



11







# Riesgo de hundimientos y subsidencia kárstica en la zona maya de Quintana Roo

**María Luisa Hernández Aguilar**  
Universidad de Quintana Roo  
malu@uqroo.edu.mx

## 11.1. Resumen

El karst es uno de los fenómenos geológicos que debe ser considerado como fuente potencial de riesgo en el territorio y, en particular, en zonas urbanas. Los paisajes kársticos, del municipio de Felipe Carrillo Puerto, que reciben precipitación abundante alrededor de seis meses al año, principalmente con el inicio de la temporada de lluvias y de ciclones tropicales, están sujetos a la ocurrencia cíclica de periodos de subsidencia lenta y eventos de hundimiento brusco. Este municipio forma parte de la Zona Maya del Estado de Quintana Roo, donde las ranuras naturales que se observan en este tipo de rocas se hacen más anchas y se expanden con las corrientes de agua. Comúnmente se hacen cuevas de las rocas. Cuando colapsa el techo de una cueva por el sobrepeso de la roca, se forma un hundimiento y cualquier cosa ahí localizada se viene abajo. En este territorio se observa el desarrollo de asentamientos humanos sobre depresiones kársticas propensas a inundaciones y a hundimientos poniendo en peligro vidas e infraestructura. En este trabajo se exponen los resultados del análisis de susceptibilidad y peligro a hundimientos y subsidencia elaborados para el Atlas de Riesgo del Municipio de Felipe Carrillo Puerto 2018, teniendo como base principal la caracterización de las formas kársticas comunes y trabajo de campo, así como geoprocesos espaciales, para identificar las zonas con mayor riesgo de subsidencia y hundimientos.

**Palabras clave:** *prevención, peligro, hundimientos, paisajes kársticos, zona maya.*

## 11.2. Introducción

La mayoría de las situaciones de desastre se encuentran asociadas a las actividades antropogénicas. Sin embargo, tienen como origen un fenómeno natural, por lo que suelen llamarse "desastres naturales", aunque en su desarrollo y consecuencias tiene mucho que ver la acción del hombre. Por otra parte, la estimación del riesgo implica conocer las posibles consecuencias del fenómeno natural sobre el territorio, las cuales dependen de las características físicas del entorno, los asentamientos humanos y de la infraestructura existente.

Los análisis de peligro o amenaza son más objetivos, ya que se basan en la descripción e información física poco cambiante con el tiempo. Los análisis de riesgo son muchos más complejos, porque reflejan la interacción entre los ecosistemas y el entorno, y la de éstos, con las actividades humanas. Por otra parte, los estudios de peligros suelen realizarse a escalas relativamente pequeñas, abarcando grandes regiones donde los fenómenos se manifiestan de forma similar, sin poder distinguir cambios; por el contrario, los estudios de riesgo son mucho más locales, porque dependen de las características específicas de cada región o ciudad.

El municipio de Felipe Carrillo Puerto se encuentra en la parte central del Estado de Quintana Roo que forma parte de la Península de Yucatán (figura 1) entre las siguientes coordenadas 19° 35' de latitud norte, 88° 33' de longitud oeste. Cubre una superficie aproximada de 13,191 km<sup>2</sup>. Es el más extenso de la entidad, representando el 27% aproximadamente de la superficie total estatal. Con una altitud media de 20 msnm. Colinda al norte con el municipio de Tulum; al oeste con el Municipio de José María Morelos, al sur con el municipio de Bacalar y al este con el Mar Caribe. Los territorios de los municipios de Felipe Carrillo Puerto y José María Morelos constituyen la zona maya del Estado de Quintana Roo, ya que en ellos habitan, en pequeñas comunidades, descendientes de mayas que alguna vez fueron llamados "cruzoob", otorgando la identidad cultural a su región, ya que aún conservan con celo sus costumbres, la lengua maya, así como tradiciones y formas de vida de hace dos siglos, herencia de la milenaria cultura maya.

Según Weidie (cit., Moreno-Gómez, *et al.*, 2019), los sedimentos dominantes en la Península de Yucatán son la piedra caliza y la dolomita del Eoceno, que en épocas

