



**CENTRO DE ESTUDIOS DEMOGRÁFICOS, URBANOS Y
AMBIENTALES**

**EXPANSIÓN URBANA Y EXPOSICIÓN A RIESGOS ASOCIADOS AL
AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR: ANÁLISIS COMPARATIVO DE
LAS CIUDADES COSTERAS DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN,
1975-2014**

**Tesis presentada por
Héctor Emanuel León Rojas**

**Para optar por el grado de
MAESTRO EN ESTUDIOS URBANOS
Promoción 2017-2019**

**Directora de tesis:
Dra. Landy Lizbeth Sánchez Peña**

**Lector:
Dr. Salomón González Arellano**

Ciudad de México, México, agosto de 2019

AGRADECIMIENTOS

Todo trabajo producto del intelecto humano no es creado en el vacío, es a través de la colectividad en que se generan las condiciones necesarias para producir nuevas ideas y encontrar inspiración. El producto del presente trabajo es gracias a que me he subido a hombros de gigantes, a saber, de grandes familiares, profesores y amigos. Es por ello que quiero agradecerles, debido a que, en palabras de uno de estos gigantes, “el comportamiento recíproco entre los individuos comienza, necesariamente, con un acto de agradecimiento”.

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, pues por su esfuerzo y comprensión he llegado hasta la presente estancia, a ellos va dedicado el presente trabajo: a mi mamá Carmen, a mi papá Mario, a mi hermana Heidi y mi hermano Hugo. Y por supuesto a mis sobrinos Ian y Araizú ya que por ellos uno aspira por la existencia de asentamientos humanos ideales para la condición humana y no mercantil.

Agradezco también a mis profesores de la maestría que de una u otra forma han contribuido en mi comprensión de lo urbano: al Dr. José Luis Lezama, Dr. Jaime Sobrino, Dra. Martha Schteingart, Dra. María Perevochtchikova, Dr. Sergio Puente, Dr. Carlos López, Dr. Roberto Breña, Dr. Sergio Rincón, Dra. Verónica Crossa, Dra. Judith Domínguez, Dra. María Negrete y al Dr. Vicente Ugalde.

Agradezco profundamente a mi directora, la Dra. Landy Sánchez, por su inigualable apoyo en la elaboración de la presente tesis, no sólo por su tiempo invertido en mí, sino también por abrir mi perspectiva y alejarme de mi zona de confort economicista y poder aterrizar mis inquietudes intelectuales en nuevos puertos, inimaginables para mí en el pasado, hablo del ámbito espacial, así como compartirme literatura de vanguardia sobre los problemas urbanos que tanto me sorprendieron e inspiraron. También agradezco su apoyo para realizar una estancia en una de las ciudades costeras más icónicas que existen, misma que me ha llenado de más inquietudes intelectuales e inspiración. Finalmente, agradezco su labor como investigadora, me alegra poder colaborar con investigadora de tal magnitud.

A mi lector, el Dr. Salomón González, por su apoyo y sugerencias en el contenido de la tesis, por motivar acercarme a los temas de forma urbana.

Agradezco de corazón a aquellos que me recibieron durante mi estancia en el Baruch College de CUNY: a la Dra. Deborah Balk, Paradorn Wongchanapai, Hasim Engin, Cedilla Sachar y Jessica Miller. Quienes fueron muy amables y dispuestos a resolver cualquier duda que tuviera, por compartirme sus saberes sobre sus temas de investigación, así como saber más de la cultura neoyorkina.

A mis compañeros de la maestría: Maritza, Cecilia, Daniel, Jaime, Rigoberto, César, Francisco, Dairee, Karen, Josué, Abraham, Francisco Breña, Gerardo, Alba, Andrés Sierra y Andrés Colorado.

Quiero agradecer profundamente a Adylene, por todos los momentos que pudimos compartir, así como por todo lo que me enseñó, en términos interpersonales, intrapersonales e intelectuales. Gracias a ella he podido aprender de muchas artes, y entre una de ellas, la que cualquier estudioso de lo urbano debe conocer: la Arquitectura.

A los compañeros de voleibol por hacer ameno la estadía en El Colegio: Naghielli, Natalia, Ali. También quiero agradecer a Angélica, Ulsía y José Luis por su amistad y su apoyo invaluable a lo largo de la maestría y del proceso de elaboración de la presente tesis. A mis entrañables amigos: Luis, Isaac y Mauricio. A los camaradas más intensos y brillantes que conozco: Francisco, Ricardo y Gabriel. A mis amigos de la Especialidad que se han guardado un espacio en mi vida: Paula, Joshua, Erik, Andrea, Irving, Aline, Sofía. De igual forma agradezco a mis amigos de la licenciatura que a pesar de la distancia siempre están en mi mente: Lizbeth, Emilia, Cristóbal, Frida, Marcos, David, Josué.

Al Dr. José Antonio Rojas Nieto por seguir apoyándome en el aprendizaje de la docencia, por enseñarme que la docencia sin humanismo no vale nada. A Germán por recordarme el camino de la rebeldía intelectual. A Camille por mostrarme nueva inspiración y motivación para retomar una de las más hermosas y apasionantes actividades del mundo, tocar el piano.

Finalmente, pero no menos importante, agradezco a todos y a cada uno de los trabajadores de El Colegio de México, que sin su labor esta escuela no funcionaría de excelente manera. Agradezco también el apoyo brindado por el CONACYT para cursar dos años de maestría y para realizar una estancia de investigación. De igual forma agradezco a la Fundación Kaluz por el apoyo para la estancia de investigación, misma que fue pieza clave para el desarrollo de la presente investigación.

A TODO EL MUNDO, GRACIAS

TO ALL THE WORLD, THANKS

À TOUT LE MONDE, MERCI

A Luis Unikel Spector,
que en este mes se cumplen
87 años de su nacimiento.

A Víctor L. Urquidi
que en este mes se cumplen
15 años desde su partida.

*La importancia de las investigaciones sobre la urbanización se ve aumentada por la necesidad de que cubran objetivos específicos que se enmarcan dentro del contexto de su relación global en el desarrollo económico: analizar los factores de localización industrial en el sector urbano tales como mercados, economías externas y de urbanización, disponibilidad de mano de obra, servicios profesionales especializados, etc.; proporcionar criterios para la mejor orientación de las inversiones sociales y básicas de desarrollo entre el sector urbano y el rural; facilitar la elaboración de programas de vivienda; **evaluar los problemas espaciales del desarrollo** [...]*

*Luis Unikel, El desarrollo Urbano de México
Diagnóstico e implicaciones futuras*

ÍNDICE GENERAL

Introducción general	6
Capítulo 1: La expansión urbana y la configuración de riesgo ante el aumento del nivel del mar en zonas costeras bajas	13
Introducción.....	13
1. Cambio climático y sus efectos en el nivel del mar	14
2. Riesgo urbano y su configuración social a partir de la urbanización.....	18
3. Expansión y forma urbana	30
Conclusiones	33
Capítulo 2 Expansión y forma urbana en nueve ciudades costeras de la península de Yucatán	35
Introducción.....	35
1. El crecimiento urbano en las costas de México	36
2. La expansión urbana: aproximación conceptual y metodológica	39
3. El crecimiento de la extensión urbana de las ciudades costeras de la península de Yucatán	42
Fuentes de información.....	42
Estimaciones de la evolución de la extensión de las ciudades costeras en la península yucateca.....	46
4. La forma urbana: aproximación conceptual y metodológica.....	60
5. La forma urbana de las ciudades costeras de la península de Yucatán	62
Conclusiones	66
Capítulo 3 Expansión urbana y exposición a riesgos por elevación del nivel del mar	68
Introducción.....	68
1. La configuración del riesgo de inundación por el aumento del nivel del mar	68
2. Estimaciones de exposición a la amenaza del incremento del nivel del mar en las ciudades de estudio.....	71
3. Intensidad del uso del suelo en las ciudades costeras de estudio.....	84
Conclusiones	103
Conclusión general	105
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110

Introducción general

El asentamiento de grupos humanos cerca de ríos o del mar es un fenómeno que tiene tanta antigüedad como la sociedad misma. Hoy en día dichos asentamientos se han convertido en ciudades, aglomerando una gran cantidad de personas, edificaciones y actividades económicas. Las ciudades costeras se destacan principalmente por sus actividades turísticas, pesqueras y portuarias; el dinamismo de estas actividades ha mantenido el atractivo de este tipo de asentamientos y han hecho que las ciudades costeras no estén fuera del proceso global del crecimiento urbano que sucederá a lo largo del siglo XXI.

En 2018 el 55% de la población mundial vivía en zonas urbanas, para el año 2050 se pronostica que el 68% de la población mundial será urbana (United Nations, 2019, p. 1). Actualmente los asentamientos urbanos que contienen a la mitad de la población mundial sólo ocupan el 2.8% de la superficie terrestre, pero esta concentración espacial es mayor en las costas debido a que dos tercios de las ciudades con una población mayor a 5 millones de habitantes están localizadas en zonas de entre 0 y 10 metros sobre el nivel del mar (Blackburn y Marques, 2013, p. 2). A escala mundial, de 1975 al 2000 el número de megaciudades¹ en países de ingreso bajo y medio pasó de 2 a 13, cuya población se incrementó más de 7 veces, sumando un total de 165 millones de habitantes (Blackburn y Marques, 2013, p. 7).

En cuanto a la dinámica poblacional de México, de acuerdo con proyecciones de la CONAPO, para el año 2030 la población urbana aumentará 16.6 millones de personas pasando de 82.6 millones en 2010 a 99.3 millones en 2030. Por su parte, la población nacional en ese periodo de tiempo aumentará 23.3 millones de personas, en otras palabras, el 71.6% del aumento poblacional se dará en ciudades (Almejo-Hernández, García, y Benítez, 2014, p. 141). En lo que respecta a la dinámica poblacional costera, Pérez-Campuzano y Santos-Cerquera (2016) señalan que los principales cambios de los asentamientos costeros, entre 2000 y 2010, consistió en la transición de municipios rurales a mixtos, debido a que en el año 2000 había sólo 48 municipios rurales con un total de 1.2 millones de habitantes, simultáneamente había 36 municipios mixtos con 1.2 millones de habitantes. Para el año 2010, la situación se revirtió, dado que había sólo 12 municipios rurales con poco menos del

¹ Son aquellas ciudades que contienen más de 10 millones de habitantes.

millón de habitantes, mientras que la cifra de municipios mixtos aumentó a 67 con 1.5 millones de personas. Si bien en México la concentración de la población urbana es primordialmente en la zona continental, la urbanización en la costa parece ser semejante al patrón de crecimiento en la parte continental, debido a la alta concentración poblacional en algunas ciudades y la alta dispersión en las localidades medianas y pequeñas (Pérez-Campuzano y Santos-Cerquera, 2016, p. 285). Con datos del Censo de Población 2010 del INEGI se puede identificar la existencia de 112 ciudades costeras que concentran un total de 11.7 millones de personas, de las cuales el 64% se concentraba en ciudades medias, 25% en ciudades pequeñas y el restante 11% en ciudades grandes².

El crecimiento de la población urbana también tiene repercusiones en el medio ambiente circundante. Por un lado, el aumento de las actividades urbanas ha generado problemas de contaminación sonora, del aire, generación de asentamientos irregulares, aumento de tiempos de traslado, ausencia de servicios públicos como electricidad y agua, entre otros. Por otro lado, en el medio ambiente circundante, se ha presentado deforestación, contaminación de ríos y mares, extracción excesiva de los bancos pesqueros, es decir, se ha sobreexplotado los recursos que son insumos para el funcionamiento de las ciudades. El cambio climático es una síntesis de estos problemas ambientales. Como consecuencia de éste se proyecta un aumento de la temperatura atmosférica, lo cual influye en el aumento progresivo del nivel del mar por el derretimiento de los casquetes polares, asimismo se presentarán mayores ciclones tropicales y de mayor intensidad. Esto tendrá consecuencias sociales, económicas y ambientales en las zonas costeras a lo largo del mundo y a los asentamientos que se encuentren en dichas zonas.

