



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE DESARROLLO SUSTENTABLE

**“Índice de vulnerabilidad a la contaminación del
acuífero en sistemas kársticos costeros urbanizados:
Playa del Carmen, Quintana Roo.”**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

Maestro en Ciencias Marinas y Costeras

PRESENTA

Lic. Wilbert David Uhu Yam

DIRECTOR(A) DE TESIS

Dr. Ing. Geóg. Oscar Frausto Martínez

ASESORES

Dra. Martha Angelica Gutiérrez Aguirre

Dra. Jennifer Denisse Ruíz Ramírez

Dr. Cesar Daniel Aguilar Becerra

Dra. Yameli Guadalupe Aguilar Duarte



COZUMEL, QUINTANA ROO, MÉXICO, OCTUBRE DE 2022



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE DESARROLLO SUSTENTABLE

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR: Dr. Ing. Geóg. Oscar Frausto Martínez

Handwritten signature of Oscar Frausto Martínez in black ink.

ASESORA: Dra. Martha Angelica Gutiérrez Aguirre

Handwritten signature of Martha Angelica Gutiérrez Aguirre in blue ink.

ASESORA: Dra. Jennifer Denisse Ruíz Ramírez

Handwritten signature of Jennifer Denisse Ruíz Ramírez in blue ink.

ASESOR: Dr. Cesar Daniel Aguilar Becerra

Handwritten signature of Cesar Daniel Aguilar Becerra in blue ink.

ASESORA: Dra. Yameli Guadalupe Aguilar Duarte

Handwritten signature of Yameli Guadalupe Aguilar Duarte in blue ink.



AGRADECIMIENTOS

A la universidad Autónoma de Quintana Roo, especialmente la división de Desarrollo Sustentable por aceptarme en el programa de Maestría en Ciencias Marinas y Costeras.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) quien me apoyó con la beca otorgada durante mis estudios de Maestría.

A mis padres; Isidro Mario y María Ramona por su apoyo incondicional durante mi etapa académica.

Agradezco especialmente al Dr. Oscar Fraustro Martínez por el apoyo brindado en mi etapa como estudiante, por aceptar ser mi director de tesis y por permitir desarrollar mis conocimientos al ser parte del Laboratorios de Observación e Investigación Espacial.

Al M. en A. E. G. Sergio Esteban de León López representante de Geolander consultores S.C por la oportunidad y el apoyo económico brindado para general los primeros datos para la elaboración de la tesis, a través del proyecto Saneamiento de cenotes, grutas y cavernas del municipio de Solidaridad Quintana Roo.

A la Dra. Martha Angelica Gutiérrez Aguirre por las clases y asesorías brindadas que contribuyeron en la elaboración de esta tesis.

A la Dra. Jennifer Denisse Ruíz Ramírez por su asesoramiento en la elaboración de esta tesis.

A la Dra. Yameli Guadalupe Aguirre Duarte por el material brindado para elaborar la tesis.

Al Dr. Cesar Daniel Aguilar Becerra por su tiempo y asesoramiento para elaborar esta tesis.

Al Dr. Adrián Cervantes Martínez por el apoyo brindado tanto como coordinador de programa de la maestría.

Al Lic. José Francisco Rodríguez Castillo por el asesoramiento brindado en la elaboración de los mapas presentados en la tesis.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN	11
CAPITULO 1: MARCO INTERPRETATIVO Y CONTEXTUAL	13
1.1 MARCO TEÓRICO.....	13
1.1.1 VULNERABILIDAD	13
1.1.2 VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN	13
1.1.3 VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS	14
1.1.4 ÍNDICES DE VULNERABILIDAD	15
1.2 ANTECEDENTES	17
1.3 JUSTIFICACIÓN	20
1.4 OBJETIVOS.....	21
1.4.1 GENERAL:	21
1.4.2 ESPECÍFICOS:	21
CAPITULO 2: ENFOQUE METODOLÓGICO	22
2.1 ÁREA DE ESTUDIO	22
2.1.1 LOCALIZACIÓN.....	22
2.1.2 CLIMA	22
2.1.3 HIDROLOGIA.....	23
2.1.4 GEOLOGÍA	23
2.1.5 ACTIVIDAD ECONOMICA	24
2.2 METODOLOGÍA	24
2.2.1 DIAGRAMA METODOLÓGICO.....	24
2.2.2 TÉCNICAS Y HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS DE LOS FACTORES.	26
2.2.2.1 Análisis de Variables y factores.....	26
2.2.2.2 Asignación de pesos	29
2.2.2.3 Índice de vulnerabilidad.....	30
CAPITULO 3 INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS.....	32

3.1. RESULTADOS	32
3.1.1 ANÁLISIS DE VARIABLES Y FACTORES.....	32
3.1.1.1 Relieve.....	32
3.1.1.2 Clima.....	33
3.1.1.3 Ascenso del nivel del mar.....	34
3.1.1.4 Uso de suelo.....	34
3.1.2 ASIGNACIÓN DE PESOS	37
3.1.2.1 Relieve.....	37
3.1.2.2 Clima.....	38
3.1.2.3 Asenso del mar.....	39
3.1.2.4 Uso de suelo.....	39
3.1.3 ÍNDICE DE VULNERABILIDAD.....	41
3.1.3.1 Desarrollo de índice de vulnerabilidad	41
3.1.3.2 Categorías del índice de vulnerabilidad	43
DISCUSIÓN	44
CONCLUSIÓN.....	48
LIMITANTES Y RECOMENDACIONES.....	49
REFERENCIAS	50
ANEXOS.....	58
Anexo 1. Valores para la asignación de peso por cada variable.....	58
Anexo 2. Tablas con pesos y valores de los factores: relieve, clima, ascenso del mar y uso de suelo.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio	22
Figura 2. Diagrama metodológico para el desarrollo del índice de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos.....	25
Figura 3. Frecuencia de depresiones kársticas por unidades de uso del suelo.	33
Figura 4. Reclasificación de los usos de suelo.	35
Figura 5. Mapa de vulnerabilidad por el relieve.	37
Figura 6. Mapa de vulnerabilidad por el clima.	38
Figura 7. Mapa de vulnerabilidad por el aumento del nivel del mar.	39
Figura 8. Mapa de vulnerabilidad por el uso de suelo.....	40
Figura 9. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación de la zona urbana de Playa del Carmen.	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Definiciones del concepto de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos.	13
Tabla 2. Descripción de la importancia de los factores (clima, relieve, suelo y ascenso del mar)	26
Tabla 3. Escala de preferencia de saaty, 1980.....	30
Tabla 4. Datos morfométricos de las depresiones kársticas	32
Tabla 5. Datos de precipitación por estación meteorológica.....	34
Tabla 6. Descripción de los usos del suelo.....	36
Tabla 7. Descripción de las categorías de vulnerabilidad (relieve, clima y ascenso del mar).	37
Tabla 8. Descripción de las categorías del factor uso de suelo.	40
Tabla 9. Asignación de valores por juicios.....	41
Tabla 10. Normalización de los valores por juicios.	41

RESUMEN

El presente trabajo de tesis tuvo el objetivo de proponer un índice de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos kársticos costeros, en zonas urbanas, donde entenderemos por vulnerabilidad a la contaminación del acuífero como el grado de probabilidad que existe para que se modifiquen las propiedades del agua por diversas sustancias y no sea apto para el uso humano o que rebase los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud. Para el desarrollo del índice se tomó como referencia la zona urbana de Playa del Carmen, Solidaridad, ubicada en Quintana Roo, México. Se consideraron cuatro factores por las características propias del área de estudio: 1) Relieve, analizando dos variables; a) la frecuencia de las depresiones kársticas y b) el tipo de depresión (dolina, úvala o polje). 2) Clima, a partir de la agresividad de las lluvias, calculado con el índice modificado de Fournier. 3) Ascenso del nivel del mar, considerando tres variables; a) Proyecciones del aumento del nivel del mar, b) distancia a la línea de costa y c) el nivel piezométrico. Por último, 4) El uso de suelo, analizando dos variables; a) el uso de suelo, según las actividades permitidas y b) el Coeficiente de ocupación de suelo (COS). Para cada variable fue necesario sintetizar, depurar y generar la información necesaria a partir de la obtención de datos primarios. El relieve con datos LiDAR en formato ASCII/GRID disponibles en INEGI; el clima con la precipitación mensual y anual de las estaciones meteorológicas; el ascenso del nivel del mar con proyecciones del aumento del mar y datos de niveles piezométricos disponibles en CONAGUA, y el uso de suelo con el plan de desarrollo urbano del municipio de Solidaridad. Los resultados por cada factor permitieron identificar las zonas con mayor vulnerabilidad, para el relieve se identificó las áreas más vulnerables al sur de la zona urbana de playa del Carmen, con uso de suelo turístico residencial y habitacional de alta intensidad con una frecuencia de 29 a 37 depresiones con predominancia dolinas-úvalas. El clima, con una distribución de vulnerabilidad muy alta al sureste de la zona urbana de Playa del Carmen; para el ascenso del nivel del mar se ubicó la zona más vulnerable en la franja costera con un área de influencia de 1 km y, con el uso de suelo, se identificó para el uso de suelo destinado como mixto y crecimiento poblacional. Los resultados del índice permitieron identificar cuatro categorías de vulnerabilidad (muy baja a alta), no se registró la categoría de muy alta vulnerabilidad debido a que el factor relieve tampoco obtuvo esa categoría. Las limitantes para este estudio se encontraron con el factor clima, ya que se trabajó a otra escala debido a la ausencia de información meteorológica a nivel local y para la variable nivel piezométrico, ya que no se logró conseguir información específica. A pesar de estas limitantes, el índice de vulnerabilidad propuesto para acuíferos kársticos-costeros en zonas urbanas resulta eficiente para calcular el nivel de vulnerabilidad y este puede ser replicado a diferentes zonas con características similares.

Palabras clave: ascenso del mar, contaminación, relieve, solidaridad, uso de suelo.

ABSTRACT

The objective of this thesis work was to propose an index of vulnerability to contamination of coastal karstic aquifers in urban areas. where vulnerability to aquifer contamination is understood as the degree of probability that the properties of the water are modified by various substances and that it is unfit for human use or that it exceeds the values recommended by the World Health Organization. For the development of the index, the urban area of Playa del Carmen, Solidaridad, located in Quintana Roo, Mexico, was taken as a reference. Four factors were considered due to the characteristics of the study area: 1) Relief, analysing two variables; a) the frequency of karst depressions and b) the type of depression (dolines, uvalas or poljes). 2) Climate, based on the aggressiveness of rainfall, calculated with the modified Fournier index. 3) Sea level rise, considering three variables; a) sea level rise projections, b) distance to the coastline and c) piezometric level. Finally, 4) Land use, analysing two variables; a) land use, according to permitted activities and b) the Coefficient of land occupation (COS). For each variable it was necessary to synthesise, purify and generate the necessary information from primary data. Relief with LiDAR data in ASCII/GRID format available in INEGI; climate with monthly and annual precipitation from meteorological stations; sea level rise with sea level rise projections and piezometric level data available in CONAGUA, and land use with the urban development plan of the municipality of Solidaridad. The results for each factor made it possible to identify the areas with the greatest vulnerability. For relief, the most vulnerable areas were identified to the south of the urban zone of Playa del Carmen, with residential tourism and high intensity residential land use, with a frequency of 29 to 37 depressions with a predominance of dolines-uvalas. Climate, with a distribution of very high vulnerability to the southeast of the urban zone of Playa del Carmen; for sea level rise, the most vulnerable zone was located on the coastal strip with an area of influence of 1 km and, with land use, it was identified for mixed land use and population growth. The results of the index allowed the identification of four categories of vulnerability (very low to high); the category of very high vulnerability was not recorded because the relief factor did not obtain that category either. The limitations for this study were found with the climate factor, as we worked on a different scale due to the absence of meteorological information at the local level, and for the piezometric level variable, as we were unable to obtain specific information. In spite of these limitations, the proposed vulnerability index for karstic aquifers in urban areas is efficient for calculating the level of vulnerability and can be replicated in different areas with similar characteristics.

Keywords: rise of the sea, pollution, relief, solidarity, land use.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso con gran valor para la humanidad y es un recurso vital para la vida; se estima que el agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1,386 millones de km³, de estos, el 97.5% es agua salada, el 2.5% agua dulce y de esta última, casi el 70% no está disponible para uso, debido a que se encuentra en forma de glaciares, nieve o hielo (CONAGUA, 2019). El agua que está disponible se encuentra en lagos, ríos y depósitos subterráneos. Para el caso de México, sus reservas de agua provienen principalmente de las lluvias infiltrándose en el subsuelo de tal forma que el agua subterránea abastece a el 75 % de la población, el 61% del sector industrial y el 33% del sector de la agricultura (Ávila-Verdín *et al.* 2016). Siendo los acuíferos de la Península de Yucatán la gran reserva de agua dulce del país, por lo que es necesario conocer, analizar y evaluar las amenazas, la vulnerabilidad y el riesgo de la contaminación del acuífero (Bautista *et al.* 2011).

El proceso de desarrollo del hombre ha dado las pautas para conceptualizar adecuadamente los elementos vinculados a su hábitat, medio ambiente y una posible relación entre estos (Cardona, 2001), generando un interés por conocer la vulnerabilidad de los ecosistemas. A partir el año de 1975, con la introducción del concepto de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea de Albinet y Margat, se han propuesto diferentes modelos para calcular la vulnerabilidad, entre ellas están el DRASTIC, SINTACS, GOD (Ríos-Roja y Vélez-Otálvaro 2008), este último es el más simple y sirve para una primera aproximación a las condiciones de vulnerabilidad de un acuífero; en tanto que, los índices EPIK, PI, COPK, KARTIC, RISKE, Enfoque esloveno, PaPRIKa, KAVI, LEPT, APLIE son desarrollados para el análisis de zonas kársticas (Aguilar-Duarte *et al.* 2016). Sin embargo, estos modelos tienen un enfoque hidrogeológico (Bolio-Barrientos *et al.* 2011). El modelo propuesto por Aguilar-Duarte *et al.* (2016), denominado Índice de la Vulnerabilidad del Acuífero Kárstico Yucateco (IVAKY), se construye específicamente para la Península de Yucatán (PY), en él que se consideran las características y combinación de múltiples factores como el relieve, el clima y el suelo.

Para este estudio, se toma la definición de vulnerabilidad propuesta por Zwahlen (2003), quien denota las características de la hidrogeología, suelo, relieve, clima y vegetación, inherentes al sistema en conjunto que determinan la susceptibilidad a la contaminación por actividades antrópicas. Pero el desarrollo urbano en las zonas costeras

es un aspecto significativo, debido al crecimiento poblacional, la expansión asociada a asentamientos irregulares y la sustitución de ambientes naturales que conlleva a un importante cambio de uso de suelo (Barragán y de Andrés, 2016). Por lo que es necesario considerar el uso de suelo como factor principal que influye en el grado de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero, ya que la infraestructura urbana funciona como impermeabilizador, lo que disminuye la infiltración e incrementa el flujo de los contaminantes (Pousa *et al.* 2007); además, tiene influencia directa en la recarga e infiltración (Momejian *et al.* 2019). Aunado a las problemáticas mencionadas anteriormente, se debe considerar el cambio climático como factor ante la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas (Nicholls y Cazenave 2010, Contreras-Tax *et al.* 2021) por lo que se necesita incorporar factores como el ascenso del nivel del mar y la distancia con respecto a la línea de costa, ya que la contaminación también se puede presentar en un plano horizontal (Blanco-de-la-Paz *et al.* 2018). Hay estudios que demuestran la contaminación de sistemas acuáticos (principalmente cenotes) en las zonas costeras de la Península de Yucatán y el Caribe Mexicano (Medina-Moreno *et al.* 2014, Hoogesteijn-Reul *et al.* 2015).

Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue construir un índice de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos kársticos-costeros para zonas urbanizadas, teniendo como referencia a la Ciudad de Playa del Carmen, Quintana Roo teniendo como referencia la definición propuesta por Zwahlen (2003) y tomando como base los principios aplicados en el IVAKY propuesto por Aguilar-Duarte *et al.* (2016).

CAPITULO 1: MARCO INTERPRETATIVO Y CONTEXTUAL

1.1 MARCO TEÓRICO

1.1.1 VULNERABILIDAD

El concepto de Vulnerabilidad a lo largo del tiempo ha tenido diferentes definiciones y enfoques según las diversas disciplinas que han abordado el tema. Siendo la geografía y las ciencias sociales a principios del siglo 20 los primeros en usarlo en los temas de riesgo desde la perspectiva de prevención de desastres (Kates, 1973 tomado de Cardona, 2001). Analizando la vulnerabilidad desde estas dos ciencias, el enfoque social refleja la cercanía de los elementos de la epistemología, el objetivo, es decir, la exposición y sensibilidad del análisis (como una comunidad) y la causa (amenaza física) no están separados analíticamente (Lampis, 2013). Y Desde la perspectiva de las ciencias aplicadas la UNDR0 en conjunto con la UNESCO promovieron la reunión Desastres naturales y análisis de vulnerabilidad para proponer una unificación de definiciones de conceptos, definiendo la vulnerabilidad como “el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, resultado de la probable ocurrencia de un evento desastroso, expresada en una escala que va de 0 o sin daño a 1 pérdida total (UNDR0, 1979).

1.1.2 VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN

Desde el punto de vista de la conservación este término tomo peso en 1968 con la introducción de la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación (Martgat 1968). A partir de entonces se han propuesto diversas definiciones y metodologías, entre las definiciones más destacadas se encuentran las de Vrba Y Zaporozec, Foster Y Hirata, Custodio, Carbonell, EPA, NRC, Daly, Zwahlen (Auge, 2004; Duarte *et al.*, 2013) (Ver tabla 1)

Tabla 1. Definiciones del concepto de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos.

Autor	Tipo	Definición
Foster (1987)	Intrínseca	Características que determinan la sensibilidad de un acuífero ante un contaminante
Foster y Hirata (1991)	Intrínseca	Sensibilidad del acuífero para ser adversamente afectado por una carga de contaminantes

EPA (1991)	Específica	Vulnerabilidad subterránea respecto a un plaguicida
CARBONELL (1993)	Intrínseca	Tendencia de los contaminantes a situarse en el agua subterránea después de ser introducidos por encima del acuífero
NRC (1993)	Intrínseca	Tendencia o probabilidad de que los contaminantes alcancen una posición específica dentro del acuífero subterráneo
Vrba y Zaporozec (1994) y Daly et al. (2002)	Intrínseca	Susceptibilidad natural del medio biofísico o hidrogeológico a la contaminación
Vrba y Zaporozec (1994) y Daly et al. (2002)	Específica	Impacto de un contaminante en particular o algún uso del territorio
Custodio (1995)	Intrínseca	La incapacidad del sistema para absorber las alteraciones, naturales y artificiales
Zwahlen (2003)	Intrínseca	Características de la hidrogeología, suelos, relieve, clima y vegetación, inherentes al sistema en conjunto que determinan la susceptibilidad a la contaminación por actividades antrópicas.

Fuente: Elaboración propia a partir de las definiciones citadas en Auge (2004) y Duarte *et al.* (2013)

1.1.3 VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS

Las zonas costeras juegan un papel importante, ya que son sistemas muy dinámicos y complejos presentando un gran conflicto entre las actividades socioeconómicas que se desarrollan como el turismo, el comercio, la pesca y la extracción de recursos con los valores ecológicos y naturales (Rivera-Arriaga *et al.* 2020). A si mismo se presenta el conflicto por el cambio climático, siendo el aumento del nivel del mar el más notable (Ortiz-Pérez & Méndez-Linares, 2004). A partir de esta problemática se han desarrollado diversas metodologías para calcular la vulnerabilidad de las costas, el cual se entiende por la sensibilidad ante un fenómeno y capacidad de adaptación (Ojeda-Zújar *et al.* 2009). Uno de los más usados es el índice de vulnerabilidad costera (CVI) utilizando 6 variables (Ružić *et al.*, 2019). A partir del papel que desarrolla el cambio climático se debe considerar incorporara algunas variables usadas para la vulnerabilidad costeras, dentro de los índices de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos, para poder realizar análisis en zonas costeras.

1.1.4 ÍNDICES DE VULNERABILIDAD

Los índices de vulnerabilidad son desarrollados con la finalidad de identificar las zonas con mayor vulnerabilidad a la contaminación y son usados en diferentes modelos según los objetivos. Algunos trabajos que presentan diferentes modelos son:

Ríos-Roja y Vélez.Otálvaro (2008) aplicando seis índices (AVI, BGR, DRASTIC, GOD, GODS y PATHS) para determinar la Vulnerabilidad a la contaminación de la Zona Sur Acuífero Del Valle del Cauca, Colombia. Obteniendo para diferentes grados de vulnerabilidad para los métodos, AVI, PATHS y GOD van de un grado de muy alta a moderada vulnerabilidad, mientras que el DRASTIC y GODS van de moderada a baja y finalmente BGR con categorías de muy alta hasta muy bajas.

Estrada-Godoy *et al.* (2013) usó el índice SINTACS con el objetivo de medir los niveles de vulnerabilidad acuífera del agua subterránea de la cuenca del río Duero, Michoacán, obteniendo dos principales niveles: vulnerabilidad baja para el 50% del área y 25% para vulnerabilidad media y solo pequeñas porciones con rangos de muy baja y alta.

Torres Díaz *et al.* (2014) evaluando el riesgo de contaminación del agua subterránea de la región hidrogeológica denominada "Semicírculo de cenotes" y "Zona costera" en el estado de Yucatán a partir del índice DRASTIC, donde sus resultados mostraron principalmente una vulnerabilidad alta, muy alta y extrema para Yucatán.

Ben y Villarroya (2016) aplicaron el índice DRASTIC para la cartografiar la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de R'mel, Larache, Marruecos. Obteniendo que un 70,5% de la superficie del acuífero pertenece a un grado de vulnerabilidad muy bajo, un 17,9% bajo, el 6,7% moderado y el 4,8% no presenta vulnerabilidad.

Espitia-Fernández (2020), usó los índices el DRASTIC, SINTACS y GOD para analizar la vulnerabilidad del acuífero río Magdalena, Cuba. Obteniendo niveles relevantes de una alta vulnerabilidad, sin embargo, la metodología GOD clasifico mayor porcentaje del área con un grado de vulnerabilidad más alta en comparación con los porcentajes de área clasificados con las metodologías GODS y DRASTIC.

Bolio-Barrientos *et al.* (2011), analizaron la vulnerabilidad del acuífero de Estado de Yucatán con el índiceEPIK, obteniendo para la mayoría de los sitios muestreados una alta vulnerabilidad, observándose diferentes grados de vulnerabilidad según los diferentes

paisajes. Siendo el más alto (extrema) el paisaje de dolinas agrupadas cerradas y el más bajo (media) paisaje kárstico sub-horizontal media.

Doummar *et al.* (2012) usaron los índices COP y EPIK para evaluar la vulnerabilidad a la de Jeita Spring, Líbano. Obteniendo para el COP una vulnerabilidad alta y moderada para las zonas de amortiguamiento, la cual se encuentra conformada por dolinas y sumideros, y una baja a muy baja para las formaciones no kársticas y para el EPIK la mayor parte del área se considera como muy vulnerable.

Mangoua *et al.* (2020) evaluaron la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos fracturados en el Departamento de Odienné en Côte d'Ivoire, con el método de Protección de Acuíferos y el embalse e Infiltración (PaPRI), que es una adaptación del índice PaPRIKa. Obteniendo una vulnerabilidad intermedia, equivalente al 52% del área de estudio y un 42% de vulnerabilidad alta a muy alta.

Aguilar-Duarte *et al.* (2016) propusieron el índice de vulnerabilidad del acuífero kárstico yucateco (IVAKY). Con este índice evaluaron la vulnerabilidad de Estado de Yucatán considerando tres factores: Relieve, Clima y suelos. A partir de estos factores obtuvieron que el 19% del estado presenta niveles de vulnerabilidad extrema, específicamente en el anillo de cenotes y la zona noroeste del Estado y el 12% por niveles bajos y muy bajos de vulnerabilidad, principalmente en la zona sur del Estado.

1.2 ANTECEDENTES

Se han desarrollado diferentes índices para calcular la vulnerabilidad de la contaminación de acuíferos considerando factores específicos según la necesidad de cada sitio a estudiar. Estos índices desarrollados se pueden clasificar en dos grupos según la composición del acuífero:

a) Índices de vulnerabilidad para acuíferos

GOD: Desarrollado por Foster (1987) este es el más simple, ya que solo emplea 3 variables (tipo de acuífero, litología de la zona no saturada y profundidad del agua) y sirve para una primera aproximación a las condiciones de vulnerabilidad de un acuífero.

- **DRASTIC:** Desarrollado por Aller *et al.* (1987) para EPA, con el objeto de evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos. Este contempla dos parámetros iniciales; uno de clasificación y otro de ponderación. Usando 7 variables (profundidad del agua, recarga neta, litología del acuífero, tipo de suelo, topografía, subsuelo no saturado y conductividad hidráulica).

- **SINTACS:** Desarrollado por Civita y colaboradores en el 1990 a partir del DRASTIC (Auge, 2004) con la finalidad de adecuarlo a las diversificadas características hidrogeológicas de Italia y un mapeo a mayor detalle, utilizando 7 variables (Profundidad del nivel piezométrico, infiltración efectiva, capacidad de atenuación de la zona no saturada, tipo de suelo, características hidrogeológicas del acuífero, conductividad hidráulica, pendiente).

- **AVI:** Propuesto por Van Stempvoort y colaboradores en 1992 (tomado de Ríos-Roja y Vélez-Otálvaro, 2008) para una provincia de Canadá, éste cuantifica la vulnerabilidad del acuífero a través del parámetro C (Resistencia Hidráulica). A partir de dos variables (espesor de las capas homogéneas ubicadas sobre el sistema saturado y la permeabilidad). El valor de C esta expresado en años, mientras más años sean, menos es la vulnerabilidad.

- **EKv:** Propuesto por Auge en 1995 (Auge, 2004), desarrollado para acuíferos libres contemplando la profundidad de la superficie freática y permeabilidad vertical de la zona subsaturada), estos también son usados también por el AVI.

- **BGR:** Propuesto por Hölting *et al.* (1995), este método estima la protección que brindan los materiales del suelo y subsuelo al acuífero, a partir de 6 variables (capacidad

de campo efectiva del suelo, recarga natural del acuífero, litología, espesor de cada capa de la zona no saturada, presencia de acuíferos colgados y condiciones de presión (H_p)).

- **GODS:** Desarrollado por Forter en el año 1996 (tomado de Ríos-Roja y Vélez-Otálvaro, 2008) el cual consiste en una modificación del modelo GOD para incluir el factor del suelo (S). Quedando la fórmula de la siguiente manera:

$$\text{Vulnerabilidad GOD} = G * O * D * s$$

- **DI-O-S:** Propuesto por Ramírez y Alfaro (2002) para la vulnerabilidad Hidrogeológica en Costa Rica, para el cálculo de la vulnerabilidad se utilizan tres factores (distancia al agua, subterráneas (confinado o libre) y sustrato geológico (caracterización de los estratos encima de la zona saturada, que tiene relación con el grado de confinamiento y el carácter litológico).

- **PATHS:** Desarrollado por Ortega y Miranda (2004) para acuíferos cubanos, usando 6 variables (precipitación, profundidad del nivel Freático, litología del acuífero, tectónica, pendiente topografía y resistencia hidráulica del suelo).

b) Índices de vulnerabilidad para acuíferos Kársticos:

- **COPK:** Fue propuesto por Acción Europea COST 620 (iniciada en 1997) para lograr más coherencia en el establecimiento de mapas de vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas en Europa (Daly *et al.* 2002), contemplando 4 variables (concentración de flujo, capas protectoras, precipitación y red kárstica).

- **EPIK:** Desarrollado por Doerfliger *et al.* (1999) con el enfoque de acuíferos kársticos teniendo en cuenta 4 variables (permeabilidad de la roca caliza, grosor del suelo, infiltración y red kárstico (grado de desarrollo)).

- **KARSTIC:** Fue propuesto y modificado por Davis *et al.* (2002) a partir del modelo DRASTIC. Contemplando 7 variables: el Karst (la presencia de dolinas, sumideros, etc.), acuífero medio (tipo y composición de la roca), recarga neta, suelo (espesor, textura, tipo de arcilla), topografía, zona vanosa (espesor) y conductividad hidráulica.

- **PI:** Fue propuesto por Goldscheider (2005) para todo tipo de acuíferos aplicado para Alemania; sin embargo, resulta más conveniente para medios kársticos. Considerando solamente 2 variables (cubierta protectora y condiciones de infiltración). Este método mide la vulnerabilidad intrínseca basada en el modelo: A) Origen; posible fuente de liberación de

contaminantes, B) Vía; el paso de contaminantes desde un punto hasta el objetivo y C) Objetivo; que es el receptor de los contaminantes.

- **KAVI**: Fue propuesto por Van Beynen *et al.* (2012) usando 4 factores (el suelo, conductividad hidráulica, depresiones y profundidad de la capa freática). Destacando el análisis de densidad “Kernel” para la identificación de agrupaciones de depresiones y definir un mayor nivel de vulnerabilidad a la capa de “epikarst”.

- **LEPT**: Fue propuesto por Taheri *et al.* (2015) para un acuífero Kárstico en Irán para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación cuando la información es escasa, por lo que solo considera 4 factores: litología (rocas kársticas), elevación (distribución de las dolinas, cubierta protectora y topografía (Pendiente topográfica).

- **APLIE**: Fue desarrollado por Guo *et al.* (2016) para un acuífero kárstico de la región de china, utilizando 5 variables (abundancia de agua, cubierta protectora, uso de suelo, cantidad de infiltración de precipitación y explotación de agua). Este modelo es una combinación de los modelos DRASTIC, PI y COPK (Aguilar-Duarte *et al.* 2016).

- **IVAKY**: Fue desarrollado por Aguilar-Duarte *et al.* (2016) para el acuífero kárstico Yucateco, utilizando 3 variables (relieve, clima y suelos). Basado en la localización y tipos de depresiones kársticas, la longitud del periodo de lluvias (distribución e intensidad de la lluvia) y las asociaciones edáficas en cada unidad geomorfopedológica.