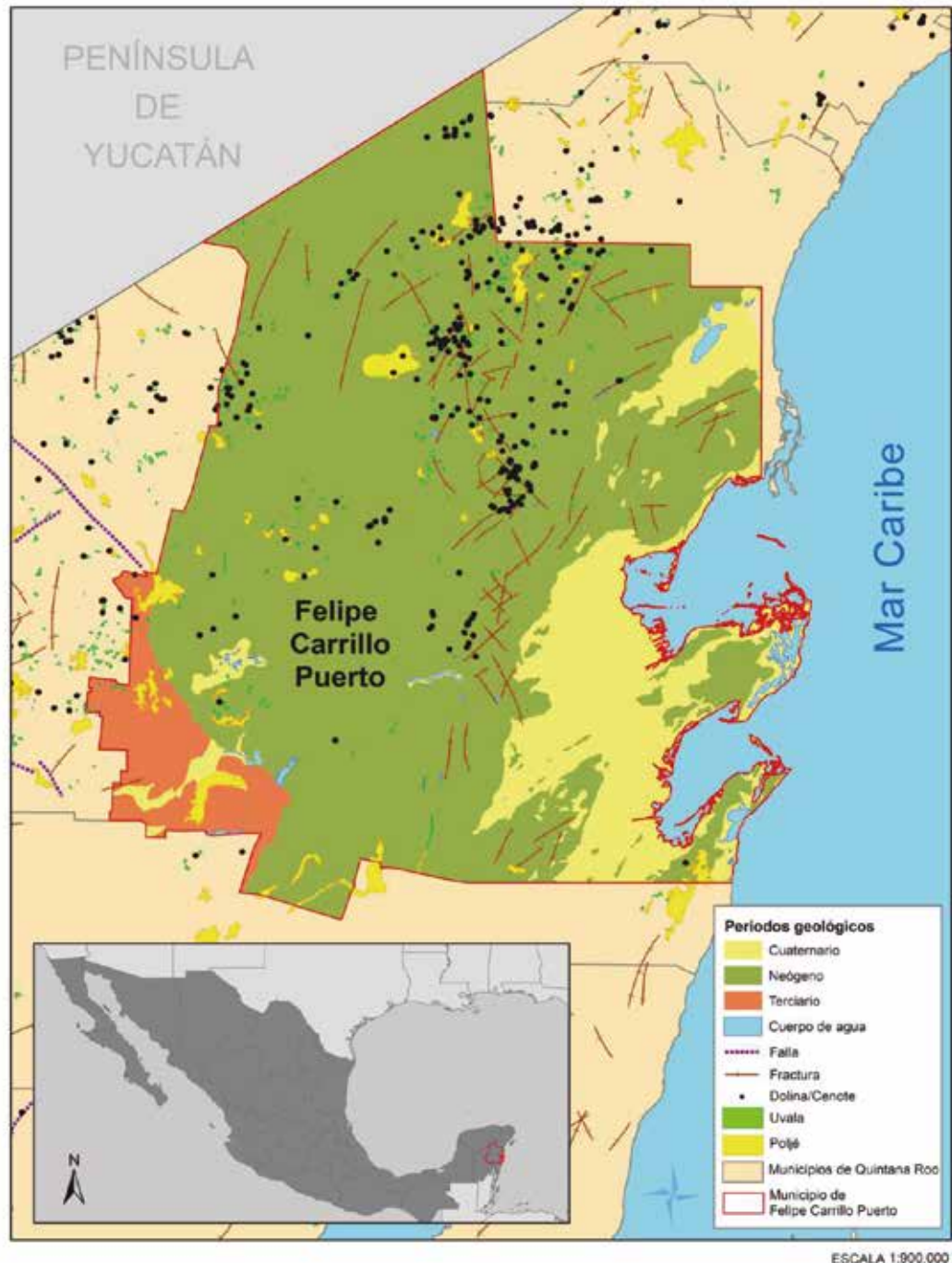


Figura 11.1. Localización y geología del Municipio de Felipe Carrillo Puerto.  
Fuente: Elaboración propia.

más jóvenes alcanzaban espesores mayor a los 1,500 m. Lugo-Hubp (*Ibíd.*) dividió a la Península de Yucatán en dos unidades morfológicas principales según las etapas de la formación kárstica: un área relativamente joven al norte, donde predominan las rocas sedimentarias del Neógeno con un alto número de dolinas, y una zona más antigua en el sur del Paleógeno con rocas sedimentarias exponiendo poco desarrollo de dolina (Figura 11.1).

De la misma manera, en el Nuevo Atlas Nacional de México 2017, se presenta la distribución del karst en el territorio nacional, donde igual se puede observar que existen dos principales regiones: la primera a lo largo de la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre del Sur y la Sierra de Chiapas y la segunda, la más extensa en la plataforma kárstica de la Península de Yucatán, cubriendo todo su territorio. Es ahí donde Espinosa-Pereña (2017) señala que las formas y tipos kársticos de la Península de Yucatán han sido pocos estudiados, y que de acuerdo a su estructura geológica se puede separar en dos regiones distintas. La planicie norte, plataforma recientemente emergida, y los lomeríos y planicies de la porción sur, en la cual se ubica nuestra zona de estudio, que se distingue por su relieve de karst tropical, con pequeños cerros rodeados de planicies.

De la misma manera, este relieve kárstico en el municipio de Felipe Carrillo Puerto se puede dividir en dos zonas: *endokarst* (en el subsuelo) y *exokarst* (en la superficie). En la primera el proceso de disolución de rocas carbonatadas se lleva en el subsuelo: cuevas y espeleotemas (estalactitas, estalagmitas, etc.) que se forman dentro de ellas. En la segunda, en la zona superficial, localizamos formas kársticas de las más conocidas como son las dolinas, además de uvalas y poljes. Por toda la caracterización anterior, es común que se presenten hundimientos de suelos en su territorio, en un sentido vertical descendente y que tiene lugar en áreas de muy baja pendiente. Su origen se explica por el fallo de la estructura geológica que sostiene una porción del terreno bajo el cual existe una cavidad, lo que puede venir motivado por la disolución de las rocas hasta el límite de la resistencia de los materiales o el vaciado de los acuíferos, o en general, por el debilitamiento por meteorización física o química de una estructura que alberga una cavidad. Asimismo, efectos del peligro de subsidencia también pueden advertirse en el municipio, como son el agrietamiento y fracturas que se pueden observar en muros y techos de viviendas e infraestructura; así como el rompimiento de tuberías, separación de elementos estructurales; y afectaciones de suelo en carreteras y caminos.

Un requisito esencial para que las acciones de protección y mitigación del riesgo puedan evitar los desastres es contar con diagnósticos de riesgo, es decir, análisis que den a conocer las características de los eventos que puedan tener consecuencias desastrosas y determinar la forma en que estos inciden en los asentamientos humanos, en la infraestructura y en el entorno. Los Atlas de Riesgo Municipales son los principales instrumentos operativos para la elaboración de los programas de

protección civil y los planes de emergencia locales. Que también sirven como base de conocimientos del territorio y de los peligros que pueden afectarlo como una forma para contribuir a la toma de decisiones para la reducción de riesgos de desastres.

Con base a lo anterior, en este trabajo se exponen algunos de los resultados incluidos en el Atlas de Riesgo del Municipio de Felipe Carrillo Puerto 2018, elaborado por el Centro de Información Geográfica de la Universidad de Quintana Roo, campus Chetumal. Este análisis de los fenómenos naturales geológicos se realizó teniendo como agente perturbador los hundimientos y las subsidencias, agentes que tienen como causa directa las acciones y movimientos de la corteza terrestre. Partiendo de la caracterización de las formas kársticas sobre el territorio municipal, empleando herramientas geo-tecnológicas y procesos espaciales, así como trabajo de campo para identificar las zonas de peligro y riesgo.

### 11.3. Problemática

Los fenómenos de hundimientos y subsidencia del subsuelo son cada vez más comunes en varias zonas del mundo, especialmente en las grandes urbes, como en la Ciudad de México. Estos fenómenos ya han sido reconocidos en el catálogo de la UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) como un peligro geológico. En México, el Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) ha adoptado la clasificación basada en el tipo de agente perturbador que los produce, al igual que CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). Donde se distinguen a los hundimientos y subsidencias como agentes perturbadores de riesgos de origen geológico (Hernández, 2014).

El fenómeno geológico de subsidencia, no suele ocasionar víctimas mortales, pero los daños materiales que causa pueden llegar a ser cuantiosos (Tomás, *et al.*, 2009). Hay que señalar que existen diferencias entre el peligro de subsidencia y colapsos o hundimientos, los cuales se pueden diferenciar en que, los primeros son descensos lentos y paulatinos de la superficie del terreno, y los segundos, movimientos verticales repentinos del suelo. El fenómeno natural de subsidencia puede afectar la destrucción física y daños de viviendas, invasión del agua sobre las tierras bajas adyacentes al mar, cambios en el gradiente que afecta al flujo de agua, averías en tuberías de pozos de petróleo y agua, así como pérdida y filtraciones de acuíferos.