Tal ha sido la preocupación por estos problemas que se ven reflejados en diversas agendas políticas en el mundo, ejemplo de ello, es el marco de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, cuyo onceavo objetivo (de 17) versa sobre ciudades y comunidades sostenibles, teniendo como fin mejorar la seguridad y sostenibilidad de las urbes, donde una de las implicaciones para lograrlo es la planificación y gestión urbana. En sintonía con ese objetivo, la Nueva Agenda Urbana del Programa de las Naciones Unidas

² Se considera a las ciudades pequeñas a aquellas que contienen de 15,000 a 99,999 habitantes. Las ciudades medias dónde habitan entre 100,000 y 999,999 personas. Las ciudades grandes se caracterizan por tener más de un millón de habitantes.

para los Asentamientos Humanos (ONU-Hábitat), apunta a la importancia del desarrollo de instrumentos de planificación y diseño urbano que busquen compatibilidades y densidades adecuadas al momento del crecimiento de zonas urbanas. Otro ejemplo es el Marco Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 de la ONU. Éste tiene cuatro esferas prioritarias y la primera consiste en comprender el riesgo de desastres, es decir, las políticas para la gestión del riesgo de desastre deben basarse en la comprensión de las dimensiones de vulnerabilidad, grado de exposición de personas y bienes, así como las características de la amenaza.

De forma particular, México es un país donde se pueden presentar ciclones tropicales e inundaciones costeras dado sus características geográficas; por un lado, tiene una extensión costera de 11,122 km (INEGI, 2017b) y, por otro lado, se encuentra entre el mar Pacífico, el Golfo de México y el mar Caribe. Se ha demostrado que la zona costera de México es altamente vulnerable al aumento del nivel del mar (Pedrozo-Acuña et al. 2015, p. 228). De forma singular la península de Yucatán destaca de las demás zonas costeras del país por su baja elevación respecto al nivel del mar. Las ciudades que se encuentran en la península se distinguen por sus actividades turísticas y portuarias, por consiguiente, dichas actividades económicas se ven susceptibles a sufrir los estragos de los fenómenos naturales. Asimismo, Redclift *et al.* (2011) señalan que la costa del Caribe mexicano es una de las zonas costeras con mayor urbanización en el mundo y que está altamente expuesta a peligros climáticos, principalmente huracanes (2011, p. 2).

Considerando el progresivo crecimiento urbano costero en México³, así como sus características geográficas y climáticas, se puede vislumbrar la importancia de analizar la dinámica del crecimiento urbano en la península de Yucatán en relación con la susceptibilidad de presentarse inundaciones costeras a partir del incremento del nivel del mar impulsado por el cambio climático y la presencia de ciclones tropicales.

En la literatura especializada se pueden encontrar diversos estudios respecto de la problemática presentada. Dentro de los casos más destacados a escala internacional se encuentra el trabajo de McGranahan et al. (2007) el cual evalúa el riesgo ante el aumento del

³ Particularmente en la península de Yucatán, cuyas actividades económicas se verán impulsadas a partir de la culminación del proyecto del "Tren Maya" del gobierno federal en turno.

nivel del mar en todas las ciudades del mundo ubicadas en zonas de baja elevación (menos de 10 metros sobre el nivel del mar) para el año 2000. Para la región latinoamericana se puede consultar el trabajo de Reguero et al. (2015) cuyo análisis ha versado sobre estimación de la exposición de la población y de las actividades económicas al aumento del nivel del mar desde el 2011 hasta un horizonte temporal de 100 años. De forma más particular a la zona de estudio, se encuentra el trabajo realizado por Pedrozo-Acuña et al. (2015), el cual se ubica en la costa del estado de Quintana Roo, enfocándose en las afectaciones a las actividades económicas, la población y los manglares de la región ante el aumento del nivel del mar en una proyección desde 2010 hasta el 2100. Otro trabajo ubicado en la península de Yucatán es el elaborado por Redclift et al. (2011), el cual se centra en la zona del mar Caribe, el trabajo adopta una perspectiva de gobernanza para ver los efectos de la rápida urbanización, la migración urbana y el régimen de gobernanza sobre la distribución social de la vulnerabilidad, la capacidad adaptativa y riesgo en zonas costeras peligrosas.

Para la presente investigación se estudiarán las ciudades costeras de la península de Yucatán ya que es una zona de baja elevación y es una región donde se presentan continuamente tormentas tropicales, volviéndose una zona muy vulnerable a inundaciones a causa de aumentos del nivel del mar. La pregunta general que guía la tesis es ¿cómo incide el patrón histórico de la expansión (1975-2014) sobre el riesgo a inundaciones por aumentos en el nivel del mar en las ciudades costeras de la península de Yucatán? Se busca corroborar la hipótesis de que las ciudades costeras con tasas de expansión urbana más aceleradas, patrones de expansión urbana menos compactas, así como un crecimiento en dirección al mar, han ido aumentando la proporción de áreas urbanas expuestas a inundaciones asociadas a elevaciones extremas del nivel del mar relacionadas al cambio climático. El objetivo principal de la investigación es estimar cómo ha sido la expansión y forma urbana de cada ciudad de estudio y determinar cómo ese crecimiento determina el grado de exposición de las áreas urbanas de cada ciudad a las inundaciones por el aumento extremo del nivel del mar. En ese sentido, los objetivos específicos son: estimar el ritmo de la expansión y la forma urbana de cada ciudad costera; determinar el área urbana expuesta a inundaciones por el aumento del nivel del mar al encontrarse en zonas costeras de baja elevación y en el área urbana localizada en la franja costera; adicionalmente, se busca describir las modificaciones

en la intensidad del uso del suelo a lo largo del tiempo en cada ciudad y su vinculación con la exposición.

Los aportes que pretende hacer la presente tesis son, primero, entender cómo ha sido el crecimiento físico de las ciudades costeras de la península de Yucatán en una perspectiva histórica y su relación a exposición a inundaciones. A diferencia de lo realizado por Pedrozo-Acuña et al. (2015) se analiza la península de Yucatán en su totalidad, además de que se examina exclusivamente la superficie construida y se emplea un análisis netamente espacial. Otra contribución es la adopción de una perspectiva histórica en el sentido de observar cómo se ha conformado el grado de exposición al aumento del nivel del mar a partir del crecimiento de la “mancha urbana” desde 1975 hasta el año 2014 para cada una de las ciudades costeras de estudio, en otras palabras, se pretende ver la configuración del riesgo a inundaciones a partir de la localización física de los asentamientos urbanos. Además, el análisis urbano de cada una de las ciudades costeras implicará un análisis comparativo del crecimiento urbano de cada ciudad para vislumbrar semejanzas y diferencias del proceso, y cómo éste ha influido en la exposición a inundaciones por aumento del nivel del mar.

En lo descrito líneas arriba subyace el ánimo de propugnar la necesidad de desarrollar una *Urbanization Science* como plantean Solecki et al. (2013). Es decir, desarrollar trabajos que comprendan coherentemente la interacción de los procesos urbanos con los procesos sociales y biofísicos. Entre otras cosas, ésto supone que para entender de mejor forma el crecimiento de una ciudad y su ulterior desarrollo es importante tener información que muestre cómo ha cambiado a lo largo del tiempo. Además, para contribuir al mejor entendimiento del proceso urbano es crucial poder comparar los procesos de crecimiento entre ciudades de cualquier parte del mundo, lo cual implica el uso de métodos y fuentes de información homogéneas. Actualmente el uso de imágenes satelitales para los estudios urbanos ha contribuido en dicho papel de entender de mejor forma *lo urbano*. Muestra de ello es que la literatura especializada reconoce la importancia de las imágenes de sensores remotos en la identificación y mapeo de las nuevas áreas urbanas (Chowdhury et al., 2018). Algunos países, principalmente los países en desarrollo, no cuentan con datos censales o información de uso de suelo de forma periódica o tiene un alto costo el acceder a ellos, por lo cual las imágenes satelitales son una alternativa al ser de libre acceso y se encuentran en

una mayor cantidad de países (Leyk, Uhl, Balk, y Jones, 2018; Uhl et al., 2018). Además, las imágenes remotas implican un menor tiempo para su uso a diferencia de las formas convencionales de mapeo (Acheampong, Agyemang, y Abdul-Fatawu, 2017, p. 824). En suma, el uso de imágenes satelitales es una herramienta clave para el monitoreo del cambio de uso de suelo y medir la expansión urbana entre otros usos (D. L. Balk, Nghiem, Jones, Liu, y Dunn, 2019).

Justamente esta tesis emplea datos fundamentalmente basados en clasificación de imágenes satelitales y emplea la *Global Human Settlement Layer*, la cual es información tipo raster que contiene tanto información de superficie construida como cantidad de población⁴ desde 1975 hasta el año 2014, si bien la presente investigación se limitará a la evaluación de las edificaciones. Se estudiará las nueve ciudades costeras de la península de Yucatán: Ciudad del Carmen, Champotón, Campeche, Progreso, Cancún, Cozumel, Playa del Carmen, Tulum y Chetumal. A partir de la información de superficie construida para cada ciudad costera de estudio se estima las tasas de crecimiento urbano para determinar la velocidad de la expansión urbana; adicionalmente se construyeron índices de la forma urbana para examinar el grado de compacidad de cada ciudad y vincularlo a las tendencias de expansión. Posteriormente con información del modelo de elevación digital *MERIT* y con un radio de influencia de 1 kilómetro se establecen las zonas vulnerables a inundaciones por elevación del nivel del mar. A partir de éstas se identificó las áreas construidas expuestas al incremento del nivel del mar. Finalmente se mide y compara el grado de intensidad del uso del suelo urbana en cada ciudad, así como se considera la distancia respecto del nivel del mar de cada una de las diferentes zonas de las ciudades.

La investigación se organiza en tres capítulos. En el primer capítulo se presentará el marco teórico para comprender el cambio climático y sus consecuencias en zonas costeras, así como el proceso de expansión urbana junto y su relación a los peligros asociados al aumento del nivel del mar en zonas costeras bajas, el capítulo termina con una discusión sobre riesgo urbano. El segundo capítulo discute qué es la expansión urbana y la forma urbana, así como la forma de medirlas. Se describe los criterios para establecer las ciudades

⁴ Por cuestiones de delimitación y tiempo para realizar la tesis se optó por comprender sólo la información de superficie construida.

costeras de estudio, para después pasar a estimar su extensión física, así como las tasas y velocidades de crecimiento físico y, finalmente, caracterizar su forma urbana. En el tercer capítulo se examina la relación entre la expansión urbana y el riesgo de inundaciones por elevación del nivel del mar a través de dos aspectos, por una parte, la cercanía de las ciudades a la costa y por otra, la altitud en la que se encuentran las ciudades respecto al nivel del mar. Para ello se calculan indicadores tanto en términos del área construida en zonas de alta vulnerabilidad como de intensidad del uso del suelo y distancia respecto de la costa. Finalmente, se presentan las conclusiones generales del trabajo donde se resumen los principales hallazgos y la agenda de investigación pendiente, así como una serie de consideraciones en torno a la gestión urbana.