Los índices mencionados anteriormente no consideran variables relacionadas a las zonas costeras y estas juegan un papel importante, ya que son sistemas muy dinámicos y complejos presentando un gran conflicto entre las actividades socioeconómicas que se desarrollan como: el turismo, el comercio, la pesca y la extracción de recursos con los valores ecológicos y naturales (Rivera-Arriaga *et al.* 2020). Sin embargo; se encuentran bajo los efectos del cambio climático, siendo el aumento del nivel del mar la problemática más notable (Ortiz-Pérez y Méndez-Linares, 2004). Debido al aumento del mar se han desarrollado diversas metodologías para calcular la vulnerabilidad de las costas, la cual se entiende por la sensibilidad ante un fenómeno y capacidad de adaptación (Ojeda-Zújar *et al.* 2009). A partir del papel que desarrolla el cambio climático se debe considerar incorporara algunas variables usadas para la vulnerabilidad costeras, dentro de los índices de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos, para poder realizar análisis en zonas costeras.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El municipio de Solidaridad, Quintana Roo, por su alto crecimiento urbano, sus actividades turísticas y su cercanía al mar, presenta problemáticas ambientales emergentes, siendo la presión al acuífero una de ellas; debido al aprovechamiento y a la vulnerabilidad a la contaminación de este recurso ya que se encuentra dentro de un ecosistema frágil por las características del suelo. Volviendo el tema de la conservación del agua, un tema importante, debido a que este recurso es obtenido principalmente de los acuíferos subterráneos y abastece a todo el municipio de Solidaridad, por eso es necesario desarrollar estudios que propongan planes de conservación del recurso hídrico. Sin embargo, en la actualidad no existe la información necesaria para poder realizar estas estrategias de conservación, dejando expuesto los sistemas acuáticos como los cenotes, cavernas y grutas y al mismo tiempo poniendo en riesgo las diversas especies que habitan estos ecosistemas y la salud humana en zonas donde no se cuenta con agua potable.

A partir de lo planteado anteriormente, este trabajo de tesis pretende contribuir con un índice que permita conocer el grado de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero, considerando características específicas de la zona. Este índice fungirá como una herramienta que permita la gestión integral y el uso sostenible del recurso hídrico en zonas kársticas costeras con alta presión humana.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 GENERAL:

Proponer un índice de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos kársticos costeros en zonas urbanas considerando características propias: relieve, clima, ascenso del nivel del mar y el uso de suelo.

1.4.2 ESPECÍFICOS:

OP	Objetivo
1	Analizar la vulnerabilidad a la contaminación a partir del relieve kárstico con la identificación de las depresiones kársticas, sus características morfométricas y el tipo de depresión.
2	Analizar la vulnerabilidad a la contaminación a partir del clima utilizando los datos de precipitación para la aplicación del índice de Fournier Modificado
3	Analizar la vulnerabilidad a la contaminación a partir del ascenso del nivel del mar
4	Analizar la vulnerabilidad a la contaminación a partir de los usos de suelo designados para la zona urbana
5	Construir un índice de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos kársticos costeros en zonas urbanas.

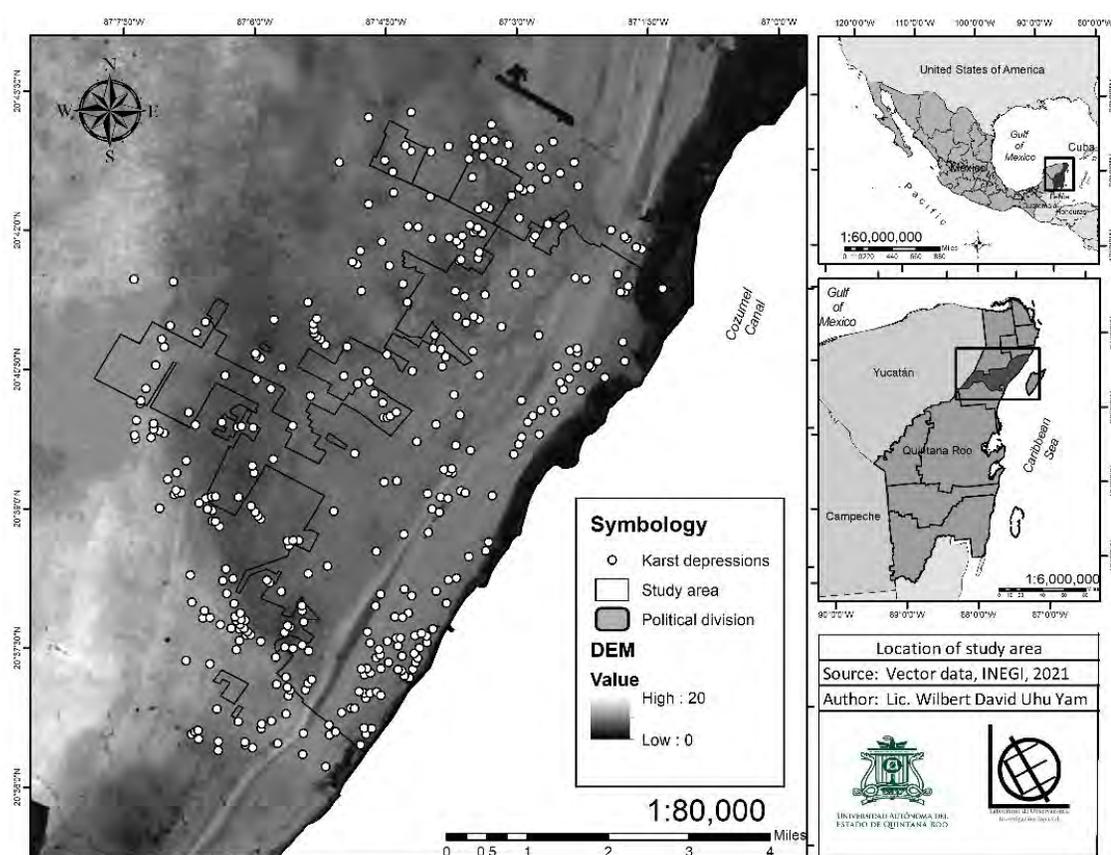
CAPITULO 2: ENFOQUE METODOLÓGICO

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

2.1.1 LOCALIZACIÓN

El área de estudio comprende la ciudad de Playa del Carmen, ubicada en el municipio de Solidaridad, el cual se encuentra en la parte norte del estado de Quintana Roo, colinda al norte con los municipios de Lázaro Cárdenas y Benito Juárez, al sur con el municipio de Tulum y al este con el mar caribe. Se localiza entre las coordenadas geográficas extremas $19^{\circ} 46'$ a $20^{\circ} 45'$ LN y $86^{\circ} 57'$ a $88^{\circ} 05'$ LO (Ver figura 1).

Figura 1. Ubicación del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

2.1.2 CLIMA

El municipio de Solidaridad tiene un clima denominado Grupo A, de tipo AW, es decir cálido subhúmedo con lluvias todo el año, aunque éstas se presentan más durante el

verano. Dentro de la superficie del municipio se pueden encontrar dos subtipos climáticos, de acuerdo con la clasificación de Koeppen, modificado por García en 1978, el primero es Aw1(x') que abarca una porción irregular de la zona Norte, que va desde el límite norte del municipio hasta la Ciudad de Playa del Carmen. Y el segundo es Aw2(x') que abarca toda la superficie restante. Según los datos de la CNA estación Playa del Carmen, la temperatura promedio anual es de 25.4 °C y la media mensual oscila entre los 22.8 °C en febrero (mes más frío) y los 27.5 °C en julio (mes más cálido) y la precipitación media anual es de 1,475.5 mm y la media mensual 123.3mm. A partir de la oscilación mensual se puede dividir en dos temporadas: la temporada de seca que va de diciembre a mayo con una precipitación total mensual de 50 mm y la temporada lluviosa de junio a noviembre con precipitaciones totales mensuales superiores a los 100 mm, siendo el mes octubre con mayor precipitación (SEDUMA, 2008)

2.1.3 HIDROLOGIA

La Ciudad de Playa del Carmen se encuentra dentro de la región hidrogeológica RH33, mientras que la gran mayoría del resto del municipio se encuentra dentro de la región RH32 denominada como Yucatán Norte, las cuales se caracterizan por no presentar ríos superficiales. El municipio no cuenta con corrientes de agua subterránea; sin embargo, si cuenta con varias lagunas: Laguna La Unión, Chumpoko, Laguna Campechen, Boca Paila, San Miguel, Catoche (al sur) y Cobá, Verde y Nochacam (al oeste), así como varios cenotes, aguadas y cuerpos de agua intermitente y perenne (SEDUMA, 2008). Al localizarse en la RH32 el municipio se caracteriza por tener una precipitación promedio de 800 mm en el Norte y 1,500 al Sureste de la cuenca y con un rango de 0 a 5.

2.1.4 GEOLOGÍA

El origen geológico de la Península de Yucatán es uniforme ya que se compone de rocas sedimentarias de Terciario y Cuaternario de la Era Cenozoica. Conformado por un 99% de rocas sedimentarias de Terciario y el 1% del Cuaternario distribuidas a lo largo de la costa. De acuerdo con las cartas geológicas del INEGI, el municipio de Solidaridad tiene su origen el Terciario Superior con tipo de roca caliza abarcando la porción continental, mientras que la costa se diferencian dos orígenes, el cuaternario y al Plioceno, predominando cuatro tipos de suelos en la zona: Palustre, Litoral, Eólico y Lacustre. (SEDUMA, 2008). Los suelos del municipio por lo general pocos evolucionados, pedregosos, someros, degradables y con potencial forestal. Estos corresponden a los

suelos de tipo litosol y rendzina con clase textural media, mientras que el subsuelo está formado por calizas blancas, arenosas, no mineralizadas (Ruiz-Ramírez *et al.* 2020).

2.1.5 ACTIVIDAD ECONOMICA

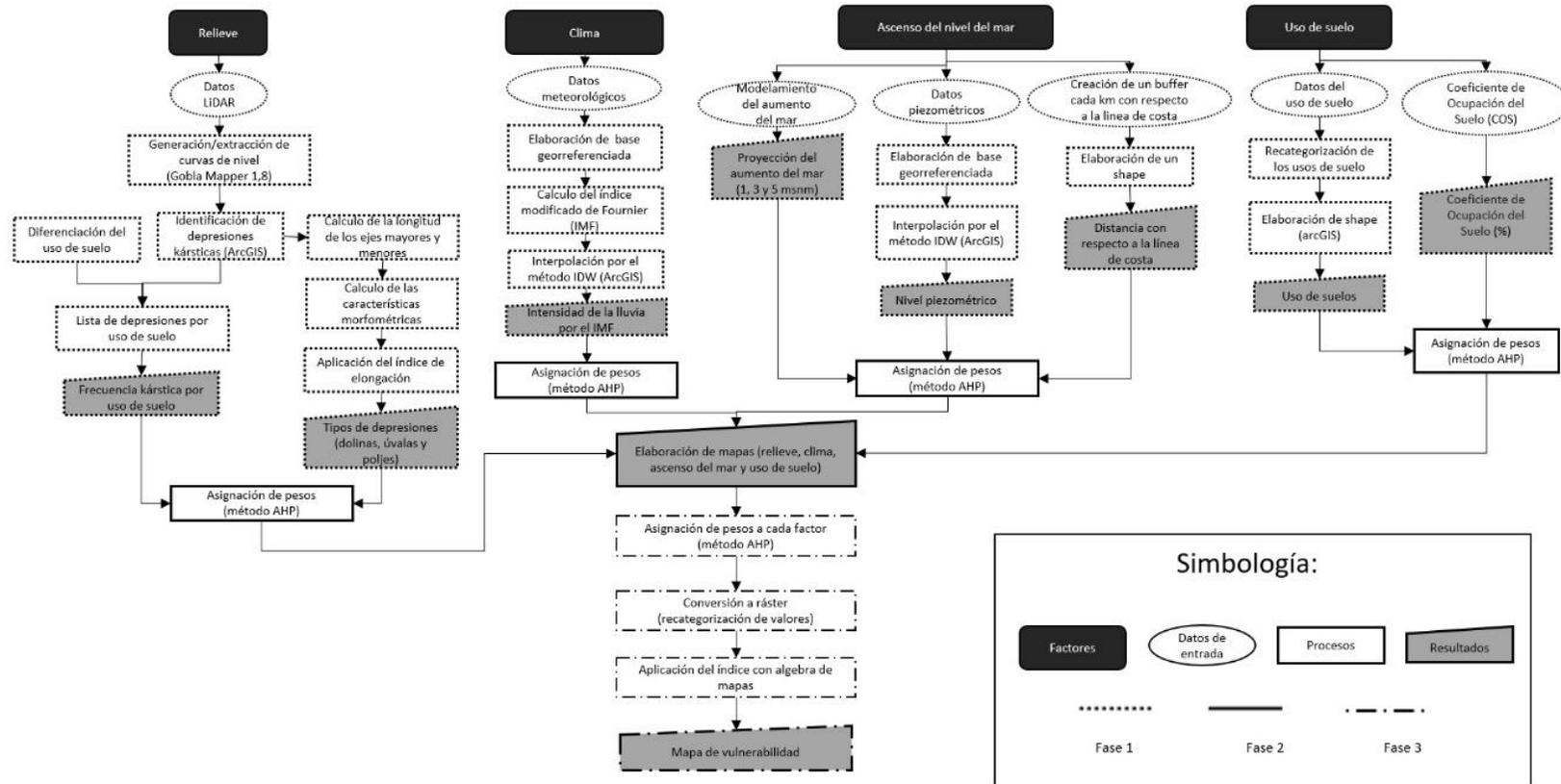
La actividad económica se concentra principalmente del turismo, ya que pertenece al corredor comercial Cancún – Tulum. Recibiendo para el 2019, 22 millones 858 mil 402 visitantes con una derrama económica de más de 15 mil 440 millones de dólares. Siendo Playa del Carmen la ciudad con mayor concurrencia de turistas provenientes de Estados Unidos, Canadá y Europa, ya que cuenta con 276 hoteles con 40,062 cuartos. (SEDETUR, 2020). Otras actividades que se desarrollan en menor grado dentro del municipio son: A) la agricultura, con el cultivo de lechuga, pepino y chile habanero, B) la acuicultura principalmente de pescados (Tilapia, Pargo, Mero, Chac-Chí) y camarones, C) Apicultura para la obtención de productos como el propóleo, polen, cera y jalea real. (SDETAI, 2021).

2.2 METODOLOGÍA

2.2.1 DIAGRAMA METODOLÓGICO

A continuación, en la figura 2, se presenta el diagrama metodológico. Este se dividió en tres etapas: 1) Análisis de Variables y factores: se generó y analizo la información de los cuatro factores (relieve, clima, ascenso del nivel del mar), 2) Asignación de pesos: en esta fase se calculó la vulnerabilidad por cada factor asignado pesos a cada factor considerando sus variables, así mismo se desarrolló los modelos de vulnerabilidad y finalmente, 3) Índice de vulnerabilidad: con los modelos de vulnerabilidad se construyó e implemento el índice de vulnerabilidad para acuíferos kársticos-costeros en zonas urbanizadas. A si mismo se aborda detalladamente el proceso metodológico aplicado.

Figura 2. Diagrama metodológico para el desarrollo del índice de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos.