Por otra parte, los procesos fluviales pueden ser significativos en la formación de algunas formas terrestres superficiales y subterráneas. Las rocas a base de calcio pueden ser el cimiento de grandes áreas, expuestas al proceso de disolución a largo plazo por la filtración del agua, razón para no construir en esa zona. A esto se le conoce como proceso de *karstificación*, más propenso en rocas carbonatadas, como la piedra caliza, la dolomita y otras rocas solubles. Al ser un proceso continuo y en evolución, la disolución modifica la superficie y el subsuelo, mostrando así depresiones geológicas características del karst: dolinas, cuevas y redes de conductos localizadas a través de aperturas subsuperficiales. Las dolinas pueden actuar como conectores entre las aguas superficiales y subterráneas, recolectando y drenando la lluvia que se infiltra al subsuelo (Moreno, *et al.*, 2019).

Los paisajes kársticos, como los que se observan en el municipio de Felipe Carrillo Puerto, y en gran parte de Quintana Roo, reciben precipitación abundante alrededor de seis meses al año debido a la temporada de lluvias y ciclones tropicales, lo que lo hace propenso a originar hundimientos dado que estas rocas son susceptibles a disolverse al exponerse a la lluvia ácida, por un lado, y al agua freática por el otro. Con las corrientes de agua las ranuras naturales en rocas carbonatadas se hacen más anchas y se expanden. Comúnmente se hacen cuevas de las rocas. Los hundimientos sólo ocurren cuando el agua ha disuelto por completo la roca que subyacente convirtiéndola casi en una gran caverna y es cuando el techo de ésta se vuelve débil y no soporta el material.

En este trabajo partimos de la localización de las dolinas. Si el colapso de una dolina permite la entrada a un sistema subterráneo de cuevas, entonces lleva el nombre de "ventana kárstica". La mayoría de los cenotes de la Península de Yucatán son dolinas de colapso. Varios ejemplos de dolinas de colapso fueron identificados para el territorio de Felipe Carrillo Puerto. Existen varios tipos de estructuras generadas por el paso del agua en las dolinas: las de punto de recarga, las de depresión y las de nacimiento (Figura 11.2). Como se observa en la figura 2, estas dolinas empiezan simplemente cuando una red de drenaje de agua se concentra en un punto ocasionado generalmente por la geología, por las fallas, por grietas más grandes, por la roca más soluble, etcétera.

La palabra cenote se usa hoy en día en forma extendida para referirnos a dolinas con agua, ya que, no todas las dolinas son cenotes, pero todos los cenotes son dolinas



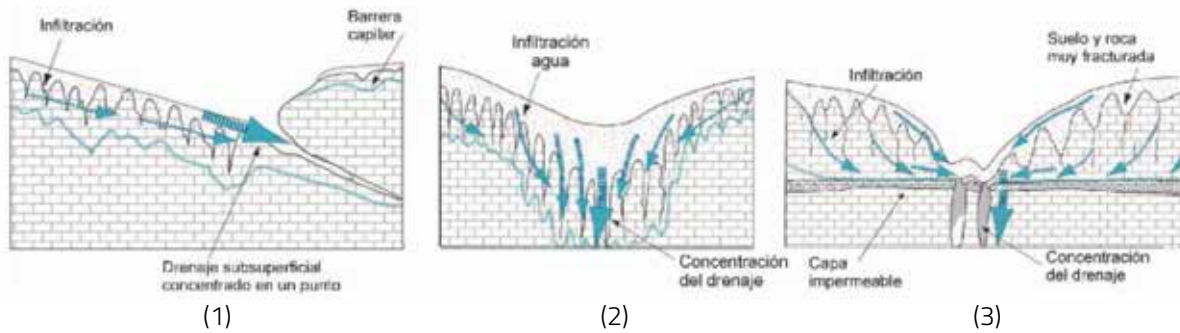


Figura 11.2. Dolinas de punto de recarga (1), dolinas de depresión (2) y dolinas de nacimiento (3).  
Fuente: Velázquez, A. (2016).

(Velázquez, 2016). En el inicio, estos cenotes fueron galerías en sistemas de cuevas subterráneas, y conforme a la caída de agua de lluvia que contiene dióxido de carbono se fueron disolviendo y ensanchando, posteriormente el material de los techos cayó por gravedad y se formó la depresión. Al mismo tiempo, los techos de las dolinas quedaron muy delgados y también colapsaron convirtiéndose en cenotes. Los cenotes siempre contienen agua, esto se debe a que el nivel freático está muy cerca de la superficie topográfica.

Cuando colapsa el techo de una cueva por el sobrepeso de la roca o por otro factor externo cualquier cosa situada sobre esa cueva se viene abajo. Siendo un problema de riesgo geográfico latente con graves implicaciones sociales, económicas y ambientales. Basta recordar el colapso de un tramo de la carretera Federal 307, Chetumal-Cancún, en agosto de 2015, la cual tiene una longitud aproximada de 366 kilómetros. El colapso se produjo en el kilómetro 307, en una zona de cavernas y cenotes (dolinas subterráneas), cercano a Playa del Carmen, causando pérdidas económicas en el sector turístico, así como en infraestructura pública.

Del trabajo de campo, en la localidad de Francisco I. Madero, al norte del municipio, se localizó una dolina de colapso con agua en su interior, la cual se conoce como Cenote "Ts'onoot Ja'as" (Cenote plátanos) perteneciente a la región conocida como "Los Chunes" (Figura 11.3). En esta comunidad y a unos tres metros sobre el techo de esta dolina funciona una escuela de educación básica de la comunidad, lo que representa un riesgo potencial de colapso.

Cabe señalar, que en la misma región de "Los Chunes", en junio de 2018, se presentaron fuertes inundaciones, debido a las lluvias provocadas por la onda tropical número



4 y al desborde de cenotes y lagunas aledañas. Se alcanzaron profundidades entre los 40 centímetros y los 1.20 metros, en sus vialidades de acceso y en algunas comunidades, dañando viviendas, cultivos, e infraestructura.



Figura 11.3. Cenote Plátanos, Francisco I. Madero, Felipe Carrillo Puerto.  
Fotografía de Ma. Luisa Hernández Aguilar. Cenote "Ts'onoot Ja'as", localidad de Francisco I. Madero, municipio de Felipe Carrillo Puerto, octubre 2018.

Asimismo, en la localidad de San Hipólito (Figura 11.4), localizada también al norte del municipio, se identificó la instalación de infraestructura pública, un parque infantil, sobre suelo en el que existen sospechas fundadas de su origen kárstico, por la depresión topográfica observada y el nivel del manto freático, si bien las evidencias no son concluyentes al respecto, se debe monitorear la variación máxima anual del nivel freático y parámetros geotécnicos de los materiales cuaternarios para descartar posible colapso.

