*, 27, 2365-2376. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02016-w>
- Andreo, B., Goldscheider, N., Vadillo, I., Vías, J.M., Neukum, C., Sinreich, M., Jiménez, P., Brechenmacher, J., Carrasco, F., Hötzl, H., Perles, M.J., Zwahlen, F., 2006, Karst groundwater protection: First application of a Pan-European approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Líbar (Southern Spain): *Science of the Total Environment*, 357(1-3), 54-73. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.05.019>
- Anónimo, 1989, Sitios para la perforación de pozos de abastecimiento de buena calidad para su uso como agua potable para la localidad de Telchac Puerto: México, Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería, Unidad de Posgrado e Investigación. Coordinación Académica de Hidrología.
- Arcega, F., 2018, Caracterización de actividades contaminantes o factores causales de contaminación en el estado de Yucatán. Informe Parcial, en Sistema de monitoreo e infraestructura tecnológica basada en el Internet de las cosas, para el monitoreo y evaluación de la calidad del agua del acuífero de Yucatán: México, INNOVAFORCE – CONACYT.
- Arellano-Catalán, O., 2017, Modelado estructural del cráter de impacto de Chicxulub derivado de datos de anomalías gravimétricas y magnéticas: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis Doctoral.
- Báez, A., 2001, Validación de mapas de vulnerabilidad en medios urbanos, en I Seminario-Taller de Protección de acuíferos frente a la contaminación. Metodología: Toluca, México.
- Bautista, F., Batllori-Sampedro, E., Palacio, G., Pérez, M., Castillo-González., 2005, Integración del conocimiento actual sobre paisajes geomorfológicos de la península de Yucatán, en Bautista, F. y Palacio, G. (eds.), Caracterización y manejo de los suelos en la península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales: México, Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, 33-58.

- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B.R.N., Charvet, G., Marín, L., Rebolledo, M., Merediz, G., 2011, Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico: *Hydrogeology Journal*, 19, 507-524. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0699-5>
- Bessouat, C., Castagnino, G., De Los Santos J., Robano, M., 2001, Vulnerabilidad de un acuífero somero en medio poroso, en I Seminario-Taller de Protección de acuíferos frente a la contaminación. Metodología: Toluca, México.
- Bolio-Barrios, E. R., Cabrera-Sansores, A., Bautista, F., 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. <https://doi.org/10.22403/uqroomx/typ09/03>
- Casáres Salazar, R., 2006, Hidrogeología de la zona de descarga del acuífero del estado de Yucatán, y sus implicaciones ambientales: México, Universidad Autónoma de Yucatán, Tesis de Maestría.
- Comisión Nacional del Agua, 2015, Agua Subterránea, disponible en <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/agua-subterranea>
- Consultores en Agua Potable, Alcantarillado, Geohidrología & Hidráulica Costera, I.C., 2008, Estudio geohidrológico para definir el contacto de la capa de caliche semiconfinante (acuitardo) en el área del sur del puerto de Progreso, Yucatán: México, Mitza S.A. de C.V.
- Comisión Nacional para el uso y Conocimiento de la Biodiversidad (CONABIO), 2013, Portal de Geoinformación, fecha de consulta 11 de febrero del 2022. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Delgado-Carranza, C., Bautista, F., Orellana-Lanza, R., Hernández, H., 2011, Classification and agroclimatic zoning using the relationship between precipitation and evapotranspiration in the state of Yucatán, México: *Investigaciones Geográficas*, 75,51-60.
- Dorfliger, N., Jauret, D., Loubier, S., 2004, Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques en Franche-Comté, rapport BRGM/RP-53576-FR, 140 p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-53576-FR.pdf>
- Duch, G. J., 1988, La conformación territorial del Estado de Yucatán. Los componentes del medio físico: México, Universidad Autónoma de Chapingo, Centro Regional de la Península de Yucatán, 427 p.
- Escolero, O., Marín, L.E., Steinich, B., Pacheco, J.A., 2000, Delimitation of a hydrogeological reserve for a city within a karstic aquifer: the Merida, Yucatán example: *Landscape and Urban Planning*, 51(1), 53-62. [https://doi.org/10.1016/s0169-2046\(00\)00096-7](https://doi.org/10.1016/s0169-2046(00)00096-7)
- Escolero, O., Marín, L.E., Steinich, B., Pacheco, J.A., Molina-Maldonado, A., Anzaldo, J.M., 2005, Geochemistry of the hydrogeological reserve of Mérida, Yucatán, México: *Geofísica Internacional*, 44(3), 301-314. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2005.44.3.201>
- Espinoza, C., Ramírez, J., 2002, Análisis comparativo de técnicas de evaluación de vulnerabilidad de acuíferos. Aplicación a la zona norte de la ciudad de Santiago, en II Seminario-Taller de Protección de acuíferos frente a la contaminación. Metodología: Toluca, México.
- Foster, S. E., Hirata, R., 1991, Determinación del Riesgo de contaminación de aguas subterráneas: Perú, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).
- García, E., 1973, Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen: México, UNAM, Instituto de Geografía, 246 p.
- Hernández, J., s/f, Gravimetría 4 clases. Prospección geofísica. https://www.academia.edu/4949562/Gravimetr%C3%ADa_4_clases
- Hernández, L., Rebolledo, V. M., Almazán, B.A.,