Fuente: Elaboración propia

2.2.2 TÉCNICAS Y HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS DE LOS FACTORES.

2.2.2.1 Análisis de Variables y factores.

Se establecieron cuatro etapas para este estudio; hacen referencia a cada factor: relieve, clima, aumento del nivel del mar y uso de suelo. En la tabla 2 se describe la relación de cada factor con la vulnerabilidad a la contaminación.

Tabla 2. Descripción de la importancia de los factores (clima, relieve, suelo y ascenso del mar)

Factor	Variables	Importancia
Relieve	Frecuencia de depresiones	Permite identificar la intensidad de karstificación, tipo de recarga (puntual o difusa) y el tipo de flujo subterráneo (Lindsey <i>et al.</i> 2010). Una alta densidad de depresiones se deduce como un epikarst desarrollado, por lo tanto, la vulnerabilidad es mayor (Aguilar-Duarte <i>et al.</i> 2016).
	Tipo de forma	Las dolinas son puntos de entrada directa de agua y contaminantes, por lo que son los más vulnerables, mientras que los poljes contienen suelos con alto contenido de arcillas, atenuando la infiltración de contaminantes, por lo que son los menos vulnerables y las úvalas son un caso intermedio (Aguilar-Duarte <i>et al.</i> 2016).
Clima	Agresividad de las lluvias	La precipitación es el factor primario para la recarga de las aguas subterráneas, es decir que a mayor intensidad de las lluvias mayor será la infiltración de agua y contaminantes (Taylor <i>et al.</i> 2012). Considerando que el agua es un vector para el transporte de contaminantes hacia el acuífero (Aguilar-Duarte <i>et al.</i> 2016).
Ascenso del mar	Proyecciones del aumento del mar	Los efectos del cambio climático han favorecido en la aceleración del aumento del nivel del mar afectando los ecosistemas principalmente en zonas costeras. Este aumento puede afectar con la desestabilización de las bocas en las lagunas costeras y estuarios (Torres-Mota <i>et al.</i> 2014) y la inundación de las depresiones kársticas y por la infiltración contaminar las aguas subterráneas.

Distancia a la línea de costa.	Se toma como si fuera la distancia vertical al agua subterránea ya que la contaminación también ocurre en un plano horizontal. Se valora que la parte del acuífero más alejada de la costa es la menos vulnerable a la intrusión salina y otros contaminantes (Blanco-de-la-Paz 2018)
Nivel piezométrico	A mayor nivel piezométrico mayor presión hidráulica ejerce el acuífero sobre el agua de mar y menos avanza la cuña marina, por lo tanto, la vulnerabilidad será menor (Blanco-de-la-Paz 2018; Valcerce-Ortega y Forcada-Labrador 2021)
Uso de suelos	<p>Zonificación secundaria del uso de suelo del Programa de Desarrollo Urbano</p> <p>Las zonas designadas para actividades específicas influyen en el grado de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero, principalmente las designadas al turismo y las zonas habitacionales. El turismo en zonas costeras kársticas tiene una influencia directa por la existencia de cenotes naturales que están habilitados para realizar actividades recreativas dejando un camino libre a la contaminación del agua subterránea por la infiltración en las fracturas interconectadas existentes (Medina-Moreno <i>et al.</i> 2014, Hoogesteijn-Reul <i>et al.</i> 2015). También las actividades y asentamientos urbanos ejercen gran presión sobre el agua subterránea (Contreras-Tax <i>et al.</i> 2021)</p>
Coeficiente de ocupación de suelo	Representa el porcentaje de construcción, que funciona como impermeabilizante, por lo que, a mayor superficie construida, menor será la infiltración de agua y contaminantes por lo que la vulnerabilidad es menor. Mientras que las zonas con menor construcción serán las más vulnerables por el escurrimiento de las zonas más permeables (Pousa <i>et al.</i> 2007)

Fuente: Elaboración Propia

Primera etapa. El análisis del relieve se realizó a partir de dos variables: a) La frecuencia de depresiones por tipo de uso de suelo. Primero se identificaron las depresiones kársticas mediante el proceso descrito por Frausto-Martínez *et al.* (2018) y Colin-Olivares *et al.* (2019) procesando datos LiDAR de 5m de resolución en formato ASCII/GRID del INEGI (2012), sólo se reconocieron aquellas depresiones mayores a un metro de profundidad y se asignó un centroide a cada depresión; después, se diferenció

el área por tipo de uso de suelo de acuerdo a la zonificación secundaria del Plan de Desarrollo Urbano del municipio de (PDU) y se obtuvo el número de depresiones para cada tipo de suelo; y b) Tipo de formas. Se trazó el eje mayor y menor en función del límite de la cota máxima de cada depresión y se calculó la longitud de cada eje, que permite la aplicación del índice de elongación (Fragoso-Servón *et al.* 2014, Frausto-Martínez *et al.* 2021), donde un índice menor a 1.25 se clasifica como dolina, de 1.25 a 1.75 son aquellas depresiones que se encuentran en la transición de dolinas a úvalas, de 1.75 pero menor 2 como úvalas y, mayor a 2.0 como poljes. Para presentar una caracterización de cada depresión se calculó su profundidad, volumen y área, con el que se emplearon las herramientas Interpolate shape, Field calculator, Triangulator Surface y Polygon Volume del software ArcGis v. 10.8.

Segunda etapa. El clima se analizó a partir de la agresividad de la lluvia por medio del Índice Modificado de Fournier (IMF) (Arnoldus 1980). Se construyó una base de datos primaria con la información de la precipitación mensual de 11 estaciones meteorológicas de la Comisión Nacional del Agua para el periodo de 28 años (1990-2018); posteriormente, se aplicó el índice de calidad de la información (ICI) de manera manual en el software Excel. Con el mismo software se calculó el IMF para cada año y luego el promedió de los 28 años, considerando la recomendación de la UNESCO (2006). Para el cálculo del índice IMF se utilizó la siguiente fórmula:

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_t}$$

Dónde: IMF= índice Modificado de Fournier, Pi= es la precipitación media mensual y Pt= es la precipitación media anual.

Por último, se importó la base de datos georreferenciada con los resultados del IMF al software ArcGIS v.10.8 para realizar un análisis espacial y de distribución de los datos por medio de una interpolación de Ponderación de distancia inversa (IDW, por sus siglas en inglés). Con la interpolación terminada se recortó la información únicamente para la el territorio del municipio de Solidaridad y con el mismo software se dividió en 5 cuantiles, con la finalidad de obtener las 5 categorías de vulnerabilidad (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto).

Tercera etapa. Para el ascenso del mar se emplearon las siguientes variables: a) aumento del nivel del mar considerando las proyecciones realizadas para México de uno, tres y cinco metros (Pedrozo Acuña 2012 y PNUD-INECC 2016). Utilizando el modelo digital de elevación (MDE) creado a partir de la digitalización de las curvas de

nivel e interpolación de los datos altitudinales con herramientas de software ArcGIS v.10.8. se identificó las zonas y las depresiones que se ven afectadas, b) Nivel piezométrico, al no existir datos puntuales de la zona de estudio, se decidió usar una aproximación con el uso de la base de datos de niveles piezométricos de la CONAGUA. Esta base fue importada al software ArcGIS v.10.8 para la depuración de datos, seleccionándose 22 pozos de muestreo ubicados en la proximidad de la zona de estudio; se calculó el promedio de los datos y se realizó una interpolación IDW para obtener un mapa de distribución. C) La distancia con respecto a la línea de costa, esta medida se calculó por medio de un polígono con área de influencia a cada kilómetro con respecto a la línea de costa. Estas dos últimas variables fueron consideradas a partir de lo propuesto por método GALDIT (Chachadi y Lobo-Ferrerira 2001) y el método DARLE de Blanco-de-la-Paz *et al.* (2018) diseñado para evaluar la vulnerabilidad a la intrusión salina en acuíferos costeros.

Cuarta etapa. Uso de suelo, por tratarse de una zona urbanizada se utilizó la zonificación secundaria del Programa de Desarrollo Urbano (PDU) del centro de población Playa Del Carmen, Municipio Solidaridad 2010-2050 (CCPY, 2010). Tomando como base el Shapefile disponible, se creó uno nuevo Shapefile para agruparlos en 10 usos de suelos según las actividades permitidas y la categoría superior propuesta por el mismo PDU (protección, equipamiento, parques urbanos, turismo campestre, habitacional de baja intensidad, comercial, turismo residencial, industrial, habitacional de alta intensidad y mixto). Se considero dos variables para este factor: a) grado de vulnerabilidad de acuerdo a las consideraciones de Pousa *et al.* (2007) y Carretero y Kruse (2014) y b) coeficiente de Ocupación del Suelo (COS), este indica el área total que se puede ocupar para construir, según cada uso de suelo.

2.2.2.2 Asignación de pesos

Con la finalidad homogenizar los factores relieve, asenso del nivel del mar y uso de suelo se tomó los datos mínimos y máximos de cada variable, para dividirlos en 5 cuantiles, equivalente a las 5 categorías de vulnerabilidad usadas para el factor clima. Posteriormente, se aplico método Analytic Hierarchy Process (AHP), propuesto por Thomas Saaty en 1980 (NANTES, 2019), este método consiste en ordenar los factores o variables en un modelo jerárquico para realizar comparaciones por pares atribuyendo valores numéricos a los juicios (Tabla 3). Una vez obtenido el peso de cada variable (anexo 1) se usó la siguiente formula por cada factor:

$$(V1*p) + (V2*p) + (V3*p) = \text{Grado de vulnerabilidad}$$

Donde:

V: es la variable

p: es el peso obtenido

Tabla 3. Escala de preferencia de Saaty, 1980.

Intensidad	Definición	Explicación
1	De igual importancia	Las actividades contribuyen de igual forma al objetivo.
3	Moderada importancia	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a una actividad sobre la otra
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Una actividad es mucho más favorecida que la otra; su predominancia se demostró en la práctica
9	Importancia extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra es absoluta e incuestionable

Fuente: Tomado y modificado de NANTES 2019

Finalmente se importó al software ArcGIS 10.8 toda la información obtenida de cada factor, con la finalidad de obtener un sistema de información geográfica para realizar los modelos en formato ráster de cada factor.

2.2.2.3 Índice de vulnerabilidad

Con la finalidad de homogenizar los cuatro modelos ráster (relieve, clima, ascenso del nivel del mar y uso de suelo) se proyectaron en un sistema de proyección Geográfica WGS-84 y una resolución de 5x5 m por pixel. Paralelamente se calcularon los valores de referencia y los pesos para cada factor por medio método Analytic Hierarchy Process (AHP)

Con los modelos importados a un sistema de información geográfica en el software ArcGIS 10.8 se procedió a utilizar la herramienta de álgebra de mapas para obtener el mapa de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos kársticos costeros en zonas urbanas con la siguiente fórmula:

$$IVCAKCU = (R \cdot 0.18) + (C \cdot 0.07) + (A \cdot 0.11) + (U \cdot 0.62)$$

Donde:

IVCAKCU: índice de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos kársticos costeros en zonas urbanas

R: relieve

C: clima

A: ascenso del nivel del mar

U: uso de suelo

Para la evaluación de la consistencia de la matriz se tomó lo descrito por Mendoza *et al.* 2019. Esto con la finalidad de decidir si el nivel de inconsistencia es tolerable o aceptable se considera el siguiente proceso:

a) Para cada fila de la matriz de comparación, se calculó la suma ponderada, con base a la suma del producto de cada elemento por la prioridad calculada de cada criterio.

b) Para cada elemento del vector resultante del paso anterior, se dividió su suma ponderada por la prioridad de su criterio correspondiente.

c) Se determinó la media λ_{max} del resultado del paso anterior.

d) Se calculó el índice de consistencia (CI) para cada criterio, donde n es igual al número de criterios.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

e) Se determinó el índice aleatorio (IA), con la fórmula:

$$IA = \frac{1,98(n - 2)}{n}$$

f) Se estableció la razón de consistencia (CR) con la ecuación:

$$CR = \frac{CI}{IA}$$

Donde si el resultado la razón de consistencia es menor o igual a 0,1, el nivel de inconsistencia es aceptable, con un resultado contrario se recomienda que el experto debe revisar sus estimaciones.

CAPITULO 3 INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS.

3.1. RESULTADOS

3.1.1 ANÁLISIS DE VARIABLES Y FACTORES.

3.1.1.1 Relieve

Para el relieve se identificaron 364 depresiones kársticas dentro de la zona urbana de Playa del Carmen (ver fig. 2.1), con un intervalo de profundidad de 1 a 6.75 m, con media de 2.20 m, el área de las depresiones fluctúa entre los 310.30 m² hasta los 53 819.83 m², con media de 2 889 m², el volumen oscila de los 147.65 a 143 006.59 m³, con media de 4 436.29 m³. Por el índice de elongación, se reconocen 87 dolinas (23.90%), 157 dolinas-Úvalas (43.13%), 46 úvalas (12.63%) y 74 poljes (20.32%). En la tabla 4 se muestran los máximos, mínimos y promedios de las características morfométricas para cada grupo y en la figura 3 se representa la frecuencia de depresiones kárstica por uso de suelo.

Tabla 4. Datos morfométricos de las depresiones kársticas

	Dolina			Dolina-úvula			Úvula			Polje		
	Máxima	Mínima	Promedio	Máxima	Mínima	Promedio	Máxima	Mínima	Promedio	Máxima	Mínima	Promedio
Profundidad (m)	6.5	1	2.65	6.74	1	2.14	3.75	1	1.63	5	1	2.13
Área (m²)	11365.49	310.3	2197.73	25572.02	349.89	2838.55	9086.65	666.94	2124.68	53819.83	718.17	4284.78
Perímetro (m)	410.29	69.42	166.09	824.04	70.28	195.89	395.74	101.35	187.35	1225.78	107.34	261.78
Volumen (m³)	31233.13	200.46	3619.9	86929.38	147.65	4213.32	9523.45	208.58	1841.36	143006.59	351.31	7482.21
Longitud Eje menor (m)	118.56	12.5	48.31	143.38	16.36	44.94	74.95	18.79	36.74	161.86	13.51	37.25
Longitud Eje mayor (m)	142.25	22.99	53.59	209.49	25.73	65.77	139.97	36.59	68.21	472.73	42.34	98.8

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Datos de precipitación por estación meteorológica.