Por otra parte, el fenómeno natural de subsidencia puede afectar la destrucción física y daños de viviendas, invasión del agua sobre las tierras bajas adyacentes al mar, cambios en el gradiente que afecta al flujo de agua, averías en tuberías de pozos



Figura 11.4. San Hipólito, Felipe Carrillo Puerto.  
Fotografía de Ma. Luisa Hernández Aguilar. Localidad de San Hipólito, municipio de Felipe Carrillo  
Puerto, octubre 2018.

de petróleo y agua, así como pérdida y filtraciones de acuíferos. Para el municipio de Felipe Carrillo Puerto una subsidencia (hundimiento progresivo de una superficie) no se presentaría por causas de obras subterráneas o galería mineras o la actividad tectónica, ni siquiera por sequía del manto acuífero. Sus mecanismos desencadenantes serían principalmente por construcciones sobre cavernas y áreas karst donde la precipitación se filtra al subsuelo, pero si éstas son lluvias abundantes, no logran ser drenadas suficientemente rápido. Como se ha comentado en párrafos anteriores, la mayor parte del suelo del municipio lo componen rocas calizas de carbonato cálcico, las cuales son solubles en agua bajo determinadas condiciones pudiendo llegar a generar grandes sistemas de huecos interconectados entre sí cuya deformación, y colapso, en caso extremo, generarían una subsidencia con carácter localizado. Por otra parte, también se podría presentar la subsidencia por erosión subterránea, la cual se produce por un proceso mecánico de arrastre de partículas de suelo causado por el flujo de agua subterránea. Es decir, el agua, en su recorrido horizontal por el terreno, moviliza partículas de suelo generando una serie de canales que pueden desencadenar colapsos de terreno. Por lo que las causas directas de subsidencia sobre la superficie del municipio serían principalmente por disolución o erosión subterránea.

## 11.4. Aproximación metodológica

El proceso de diagnóstico (peligro) implicó la determinación de escenarios o eventos desfavorables que pudieran ocurrir, así como su probabilidad asociada (riesgo), en el territorio analizado. En el municipio de Felipe Carrillo Puerto, la mayoría de las dolinas, uvalas y poljes se identificaron a partir de la investigación de Fragozo-Servón, *et al.* (2014) y de cartas topográficas del INEGI, así como del trabajo de campo desarrollado durante la elaboración del Atlas Municipal de Riesgos de Felipe Carrillo Puerto (2018).

Como se observa en las figuras 3 y 4, en localidades hacia el norte del municipio se localizaron dolinas colapsadas (Francisco I. Madero, Kankabdzonot y San Antonio Nuevo) y dolinas donde el techo de la dolina aún no es muy delgado para colapsar (San Hipólito). En esta zona del norte del municipio es donde se localiza la mayor concentración de dolinas, algunas perenes, es decir, ya colapsadas (cenotes), y muy pocas intermitentes.

Ahora bien, para la identificación del peligro de subsidencia en el municipio de Felipe Carrillo Puerto, los factores a considerar para la elaboración de mapas de susceptibilidad, fueron la litología y factores hidrogeológicos, principalmente. A partir de lo anterior se identificaron zonas de subsidencia por disolución o por erosión.

Hernández (2014, p. 45, cit. Maskrey, 1998; Mansilla, 2000; Soldano, 2009), señala que una región o un país, un municipio o una ciudad, se encuentran en riesgo cuando existe una combinación de factores naturales y condiciones sociales que hacen a dicha sociedad propensa a un desastre. Sin embargo, es común que el riesgo sea estimado solo en términos físicos (Hernández, 2018), sin tomar en cuenta los efectos directos e indirectos de la sociedad. Para el cálculo del riesgo en este trabajo se asoció la extensión territorial del fenómeno natural y la vulnerabilidad por ubicación de las localidades e infraestructura al interior de los polígonos delimitados como zonas de peligro, tomando como variable principal el total la población asentada al interior.

El nivel de estudio consistente en este análisis de riesgo potencial de hundimientos y subsidencia se trabajó a una escala 1:200 000, ya que así lo marcan los Términos de Referencia para la Elaboración de Atlas de Riesgo de la Secretaría de Desarrollo



Territorial y Urbano (SEDATU) para territorios municipales. La sobreposición de las variables del entorno físico dio como resultado principal mapas de peligro a hundimientos y subsidencia, sin embargo, para el cálculo de zonas de riesgo se llevó a cabo la sobreposición de la variable humana (población e infraestructura). Lo anterior, permitió observar cuantas localidades y número de personas podrían estar en riesgo, así como vías de comunicación con posibilidades de ser afectadas. Con el análisis de sobreposición se logró combinar características físicas y características humanas, logrando identificar las zonas de peligro y riesgo a los fenómenos naturales de hundimientos y subsidencia en el municipio de Felipe Carrillo Puerto.

La metodología general de trabajo siguió la técnica de sobreposición y análisis espacial a través de geoprocesos a través de software especializado, la cual se muestra esquemáticamente en las Figura 11.5 y Figura 11.6 siguientes:

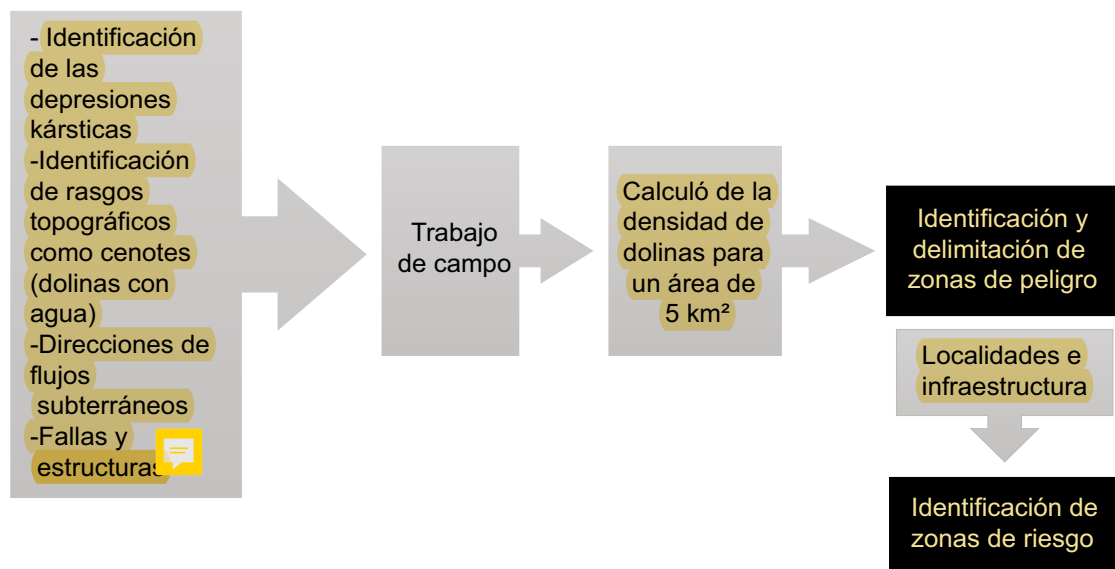


Figura 11.5. Trabajo de flujo para la identificación de zonas de peligro y riesgo de hundimientos.