Capítulo 1: La expansión urbana y la configuración de riesgo ante el aumento del nivel del mar en zonas costeras bajas

Introducción

El crecimiento urbano es un fenómeno que se relaciona con la dinámica económica y poblacional de una ciudad, pero dicho crecimiento también tiene una dimensión física que consiste en la superficie construida, es decir, el área que está cubierta por edificaciones, constituyendo el medio ambiente construido de una ciudad. Los estudios urbanos se han concentrado principalmente en analizar aspectos particulares relacionados a alguna de estas tres dimensiones, algunos ejemplos de temas son el crecimiento de la oferta y demanda de trabajo dentro de una ciudad, el estudio del transporte urbano, también se estudia aspectos ambientales como la contaminación resultado del gran uso del autotransporte privado, asimismo hay estudios sobre la situación de riesgo de una ciudad por fenómenos naturales como un terremoto. Todos dando muestra del estado de una ciudad, así como su continuo crecimiento y aumento de complejidad de la dinámica urbana.

Sin duda, el crecimiento de las ciudades será un fenómeno que continuará en el siglo XXI. En ese sentido el proceso cada vez se volverá más complejo y un sin fin de artículos de investigación nos ayudarán a entender esa complejidad. Sin embargo, el proceso urbano está inmerso en un sistema climático mundial, el cual está siendo modificado y por lo tanto las condiciones climáticas de diferentes sitios del mundo cambiarán. Esto afecta directamente en la dinámica urbana por lo que no se puede dejar de lado las consecuencias directas e indirectas del proceso urbano, dentro y fuera de la ciudad, y sus interrelaciones con los sistemas ecoterrestres en donde ocurre. Esta investigación parte de esta idea y se concentra en entender la exposición de las ciudades costeras a riesgos por elevación del nivel del mar.

Por ello el propósito del presente capítulo es revisar los aspectos teóricos que ayuden a entender, en primer lugar, el cambio climático, para clarificar sus causas y consecuencias, particularmente en zonas costeras. En segundo lugar, revisaremos cómo este cambio en el clima puede generar situaciones de riesgo, al vincularse con procesos socioeconómicos. Finalmente, se tratará la cuestión de la expansión y forma urbana, para poder comprender que la dimensión física de una ciudad ayuda a entender la configuración del riesgo urbano.

1. Cambio climático y sus efectos en el nivel del mar

Si bien las primeras investigaciones relacionadas al clima de nuestro planeta se remontan al siglo XIX, ha sido en las últimas cuatro décadas cuando se ha podido obtener información más precisa de lo que ocurre en la atmósfera como resultado de la actividad humana; ello gracias a mediciones directas, a partir de satélites, de la temperatura de la superficie del planeta y de la atmósfera. Información que es procesada por grandes computadoras y examinada a partir de modelos climáticos (Molina, Sarukhán, y Carabias, 2017, pp. 25–26)

Actualmente existe un consenso entre la comunidad científica respecto a que hay una alteración en el clima mundial y que es muy probable que las actividades antropogénicas son la causa del cambio climático debido al aumento de las emisiones de gases efecto invernadero. Por ejemplo, el trabajo de Cook et al. (2013) analiza 11,944 diferentes trabajos científicos sobre el clima, de los cuales el 97.1% sostienen que el calentamiento global es debido a las actividades humanas.

Para entender en qué consiste el cambio climático es imprescindible describir la dinámica del sistema climático del planeta. Pero antes que nada cabe aclarar que es necesario diferenciar entre tiempo y clima. Tiempo hace referencia a las condiciones con las que amanece un día en términos de temperatura o fenómenos como la lluvia, el “tiempo” ocurre en escalas pequeñas, por ejemplo, una hora o un día. Mientras que el clima “son las condiciones promedio, para extensos períodos, de las temperaturas, las precipitaciones, la velocidad de los vientos y la humedad de un lugar o región, y que pueden presentar una determinada tendencia.” (Molina et al., 2017, p. 31).

En ese sentido el sistema climático está compuesto por: la atmósfera; la hidrosfera; la criosfera; la superficie terrestre y la biosfera (Castro, Muñoz, y Peralta, 2015, p. 20; IPCC, 2013a, p. 1451). La atmósfera es un componente clave del sistema climático porque establece la dinámica climática del planeta al determinar la temperatura media en la tierra a partir de un fenómeno llamado efecto invernadero natural. Este fenómeno ocurre de la siguiente manera: el sol emite radiación solar que llega hasta la Tierra, cerca de un tercio de esta energía solar es reflejada al espacio por las nubes, el hielo y grandes desiertos (Molina et al., 2017, pp. 33–34), los restantes dos tercios de energía solar es absorbido por la superficie terrestre y expulsada en forma de radiación infrarroja. La atmósfera, que es un conjunto de capas de

diferentes gases que cubren la superficie de la Tierra (Castro et al., 2015, p. 16), ayuda a capturar cierta cantidad de dicha radiación infrarroja esto es debido a que la atmosfera cuenta con ciertos gases presentes de forma natural, denominados gases efecto invernadero (GEI), éstos atrapan la energía infrarroja y la emiten a diferentes direcciones incluyendo la superficie terrestre. Si no existiera la atmósfera la temperatura terrestre sería de -18°C , gracias al efecto invernadero natural la temperatura promedio del planeta es de 15°C (Molina et al., 2017, p. 36), esto hace habitable el planeta para toda la diversidad de organismos vivos existentes.

La dinámica del sistema climático ha cambiado a partir de la revolución industrial ya que la emisión GEI por actividades humanas, principalmente por la quema de combustibles fósiles, ha ido aumentando desde entonces. Por ejemplo, la concentración de GEI como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O) ha aumentado 40%, 150% y 20% respectivamente, en relación al año 1750 (IPCC, 2013b: 11). Como consecuencia de esto se estima que la temperatura promedio mundial ha aumentado 0.85°C del periodo de 1880 al 2012 (IPCC, 2013b, p. 5; Molina et al., 2017, pp. 70–71).

Este ascenso progresivo de la temperatura promedio de la superficie de la Tierra altera otros componentes del sistema climático, ocasionando diferentes cambios físicos que, al mismo tiempo, vuelven a influir en el clima, presentándose una suerte de retroalimentación en el sistema climático del planeta (Molina et al., 2017, p. 70). En ese sentido el cambio climático se define como el cambio en las características climáticas -como temperatura, humedad, lluvia, viento y fenómenos meteorológicos severos- durante periodos de tiempo prolongados los cuales son atribuidos directa o indirectamente a las actividades humanas (IPCC, 2013a, p. 1450). Estos cambios en las características climáticas no se comportan de forma lineal, es decir, cada componente del sistema climático influye en generación de nuevas características climáticas y éstas a su vez influyen en las condiciones de cada componente del sistema climático.

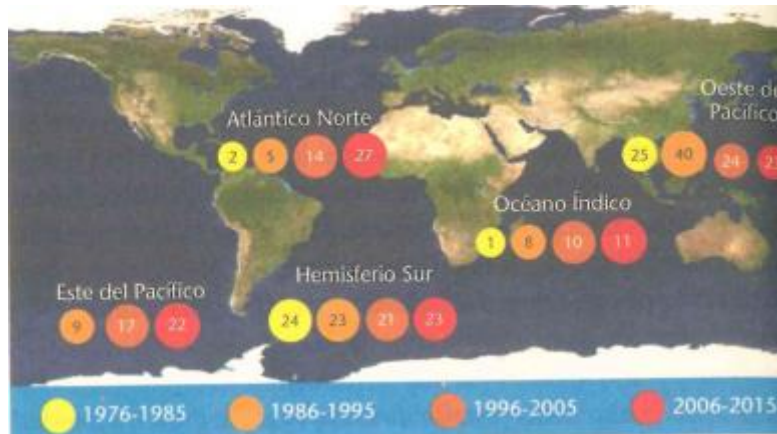
A medida que la temperatura del planeta cambie el nivel del océano también lo hará. Esto es debido a que la temperatura global y el nivel del mar están asociados por dos mecanismos físicos. El primero consiste en que con mayores temperaturas terrestres el volumen de hielo ubicado en los casquetes en el Ártico y en la Antártida, así como el hielo de Groenlandia, se reducirá y, con ello, aumentará el nivel promedio del mar de manera

directa (Castro et al., 2015, p. 42). De acuerdo con registros históricos, desde mediados del siglo XIX el ritmo de la elevación del nivel del mar ha sido superior a la media de los dos milenios anteriores, de hecho, durante el período 1901-2010, el nivel medio global del mar se elevó 0.19 metros. Datos globales indican que en el periodo comprendido entre 1961 y 2003 el nivel del mar aumentó a una tasa promedio de 1.8 +/- 0.5 mm al año y de 1993 a 2003 la tasa de incremento fue de 3.1 +/- 0.7 mm al año (Rosenzweig *et al.*, 2007 en Zavala-Hidalgo, Kalman, Romero-Centeno, y Hernández, 2011, p. 316). El segundo mecanismo físico consiste en la expansión térmica del mar; esto significa que el nivel promedio del mar sube al incrementar su volumen debido al aumento de la temperatura del agua. Esto ocurre porque los océanos capturan entre un 80% y 90% de la energía infrarroja capturada por los GEI (Castro et al., 2015, p. 38) ocasionando una elevación de la temperatura del mar. Se han hecho mediciones de la temperatura promedio del océano desde el siglo XX y se ha encontrado que, en el periodo del año 1901 al 2012, la tasa promedio de elevación de la temperatura ha sido de 1°C por década y los incrementos más altos han ocurrido en los últimos 30 años (Castro et al., 2015, p. 39). Si bien este aumento del volumen del agua a causa de una mayor temperatura es micrométrico, al considerar los millones de litros de agua existentes en el mar el fenómeno tiene una mayor magnitud de lo que uno puede imaginar, por lo cual se vuelve un peligro que no hay que desestimar (Castro et al., 2015, p. 42).

Otra consecuencia de océanos más cálidos es un aumento de intensidad y frecuencia de eventos hidrometeorológicos, tales como huracanes y ciclones tropicales. La razón por la cual se observa dicho aumento de intensidad y frecuencia ciclónica es que el calentamiento de la superficie de los océanos produce mayor humedad; genera vientos de aire más caliente, intensos y con más agua, aumentando la energía disponible para los huracanes (Castro et al., 2015, p. 48; Molina et al., 2017, p. 73). Tan sólo para el periodo comprendido de 2006 al 2015, en el océano Atlántico Norte se han presentado 27 huracanes categoría 4 y 5 en contraste con 2 en el periodo de 1976 a 1985 (véase Figura 2). Al haber una mayor cantidad de ciclones y más intensos se presentarán mareas de tormenta más altas, lo que la literatura cataloga como niveles extremos del nivel del mar (ACE, 2008, p. 6; IPCC, 2013a, p. 1463). Con mayores mareas de tormenta, es decir, con oleajes de mayor altura, habrá mayores inundaciones temporales a lo largo de áreas costeras de baja altura, este aspecto es

considerado uno de los más destructivos derivado de la actividad ciclónica (ACE, 2008, p. 12; CMM, 2017, p. 2).

Figura 1. Número de huracanes intensos en todos los mares desde 1976 al 2015.



Fuente. Extraído de Molina *et al.* (2017, p. 74).

Los impactos de los cambios en la temperatura y volumen de los océanos se traducen en dos tipos de amenazas. Por un lado, el paulatino aumento del nivel del mar que amenaza con cubrir de manera permanente ciertas zonas costeras (a esto se le denomina aumento del nivel del mar a largo plazo) y, por el otro, amenazas repentinas, como lo son las mareas de tormenta derivadas de eventos extremos o como lo son los ciclones tropicales (a esto otro se le denomina aumento extremo del nivel del mar (Reguero et al 2015, p. 2). Estos aumentos del nivel del mar ocasionan dos tipos de inundaciones, unas permanentes y otras temporales, respectivamente.