Estación	Precipitación				
	Mínima	Máxima	Promedio	ICI	IMF
Cobá	747.8	2125.6	1156.4	99.42	170
Cancún	817.5	2622.6	1384.9	99.42	224.1
Kantunilkín	1040.3	2734.2	1523.1	97.98	214.2
Victoria	1017.7	2277	1437.4	95.11	198.6
Solferino	708.2	1859.4	1258.3	94.54	177
Ideal	1072.5	2557	1448.9	93.39	203.9
Leona Vicario	501.9	1759.1	1165.5	89.94	164.3
Tulum	374.2	2177.8	1126.2	88.21	179.2
P. del Carmen	600.2	2790.4	1329.9	72.12	200.8
Cozumel	909.3	2235.3	1420.4	56.89	179.8
C. Vallarta	67.3	1794.6	834	53.1	130.7

Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA

3.1.1.3 Ascenso del nivel del mar.

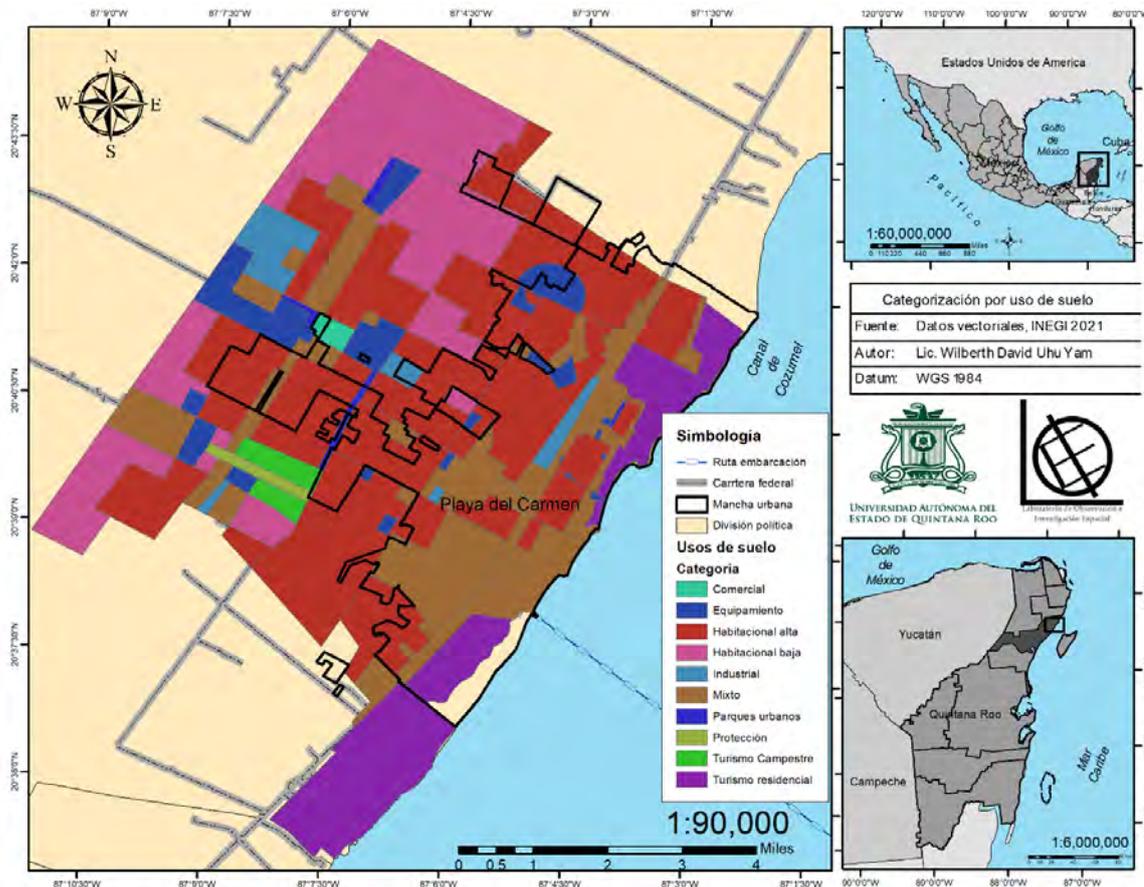
La ciudad de Playa del Carmen se ubica en el litoral costero y la altitud máxima es de 11 msnm. Por medio de las proyecciones del ascenso del nivel de mar de uno a cinco metros y la ubicación de las depresiones kársticas, se identifica que el 57.96% de éstas se verían afectadas si se considera la altitud del fondo de cada unidad. Por lo que el ascenso de un metro afectaría a 19 depresiones, con ascenso de tres metros tendría influencia en 93 unidades y con un escenario de ascenso de cinco metros afectaría 211 depresiones. Con respecto al nivel piezométrico, éste oscila de 2.15 a 19.11 m, al aplicar un análisis de interpolación, el nivel piezométrico de la zona urbana es de 6.40 m. La distancia de la línea de costa al límite de la urbana es de hasta 9 km.

3.1.1.4 Uso de suelo.

Se identificaron 630 polígonos con 24 diferentes usos de suelo. Principalmente de uso mixto barrial, ubicado en los bordes de las zonas de uso habitacional. Los usos de suelo con menor frecuencia son destinados a distrito de negocios, parques privados y la protección a pozos y humedales con un polígono. Conjuntamente, las zonas con mayor coeficiente de ocupación de suelo son las destinadas al uso comercial, con

autorización de construir hasta el 70% en el terreno. El uso del suelo se agrupo en 10 tipos principales (Figura 4) de acuerdo con las actividades permitidas señaladas en el plan de desarrollo urbano y dos polígonos destinados al crecimiento urbano (Tabla 6).

Figura 4. Reclasificación de los usos de suelo.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Descripción de los usos del suelo.

Uso de suelo	Descripción
Protección	Están destinados para la conservación de pozos y humedales, en estas zonas no está permitido la edificación de ningún tipo
Parques urbanos	Están destinados para la construcción de parques municipales, ecológicos y plazas cívicas
Equipamiento	Están destinados para edificios de administración pública y servicios como centros deportivos, escuelas, etc.
Turismo campestre	Permite la construcción de 10 viviendas o 20 cuartos por hectárea y no debe exceder de dos niveles
Turismo residencial	Permite la construcción de 25 viviendas o 50 cuartos por hectárea y no debe exceder de cuatro niveles
Habitacional de baja intensidad	permite la construcción de 20 viviendas con una densidad de 72 personas por hectárea
Comercial y de servicios	Permite la construcción de 40 viviendas por hectárea y pueden servir para mercados, cantinas, talleres de vehículos, gasolineras y restaurantes
Habitacional de alta intensidad	Permite la construcción de 60 viviendas con una densidad de 216 personas por hectárea
Industrial baja intensidad	Destinada a industria ligera como almacenamiento y envasado de lubricantes, bodega de productos que no impliquen alto riesgo y distribución de gas L. P
Mixto	Permite la construcción de 60 viviendas por hectárea y puede ser utilizado para actividades de uso comercial, habitacional, equipamiento e industrial ligero.
Crecimiento	Zonas designadas para la expiación urbana.

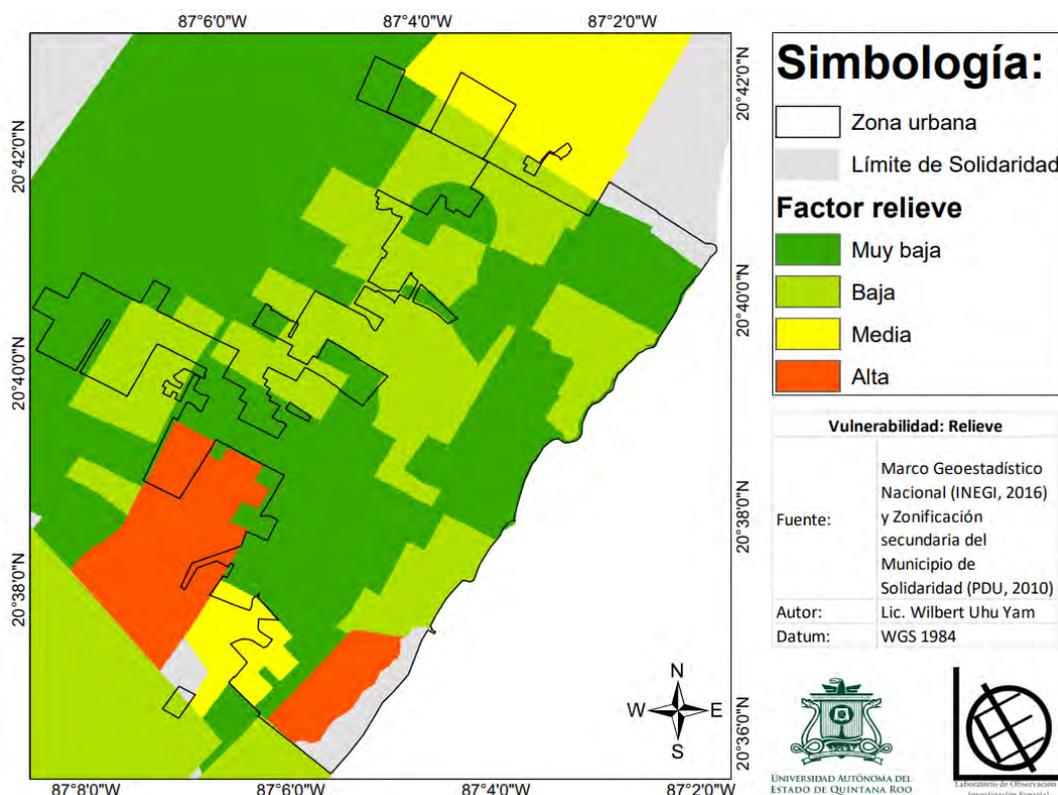
Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 ASIGNACIÓN DE PESOS

3.1.2.1 Relieve

Para el relieve se consideró dos variables: la frecuencia kárstica con un peso del 0.75 y la predominancia del tipo de depresión con un 0.25, obteniendo cuatro de las cinco categorías de vulnerabilidad (muy baja, baja, media y alta). Las áreas más vulnerables se identificaron al sur de la zona urbana, donde predomina el uso de suelo turístico residencia y habitacional de alta densidad, con una frecuencia de 29 a 37 depresiones con una predominancia de tipo dolinas-úvalas (Ver figura 5 y tabla 7).

Figura 5. Mapa de vulnerabilidad por el relieve.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Descripción de las categorías de vulnerabilidad (relieve, clima y ascenso del mar).

Descripción					
	Relieve		Clima	Ascenso del mar	
Categoría	Frecuencia	Predominancia	MFI	Distancia de la costa (km)	Aumento del nivel del mar (m).

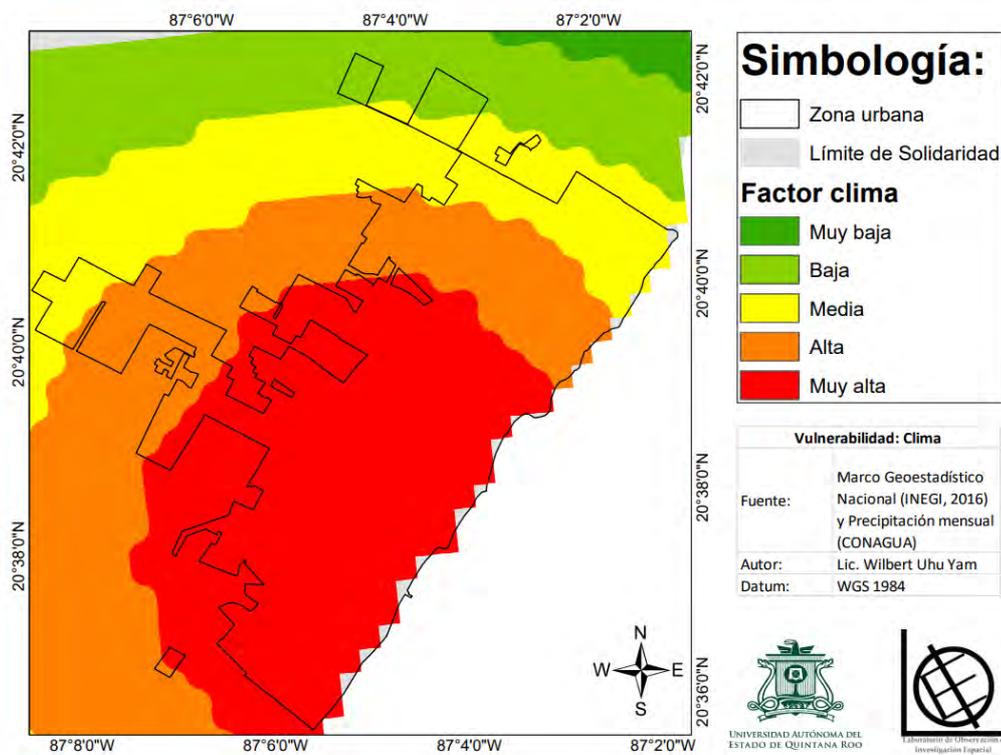
Muy baja	0-7	dolinas y dolinas-úvalas	185.02 - 189.58	7-9	
baja	8-19	dolinas, dolinas-úvalas, úvalas y poljes.	189.59 - 192.97	6-7	
Media	20-27	dolinas-úvalas	192.98 - 195.87	5-6	
Alta	28-37	dolinas-úvalas	195.88 - 198.46	3-5	
Muy alta	-	-	198.47 - 200.74	1-3	1-5

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2.2 Clima

Para el clima solo se consideró una variable, por lo que no fue necesario aplicar el método AHP, solamente se dividieron los resultados en 5 cuantiles (Tabla 7). Obteniendo las cinco categorías de vulnerabilidad. Identificando una mayor vulnerabilidad al sureste de la zona urbana con valores del índice de Fournier Modificado de 198.46 a 200.74 (Figura 6), ocupando gran parte de la mancha urbana.

Figura 6. Mapa de vulnerabilidad por el clima.

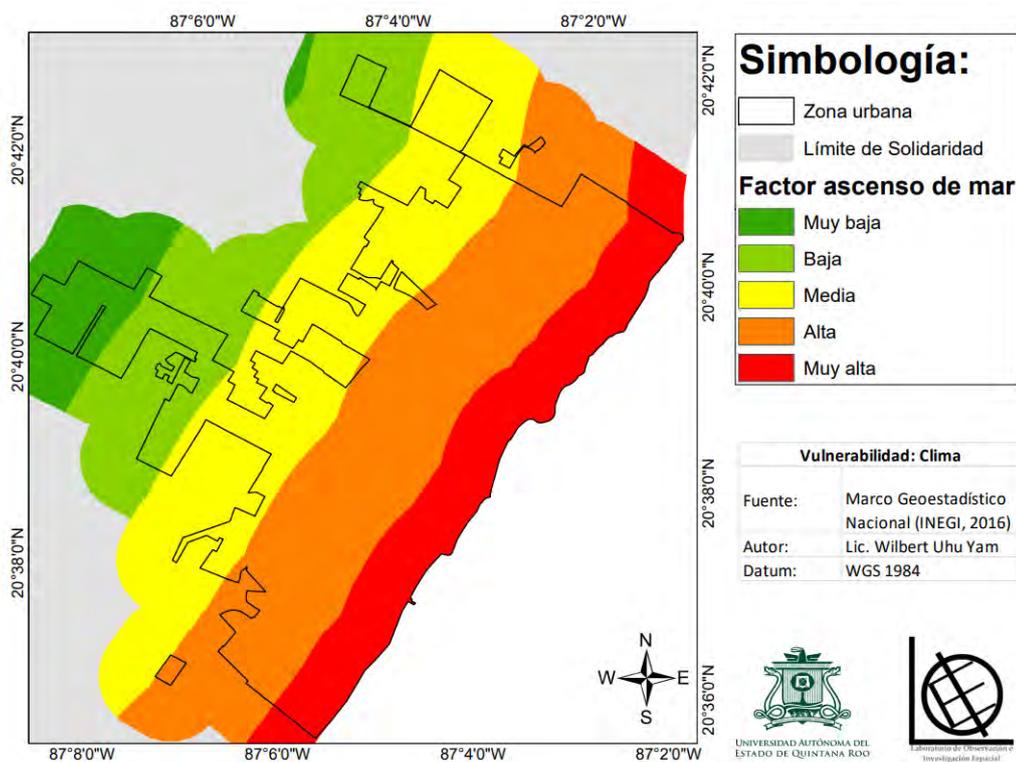


Fuente: Elaboración propia

3.1.2.3 Asenso del mar

Para el ascenso del mar, se propuso analizarlo desde 3 variables, sin embargo, al no contar con datos específicos el nivel piezométrico no se logró realizar diferenciación dentro de la zona urbana de Playa del Carmen, por lo que no se lo asigno un peso. Se trabajo con las variables: Proyecciones del aumento del nivel de mar que se consideró específicamente dentro de la categoría de vulnerabilidad extrema debido a la diferencia de unidad de medida con respecto a la variable distancia a la línea costera. Esta última variable se dividió en 5 cuantiles. Por lo que tampoco se utilizó el método AHP. Se obtuvo las cinco categorías de vulnerabilidad, atribuyéndole la mayor vulnerabilidad al área del primer kilómetro con respecto a línea de costa (Figura 7).