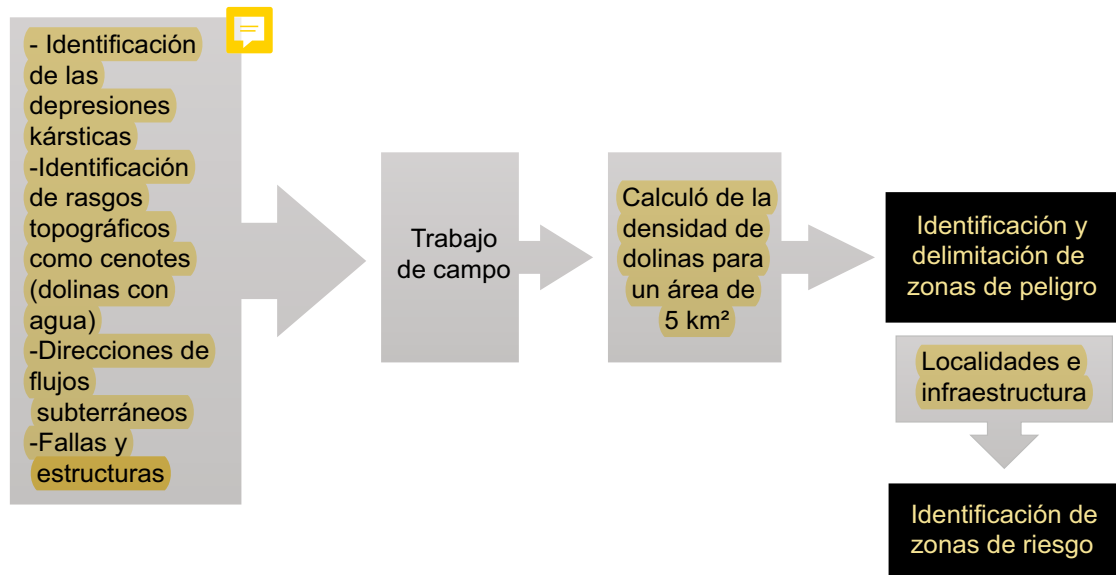


Figura 11.6. Peligro de subsidencia Peligro de subsidencia Peligro de subsidencia.

## 11.5. Resultados

### 11.5.1. Peligro de hundimientos y subsidencia

Los resultados alcanzados en este análisis tienen el propósito principal de difundir conocimientos sobre la problemática de hundimientos y subsidencia en la zona maya, así como mostrar la distribución geográfica del riesgo derivado de estos peligros naturales.

Para identificar las zonas potencialmente propensas a los hundimientos, se tomaron las dolinas con inundación permanente conocidas como cenotes que están en contacto con el manto freático y tienen interés turístico. No obstante, la densidad de dolinas fue la variable clave para delimitar estas zonas. Ya que como White (1988) indica, conocer las formas presentes de las depresiones kársticas como su tamaño y densidad, permite identificar las superficies territoriales con mayor disolución de la roca y por lo tanto el grado de desarrollo del karst.

En el **mapa 1** se observan estas zonas identificadas con números de 1 a 5. Donde la zona 1 es la que tiene más susceptibilidad de hundimientos, localizada al norte del

municipio, ya que su densidad es mayor que las otras zonas. Le sigue en orden de importancia la zona 2, al oeste del municipio limitando con el municipio de José Ma. Morelos. La zona 3 se encuentra casi al centro del municipio y la 4 con menor densidad cerca de su capital. La zona 5, si bien se identifica como zona de hundimiento, es la que presenta menor densidad y peligro.

Si bien, en el mapa 1 las densidades presentadas solo fueron de las dolinas, los poljes y las úvalas son más propensas a inundaciones y acumulación de materiales que permite a la población local usarlos con fines agrícolas y turísticos, como en las localidades de Chuhuhub al sur del municipio y la localidad de Señor al norte del municipio.

Por otro lado, en el mapa 2, se pueden observar las zonas de peligro al fenómeno de subsidencia para el municipio de Felipe Carrillo Puerto, divididas por disolución subterránea y por erosión subterránea. Las zonas punteadas en color morado en el mapa 2, es decir zonas 1, 2 y 3, corresponden a subsidencia por disolución, partiendo de la base en que la mayor parte del municipio se compone de roca sedimentaria caliza, es decir roca compuesta de carbonato de calcio, la cual se disuelve con mayor facilidad, principalmente, por el flujo de agua de las corrientes subterráneas.

Estas tres zonas identificadas coexisten con flujos subterráneos identificados con flechas rosadas, así como con la red de drenaje en color azul. De éstas, destaca la zona 3 al suroeste del municipio, ya que su litología se divide en lacustre y caliza yeso. El yeso se disuelve parcialmente reduciendo su volumen. Cuando su resistencia mecánica no es suficiente para soportar el peso de la cobertura, este se fragmenta y se agrieta subsidiando la cobertura terrestre por flexión o colapso en función de que ésta se comporte de forma dúctil. La cal hidratada (yeso) es esencialmente hidróxido de calcio o una mezcla de hidróxido de calcio, óxido de magnesio y algo de hidróxido de magnesio. La cal hidráulica es una cal en polvo y parcialmente apagada que puede fraguar en sitios húmedos y debajo del agua.

De baja resistencia mecánica, su valor depende de la proporción de arcilla que contenga, y se encuentra presente en la zona 3 donde se localiza la única falla geológica del municipio, al suroeste. La acción del agua de lluvia y de los ríos (especialmente cuando se encuentra acidulada por el ácido carbónico) provoca su disolución, creando un tipo de meteorización característica denominada kárstica. Esta zona también concentra diversos flujos de corrientes subterráneas, red de drenaje, úvalas y poljes.