En el caso de México, el número de desastres hidrometeorológicos ha crecido en las últimas décadas esto lo muestra el número de declaraciones oficiales de desastre, emergencia o contingencia por parte del Centro Nacional de Prevención de Desastres, tan sólo para 2001 se tenía aproximadamente 200 declaratorias y en 2007 se llegó a aproximadamente 1,500 declaratorias (El Colegio de México, 2018, p. 92).

En relación a la frecuencia y susceptibilidad de presentarse ciclones tropicales en la zona de estudio, la península de Yucatán, el Atlas Climático Digital de México de la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales del Centro de Ciencias de la Atmosfera de la UNAM, tiene el registro de que a lo largo de la costa del estado de Campeche

se han presentado entre 180 a 237 ciclones tropicales en la cuenca del Atlántico que impactaron las costas con un radio de influencia de 350 km desde junio de 1851 a noviembre del 2015, para el caso del estado de Yucatán y de Quintana Roo fueron entre 237 y 296 ciclones tropicales del mismo periodo y con las mismas características. Además, tienen registro de ciclones tropicales con un radio de influencia de 150 km donde se estima entre 77 a 104 ciclones en las costas de Campeche y en Yucatán, mientras que para el estado de Quintana Roo se tiene de un registro entre 104 a 136 ciclones a lo largo de su costa para el periodo de tiempo ya referido. Un caso severo en los últimos años ocurrió en 1988 donde el huracán Gilberto se catalogó como un huracán de categoría 5 y generó mareas de tormentas que alcanzaron entre 30 y 40 metros de altura (Molina, Rubinoff, y Carranza, 2001, p. 27). Las repercusiones de ese evento se estiman en 4,000 cuartos de hotel afectados en Cancún y hasta 1,350 habitaciones hoteleras en Cozumel, lo que muestra las severas consecuencias sociales y económicas de este tipo de eventos. Si bien huracanes de esta categoría no ocurren cada año, durante los meses de julio a octubre se presentan tormentas tropicales cuyos vientos pueden generar olas de hasta 10 metros de alto (Molina et al., 2001, p. 27).

Pero ¿cómo es que este proceso biofísico se asocia con un proceso social cómo lo es la urbanización? Así mismo, ¿cómo es que el crecimiento de una ciudad puede aumentar el riesgo a sufrir inundaciones de este tipo? Para poder comprender la relación de un proceso ambiental y social cabe exponer como se conceptualiza la construcción de un riesgo y cómo se da el crecimiento de una ciudad en su aspecto físico.

2. Riesgo urbano y su configuración social a partir de la urbanización

La investigación sobre riesgo ha ido en aumento, pero ha conllevado diferencias interdisciplinarias en su definición y en los enfoques utilizados. Un ejemplo de esta variedad nos la señala Thywissen (2006) al identificar 25 definiciones de riesgo. El riesgo se suele definir como la probabilidad de ocurrencia de un peligro; la posibilidad de pérdida, daño y otros perjuicios; la probabilidad de ocurrencia de un evento adverso o la probable magnitud de sus consecuencias (P. Romero-Lankao y Gnatz, 2016, p. 214). A pesar de la diversidad de definiciones, el enfoque preponderante en cuestión de riesgo consiste en ver cómo los sucesos ambientales peligrosos, por ejemplo, temperaturas y precipitaciones extremas o la

contaminación del aire, generan un resultado negativo como puede ser un daño económico, o el aumento de la mortalidad o morbilidad.

Así mismo ha habido nuevos consensos sobre la definición de riesgo y sus componentes dentro de la literatura especializada y que se ha adoptado dentro de instituciones como el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2018; IPCC, 2012). Dicho consenso establece tres componentes del riesgo: peligro, exposición y vulnerabilidad (Cardona et al., 2012, p. 69). Desde esta perspectiva el riesgo significa la posibilidad de efectos adversos en el futuro. El riesgo deriva de la interacción entre procesos sociales y ambientales, en ese sentido el riesgo no es estático, está en constante evolución. El riesgo de desastre también puede comprenderse como la materialización del riesgo existente en una sociedad y que es, en sí, una construcción social. Los efectos adversos como pérdida de vidas humanas o pérdidas financieras suceden a partir de un fenómeno determinado. Es a partir de la mensurabilidad de estos efectos adversos en que se puede calificar el grado de un desastre (Cardona et al., 2012, p. 69).

El *peligro* es entendido como la posible o futura ocurrencia de un evento físico natural o inducido por el factor humano que puede tener un efecto adverso sobre un elemento expuesto y vulnerable (Cardona et al., 2012, p. 69). Algunos ejemplos de peligros son: huracanes, erupciones volcánicas, explosión de una planta de energía nuclear, entre otros. Por su parte, cuando uno habla de *exposición* se refiere al conjunto de elementos localizados en un área determinada en la cual los eventos peligrosos pueden ocurrir (Cardona et al., 2012, p. 69). Por ejemplo, podemos hablar de personas u objetos (como casas) expuestos al peligro huracán. Siguiendo esa lógica, si no hay elementos expuestos a un peligro, entonces no existiría riesgo alguno. La *vulnerabilidad* se define como la propensión de los elementos expuestos a sufrir efectos adversos cuando son afectados por un evento peligroso. En ese tenor, la vulnerabilidad está relacionada a la predisposición, susceptibilidad, fragilidad, debilidad, deficiencias o ausencia de capacidades que aminora los efectos adversos de los elementos expuestos (Cardona et al., 2012, p. 70). La vulnerabilidad está en función de circunstancias históricas, culturales, políticas, económicas y ambientales (Cardona et al., 2012, p. 71). Cabe mencionar que vulnerabilidad y exposición no es lo mismo, la exposición

es un determinante necesario, pero no suficiente del riesgo, es posible estar expuesto, pero no vulnerable.

Cardona *et al.* (2012) establecen tres dimensiones de la exposición y la vulnerabilidad: la dimensión ambiental, la social y la económica. Para nuestros fines únicamente nos centraremos en la dimensión ambiental de la vulnerabilidad. Dicha dimensión ambiental consta de tres aspectos de acuerdo con los autores: el físico; el geográfico y el de ubicación; finalmente, los patrones de los asentamientos y trayectorias de desarrollo. Los aspectos físicos, el primer rubro, se refiere a la ubicación específica donde ocurre la interacción entre los asentamientos humanos y el mundo natural. La exposición física de los seres humanos a los peligros es influida por la localización de asentamientos humanos en áreas propensas a peligros. En ese sentido, al considerar la dimensión física de la vulnerabilidad estamos reconociendo el vínculo existente entre un fenómeno natural peligroso y un grupo de personas u objetos propensos al peligro (Cardona et al., 2012, p. 77). En un segundo lugar, la geografía de un lugar, así como su localización influye en la determinación de exposición y vulnerabilidad, por ejemplo, a pesar que haya fenómenos naturales similares a lo largo del mundo, no es lo mismo sus repercusiones en países desarrollados que en países en vías de desarrollo (Cardona et al., 2012, p. 78). El tercer rubro, los patrones de asentamientos, está compuesto por los asentamientos de carácter urbano y rural. Este último rubro y en específico el aspecto urbano será retomado más adelante.

Una vertiente de estos estudios considera al riesgo como socialmente construido y que se puede gestionar, esa perspectiva se denomina gestión del riesgo o gestión integral del riesgo (GIR)⁵. En palabras de Lavell la GIR es un “proceso social complejo que conduce al planteamiento y aplicación de políticas, estrategias, instrumentos y medidas orientadas a impedir, reducir, prever y controlar los efectos adversos de los fenómenos peligrosos sobre la población, los bienes y servicios y el ambiente. Acciones integradas de reducción de riesgos a través de prevención, mitigación, preparación para, y atención de emergencias y recuperación post impacto” (Lavell, n.d., p. 19). La GIR subraya que en cuestiones de desastres⁶ la atención no debe recaer totalmente

⁵ Si bien en la literatura se llega a mencionar la “gestión del riesgo” (Lavell, s/f: 19) o “gestión integral del riesgo” (Puente, 2014), no hay demasiadas diferencias entre una u otra y ambas tienen como base una planificación integral, además consideran la prevención como piedra angular de la teoría.

⁶ Se define como una “Situación o proceso social que se desencadena como resultado de la manifestación de un fenómeno de origen natural, tecnológico o provocado por el hombre que, al encontrar condiciones

en la magnitud de un evento físico, sino que se deben considerar las condiciones y repercusiones sociales, económicas y ambientales (Lavell, n.d., p. 1). Adicionalmente, esta perspectiva teórica considera a los desastres como una consecuencia de un proceso social, resultados de los modelos de desarrollo adoptados, así como una forma de interacción y apropiación de la naturaleza específica. Un ejemplo puede ser las ciudades costeras asentadas cerca de las zonas vulnerables a inundaciones; en este caso, el proceso social de expansión urbana termina influyendo en la construcción social del desastre (Pelling, 2003, p. 7; Puente, 2014, p. 695). Pero también puede ocurrir la existencia de un desarrollo urbano ideal donde el riesgo de desastres se reduzca conforme la ciudad se transforma y evoluciona, esto conforme la implementación de planeación y ordenamiento natural. Así como otros enfoques como la resiliencia urbana.

La sutil diferencia entre la GIR y la perspectiva general de riesgo descrita líneas arriba consiste en que el riesgo está compuesto por dos componentes: la amenaza y la vulnerabilidad. Donde la definición de los conceptos riesgo y amenaza se asemejan a la teoría general del riesgo, mientras que la vulnerabilidad en la GIR conjuga el concepto de vulnerabilidad y exposición.

Antes de describir la vulnerabilidad y riesgo urbano y poder entender la configuración social del riesgo a partir del crecimiento urbano, haremos dos señalamientos sobre la relación existente entre el ser humano y la naturaleza. Primero veremos en un sentido abstracto como se concibe la apropiación de la naturaleza por parte del ser humano, posteriormente disminuirémos el grado de abstracción para describir la urbanización.

El trabajo de Ibarra *et al.* (1984) nos ayuda a visualizar el proceso de conformación de un medio ambiente urbano. En un primer momento, una ciudad tiene una traza urbana delimitada, que es su medio ambiente social-artificial (Ibarra et al., 1984, p. 118), mientras que toda la naturaleza alrededor de la ciudad es el medio ambiente inmediato (Ibarra et al., 1984, p. 118). Conforme se van desarrollando nuevas actividades económicas y la población

propicias de vulnerabilidad en una población, causa alteraciones intensas, graves y extendidas en las condiciones normales de funcionamiento de la comunidad; representadas de forma diversa y diferenciada por, entre otras cosas, la pérdida de vida y salud de la población; la destrucción, pérdida o inutilización total o parcial de bienes de la colectividad y de los individuos así como daños severos en el ambiente, requiriendo de una respuesta inmediata de las autoridades y de la población para atender los afectados y restablecer umbrales aceptables de bienestar y oportunidades de vida.” (Lavell, s/f: 17).

incrementa, la ciudad crece y va desarrollando el medio ambiente construido urbano (Ibarra et al., 1984, p. 123), es decir, va aumentando y cambiando sus diferentes equipamientos como escuelas, oficinas, museos, viviendas etc. El segundo componente del medio ambiente urbano es el medio ambiente físico-natural, el cual consiste en los elementos naturales que cuenta una ciudad, elementos como el aire, el agua y tierra son ejemplos del medio ambiente físico-natural urbano, los cuales al mismo tiempo van cambiando su calidad por los residuos generados dentro de la ciudad. En otras palabras, cada vez hay más medios ambientes transformados conforme crecen las ciudades a costa del medio ambiente inmediato (Ibarra et al., 1984, p. 116). Una vez transcurrido este proceso hasta la actualidad se establece el medio ambiente urbano moderno (Ibarra et al., 1984, pp. 123–124). Briones y Lucatello (2018) coinciden con esta perspectiva en tanto señalan que los asentamientos humanos se construyen y se configuran modificando la naturaleza. El producto de este proceso es un nuevo entorno construido (Briones y Lucatello, 2018). A esta combinación de un ambiente “natural” con un ambiente social bajo patrones de alta centralidad y densidad se le conoce como medio ambiente urbano (Briones y Lucatello, 2018). Desde un punto de vista poblacional y económico la ciudad domina y modifica (de forma creciente tomando en cuenta las tendencias globales actuales) el entorno de la existencia inmediata del ser humano, es decir, la naturaleza. De este modo la urbanización parece irreversible (Briones y Lucatello, 2018).