- Valadéz, F., 2011, Propuesta de creación de una reserva Geohidrológica para el norte del Estado de Yucatán: México, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., Reporte Final CONACYT-FOMIX.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2019, Aguas subterráneas: México, IMTA. <https://www.gob.mx/imta/articulos/aguas-subterranas>
- La Guía, 2008, Influencia del mar en el clima. <https://geografia.laguia2000.com/climatologia/influencia-del-mar-en-el-clima>
- Marín, L., Sanborn, R., Reeve, A., Felger, T.J., Gamboa, E.C., Perry, E., Villasuso, M., 1988, Petenes: clave para comprender la hidrología de Yucatán, México, en Simposio Internacional sobre hidrología de humedales en zonas semiáridas y áridas. Sevilla, España. Asociación Internacional de Hidrogeólogos.
- Marín, L. E., 1990, Field investigations and numerical simulation of ground-water flow in the karstic aquifer of northwestern Yucatan, Mexico: U.S.A., Dekalb, Illinois, Tesis Doctoral, 182 p.
- Martínez, C., Moreno, M., Liedl, R., 2019, Estimating Pollutant Residence Time and NO₃ Concentrations in the Yucatan Karst Aquifer; Considerations for an Integrated Karst Aquifer Vulnerability Methodology: *Water*, 11(7),1431. <https://doi.org/10.3390/w11071431>
- Molero, E., Grindlay, A. L., Asensio, J. J., 2007, Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio: *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 7, 120-147.
- Moreno-Gómez, M., Pacheco, J., Liedl, R., Stefan, C., 2018, Evaluating the applicability of European karst vulnerability assessment methods to the Yucatan karst, Mexico: *Environmental Earth Sciences*, 77, 682. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7869-5>
- Orellana, R. *et al.*, 1999, Evaluación climática, Capítulo III, en Chico Ponce de León, P.A. (Coord.), Atlas de procesos territoriales de Yucatán: México, Universidad Autónoma de Yucatán, 388 p.
- Organización Mundial de la Salud (OMS), 2002, Cambio climático y salud humana. <https://www.who.int/heli/risks/water/water/en/>
- Pérez, R.Y., 2011, Modelo Hidrogeoquímico para la zona del anillo de cenotes de Yucatán, México: México, CINVESTAV-IPN, Tesis de Doctorado.
- Pérez-Ceballos, R., Pacheco, J., Euán-Ávila, J. I., Hernández-Arana, H., 2012, Regionalization Based On Water Chemistry And Physicochemical Traits In The Ring Of Cenotes Yucatan, Mexico: *Journal of Cave and Karst Studies*, 74, 90-102. <https://doi.org/10.4311/2011es0222>
- Perry, E., Velazquez-Oliman, G., Marín, L., 2002, The hydrogeochemistry of the karst aquifer system of the northern Yucatan Peninsula, Mexico: *International Geology Review*, 44, 191-221. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.44.3.191>
- Programa Estatal Forestal, 2010, Estrategias estatales para las acciones de restauración en el Estado de Yucatán: México, Consejo Estatal Forestal, Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente. Gobierno del Estado de Yucatán, 2007-2012.
- Servicio Geológico Mexicano, 2013, Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales del Estado de Yucatán: México, Gobierno del Estado de Yucatán, Unidad Estatal de Protección Civil.
- Sharpton, V.L., Burke, K., Camargo-Zanoguera, A., Hall, S., Lee, S.A., Marín, L.E., Suárez-Reynoso, G., Quezada-Muñeton, J.M., Spudis, P.D., Urrutia-Fucugauchi, J., 1993, Chicxulub multiring impact basin: Size and other characteristics derived from gravity analysis: *Science*, 261, 1564-1567. <https://doi.org/10.1126/science.261.5128.1564>
- Urrutia-Fucugauchi, J., Camargo-Zanoguera, A., Pérez-Cruz, L., Pérez-Cruz, G., 2011, The Chicxulub multi-ring impact crater, Yucatán carbonate platform, Gulf of Mexico: *Geofísica Internacional*, 50(1),

- 99–127. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2011.50.1.125>
- Valle-Levison A., Marino-Tapia, I., Enriquez C., Waterhouse A.F., 2011, Tidal variability of salinity and velocity fields related to intense point-source submarine groundwater discharges into a coastal ocean: *Limnology Oceanography*, 56 (4), 1213-1224. <https://doi.org/10.4319/lo.2011.56.4.1213>
- 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, en I Seminario-Taller de Protección de acuíferos frente a la contaminación. Metodología: Toluca, México.
- Vickery, A.M., Kring, D. A., Melosh, H. J., 1992, Ejecta associated with large terrestrial impacts: Implications for the Chicxulub impact and K/T boundary stratigraphy: *Lunar and Planetary Science*, 23, 1473-1474.
- Vrba, J., Zoporezec, A. 1994, Guidebook on mapping groundwater vulnerability. Verlag Heinz Heise.