Figura 7. Mapa de vulnerabilidad por el aumento del nivel del mar.

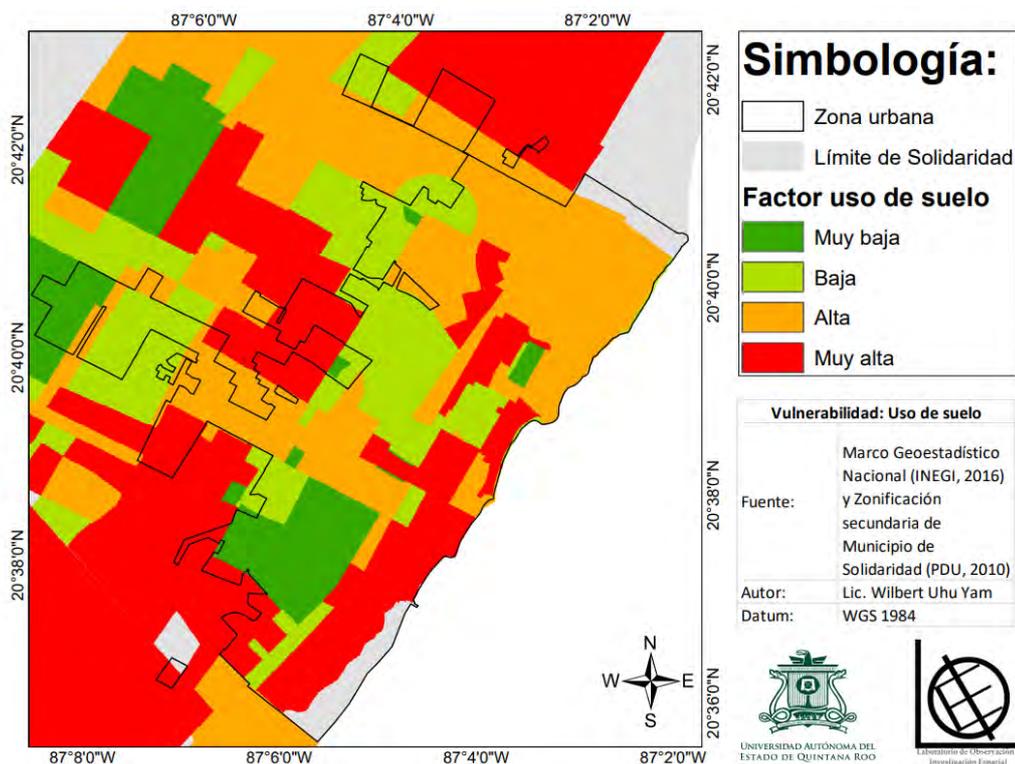


Fuente: Elaboración propia

3.1.2.4 Uso de suelo

Para este factor se consideró 2 variables: uso de suelos con un peso 0.83 y el coeficiente de ocupación del suelo con 0.17. Obteniendo cuatro categorías de vulnerabilidad (muy baja, baja, alta y muy alta), identificando la mayor vulnerabilidad en las zonas destinadas a usos mixtos y de crecimiento y un COS máximo del 80% (Figura 8 y Tabla 8)

Figura 8. Mapa de vulnerabilidad por el uso de suelo.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Descripción de las categorías del factor uso de suelo.

Categoría	Uso de suelo	COS (%)
Muy baja	Protección	0-5
	Parques urbanos	
Baja	Equipamiento	25-45
	Turismo campestre	
	Turismo residencial	
	Habitacional de baja intensidad	
Alto	Comercial y de servicios	50-65
	Habitacional de alta intensidad	
	Industrial baja intensidad	
	Mixto	
Muy alto	Crecimiento	70

Fuente: Elaboración propia

3.1.3 ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

3.1.3.1 Desarrollo de índice de vulnerabilidad

Considerando los cuatro factores y los resultados obtenidos, se presenta la construcción del índice de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos kársticos costeros de la zona urbana de Playa del Carmen.

Los pesos asignados para cada factor fueron: relieve; 0.18, clima; 0.07, ascenso del nivel del mar; 0.11 y el uso de suelo; 0.62 (Tabla 9 y 10), con un nivel de inconsistencia de 0.07. La fórmula es la siguiente:

$$IVCAKCU = (R \cdot 0.18) + (C \cdot 0.07) + (A \cdot 0.11) + (U \cdot 0.62)$$

Donde:

IVCAKCU: índice de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos kársticos costeros en zonas urbanas

R: relieve

C: clima

A: ascenso del nivel del mar

U: uso de suelo

Tabla 9. Asignación de valores por juicios.

	Relieve	Clima	Suelo	Aumento del mar
Relieve	1,0	2,0	0,2	3,0
Clima	0,5	1,0	0,1	0,5
Suelo	5,0	7,0	1,0	5,0
Aumento del mar	0,3	2,0	0,2	1,0
Suma	6,83	12,00	1,54	9,50

Fuente: Elaboración propia

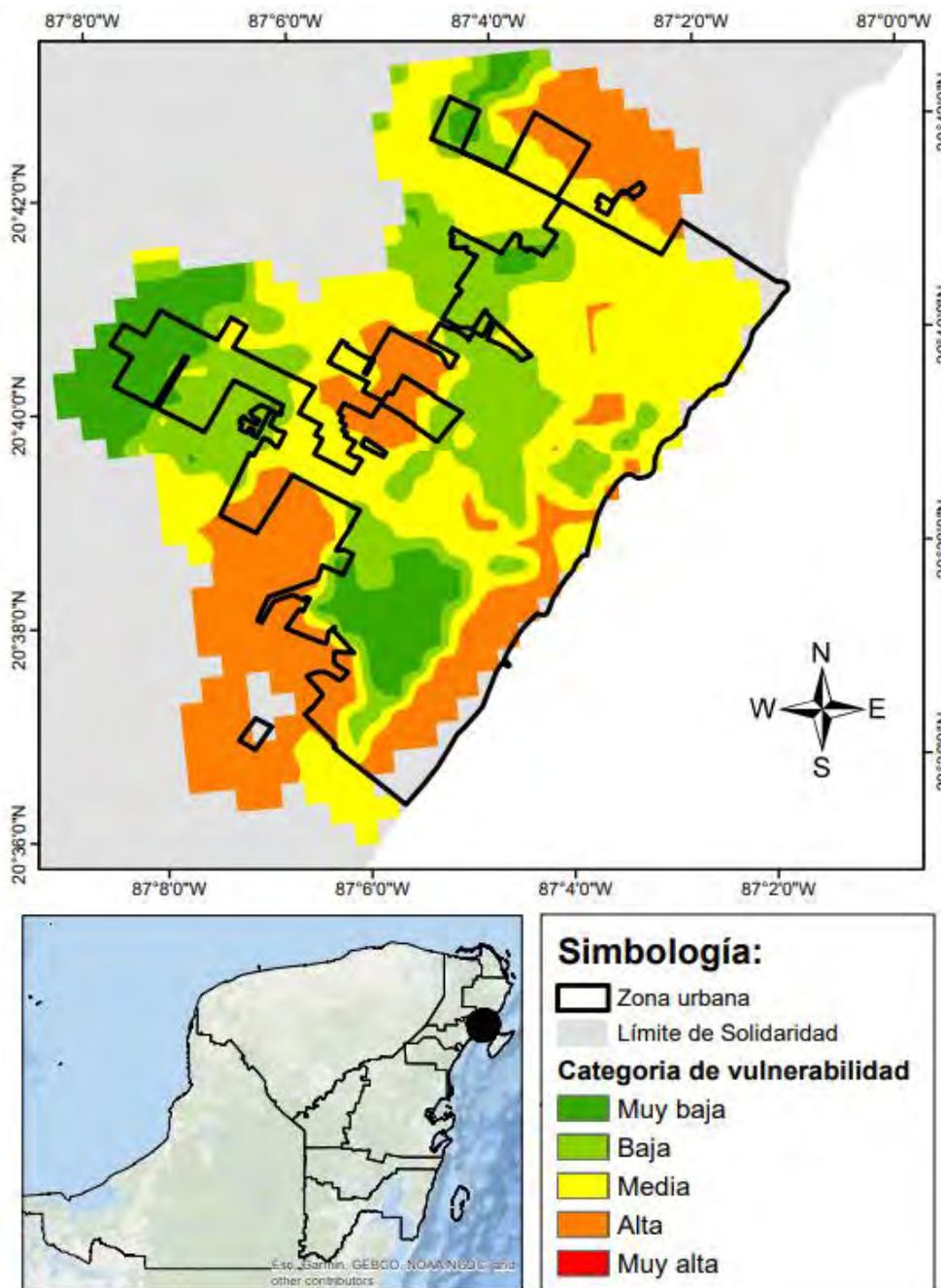
Tabla 10. Normalización de los valores por juicios.

	Relieve	Clima	Suelo	Aumento del mar	Pesos:
Relieve	0,14641	0,16667	0,12987	0,31579	0,19
Clima	0,07321	0,08333	0,09091	0,05263	0,08
Suelo	0,73206	0,58333	0,64935	0,52632	0,62
Aumento del mar	0,04832	0,16667	0,12987	0,10526	0,11

Fuente: Elaboración propia

Con el índice se identificó cuatro categorías de vulnerabilidad para la zona urbana de Playa del Carmen: muy baja, baja, media y alta (Figura 9). No se reportó zonas con vulnerabilidad muy alta debido a que el factor relieve tampoco presentó una vulnerabilidad muy alta.

Figura 9. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación de la zona urbana de Playa del Carmen.



Fuente: Elaboración propia

3.1.3.2 Categorías del índice de vulnerabilidad

Categoría alta: en esta categoría se encuentran usos de suelo destinados al crecimiento, uso habitacional y usos mixtos, con una frecuencia de 29 a 37 depresiones principalmente de tipo dolinas-úvalas, la intensidad de las lluvias se catalogó como muy alta al igual que las demás categorías de vulnerabilidad, sin embargo, existe una ligera variación entre los valores obtenidos del IMF y, en cuanto al nivel del mar, se estima un aumento del nivel del mar entre uno a cinco metros, resultando significativo ya que estas zonas se encuentran dentro del primer kilómetro con respecto a la línea de costera.

Categoría media: se encuentran los usos de suelo para uso comercial e industrial de baja intensidad, con una frecuencia de 20 a 27 depresiones principalmente de tipo dolinas-úvalas; en cuanto al clima, se catalogó dentro de la categoría de intensidad de lluvias muy alta, no se estima una afectación por el aumento del nivel de mar, sin embargo, por la distancia a la costa puede ser afectada. Esta categoría representa la mayor parte de la superficie del área urbana de Playa del Carmen.

Categoría baja: se encuentran los usos de suelo para equipamiento, turismo campestre y residencial, con una frecuencia de 8 a 19 depresiones, con una variedad de tipos de depresiones (úvalas, dolinas y dolinas-úvalas) predominantes por cada uso de suelo; el clima se catalogó dentro de la categoría de intensidad de lluvia muy alta, tampoco se estima afectación por las proyecciones del aumento del mar ya que se encuentran a una distancia entre los cinco a siete kilómetros de la costa.

Categoría muy baja: se encuentran los usos de suelo destinados a protección y parques urbanos, con una frecuencia menor a 8 depresiones con predominancia de dolinas y algunos usos de suelo no se registró ninguna depresión; el clima se catalogó dentro de la categoría de intensidad muy alta tampoco se estima afectación por las proyecciones del aumento del mar ya que se encuentran a una distancia superior a los ocho kilómetros de la costa. Esta categoría de vulnerabilidad representa el menor porcentaje de territorio.

DISCUSIÓN

El crecimiento de las ciudades en las zonas costeras del noreste de la Península de Yucatán es uno de los aspectos más significativos, con tasas muy altas de crecimiento y expansión poblacional, asociado al desarrollo de asentamientos irregulares, falta de planificación urbana y servicios de tratamiento de aguas residuales, aunado al impacto en ambientes naturales altamente sensibles, como cuevas, cavernas y cenotes (Frausto-Martínez *et al.* 2021).

Este tipo de crecimiento urbano en áreas kársticas afecta la calidad de los sistemas hídricos, ya que en ellos se realizan actividades de fabricación, almacenamiento y transporte que contienen sustancias potenciales para la contaminación de las aguas subterráneas. Por lo que se han desarrollado una gran variedad de índices para calcular la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos con la consideración de particularidades de las zonas de estudio, siendo los factores más utilizados el espesor de las capas sobre el sistema, profundidad del suelo, litología del acuífero, la conductividad hidráulica, la recarga neta, la infiltración y la pendiente del terreno (Ríos-Roja y Vélez-Otálvaro, 2008; Bolio-Barrientos *et al.* 2011; Doummar *et al.* 2012; Aguilar-Duarte *et al.* 2013; Estrada-Godoy *et al.* 2013; Torres Díaz *et al.* 2014), estos factores se centran en un análisis geohidrológico.

En comparación a la mayoría de los índices desarrollados, la construcción de este índice se basa en una combinación de métodos y enfoques, conocido como métodos híbridos (Antonakos y Lambrakis, 2006), tomando como punto de partida el IVAKY propuesto por Aguilar-Duarte *et al.* (2016) en el cual considera tres factores (relieve, clima y suelos). Estos estudios multienfoques tienen gran importancia en la actualidad y resultan más convenientes para resolver problemas ambientales más complejos (Aguilar-Duarte, 2016). Por lo que este índice consideró la integración de cuatro variables considerando características y problemáticas que se presentan en las zonas kársticas-costeras urbanizadas.

Debido al enfoque de este índice, fue necesario descartar y agregar nuevos factores de los ya propuestos en el IVAKY. Considerando únicamente los factores relieve y clima, que también han sido utilizados en otros índices como el EPIK, DRASTIC, COP.