De la misma manera, en el mapa 2, se observa en naranja las cinco zonas identificadas con susceptibilidad a subsidencia por erosión subterránea. Para identificar estas zonas se tomaron en cuenta las depresiones kársticas (cenotes, úvalas y poljes) identificadas por Fragoso-Servón, et. al. (2014), los cenotes identificados en las cartas topográficas del INEGI, las fracturas geológicas, el tipo de roca (haciendo énfasis en la roca caliza), así como la red de drenaje identificada.

Los resultados en el mapa 2 indican que en la zona 1, al norte del municipio, se observa mayor peligro, ya que concentra dentro de su área existe una densidad alta de dolinas, úvalas y poljes, así como fracturas del terreno. Le sigue la zona 2, más hacia el centro del municipio, donde de la misma manera se advierte una densidad alta de dolinas, pero menos úvalas y poljes, sin embargo, se observa un porcentaje alto de fracturas. En estas zonas también se observaron depresiones erosivas y dolinas de colapso (cenotes) de más de 1 metro de profundidad.

De la misma manera, los poljes dentro de estas zonas pueden corresponder a un ambiente palustre, con sedimentos con un alto porcentaje de materia orgánica producto de la descomposición de plantas y organismos, es decir, depresiones cerradas generadas por subsidencia kárstica sedimentaria. Las zonas 4 y 5 contemplan las mismas características, pero con menor densidad de depresiones kársticas.

Podemos señalar que en el municipio de Felipe Carrillo Puerto el peligro de subsidencia es favorecida por el adelgazamiento de la superficie terrestre y el flujo de corrientes subterráneas, lo que conlleva la disolución de la roca caliza, presente en toda su superficie. Y por otra parte los hundimientos han sido identificados más hacia el norte del municipio, donde se observan colapsos verticales en rocas calizas.

## 11.5.2. Riesgo de hundimientos y subsidencia

Ahora bien, al incorporar la variable población para el cálculo del riesgo de hundimientos y subsidencia, observamos que el grado de riesgo cambia. Es decir, las zonas de modifican ya que el mayor peso para clasificarlas se da a partir de la población que habita dentro de estas zonas. En los mapas 3 y 4, se identifican las zonas de riesgo de hundimientos y subsidencia, respectivamente, podemos observar como la numeración que identifica las zonas de peligro han sido modificadas. De la misma



riesgo alto. Por otro lado, la subsidencia por erosión con cinco zonas queda de la siguiente manera, la zona 1 pasa a zona 3 (riesgo medio), la zona 2 pasa a zona 5 (riesgo muy bajo), la zona 3 a 4 (riesgo bajo), la zona 4 a zona 2 (riesgo alto) y la zona 5 a zona 1 con riesgo muy alto, ya que ahí se encuentra la cabecera municipal que concentra la mayor parte de la población.

Tabla 11.2. Población en riesgo por peligro de subsidencia.

| Localidades (número)       | Población (habitantes, 2010) | Zona peligro a subsidencia | Zona de riesgo |   |          |
|----------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------|---|----------|
| Por disolución subterránea |                              |                            |                |   |          |
| 5                          | 113                          | 1                          | Alto           | 3 | Bajo     |
| 12                         | 2,850                        | 2                          | Medio          | 2 | Medio    |
| 24                         | 5,175                        | 3                          | Bajo           | 1 | Alto     |
| 41                         | 8,138                        |                            |                |   |          |
| Por erosión subterránea    |                              |                            |                |   |          |
| 19                         | 2,281                        | 1                          | Muy alto       | 3 | Medio    |
| 2                          | 50                           | 2                          | Alto           | 5 | Muy Bajo |
| 4                          | 1,490                        | 3                          | Medio          | 4 | Bajo     |
| 9                          | 3,942                        | 4                          | Bajo           | 2 | Alto     |
| 19                         | 26,263                       | 5                          | Muy bajo       | 1 | Muy alto |
| 53                         | 34,026                       |                            |                |   |          |

## 11.6. Conclusiones



La aproximación metodológica utilizada en este trabajo nos muestra que es posible identificar, por un lado, la afectación territorial del fenómeno natural a través de capas de datos geográficos, pero por otro, nos muestra que si no tomamos en cuenta la variable humana no estaremos identificando correctamente el riesgo. Es decir, el peligro solo será un diagnóstico o característica intrínseca de un territorio, en cambio, el riesgo es la combinación de la probabilidad y consecuencia de no controlar este peligro. Es por eso que los Atlas de Riesgo Municipal son instrumentos valiosos para gestionar el uso correcto del suelo y no construir en zonas de peligro, sin programas de reducción del riesgo estamos propensos a los desastres. Para disminuir el riesgo hay que disminuir la vulnerabilidad social, como la pobreza, la desigualdad, la desorganización y la desinformación.

A pesar de poder mapear los peligros de hundimientos y subsidencia, basándonos en la karstificación, su asignación por trabajo de campo o por análisis de imágenes de



satélite requiere mucho más tiempo para grandes áreas kársticas. Asimismo, la identificación de dolinas a partir de mapas topográficos depende de gran medida de varios factores, como la escala del mapa, el tamaño de la dolina y el intervalo del contorno.

Finalmente, podemos señalar que mapear los peligros de la zona maya del Estado de Quintana Roo es clave en el desarrollo de estrategias de planeación del uso del suelo y la vulnerabilidad de sus aguas subterráneas. Ya que las formas kársticas, en especial las dolinas o cenotes, ejercen gran influencia en los resultados de vulnerabilidad debido a su comportamiento hidrológico, ya que permite un transporte más rápido de contaminantes desde la superficie hasta el nivel freático.