Para entender cómo influye el crecimiento de los centros urbanos en el riesgo es preciso mencionar antes algunas implicaciones que tiene la urbanización sobre aspectos sociales y ambientales. Para Romero-Lankao y Gnatz (2016), Marcotullio et al. (2014) y Romero-Lankao et al. (2014) entienden la urbanización como una serie de transiciones interconectadas que definen cómo los humanos interactúan unos con otros y con el medio ambiente. Dichas transiciones son: el incremento de número de personas en un área urbana; cambios en los estilos de vida y la cultura de las personas; cambios económicos; expansión de usos de suelo urbano e infraestructura; modificación de ecosistemas, hábitats y sistemas hidrológicos. Estos cambios tienen cualidades espaciales únicas. Ya que el espacio altera las relaciones entre seres humanos, así como la relación existente entre seres humanos y el medio ambiente.

En esa misma tonalidad Romero-Lankao y Gnatz (2016) afirman la existencia de dos procesos que ocurren al mismo tiempo al momento que se va dando la urbanización. El primero consiste en que las áreas urbanas son motores de la transformación de los entornos naturales y consecuentemente causantes de los cambios que ocurren en los ciclos naturales, por ejemplo, en el ciclo del agua o del carbón. El segundo proceso consiste en que las mismas áreas urbanas se van volviendo vulnerables o en riesgo a fenómenos asociados a los cambios ocurridos en los ciclos naturales que fueron perturbados por las áreas urbanas.

Un aspecto más concreto de la noción de riesgo es su aplicación con un proceso social como lo es la urbanización. En la literatura se suele percibir a la rápida urbanización y al desarrollo urbano como determinantes de vulnerabilidad y riesgo en el sentido de sus repercusiones sobre el medio ambiente; sin embargo, aún queda por determinar los mecanismos por los cuales la urbanización influye sobre la vulnerabilidad en términos de la construcción de espacios urbanos. En ese sentido, los conceptos de vulnerabilidad y riesgo urbano han ayudado en dar luz sobre la relación de urbanización y determinación del riesgo. A continuación, trataremos la noción de vulnerabilidad urbana y sus principales perspectivas que se han desarrollado para posteriormente ver una perspectiva más integral de la cuestión y que considera la noción de riesgo urbano.

Se considera a la vulnerabilidad urbana como el grado en el cual una ciudad, población, infraestructura o sector económico es susceptible e incapaz de enfrentarse con efectos adversos de peligros como olas de calor, tormentas e inestabilidad política, entre otros (Revi et al., 2014 en Romero-Lankao y Gnatz, 2016, p. 214). En ese sentido Romero-Lankao y Gnatz (2016) señalan que la vulnerabilidad urbana es un concepto que comprende la dinámica y la complejidad de la realidad. Así mismo se revela el papel de la sensibilidad de un sistema y su capacidad para lidiar con un peligro. Por tanto, el concepto de vulnerabilidad no se puede definir sin el concepto de peligro ni prescindiendo de las características internas de un sistema⁷. Esto es importante ya que puede haber ciudades donde ocurren diferentes peligros, pero éstas cuentan con sistemas preparados para los eventos adversos, ocasionando

⁷ De acuerdo con la entrada del Diccionario del español de México un sistema se define como: “Conjunto de elementos, reglas, partes, etc., relacionados entre sí, que permite el funcionamiento de algo o produce cierto resultado”. En el ámbito académico se suele referir a diferentes tipos de sistemas como el sistema ambiental, sistema social, sistema económico, sistema urbano, entre otros.

que sean ciudades no vulnerables. Un ejemplo de ello es Japón, zona de alta actividad sísmica, cuyas ciudades cuentan con estructuras resistentes a sismos, logrando ser áreas urbanas menos vulnerables a dicha amenaza.

Romero-Lankao y Gnatz (2016) identifican tres principales corrientes dentro del tema de vulnerabilidad urbana, a saber, la vulnerabilidad como impacto; la vulnerabilidad inherente y, finalmente, la resiliencia urbana. La primera corriente identifica a la vulnerabilidad como un resultado a la exposición a uno o más peligros dada una determinada sensibilidad del sistema urbano. Los estudios de este paradigma están abocados con la relación -de tipo linear- entre el peligro y la repercusión, a razón de que se buscan ver, por ejemplo, cómo cambios en la temperatura se relacionan con perjuicios como la mortalidad. Este tipo de estudios pueden relacionarse a perspectivas de cambio climático en centros urbanos al usar parámetros como temperatura y lluvias que cambiarán en el futuro (P. Romero-Lankao y Gnatz, 2016, p. 214). La segunda perspectiva, vulnerabilidad urbana inherente, ve a la población a escala comunidad o vecindad. Estos trabajos dan luz sobre la capacidad adaptativa y sobre los conductores estructurales que crean diferencias en la situación de vulnerabilidad y riesgo de la población urbana (Pelling, 1999 en Romero-Lankao y Gnatz, 2016). Dentro de esta perspectiva hay diferentes ámbitos de análisis, tales como el ámbito de viviendas, de la ciudad y el de gobernanza. Cada ámbito influye en la capacidad de adaptación, por lo cual aspectos como clases sociales o segregación socio-espacial ayudan a explicar la determinación del riesgo y vulnerabilidad urbana (Romero-Lankao y Gnatz, 2016, p. 216). Un ejemplo de ello es cuando la población con mayores recursos puede elegir vivir en los lugares con mayores amenidades y servicios públicos. En ese sentido son las instituciones y los actores sociales los que determinan la vulnerabilidad ante un peligro dado, por ejemplo, inundaciones (Aragón-Durand, 2007; Manuel-Navarrete et al., 2011 en Romero-Lankao y Gnatz, 2016); si bien existen peligros que afectan a todos los grupos – como la contaminación del aire que afecta a toda la población expuesta-, sin embargo, los pobres pueden ser más susceptibles por lo cual serían los más afectados ante cualquier riesgo climático. Respecto a este enfoque Romero-Lankao y Gnatz nos advierten que la perspectiva de vulnerabilidad urbana inherente no ofrece un completo orden causal que muestre cómo las desigualdades sociales y los peligros corresponden a diferentes repercusiones, susceptibilidades y capacidades de adaptación (2016, p. 216). Finalmente, la perspectiva de resiliencia urbana

añade la idea de que las personas o lugares vulnerables tienen la capacidad de recuperarse de algún peligro. En palabras de Field et al. (2014) la resiliencia urbana es

*“(...) la capacidad de sistemas sociales, económicos y ambientales a enfrentarse con un evento, tendencia o perturbación peligrosa, respondiendo o reorganizándose en maneras que mantengan el funcionamiento, identidad y estructura esencial, además de mantener la capacidad de adaptación, aprendizaje y transformación”*⁸ (Field et al., 2014, p. 40).

Si bien estas son las corrientes principales dentro del tema de vulnerabilidad y riesgo urbano, no representan el total de las ideas que se han presentado en el campo. Una perspectiva que a continuación se quiere profundizar es la perspectiva de Cardona *et al.* (2012) (mencionada líneas arriba), la cual hace énfasis en el papel que tienen los aspectos físicos, geográficos y los patrones de asentamientos humanos sobre la configuración de la exposición y la vulnerabilidad y, por tanto, también del riesgo.

Briones y Lucatello definen la construcción social de riesgos como un proceso de aumento de las condiciones de vulnerabilidad que hacen a una sociedad susceptible de sufrir daños (2018, p. 64). En ese tenor, los autores apoyan la idea de Aragón-Durand de que los riesgos son resultado de transformaciones socioambientales (Briones y Lucatello, 2018, p. 66). La idea de Aragón-Durand en sus propias palabras es:

*“El enfoque aquí es sobre la relación dinámica entre la generación de peligros y la construcción de vulnerabilidad, donde las instituciones y actores sociales tienen un papel importante. Los peligros naturales no sólo son causados por los fenómenos naturales, además son producto de cambios socio-ambientales en el transcurso del tiempo como la urbanización, la migración y el desarrollo capitalista”*⁹ (Aragón-Durand, 2007, p. 491).

Para Aragón-Durand la urbanización puede causar situaciones de riesgo, mientras Briones y Lucatello sostienen que la urbanización, en vez de ser una oportunidad para truncar la generación de situaciones de riesgo, las generan al aumentar la exposición de personas y bienes frente a las amenazas, creando así nuevos territorios de riesgo (Briones y Lucatello, 2018, p. 63). En ese sentido los autores están de acuerdo con la idea de que las actividades humanas intensifican el riesgo. Pero es necesario polemizar esto ya que no todas las

⁸ Traducción propia.

⁹ Traducción propia.

actividades humanas generan situaciones de riesgo. La cuestión depende de una cuestión cualitativa, a saber, en la pregunta ¿cómo?

Otro punto de vista al respecto es el de Lavell (1996), este autor señala que hay ocho aspectos de las ciudades que contribuyen al riesgo de desastre y a la vulnerabilidad frente al cambio climático: primero, la naturaleza sinérgica de la ciudad y la interdependencia de sus partes; segundo, la ausencia de transporte, energía o sistemas de drenaje; tercero, la densidad de población y edificaciones; cuarto, una mala ubicación de la ciudad; quinto, segregación socioespacial; sexto, degradación ambiental; séptimo, ausencia de coordinación institucional y; octavo, la funcionalidad de una ciudad al rebasar los límites administrativos que impiden la coordinación de acciones por parte de las autoridades. A manera de corolario podría señalarse: no toda urbanización genera situaciones de riesgo, sino aquella mal planeada, que carezca de coordinación institucional, así como un crecimiento rápido y desmedido genera situación de riesgo de desastre. Y en sentido inverso, aquel crecimiento ordenado, planeado, que considere el aspecto geográfico en que se da el crecimiento urbano puede dar paso a ciudades seguras.

Retomando lo señalado por Lavell respecto al factor de ubicación de una ciudad, se observa que conforme las ciudades se vayan expandiendo hacia áreas vulnerables al cambio climático y a eventos climáticos extremos, las ciudades irán aumentando su grado de exposición a eventos climáticos (UN-Habitat, 2011, p. 85). Por ejemplo, las zonas costeras bajas¹⁰ son áreas vulnerables al cambio climático, las ciudades asentadas en estas regiones están expuestas (tanto en términos de personas como de edificaciones) a peligros como el aumento del nivel del mar y mareas de tormenta, por lo tanto las urbes están en situaciones de riesgo de inundaciones, sólo por el hecho de estar cerca del mar (Briones y Lucatello, 2018: 61; Cardona *et al.* 2012: 77; McGranahan, Balk, y Anderson, 2007 ; UN-Habitat, 2011: 86). Pero como se discurre líneas arriba, el grado del riesgo de inundaciones dependerá de diferentes acciones humanas, tales como el tipo de crecimiento que se suscite, así como el tipo de coordinación institucional existente.

¹⁰ Son aquellas zonas que se encuentran a menos de 10 metros sobre el nivel del mar (McGranahan, et al. 2007: 17).