El relieve, es un factor usado en diferentes índices como el EPIK, DRASTIC e IVAKY, permite identificar la intensidad de karstificación, tipo de recarga y el tipo de flujo subterráneo (Lindsey *et al.* 2010), así como una alta densidad de depresiones se deduce

como un epikarst desarrollado, por lo tanto, la vulnerabilidad es mayor (Aguilar-Duarte *et al.* 2016). Sin embargo, no se le dio el mismo grado de importancia debido a que el estudio se centra en zonas altamente urbanizadas y transformadas. A pesar de estos, se aplicó metodologías relativamente nuevas que permiten la diferenciación de las depresiones kársticas a un detalle fino (Frausto-Martínez *et al.* 2018; Colin-Olivares *et al.* 2019; Rodríguez-Castillo *et al.* 2021), logrando trabajar a una escala 1: 10 000, mientras que trabajos de Aguilar-Duarte *et al.* (2016); Ben y Villarroja (2016); Bolio-Barrios *et al.* (2011) trabajan a una escala superior a 1: 50 000. Obteniendo un reconocimiento de la vulnerabilidad con mayor precisión para este factor.

El clima, es un factor donde se analiza la precipitación, debido a que es el vínculo por el cual los contaminantes se pueden transportar de la superficie al agua subterránea (Bautista y Aguilar-Duarte, 2011; Taylor *et al.* 2012), este puede ser analizado con la cantidad e intensidad de lluvia anual utilizada en el modelo COP (Doummar *et al.* 2012), con la aplicación del índice de aridez, índice de concentración de precipitación o índice de Arkley (Bautista y Aguilar-Duarte, 2011) o por medio de la distribución espacial con la duración del periodo de lluvias propuesto por Delgado-Carranza *et al.* (2011), calculado a partir de datos de precipitación y temperatura, este último implementado en el modelo IVAKY (Aguilar-Duarte *et al.* 2016). A pesar de la gran diversidad de métodos para incorporar este factor, el problema más grande es la carencia de información para su análisis a una escala detallada, por lo que se decidió usar una opción sencilla de calcular, a partir de la información disponible, la agresividad de lluvia con el Índice Modificado de Fournier, ya que solo se necesitan datos de precipitación mensual de las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio. Cabe mencionar que los resultados obtenidos son generales y a una escala media, por lo que se les dio una menor importancia con respecto a los otros factores.

Los otros dos factores agregados son ajenos a los propuestos en el IVAKY: el ascenso del nivel del mar como un factor significativo para este estudio, debido al potencial de la intrusión salina y la presencia de las en las depresiones kársticas. (Medina-Moreno *et al.* 2014, Hoogesteijn-Reul *et al.* 2015, Contreras-Tax *et al.* 2021). Se considera la presencia de depresiones kársticas para el cálculo de vulnerabilidad (Plan *et al.* 2009) por el hecho de tratarse de una zona costera, ya que el aumento del nivel del mar es la principal impacto del cambio climático (Nicholls y Cazenave, 2010), donde se puede reconocer los efectos como la inmersión total, un incremento en las inundaciones de la costa, pérdida o cambios en hábitats (incluso islas), erosión costera e intrusión de agua salina sobre las aguas superficiales y los mantos acuíferos (Nicholls, 2015). El Ascenso del mar, ha sido abordado por el Panel Intergubernamental de

Cambio Climático debido a su importancia en términos ecológicos y económicos (Ruiz-Ramírez *et al.* 2014; Ruiz-Ramírez *et al.* 2020), para este estudio solo se considera por su importancia ecológica, específicamente por la instrucción salina, pudiendo afectar la calidad del agua subterránea. A pesar de su relevancia este factor no se ha incorporado en la construcción de un índice de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos, pero si es un tema que ha sido estudiado de manera paralela, ya que se han desarrollado índices para calcular la vulnerabilidad de las costas, pero con un enfoque de sensibilidad y capacidad de adaptación de la costa ante esta potencial subida del nivel del mar (Ojeda-Zújar *et al.* 2009). Por lo que este estudio, incorpora este factor utilizando variables propuestas en el índice de vulnerabilidad Costera (Ojeda-Zújar *et al.* 2009). En la actualidad ya existen estudios que muestran las consecuencias del aumento del mar, en trabajo de Ruiz-Ramírez *et al.* (2020) muestra los escenarios de aumento del mar para la ciudad de Playa del Carmen y deja en evidencia los daños potenciales que trae consigo el aumento del mar, ya que estima una afectación de 90 895 m² con un aumento de tres metros.

Y finalmente el segundo factor agregado es el uso de suelo debido al avanzado desarrollo urbano de la zona costera (Pousa *et al.* 2007 y Barragán y de Andrés 2016). Tradicionalmente, se considera al suelo como un factor significativo en los modelos de vulnerabilidad, considerando características de espesor, textura y tipos de arcillas como en el modelo KARSTIC (Davis *et al.* 2002), también se puede abordar considerando la permeabilidad del suelo como en el modelo KAVI (Aguilar-Duarte *et al.* 2013) o a partir de las asociaciones edáficas, para cada unidad geomorfopedológica del IVAKI (Aguilar-Duarte *et al.* 2016). Pero estas variables funcionan para estudios a escalas medias, ya que no existe información a nivel de detalle o donde se tienen sitios con bajo nivel de transformación natural del paisaje. El uso de suelo, es el factor principal para el análisis de la vulnerabilidad de este estudio, debido a que el área de estudio se encuentra urbanizada, este proceso afecta las propiedades naturales del suelo (Pousa *et al.* 2007; Momejian *et al.* 2019). Sin embargo, este proceso de urbanización suele ser conflictivo ya que afecta la recarga de los acuíferos de dos formas: a) lo potencializa debido a la reducción de la cubierta impermeable, la escorrentía urbana de pozos secos y su posterior infiltración, el rebose del alcantarillado y tuberías de agua y el riego excesivo. B) disminuye la recarga por las superficies impermeables, la captación de aguas por la red pluvial y la extracción del agua (Howard y Gerber, 2017). Posiblemente por esta razón este factor es poco considerado en los índices de vulnerabilidad. Entre los estudios que lo han considerado son: Ramírez y Alfaro (2002) no directamente en la aplicación de índice denominado DI-O-S, pero si consideró los principales usos que se

le da al suelo del área estudiada, asignando tres grados de vulnerabilidad a los mismos usos de suelo según los límites permisibles en cada uno, Howard y Gerber (2017) y Serra *et al.* (2021) tomaron en consideración el uso de suelo para su estudio de la contaminación de aguas subterráneas, González Herrera *et al.* (2018) modificó el método DRASTIC agregando un análisis del uso de suelo y Heiða (2020) incorporó el uso de suelo a su análisis con índice DRASTIC.

Para la vulnerabilidad por factor, se observa que el clima tiene un comportamiento inverso a los resultados reportados para el estado de Yucatán con el modelo IVAKY, donde la mayor vulnerabilidad se ubica al centro de Yucatán y disminuye conforme se aproxima a la costa (Aguilar-Duarte *et al.* 2016); en el factor relieve su distribución es más homogénea y con tendencia a una vulnerabilidad alta y muy alta para ambos estudios; para el ascenso del nivel de mar, la vulnerabilidad más alta se encuentra en las zonas próximas a la costa, lo cual coincide con los estudios de Chachadi y Lobo-Ferrerira (2001) y Blanco-de-la-Paz *et al.* (2018).

Otro punto considerado en la implementación de este índice fue la escala, ya que se trabajó de manera detallada a 1: 10 000, tal como lo recomienda Aguilar-Duarte *et al.* (2016) con la finalidad de establecer mejores recomendaciones de uso del territorio; ya que los índices propuestos fueron diseñados para trabajar a una escala superior a 1: 25 000 (Foster, 1987; Aller *et al.* 1987; Hölting *et al.* 1995; Ramírez y Alfaro, 2002; Davis *et al.* 2002; Ortega & Miranda, 2004; Goldscheider, 2005; Van Beynen *et al.* 2012; Taheri *et al.* 2015; Aguilar-Duarte *et al.* 2016). Esta escala permite obtener una visión más detallada del área de estudio, sin embargo, trabajar a este nivel de detalle tuvo sus limitantes por falta de información o al menos para la zona elegida para desarrollar este índice.

CONCLUSIÓN

Los índices de vulnerabilidad a la contaminación son de gran importancia para la gestión territorial. Sin embargo, las propuestas para calcularlo se han ido modificando según las necesidades y características de cada zona estudiada. Los factores propuestos para la construcción de un índice de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos kársticos presenta las formas del relieve a una escala detallada permitiendo una diferenciación fina de la vulnerabilidad; asimismo, al incorporar el factor uso de suelo permitió un análisis de todo el área de estudio, a pesar de que esta se encuentra en su mayor parte urbanizada; el factor ascenso del mar muestra el grado de vulnerabilidad ya no solo en un plano vertical, sino horizontal. Dicho factor es importante considerarlo debido a la proximidad de la ciudad con el mar. Por último, el factor clima auxilió en dar una aproximación de la realidad; sin embargo, es necesario el uso de otros insumos, ya que no se cuenta con estaciones meteorológicas a escala local. A pesar de las limitantes que se encontraron, con el análisis de los cuatro factores se hace posible una primera aproximación multidisciplinaria de la vulnerabilidad a una escala detallada (1: 10 000), por lo tanto, los factores propuestos pueden ser utilizados para la construcción de un índice de vulnerabilidad para acuíferos kársticos-costeros en zonas urbanas y este puede ser replicado a diferentes zonas con características similares. Y también, se asientan las pautas para el cambio del enfoque tradicional donde solo se consideran las características naturales del ecosistema.

LIMITANTES Y RECOMENDACIONES

Los factores utilizados para calcular la vulnerabilidad proporcionaron un mapa con la clasificación del grado de vulnerabilidad para la zona urbana de Playa del Carmen, el cual es una propuesta que permitirá desarrollar estrategias para la preservación del recurso hídrico subterráneo y asegurar la calidad del agua. Sin embargo, es importante mencionar las limitaciones de datos que se presentaron. Además, proporcionar recomendaciones para investigaciones adicionales con la intención de poder afinar este estudio.

Las limitantes se presentaron para el factor climático, ya que no se logró obtener una estimación precisa de la precipitación debido a la ausencia de estaciones meteorológicas dentro de la zona urbana, por lo que se recomienda la instalación de estaciones meteorológicas para obtener datos específicos o explorar otras opciones para poder trabajar el factor clima a la misma escala (1: 10 000) que los demás factores. Otro factor, es el aseso del nivel del mar, ya que tampoco se encontró información del nivel piezométrico detallado para la zona urbana, se recomienda trabajar en la homogenización de las unidades de medida trabajadas, ya que las proyecciones del aumento del mar se trabajaron en metros, mientras que la distancia de la costa en kilómetros, por lo que no se logró una diferenciación detallada entre estos dos factores.

Por último, las recomendaciones son seguir trabajando en la incorporación del factor usos de suelo dentro de los índices de vulnerabilidad, ya que cada vez, las zonas están siendo urbanizadas, afectando las propiedades naturales del suelo. Así mismo, el uso de suelo permite darle un valor de vulnerabilidad considerando las actividades que se desarrollan dentro de una zona específica, que resulta conveniente y más para zonas donde se desarrollan actividades con uso de sustancias peligrosas.

REFERENCIAS

- Aguilar-Duarte, Y., F. Bautista, M. Mendoza y C. Delgado-Carranza. 2013. Vulnerabilidad y riesgos de contaminación de acuíferos kársticos. *Tropical y Subtropical Agroecosystems* 16: 243-263.
- Aguilar-Duarte, Y., F. Bautista, M. Mendoza, O. Frausto-Martinez, T. Ihl y C. Delgado. 2016. IVAKY: ÍNDICE DE LA VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO KÁRSTICO YUCATECO A LA CONTAMINACIÓN. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15: 913–933.
- Albinet, M. and J. Margat. 1970. Groundwater Pollution Vulnerability Mapping. *Bulletin du Bureau de Recherches Géologiques et Minières Bull BRGM 2nd Series* 3: 13-22.
- Aller, L., T. Bennett, R. Petty, G. Hackett. 1987. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_Report.cfm?Lab=ORD&dirEntryID=35474. Drastic a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/2-85/018. Última actualización: 16/04/2004. Fecha de consulta: 29 de octubre de 2021.
- Antonakos, A. y N. Lambrakis. 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.
- Arnoldus, H. 1980. An approximation to the rainfall factor in the universal soil loss equation. in: M. Boodt and D. Gabriels (Eds.). *Assessment of Erosion* (pp. 127-132).
- Auge, M. 2004. Vulnerabilidad de acuíferos. *Hidrogeología* 4: 85–103.
- Ávila-Verdín, E, G., N. Rosas-Topete, I. Sandoval-Galaviz, A. Arciniega-Ponce & E. Pérez-Soriano. 2016. Legislación y la cultura del agua: análisis correlacional en Nayarit / Legislation and water culture: correlational analysis in Nayarit. *CIBA Revista Iberoamericana de Las Ciencias Biológicas y Agropecuarias* 5 (9): 186–210.
- Barragán, J, M. y M. de Andrés. 2016. Expansión urbana en las áreas litorales de América Latina y Caribe. *Revista de Geografía Norte Grande* 64: 129-149.
- Bautista, F., Y. Aguilar-Duarte y E. Batllori. 2011. Vulnerabilidad y riesgo de

- contaminación de las aguas subterráneas en la península de Yucatán. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(2): 7-8.
- Bautista-Zuñiga, F. y Y. Aguilar-Duarte. 2021. Riesgo de Inundación Ante Lluvias Extremas en el Karst de la Ciudad De Mérida Yucatán México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 24(35): 1-12.
- Ben, N. y F. Villarroya. 2016. Aplicación del método DRASTIC para la cartografía de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de R ' mel (Larache , Marruecos) [Application of DRASTIC method for mapping vulnerability to contamination of aquifer R ' mel (Larache , Morocco)]. *Revista Internacional de Innovación y Estudios Aplicados* 17(3): 927–946.
- Blanco de la Paz. E., O. Brown-Manrique y R. Márquez-Gurri. 2018. Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas en la cuenca sur de Ciego de Ávila. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental* 39(1): 73-83
- Bolio-Barrientos E., F. Bautista y J. Pacheco-Ávila. 2011. Uso de la metodología EPIK para determinar la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en Yucatán, México. *Revista Teoría y Praxis* 9: 55–72.
- Cardona, O, D. 2001. La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. Una crítica y una revisión necesaria para la gestión. *In International Work-Conference on vulnerability in Disaster Theory and practice* (pp. 29-30). Centro de Estudios Sobre Desastres y Riesgos. Wageningen, Holanda.
- Carretero, S. y E. Kruse. 2014. Impacto de la urbanización en la infiltración en un área costera, Argentina. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(6): 5-24.
- CCPY. 2011. *Programa Municipal de Desarrollo Urbano de Solidaridad (2010-2050)*. Ayuntamiento del Municipio de Solidaridad. Gobierno del Estado de Quintana Roo, México.
- Chachadi, A. y J., P. Lobo-Ferreira. 2001. Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using GALDIT method. *Coastin* 4: 7-9.
- Colin-Olivares O., O. Frausto-Martínez y J., F. Rodríguez-Castillo. 2019. Cálculo automatizado de la profundidad de depresiones kársticas a escala detallada. En: O. Frausto-Martínez (Ed.) *Conocimientos y saberes del karst tropical en México*. (pp. 55–78).