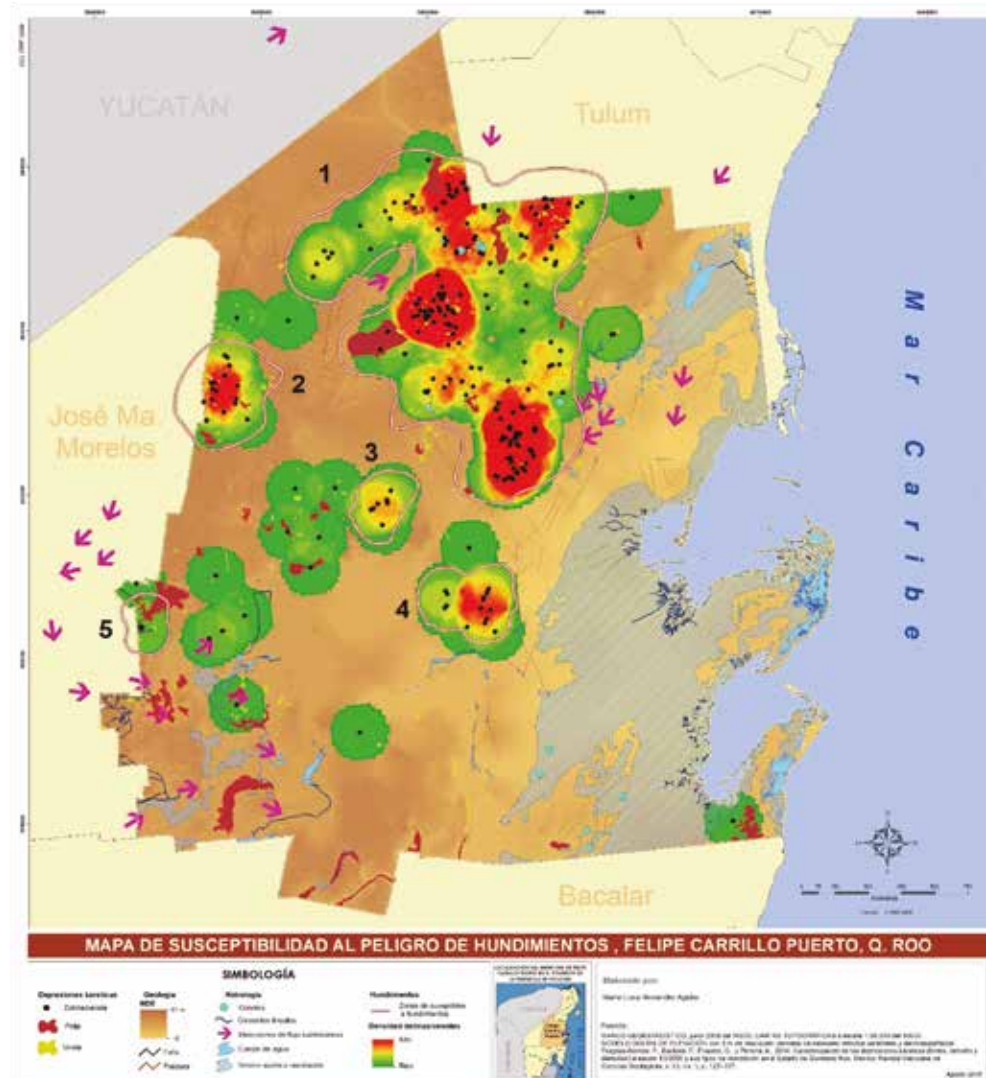


Figura 11.7. Peligro de hundimientos.