Cardona *et al.* (2012) han hallado que en Estados Unidos aspectos como el grado de densidad, urbanización y desarrollo del ambiente construido, entre otros, contribuyen consistentemente en el incremento de situaciones de vulnerabilidad (2012: 78). Esto corrobora que la localización de una ciudad es un aspecto que contribuye al grado de exposición de una ciudad ante un peligro. Cardona *et al.* están de acuerdo que el proceso de urbanización y la degradación ambiental son mecanismos significantes del riesgo que están relacionados con la creación de vulnerabilidad y exposición (2012: 71) y estas tendencias son aparentes, por ejemplo, la acelerada urbanización, la extensión a la cual estos mecanismos están alterando los grados de riesgo y vulnerabilidad en un rango de escalas geográficas y temporales no es clara. Es decir, hay consenso en que existen esta conexión de procesos, pero el conocimiento actual no provee cuantificaciones específicas (Cardona *et al.* 2012: 76).

Ante lo anteriormente dicho hay que tener precaución pues Cardona *et al.* (2012) nos señalan que la urbanización en sí no siempre es un determinante para incrementar la vulnerabilidad. A veces el tipo de urbanización y las circunstancias en que la urbanización se encuentra define si contribuye a incrementar o reducir la vulnerabilidad de las personas (Cardona *et al.* 2012: 79). Así mismo hay que considerar que a pesar de la existencia de países preparados a diferentes amenazas climáticas, las áreas urbanas aún pueden verse afectadas debido a que el cambio climático está incrementando la frecuencia y la intensidad de diferentes fenómenos climáticos, por lo cual ciertas ciudades están correctamente adaptadas a un rango de variabilidad climática, pero no a fenómenos fuera de ese rango.

Estas ideas de cómo la urbanización influye directamente en el riesgo aún son insuficientes para tener una perspectiva completa de los procesos involucrados entre la urbanización y la generación de riesgos. Es por ello que presentamos la propuesta de Romero-Lankao y Gnatz (2016) que consiste en un marco integrado, consistente y analítico de los procesos sociales y ambientales en la configuración de riesgos urbanos. Es por ello que hacemos uso de su marco conceptual en la presente investigación.

Como se mencionó anteriormente, la urbanización da lugar a áreas urbanas con características físicas, socio-económicas e institucionales únicas. Además de estas características, la mayor concentración de personas y/o infraestructura en áreas urbanas,

calidad del suelo, uso del suelo y las características funcionales del suelo, son algunas de las causas que influyen en el grado del riesgo y vulnerabilidad urbana, sin embargo, estos factores no son completamente entendidos hoy en día (Romero-Lankao y Gnatz, 2016: 219). Podemos mencionar dos ejemplos, el primero consiste en que el aumento de población y actividades económicas puede ocasionar la inexistencia de espacios adecuados para evacuaciones. Otro caso es cuando la población de altos ingresos está atraída por las propiedades ubicadas en zonas costeras bajas, o bien, los grupos de bajos ingresos, en ausencia de los medios para acceder a una tierra segura, se asientan en sitios de riesgo de inundaciones u otros peligros.

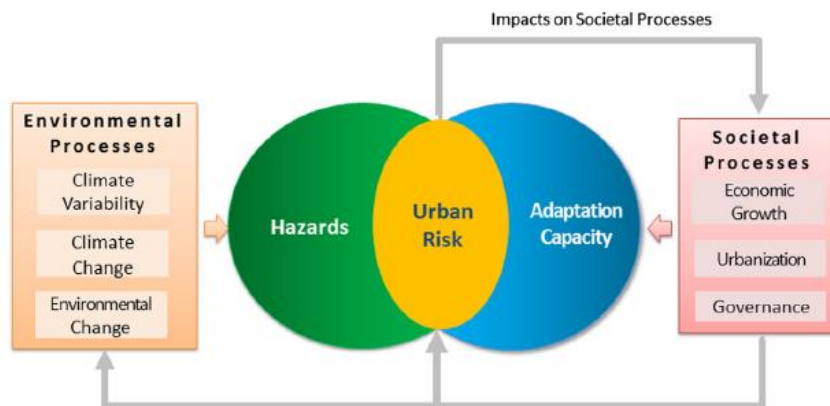
El marco conceptual, presentado por Romero-Lankao y Gnatz (2016), trata dilucidar los mecanismos por los cuales una interacción de factores físicos y sociales aumentan la vulnerabilidad y riesgo urbano dentro de una circunstancia local. Dentro de este marco el riesgo urbano es resultado de la exposición a peligros¹¹ mediados por capacidades particulares para percibir y responder a los peligros, en ese sentido el riesgo urbano es la posibilidad de pérdida, perjuicio y otros resultados derivados de dos mecanismos, a saber, la convergencia de peligros con las vulnerabilidades o capacidades de las poblaciones expuestas o de la interacción de procesos ambientales y sociales más amplios como el cambio climático, la urbanización o estructuras de gobernanza (2016: 222). La capacidad de adaptación es importante dentro de este marco, ésta se define como la habilidad de la población o áreas urbanas para percibir y evitar riesgos o disminuir las consecuencias negativas de múltiples peligros a los cuales están expuestos (Romero-Lankao y Gnatz, 2016: 223).

El riesgo y la vulnerabilidad urbana son determinados por dos procesos más amplios: el ambiental y el social. El proceso ambiental comprende aspectos como la variabilidad climática, el cambio climático y el cambio ambiental, aspectos que se reflejan en fenómenos como cambios en la precipitación, temperatura, aumento del nivel del mar, así como otros componentes del clima, dichos fenómenos están teniendo (y continuarán teniendo) un efecto sobre la extensión y localización de peligros físicos para las áreas urbanas. El proceso social comprende fenómenos económicos, aspectos políticos (como la gobernanza) y la

¹¹ Dentro de este marco los peligros son entendidos como perturbaciones probables que las poblaciones urbanas, actividades económicas e infraestructura están expuestas (Romero-Lankao & Gnatz, 2016: 222).

urbanización (Romero-Lankao y Gnatz, 2016: 223). La dinámica de los procesos sociales influye directa e indirectamente en la configuración del riesgo urbano. Por un lado, directamente modifica los componentes del riesgo como la vulnerabilidad, la capacidad de adaptación y la exposición; por otro lado, conforme se desarrolla la dinámica social urbana se alteran los procesos ambientales, consecuentemente se alteran los peligros físicos existentes e, indirectamente, lo social modifica los peligros y con ello el riesgo urbano. Una vez que se ha cambiado el riesgo urbano el proceso social vuelve a tener un proceso de cambio. El resultado general de esto es la existencia de una retroalimentación dentro de los mecanismos de configuración del riesgo urbano (Véase Figura 3). A manera de ejemplo, la urbanización, por un lado, influye en el riesgo urbano al modificar el factor exposición al expandirse las áreas urbanas hacia áreas vulnerables de algún peligro físico. Por el otro lado, la urbanización influye en el cambio de los procesos ambientales ya que el crecimiento urbano aumenta las emisiones de GEI intensificando el cambio climático, mismo que aumenta la intensidad y frecuencia de fenómenos físicos que las áreas urbanas están expuestas.

Figura 2. Riesgo urbano, dimensiones y mecanismos



Fuente: Extraído de Romero-Lankao *et al.*, 2014: 225; Romero-Lankao y Gnatz., 2016: 222, con base en IPCC (2012).

Cabe agregar que este marco es más integral que las tres corrientes principales de la vulnerabilidad urbana presentadas anteriormente, ya que incorpora una perspectiva dinámica del riesgo al ser compuesto de dos grandes procesos, el natural y el social, los cuales se

retroalimentan mutuamente, todo esto sin perder de vista medidas adaptativas que pueden implementarse en un área urbana para reducir el riesgo urbano. Por último, vale destacar que el concepto de vulnerabilidad y exposición están integrados en la categoría de capacidad de adaptación.

Conforme a lo expuesto, es posible identificar distintas dimensiones del vínculo entre crecimiento urbano y el riesgo. Por un lado, una primera dimensión se refiere a los patrones de asentamiento de las ciudades y su exposición a amenazas; por otro lado, estarían los procesos de urbanización en términos de su calidad y servicios, a través de las cuales las ciudades contribuyen a la construcción de los riesgos y, finalmente, aquellas medidas de adaptación –más o menos eficientes- que pueden contribuir a desarrollar ciudades seguras. Esta tesis se concentra en el primer aspecto, particularmente en examinar la expansión territorial de las ciudades, en términos de su extensión, forma y ritmo, y la contribución a la exposición a amenazas por elevación del nivel del mar.

3. Expansión y forma urbana

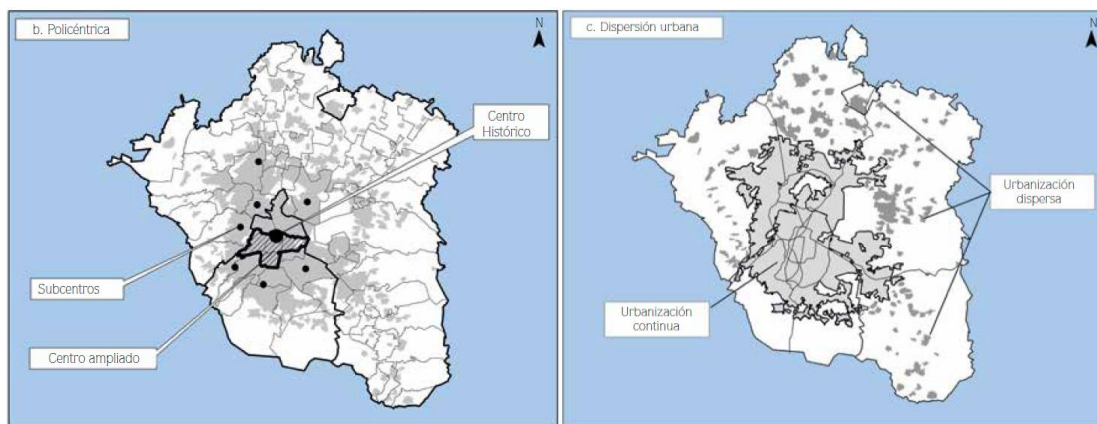
El estudio de la organización espacial de la ciudad se remonta a la Escuela Ecologista de Chicago en los años 20's, que postuló la estructura espacial de la ciudad a partir de círculos concéntricos. Sin embargo, actualmente los patrones espaciales de las ciudades son más complejos que la estructura a partir de un distrito central de negocios (Batty, 1996, p. 297).

De acuerdo con Negrete (2016, p. 112) hay 5 diferentes aspectos que conforman la estructura urbana. Primero, está el carácter político-administrativo de una ciudad; segundo, está el carácter monocéntrico o policéntrico de la ciudad, éste hace referencia a la preponderancia o no de un núcleo urbano primario, se analiza la funcionalidad de un centro y/o centros menores principalmente en función de los puestos de trabajo que concentra cada núcleo urbano (como ejemplo véase el Mapa 1); tercero, se encuentra el carácter disperso o compacto de la ciudad, este carácter se relaciona directamente con la densidad urbana, la cual se puede medir con indicadores poblacionales, habitacionales o de construcción. El patrón territorial difuso se identifica por sumar “parches de tejido urbano” alejados unos de otros y separados por superficies sin construir. Los problemas que acarrea este tipo de patrón son

que a “mayor demanda de infraestructuras, incremento en los tiempos y costos de los traslados a los sitios de empleo y necesidades de servicios que superan la capacidad de los municipios, entre otros” (Negrete, 2016: 112); el cuarto aspecto de la estructura espacial de una ciudad es la segregación, generalmente se toma el uso de suelo habitacional como expresión de segregación, así mismo se considera el grado de segregación; el quinto y último aspecto es la conectividad, que contiene a la estructura vial de la ciudad.