- CONAGUA. 2019. <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/agua-en-el-mundo> . Agua en el Mundo Comisión Nacional del agua México. Última modificación: 09 de octubre de 2019. Fecha de consulta 28 de octubre de 2021.
- Contreras-Tax A., O. Frausto-Martínez y W. Uhu-Yam. 2021. Calidad del Agua Subterránea en una Zona Kárstica de la Isla de Cozumel, Quintana Roo, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 24 (27): 1-14.
- Daly, D, A. Dassargues, D. Drew, S. Dunne, N. Goldscheider, S. Neale, I., C. Popescu and F. Zwahlen. 2002. Main concepts of the “European approach” to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal*, 10(2): 340–345.
- Davis, A, D., A. Long, & M, Wireman. 2002. KARSTIC: A sensitivity method for carbonate aquifers in karst terrain. *Environmental Geology*, 42(1): 65–72.
- Delgado-Carranza C., F. Bautista, R. Orellana-Lanza y H. Hernández. 2011. Classification and agroclimatic zoning using the relationship between precipitation and evapotranspiration in the state of Yucatan, México. *Journal Investigations Geographics* 75: 51-60.
- Doerfliger, N., P. Jeannin & F. Zwahlen. 1999. Water vulnerability assessment in karst environments: A new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental Geology* 39(2): 165–176.
- Doummar, J., A. Margane, T. Geyer & M. Sauter. 2012. Protection of Jeita Spring: Vulnerability Mapping Using the COP and EPIK Methods (Issue October). ”. Department of Applied Geology, University of Göttingen, Germany & Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Germany (pp: 42).
- Duarte, Y, A., F. Bautista, M, E. Mendoza, & C. Delgado. 2013. Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kársticos. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 16(2): 243–263.
- Estrada-Godoy F., J. Silva-García, S. Ochoa-Estrada, R. Moncayo-Estrada, G. Cruz-Cárdenas, F. Villalpaldo-Barragán, A. Ramos-Leal y J. Nava-Velázquez. 2013. Aplicación del método Sintacs para la determinación de la vulnerabilidad acuífera en la Cuenca del Río Duero, Michoacán, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 29: 235-248.

- Espitia-Fernández J.D. 2020. *Vulnerabilidad del acuífero del río Magdalena ante la contaminación, métodos DRASTIC, GOD y SINTACS en el departamento del Atlántico*. Tesis de licenciatura. Universidad del Norte, Barranquilla. 34 p.
- Foster, S. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: W. Van Duijvenbooden, H, G, Van Waegeningh (eds), *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants* (pp 69–86).
- Fragoso-Servón P., F. Bautista, O. Frausto y A. Pereira. 2014. Caracterización de las depresiones kársticas (forma, tamaño y densidad) a escala 1:50,000 y sus tipos de inundación en el Estado de Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 31(1): 127–137.
- Frausto-Martínez O., N, A. Zapi-salazar, O. Colin-olivares. 2018. Identification of Karst Forms Using LiDAR Technology: Cozumel Island, Mexico. In: R. Abdalla (ed) *Trends in geomatics-an earth science perspective* (pp: 41-54). IntechOpen. United kingdom.
- Frausto-Martínez O., O. Colín-Olivares , J, F. Rodríguez-Castillo. 2021. Karst en la ciudad: planificación del espacio urbanístico de la zona urbana de Cozumel, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 24(1): 31.
- Goldscheider, N. 2005. Karst groundwater vulnerability mapping: Application of a new method in the Swabian Alb, Germany. *Hydrogeology Journal* 13(4): 555–564.
- González-Herrera, R, A., B. Albornoz-Euán, I, A., Sánchez y Pinto y J, H., Osorio-Rodríguez. 2018. El acuífero yucateco. Análisis del riesgo de contaminación con apoyo de un sistema de información geográfica. *Revista internacional de contaminación ambiental* 34(4): 667-683.
- Guo, Y., Y. Zhai, Q. Wu, Y. Teng, G. Jiang, J. Wang, F. Guo, Q. Tang & S. Liu. 2016. Proposed APLIE method for groundwater vulnerability assessment in karst-phreatic aquifer, Shandong Province, China: a case study. *Environmental Earth Sciences* 75(2): 1–14.
- Heiß, L., L. Bouchaou, S. Tadoumant & B. Reichert. 2020. Index-based groundwater vulnerability and water quality assessment in the arid region of Tata city (Morocco). *Groundwater for Sustainable Development* 10: 100344.
- Hölting, B., T. Haertle, K. Hohberger, H. Eckl, J. Hahn & C. Koldehoff. 1995. Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. *Geologisches Jahrbuch* 63: 5–24.

- Hoogesteijn-Reul A. L., J. Febles-Patrón y V. Nava-Galindo. 2015. La contaminación fecal en cenotes de interés turístico y recreacional del estado de Yucatán. *Revista Académica de la Facultad de Ingeniería* 19(3):169-175.
- INEGI. 2012. <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/?tg=1015>. Mapas. México. Última actualización: 2012. Fecha de consulta: 20 de junio de 2021.
- Lindsey B, D., B. Katz, M. Berndt, A. Ardis y K. Skach. 2010. Relations between sinkhole density and anthropogenic contaminants in selected carbonate aquifers in the eastern United States. *Environmental Earth Sciences* 60(5): 1073-1090
- Mangoua, O., J. Kouassi, K. Kouassi, W. Douagui, G. Savane, & J. Biemi. 2020. Assessment of vulnerability to groundwater pollution in Department of Odienné (North-West Côte d'Ivoire). *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development* 12(3): 297–303.
- Medina-Moreno, S, A., A. Jimenez-Gonzales, M. Gutierrez-Rojas y M. Lizardi-Jiménez. 2014. Estudios de Contaminación por Hidrocarburos en Cenotes De Quintana Roo Relacionada Al Desarrollo Turístico en el Caribe Mexicano. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 13(2): 509-516.
- Mendoza, A., C. Solano, Cristian, D. Palencia y D. Garcia. 2019. Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la toma de decisión con juicios de expertos. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 27(3): 348-360.
- Momejian, N., M. Abou Najm, I. Alameddine, & M. El-Fadel. 2019. Groundwater Vulnerability Modeling to Assess Seawater Intrusion: a Methodological Comparison with Geospatial Interpolation. *Water Resources Management* 33(3): 1039–1052.
- Nantes, E, A. 2019. El método analytic hierarchy process para la toma de decisiones: repaso de la metodología y aplicaciones. Investigación operativa. En RIDCA.
- Nicholls, R, J. 2015. Adapting to Sea Level Rise. In: J. Shroder, J. Ellis and D. Sherman (eds) *Coastal and Marine Hazards, Risks, and Disasters* (pp. 243-270). Elsevier.
- Nicholls, R, J. & A. Cazenave. 2010. Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. *Journal Science* 328: 1517-1520.
- Ojeda-Zújar, J., J. Álvarez-Francoso, D. Cajaraville & P. Fraile-Jurado. 2009. El uso de las TIG para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera (CVI) ante una potencial subida del nivel del mar en la costa andaluza (España). *GeoFocus* 9: 83–101.

- Ortega, R, M, V., & W. Miranda. 2004. Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas en los acuíferos cubanos. Iv seminario-taller. Protección de acuíferos frente a la contaminación: protección de la calidad del agua, p. 13.
- Ortiz-Pérez, M, A., y A. Méndez-Linares. 1999. Escenarios de vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar en la costa mexicana del Golfo de México y el Mar Caribe. *Investigaciones Geográficas* 39: 68-81.
- Ortiz-Pérez, M, A., & A. Méndez-Linares. 2004. Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar y sus implicaciones en las costas bajas del golfo de México y mar caribe. In E. Rivera-Arriaga, G. Villalobos, I. Azuz-Adeath & F. Rosado-May (Eds.). *El manejo Costero en México* (pp. 307).
- Pedrozo-Acuña A. 2012. Impactos del incremento en el nivel medio del mar en la zona costera del Estado de Quintana Roo, México. Secretaría de Ecología y Medio Ambiente de Quintana Roo y el Banco Mundial.
- Pérez-Ceballos, R. y J. Pacheco Ávila. 2004. Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. *Ingeniería* 8(1): 33–42.
- Plan, L., K. Decker, R. Faber, M. Wagneich y B. Grasemann. 2009. Karst morphology and groundwater vulnerability of high alpine karst plateaus. *Journal Environmental Geology* 58: 285-297.
- PNUD-INECC. 2016. Impacto de la elevación del nivel del mar en la superficie y línea de costa de 35 islas pobladas y prioritarias de México. Informe Final. 24p. Ciudad de México.
- Pousa, J., L. Tosi, E. Kruse, D. Guaraglia, M. Bonardi, F. Rizzetto y E. Schnack. 2007. Coastal Processes and Environmental Hazards: The Buenos Aires (Argentina) and Venetian (Italy) Littorals. *Journal Environmental Geology* 51: 1307-1316.
- Ramírez-Ch, R. y A. Alfaro. 2002. Mapa de vulnerabilidad hidrogeológica de una parte del Valle Central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central* 27: 53–60.
- Ríos-Roja, L. y M. Vélez-tálvaro. 2008. Vulnerabilidad a La Contaminación, Zona Sur Acuífero Del Valle Del Cauca, Colombia. *Boletín de Ciencias de La Tierra* 23: 69–84.
- Rivera-Arriaga, E., I. Azuz-Adeath, O. Rosas-Cervantes, A. Espinoza-Tenorio, R. Silva-Casarín, A. Ortega-Rubio, A. Botello y B. Vega-Serratos. 2020. *Gobernanza y Manejo de las Costas y Mares ante la Incertidumbre. Una Guía para Tomadores de Decisiones*. 894 p.. Universidad Autónoma de Campeche, ricomar.

- Rodríguez-Castillo J, F., O. Frausto-Martínez y O. Colin-Olivares O. 2021. Morphometry of karst depressions at detailed scale: El Cedral, Cozumel – Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 24(1).
- Ruiz-Ramírez, J, D., J. Euán-Ávila, & E. Torres-Irineo. 2014. Tendencias del nivel del mar en las costas del Caribe mexicano. *European Scientific Journal* 10(20): 86-96.
- Ruiz-Ramírez, J. D., M. Gutiérrez-Aguirre y O. Frausto-Martínez. 2020. Biodiversidad y vulnerabilidad de Playa del Carmen ante el incremento del nivel medio del mar. In O. Vargas-Delgado (Ed.), *Handbook T-IX CIERMMI Mujeres en la Ciencia Biología* (pp. 95–106).
- Ružić, I., S. D. Jovančević, Č. Benac & N. Krvavica. 2019. Assessment of the coastal vulnerability index in an area of complex geological conditions on the krk island, northeast adriatic sea. *Geosciences (Switzerland)*: 9(5).
- SEDUMA. 2008.
<http://sema.qroo.gob.mx/bitacora/index.php/decretos/municipiodesolidaridad/category/20-documentos-tecnicos?download=89:caracterizacion-del-poel-solidaridad>. Caracterización del POEL del Municipio de Solidaridad, Quintana Roo. México. Última actualización: 2016. Fecha de consulta 12 de mayo de 2021.
- SDETAI. 2021.
<https://gobiernodesolidaridad.gob.mx/wpcontent/uploads/2021/03/CIDE01.pdf>. Catálogo de inversiones y diversificación económica. Gobierno de Solidaridad. Última actualización: 2021. Fecha de consulta 12 de mayo de 2021.
- SEDETUR. 2020.
[https://sedeturqroo.gob.mx/pmts2030/documentos/marco_normativo/Programa Sectorial de Diversificación y Desarrollo Integral del Turismo.pdf](https://sedeturqroo.gob.mx/pmts2030/documentos/marco_normativo/Programa_Sectorial_de_Diversificacion_y_Developimiento_Integral_del_Turismo.pdf). Actualización del programa sectorial de diversificación y desarrollo del turismo. Última actualización: 2020. Fecha de consulta 12 de mayo de 2021.
- Serra, J., M. Cameira, C. Cordovil & N. Hutchings. 2021. Development of a groundwater contamination index based on the agricultural hazard and aquifer vulnerability: Application to Portugal. *Science of The Total Environment* 772: 145032.
- Taheri, K., M. Taheri & F. Mohsenipour. 2015. LEPT, A Simplified Approach for Karst

- Assessing Vulnerability in Regions with Sparse Data; A Case Study From Kermanshah Province, Iran. 14th Sinkhole Conference, NCKRI Symposium (483–492).
- Taylor, R., B. Scanlon, P. Döll, M. Rodell, R. Van Beek, Y. Wada, L. Longuevergne, M. Leblanc, J. Famiglietti, M. Edmunds, L. Konikow, T. Green, J. Chen, M. Taniguchi, M. Bierkens, A. MacDonald, Y. Fan, R. Maxwell, Y. Yechieli y H. Treidel. 2012. *Ground water and climate change. Nature Climate Change* 3(4): 322–329.
- Torres-Díaz, M., Y. Basulto-Solis, J. Cortés-Esquivel, K. García-Uitz, Á. Koh-Sosa, F. Puerto-Romero, & J. Pacheco-Ávila. 2014. Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación del agua subterránea en Yucatán. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 1(3): 189–203.
- Torres-Mota R., P. Salles-Afonso-de-Almeida y J. López-González. 2014. Efectos del aumento del nivel del mar por cambio climático en la morfología de la ría de Celestún, Yucatán. *Tecnología y Ciencias del Agua* 5(5): 5-20.
- UNESCO. 2006. Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semi-áridas, y sub-húmedas secas de América Latina y el Caribe. CAZALAC. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°3. 58 pp. ISBN: 92-9089-088-6
- Valcerce-Ortega R, M. y C. Forcada-Labrador. 2021. Evaluación de la vulnerabilidad a la intrusión marina en el sector Güira–Quivicán del acuífero costero Cuenca Sur de Artemisa y Mayabeque. *Revista Minería y Geología* 37(1): 30-43.
- Van Beynen, P, E., M. Niedzielski, E. Bialkowska-Jelinska, K. Alsharif, & J. Matusick. 2012. Comparative study of specific groundwater vulnerability of a karst aquifer in central Florida. *Applied Geography* 32(2): 868–877.
- Zhou, Y., F. Yang, X. Wu, C. Jia, S. Liu, & Y. Gao. 2020. Bibliometric analysis of research progress on karst groundwater pollution. IOP Conference Series: Earth and *Environmental Science*: 568(1): 012040.
- Zwahlen, F. 2003. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, scope, goal, results. European Commission, COST Action 620, Belgium.

ANEXOS

Anexo 1. Valores para la asignación de peso por cada variable.

Categoría	RELIEVE			CLIMA	ASCENSO DEL MAR			USO DE SUELO	
	Valor	frecuencia	Tipos	Valor (IMF)	Distancia (km)	Proyección (m)	Nivel piezométrico (m)	Uso de suelo	COS (%)
Muy bajo	1	<7	sin registro	178,86-186,07	8-9	-	6,4	Protección	<14
Bajo	2	8-14	dolinas	186,08-190,53	6-7	-	6,4	Equipamiento, Parques urbanos y Turismo campestre	15-28
Medio	3	15-21	dolinas-úvulas	190,54-194,30	4-5	-	6,4	Habitacional de baja intensidad	29-42
Alto	4	22-28	úvulas	194,31-197,39	2-3	-	6,4	Comercial, Turismo residencial e Industrial	43-54
Muy alto	5	>29	poljes	197,40-200,74	1	1-5	6,4	Habitacional de alta intensidad, Mixto y Crecimiento	55-70

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2. Tablas con pesos y valores de los factores: relieve, clima, ascenso del mar y uso de suelo.

[anexo 2.xlsx](#)