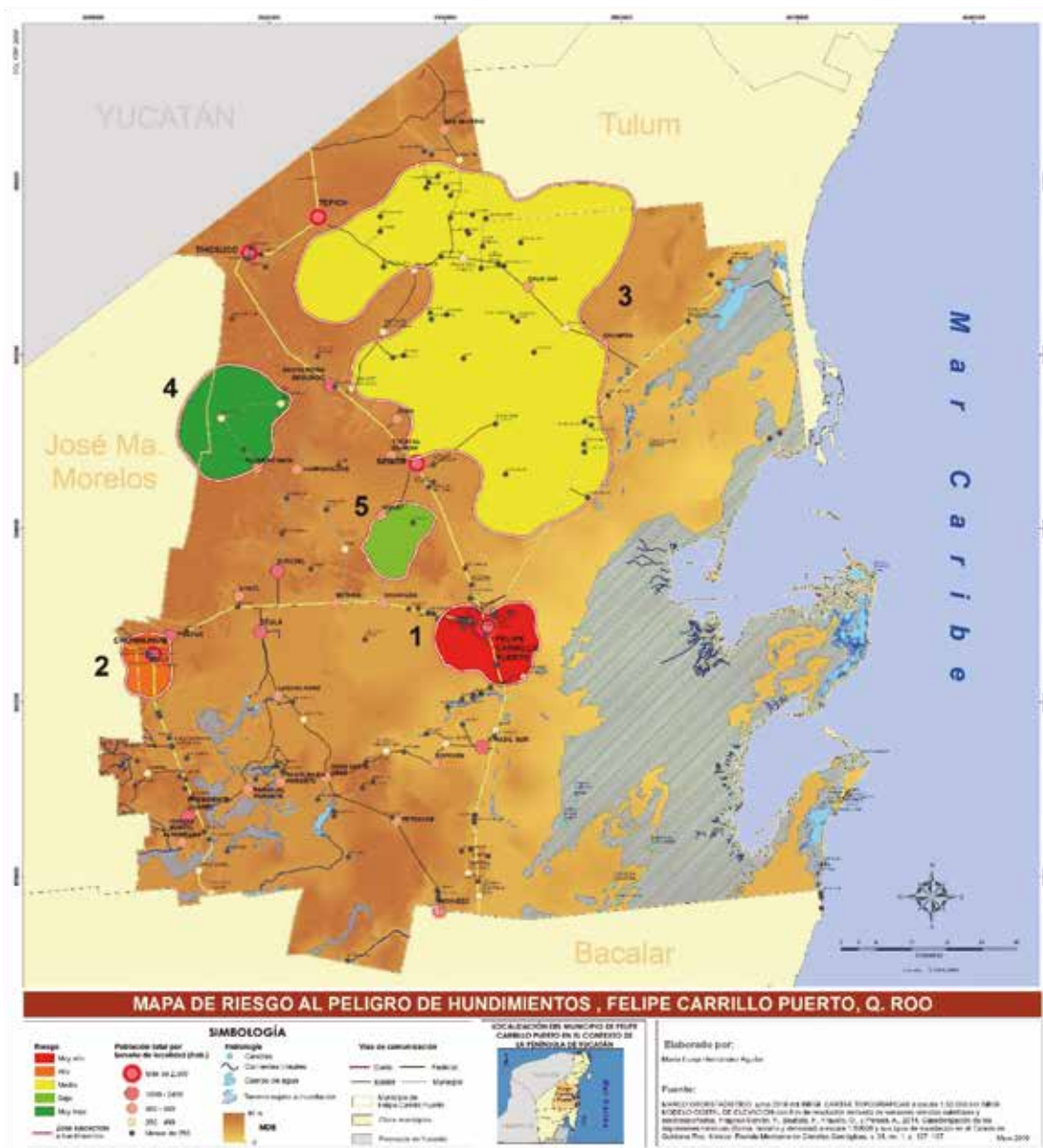


Figura 11.8. Peligro de subsidencia





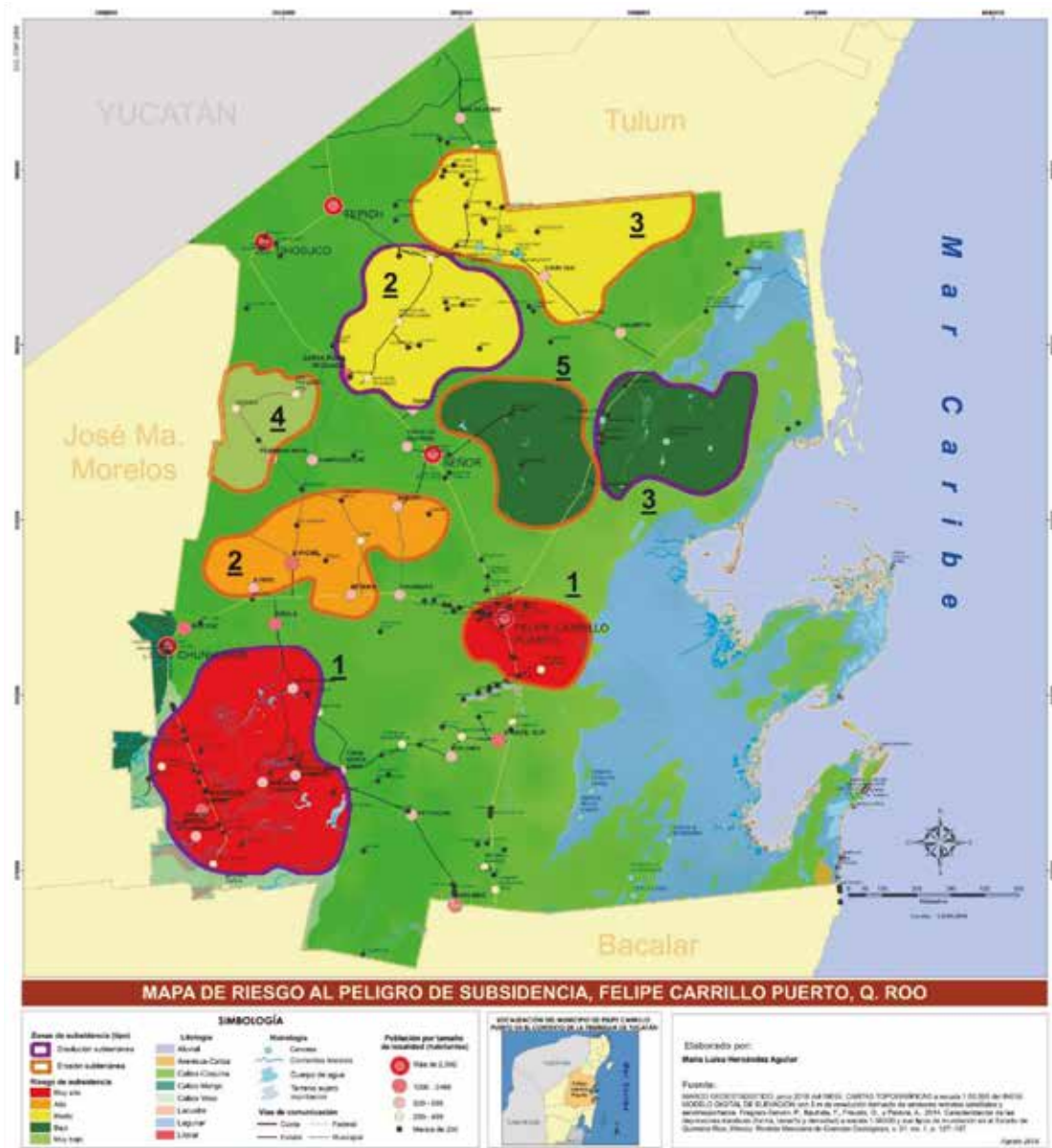


Figura 11.10. Riesgo de subsidencia

## 11.7. Referencias

- Espinasa-Pereña, R., (2017). El karst de México. En *Nuevo Atlas Nacional de México 2017*. UNAM. Disponible en: [http://www.igeograf.unam.mx/Geodig/nvo\\_atlas/5\\_naturaliza\\_ambiente/3\\_geomorfologia/NA\\_III\\_3.pdf](http://www.igeograf.unam.mx/Geodig/nvo_atlas/5_naturaliza_ambiente/3_geomorfologia/NA_III_3.pdf)
- Fragoso-Servón, P., Bautista, F., Frausto, O., and Pereira, A., (2014). Caracterización de las depresiones kársticas (forma, tamaño y densidad) a escala 1:50000 y sus tipos de inundación en el Estado de Quintana Roo, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 31, no. 1, p. 127–137.
- Hernández, M-L., Carreño, M-L., and Castillo, L., (2018). Methodologies and tools of Risk Management: Hurricane Risk Index (HRi), *International Journal of Disaster Risk Reduction*, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.08.006>
- Hernández, M-L., (2014). Evaluación del riesgo y vulnerabilidad ante la amenaza de huracanes en zonas costeras del Caribe Mexicano: Chetumal y Mahahual. *Tesis Doctoral*. Universidad de Quintana Roo. Doctorado en Geografía de la División de Ciencias e Ingeniería. Chetumal, Quintana Roo, México. Disponible en: <http://192.100.164.54/janium-bin/detalle.pl?Id=20190529163408>.
- INEGI (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. México.
- INEGI (2018). Conjunto de datos vectoriales. *Topografía*. Cartas Escala 1:50 000. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/>
- SIATL-INEGI (2018). Conjunto de datos vectoriales. *Red Hidrográfica*. Cartas Escala 1:50 000. Simulado de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas. Disponible en: [http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/siatl/#](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#)
- Moreno-Gómez, M.; Liedl, R.; Stefan, C. A New GIS-Based Model for Karst Dolines Mapping Using LiDAR; Application of a Multidepth Threshold Approach in the Yucatan Karst, Mexico. *Remote Sens.* 2019, 11, 1147.
- Tomás, R., Herrera, G., Delgado, J., y Peña, F. (2009). Subsidencia del terreno. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 2009. (17.3) 295-302. ISSN.: 1132-9157. España.
- UQROO-CIG (2018). *Atlas Municipal de Riesgo de Felipe Carrillo Puerto 2018*. Universidad de Quintana Roo. Centro de Información Geográfica. Chetumal, Quintana Roo. México.
- Velázquez, A. (2016). ¿Sólo hay cenotes en la Península de Yucatán? *Cienciorama*. Divulgación de la Ciencia. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Disponible en: <http://www.cienciorama.unam.mx/#!titulo/449/?solo-hay-cenotes-en-la-peninsula-de-yucatan>.
- White, W., (1988). *Geomorphology and hydrogeology of karst terrains: USA*, Oxford University Press, 465 pp.