En cambio, para Monkkonen y Comandon la estructura espacial urbana se refiere a la distribución de la población y los empleos en las ciudades (Anas et al. (1998) en Monkkonen y Comandon, 2016, p. 51), este concepto se diferencia de forma urbana ya que ésta hace referencia al entorno construido y el diseño de las calles. Para estos autores la estructura espacial urbana consta de tres dimensiones: la primera, versa sobre la densidad de población y empleos en su conjunto; la segunda, consiste en la tendencia de la población y empleos a concentrarse en el centro *versus* los bordes de la ciudad; y la tercera, es la uniformidad o fragmentación de población y empleos dentro del área de suelo de una ciudad. Vale decir que para los autores la estructura espacial urbana “está íntimamente conectada con la segregación espacial social urbana” (Monkkonen y Comandon, 2016: 51), postura diferente a la de Negrete (2016), la cual la segregación espacial forma parte del concepto de estructura espacial urbana.

Mapa 1. Organización espacial policéntrica de la ZMVM



Fuente: Negrete (2016: 113).

Como vemos, la estructura urbana es continente de los conceptos de forma urbana y expansión urbana. Así mismo, existen diferentes definiciones sobre el crecimiento del área urbana. De acuerdo con la ONU Hábitat, la expansión urbana (*Urban sprawl*) se refiere al crecimiento espacial de las áreas urbanas, típicamente en detrimento de las áreas rurales (UN-Habitat, 2016, p. 100). Por su parte, SEDESOL y CONAPO definen al crecimiento urbano como: “expansión de la superficie de la ciudad, es decir del área urbana; así como al aumento de su población. El crecimiento de una ciudad, también representa una transición productiva, pasando del predominio de la actividad agrícola a los sectores secundario y terciario.” (SEDESOL y CONAPO, 2012, p. 11).

En cuanto a forma urbana, de acuerdo con González y Larralde (2019) la forma urbana se puede definir como “el patrón espacial de las actividades humanas y su manifestación concreta en el medio construido de las ciudades” (2019: 13). El medio construido al cual hacen referencia se compone de edificaciones, espacios públicos y privados. De acuerdo con estos mismos autores, las ciudades contemporáneas tienen cuatro características en su forma urbana: primero, tienen un crecimiento de su espacio periférico dilatado; segundo, discontinuidad del asentamiento; tercero, policentralidad; y cuarto, un alto grado de movilidad de personas, bienes e información (González y Larralde, 2019: 15).

La literatura sobre expansión urbana suele enfocarse sobre los aspectos negativos de la expansión (Hogan y Ojima, 2008, p. 204). Casos de efectos negativos son el aumento de costos económicos, mayor dependencia del automóvil, problemas ambientales y la segregación social (González y Larralde, 2019: 15).

Mientras que diversos grupos políticos abogan por la compacidad de las ciudades añadiendo a la agenda temas de sustentabilidad ambiental y calidad de vida (ONU-HABITAT, 2017). A manera de ejemplo, el estudio de Angel *et al.* (2016) sobre la expansión urbana a lo largo del mundo concluye que a lo largo del globo el crecimiento urbano se lleva a cabo de forma desordenada y sin planificación, la informalidad se ha vuelto más común, las ciudades expanden su territorio más rápido que su población, la densidad residencial está decreciendo al igual que los espacios públicos, por lo tanto, los autores consideran a partir de los datos empíricos que el modelo de urbanización contemporáneo es altamente insustentable (2016: vi). Consideran que se debe impulsar la agenda anti expansión urbana -*urban sprawl*,

la cual debe enfrentar la poca planificación, la baja densidad, la expansión urbana fragmentada y no compacta. Sin embargo, aún está en boga la preferencia de la dispersión *vis a vis* compacidad (González y Larralde, 2019: 27).

El fenómeno del crecimiento físico de una ciudad dentro de la literatura es referido como “expansión urbana”, “fragmentación” *-fragmentation-*, e inclusive en la literatura anglosajona puede hacerse mención de *sprawl*. Así mismo, pareciera que dentro de la literatura expansión urbana fuera sinónimo de crecimiento disperso, cuando no necesariamente es así. A manera de ejemplo, Hogan y Ojima (2008: 203-204) consideran *de facto* a la expansión urbana como un patrón de asentamientos de baja densidad, una discontinuidad entre el crecimiento de la población y la expansión física del espacio urbano. Si bien en la literatura está fuertemente asociado el carácter disperso de una ciudad con una baja densidad y al carácter compacto con una alta densidad (aunque González y Larralde difieren en este punto en sus conclusiones) cabría analizar más precisamente cómo se da el proceso de expansión urbana para poder clasificarlo como disperso o compacto. A manera de ejemplo, Hogan y Ojima (2008) señalan que en el proceso de expansión urbana hay un desarrollo urbano no contiguo, también conocido como salto de rana *-leapfrog development-* (2008: 205), este proceso específico coincidiría con la noción de un crecimiento discontinuo, disperso. De forma contraria, para González y Larralde (2019: 23) la compacidad es un atributo conformado por diferentes componentes como la densidad, la mezcla de usos de suelo, la continuidad espacial, conectividad vial, entre otros (2019: 23). Por lo cual, para poder calificar a una ciudad (así como su proceso de expansión) de dispersa o compacta, habría que establecer criterios y metodologías para poder medir y determinar el tipo de forma urbana. Esta discusión metodológica se presenta más adelante en el capítulo respectivo.

Conclusiones

En el presente capítulo se ha explicado qué es el cambio climático, así como la expansión urbana y cómo ésta se relaciona con la forma urbana. Además, se ha descrito de forma teórica cómo un aspecto natural, como el clima, y un aspecto social, como lo es el crecimiento urbano, están relacionados, no sólo en el sentido de que una mayor actividad económica dentro de una ciudad ha aumentado las concentraciones de gases efecto invernadero

ocasionando el cambio climático, sino además ver cómo este cambio de las condiciones climáticas a causa de las actividades humanas tiene implicaciones en la seguridad de los asentamientos humanos, conceptualizándolo como riesgo urbano. Para el propósito del presente trabajo se hace referencia al riesgo de inundaciones en las ciudades costeras debido a la amenaza del aumento del nivel del mar causado por el cambio climático (vía el aumento progresivo del nivel promedio del nivel del mar así como el aumento en la frecuencia e intensidad de tormentas tropicales), asimismo, nos enfocamos en el crecimiento urbano en un sentido físico, dónde el objeto a estudiar es la cantidad de superficie construida de cada una de las ciudades de estudio, aspecto que se analizará a profundidad en el siguiente capítulo.

Capítulo 2 Expansión y forma urbana en nueve ciudades costeras de la península de Yucatán

“Cada vez que regreso a esa parte de la ciudad me sorprende la expansión de la abigarrada vida urbana, tan distinta a la aldea semiperdida de hace treinta años.”

Juan Villoro¹²

Introducción

El crecimiento urbano¹³ normalmente se explica por las tasas naturales y sociales de crecimiento de una población, sin embargo, a veces se deja de lado la dimensión física del crecimiento de una ciudad. Si bien hay autores que rescatan esta dimensión del proceso urbano, las limitaciones de la información, así como las diferentes definiciones de lo urbano a lo largo del mundo dificultan hacer estudios comparativos entre países y con una perspectiva histórica. Gracias a las nuevas tecnologías y procesamiento de información masiva, las imágenes producto de sensores remotos han sido de gran ayuda para estudiar el fenómeno del crecimiento de la denominada “mancha urbana”. Bases de datos libres como *Global Human Settlement Layer*, que cuenta con datos desde 1975, permiten tener una perspectiva histórica del crecimiento de las ciudades a lo largo del mundo y de manera comparable. Sin embargo, el uso de este tipo de información se da principalmente en estudios sobre grandes metrópolis, mientras que son pocos los estudios que hacen un análisis de las ciudades costeras; ciudades que, por su propias características sociales, económicas y particularmente naturales, tienen una gran importancia en el estudio de la cuestión urbana y del riesgo urbano. Por ello en este capítulo se pretende describir la expansión urbana¹⁴ en las costas de México a través de la medición de las tasas de expansión urbana y el grado de compacidad de las ciudades costeras de la península de Yucatán desde 1975 hasta el 2014.

¹² El vértigo horizontal.

¹³ “El término *crecimiento urbano* se refiere al aumento en número de la población de las ciudades.” (Polèse, 1998, p. 30)

¹⁴ Es importante distinguir entre “crecimiento urbano” y “expansión urbana” ya que el término “expansión urbana” se refiere al proceso físico caracterizado por un incremento en la cantidad de superficie construida (Acheampong et al., 2017, p. 825) y la presente investigación se enfocará en el aumento de superficie construida de una ciudad no de su población.

1. El crecimiento urbano en las costas de México

El mundo es cada vez más urbano, si bien la urbanización¹⁵ es un proceso continuo que presenta variantes regionales y nacionales, el crecimiento de las ciudades a lo largo del mundo denota una tendencia creciente y se espera que en los primeros 30 años del siglo XXI gran parte del crecimiento poblacional ocurra en las ciudades (Pisanty, Mazari, y Ezcurra, 2009).

Para el caso de México la urbanización se desarrolló a lo largo del siglo XX. Garza distingue tres etapas de la urbanización de México: de 1900 a 1940; de 1940 a 1980; y de 1980 al 2000. En la primera etapa la urbanización es considerada como moderada-baja, en la segunda, la urbanización fue acelerada-media, durante esta etapa la población mexicana se volvió mayoritariamente urbana y, finalmente, en la tercera etapa se calificó a la urbanización como baja-acelerada, periodo en el que se consolidó el perfil urbano del país (Garza, 2002). Hoy en día podemos ver una suerte de cambio urbano a partir del Sistema Urbano Nacional (SUN). En el año 2012 el SUN registró 384 ciudades de las cuales 59 eran zonas metropolitanas, 78 eran conurbaciones y 247 eran centros urbanos (SEDESOL y CONAPO, 2012, p. 22). Mientras que para el 2018 el SUN contó con 401 ciudades, clasificadas en: 74 zonas metropolitanas; 132 conurbaciones y 195 centros urbanos (CONAPO y SEDATU, 2018, p. 7).

Si bien México se caracteriza por tener grandes metrópolis en la zona continental del país, no hay que perder de vista su larga línea costera y los asentamientos humanos localizados en ésta. La extensión de la línea costera de México asciende a 11,122 km, los cuales se dividen entre el Golfo de México y Mar Caribe y el Océano Pacífico con 3,294 km y 7,828 km respectivamente (INEGI, 2017a). En el trabajo de Juárez y González se identifican 167 municipios que conforman la región costera mexicana. Para el año 2010 ésta contenía 18.2 millones de personas representando un 16.1% de la población total del país, la cual se distribuía un 65% en la vertiente del Pacífico y el restante 35% en el Golfo de México y Mar Caribe (Juárez y González, 2015, p. 9). Además, en el año 2010, la región costera se

¹⁵ “El término urbanización significa el paso de una sociedad rural a una sociedad más urbana. Se refiere asimismo al crecimiento más acelerado de la población urbana en comparación con la población rural.” (Polèse, 1998, p. 29).

registraron 34,676 asentamientos poblacionales, representando el 18% del total nacional. De los asentamientos costeros el 99.6% son considerados rurales (menores a quince mil habitantes) y el restante 0.4% son considerados urbanos. De los 34,564 asentamientos costeros rurales contienen tan sólo el 31.3% de la población costera total, mientras que 112 ciudades en la región costera concentran el restante 68.7% de la población costera total (Juárez y González, 2015, p. 13), esto da cuenta de cómo la mayoría de la población en la región costera mexicana vive en ciudades.

De la misma manera cabe destacar la importancia económica de las ciudades costeras por la variedad de actividades productivas que realizan y que son polos para el crecimiento económico y poblacional. De acuerdo con Rodríguez (2006) hay cinco procesos económicos básicos que influyen en el proceso de urbanización en las zonas costeras: los servicios portuarios; la pesca; las plantaciones tropicales; las actividades petroleras; y el turismo. De manera particular podemos señalar que el Golfo de México es la zona petrolera más importante del país, principalmente en Tamaulipas, el sur de Veracruz, Tabasco y Campeche (Pérez-Campuzano y Santos-Cerquera, 2016, p. 298), en los años noventa se adoptó un nuevo modelo de desarrollo, la exportación de hidrocarburos paso a segundo término y actividades como la industria maquiladora, el turismo y los puertos tuvieron mayor dinamismo. Por ejemplo, Cozumel y Cancún destacan como zonas turísticas muy dinámicas (Pisanty et al., 2009, p. 728). Las ciudades costeras orientadas al turismo, como las ubicadas en el Caribe o en el Pacífico, presentan considerables tasas de crecimiento dada la importancia económica del turismo (Pisanty et al., 2009, p. 727), sin embargo, de acuerdo con Pisanty *et al.* las altas tasas de crecimiento urbano en zonas costeras turísticas fomenta la expansión de las ciudades costeras sobre ecosistemas muy frágiles (2009, p. 727). A manera de ejemplo, Pérez-Campuzano y Santos-Cerquera sostienen que la metropolización de Cancún es una consecuencia del crecimiento del turismo (2016, p. 290). Amador y Moreno-Casasola señalan que hay tres mecanismos por los cuales se desarrolla el turismo en zonas costeras. El primero se refiere al crecimiento de sitios turísticos con base en ciudades ya establecidas, estos sitios, conocidos como “destinos de playa tradicionales”, reciben nuevas inversiones que cambian drásticamente las actividades de las ciudades, ocasionando que los pobladores se empleen en las actividades turísticas. A este tipo de ciudades se les atribuye un crecimiento desorganizado y carecen de un plan urbano, ejemplos en el Caribe es Cozumel (2006). El

segundo mecanismo es la creación de polos de desarrollo turístico integrado, que consiste en elegir un sitio cuyas características naturales sean atractivas para la posterior construcción de infraestructura necesaria, un ejemplo de ello en el Caribe es Cancún, en este caso el crecimiento de la ciudad alrededor del centro turístico fue más grande de lo planeado (Pisanty et al., 2009, p. 729). El tercer, y último, mecanismo consiste en la construcción de viviendas en paralelo a la línea costera, los mismos pobladores locales suelen buscar una vista al mar y acceso inmediato a la playa por lo cual construyen nuevas viviendas en la costa (Amador y Moreno-Casasola, 2006), siendo muestra de poca planificación urbana y generando una apropiación de la línea de costa de manera privada en vez de pública (Pisanty et al., 2009, p. 731).

Desde una perspectiva regional tenemos que en la península de Yucatán se presentan mayores tasas de crecimiento poblacional dado los enclaves turísticos, en el caso del Golfo el crecimiento poblacional se da principalmente en las ciudades con vocación de extracción y explotación petrolera (Pérez-Campuzano y Santos-Cerquera, 2016, p. 292). Las actividades turísticas han sido creadores de dinámicas regionales y urbanas particulares (Pérez-Campuzano y Santos-Cerquera, 2016, p. 299) y que al mismo tiempo esas actividades turísticas se ven fomentadas por fenómenos internacionales como la atracción del turismo internacional (Pérez-Campuzano y Santos-Cerquera, 2016, p. 289). Tan sólo para el año 2017 la Organización Mundial del Turismo señaló que México obtuvo el puesto número 15 como captador de divisas con 21.3 miles de millones de dólares y el puesto número 6 como destino turístico con 39.3 millones de turistas (UNWTO, 2018).

Desde un punto de vista histórico el crecimiento demográfico y multiplicación de las localidades urbanas ocurrió a partir de mediados del siglo XX (Pisanty et al., 2009, p. 728). A lo largo del siglo XX hubo procesos importantes para las regiones del Golfo y el Caribe. Por una parte, estas regiones se pudieron incorporar al mercado mundial e impulsar su crecimiento económico y, por otra parte, el gobierno implementó medidas políticas de redistribución de población, a manera de ejemplo fueron las acciones realizadas por el presidente Ruiz Cortines a mediados de la década de los 50's con su política de "Marcha hacia el mar". Como consecuencia para la región del Golfo y el Caribe las localidades de más de cien mil habitantes presentaron tasas de crecimiento medio anual de 4.92% entre los años

de 1970 a 1990 (Pisanty et al., 2009, p. 728). Hasta 1990, las zonas metropolitanas de Tampico, Coatzacoalcos y Cancún fueron las ciudades que recibían mayor cantidad de inmigrantes, concentrando aproximadamente a 451,000 personas, 35% de los inmigrantes en estas regiones (Gutiérrez y González, 1999). Para el período de 1990 al 2000 los municipios de Cozumel y Benito Juárez en el estado de Quintana Roo se registró un aumento de su población en más de 50 habitantes por km² asociado a la dinámica económica y migratoria de los municipios en dicho período (Pérez-Campuzano y Santos-Cerquera, 2016, p. 292).

Finalmente, de acuerdo con el análisis realizado por Pérez-Campuzano y Santos-Cerquera si bien los municipios costeros tienen una dinámica de crecimiento poblacional mayor respecto a los municipios restantes del país, los primeros han presentado una disminución en su dinámica de crecimiento entre los años de 2000 y 2010 (2016, p. 292). Sin embargo, hay excepciones notables, por ejemplo, para el mismo periodo los municipios de Benito Juárez y Solidaridad en Quintana Roo presentaron incremento de densidad mayor a 50 habitantes por km² (Pérez-Campuzano y Santos-Cerquera, 2016, p. 293), por lo cual no hay una prueba clara que el proceso de expansión de las ciudades costeras en la región haya finalizado. A la dinámica de crecimiento poblacional es necesario añadir el análisis de expansión territorial de las ciudades, misma que tiene amplias implicaciones sociales y ambientales, tanto en términos de impactos sobre los ecosistemas como contribuciones a la exposición a riesgos ambientales.

2. La expansión urbana: aproximación conceptual y metodológica

Si bien la urbanización es concebida como el proceso del cambio de la composición poblacional entre población rural y urbana y el crecimiento urbano se considera como el aumento de la población en una ciudad (Polèse, 1998, pp. 29–30), Acheampong *et al.* nos invita a considerar que el crecimiento urbano no es sólo un proceso en el cual los asentamientos crecen en términos de población, sino también en tamaño físico y de sus actividades económicas en el transcurso del tiempo (2017, p. 825). Para Acheampong *et al.* la expansión urbana se refiere al proceso físico caracterizado por un incremento en la cantidad de superficie construida¹⁶ de una unidad espacial a través de un desarrollo horizontal y vertical con densidades variables (2017, p. 825). En ese sentido la expansión urbana

¹⁶ En la presente investigación se considera a “superficie edificada” como sinónimo de este término.

modifica la forma y estructura de los asentamientos a través de la expansión física de las áreas construidas existentes hacia los campos verdes y asentamientos rurales circundantes (UN-Habitat, 2010). Siguiendo el énfasis de la dimensión física del crecimiento urbano en el trabajo de Acheampong *et al.* (2017) consideran que las expansiones urbanas pueden categorizarse en tres procesos interrelacionados: relleno *-infilling-*; en expansión *-expanding-* y finalmente, alejado *-outlying-*. De acuerdo con los autores la expansión de forma de relleno da como resultado un desarrollo físico compacto, consolidado e intensivo del suelo urbano. Mientras que en países en desarrollo la rápida peri-urbanización ha consistido en qué áreas construidas existentes alcanzan pequeños pueblos que están en la periferia, presentándose una expansión extensiva y dispersa *-sprawl-* (2017, p. 824).

Acheampong *et al.* utilizan tres indicadores espaciales para cuantificar la expansión urbana a través de información de sensores remotos: El primero es la “tasa de expansión urbana media anual” *-Average Annual Urban Expansion Rate-* (AUER, por sus siglas en inglés), que se define cómo:

$$AUER_i = \left[\left(\frac{ULA_i^{t_2}}{ULA_i^{t_1}} \right)^{\frac{1}{t_2-t_1}} - 1 \right] \times 100$$

Donde $ULA_i^{t_2}$ y $ULA_i^{t_1}$ se refiere al área de superficie construida en el tiempo t_1 y t_2 para la unidad espacial i , mientras que t_1 es el año inicial y t_2 es el año final¹⁷. Este índice calcula la tasa media anual de la expansión de la superficie construida de una unidad espacial entre dos periodos, su valor estima la tasa en la cual una cantidad de superficie construida está cambiando. Otro indicador espacial es el “índice de intensidad de expansión urbana” *-urban expansion intensity ubdex-* (UEII, por sus siglas en inglés):

$$UEII_i = \frac{ULA_i^{t_2} - ULA_i^{t_1}}{TLA_i \times \Delta t} \times 100$$

Donde $ULA_i^{t_1}$ y $ULA_i^{t_2}$ es el área de la superficie construida para el tiempo 1 y 2, respectivamente, para la unidad espacial i ; TLA_i es la superficie total del área de estudio i ;

¹⁷ De acuerdo con los autores que proponen el indicador, la AUER no se ve afectada por el tamaño de la unidad espacial y no tiene límites superiores o inferiores (Acheampong et al., 2017, p. 829).

finalmente, Δt es el periodo de estudio (t_2 menos t_1). La UEII describe el grado de diferenciación de expansión urbana en diferentes direcciones y denota el crecimiento de las áreas construidas de una unidad espacial como un porcentaje de la superficie total en el periodo de estudio. Los valores obtenidos del índice en el trabajo de Acheampong *et al.* se interpretan de la siguiente forma: >1.94 muy rápido; de 1.05 a 1.92 rápido; de 0.59 a 1.05 velocidad media; de 0.28 a 0.59 lento y de 0 a 0.28 muy lento. Sin embargo, es de suma importancia señalar que dichos umbrales son erróneos ya que fueron tomados del artículo de (Liu, Wu, y Shen, 2000), trabajo que originalmente generó los umbrales para el caso específico de Beijing que contaba con 155 municipios y que utilizaron el método de *natural breaks* para establecer los rangos de los valores obtenidos del UEII. Rangos que han sido utilizados en diversos trabajos, por ejemplo, los realizados por Acheampong *et al.* (2017), Hu *et al.* (2007) y Ren *et al.* (2013), sin actualizar los umbrales para sus estudios de caso específicos.¹⁸

El tercer, y último, índice es el de “Diferenciación de expansión urbana” –*Urban Expansion Differentiation Index*- (UEDI):

$$UEDI_i = \frac{|ULA_i^{t_2} - ULA_i^{t_1}| \times ULA_i^{t_1}}{|ULA_i^{t_2} - ULA_i^{t_1}| \times ULA_i^{t_1}}$$

Donde $ULA_i^{t_1}$ y $ULA_i^{t_2}$ indican el área de superficie construida urbana de la unidad i en el tiempo 1 y 2, respectivamente; ULA^{t_1} y ULA^{t_2} indican el área total de superficie urbana del área de estudio en el tiempo 1 y 2, respectivamente (Lu, Guan, He, y Zhang, 2014, p. 4729). Este índice compara la expansión urbana de una unidad espacial integrada al área de estudio. El valor del área de estudio siempre será 1 y sirve como criterio para identificar el desarrollo de valores altos en la subregión (Acheampong *et al.*, 2017, p. 829). Se pueden tener tres valores para el indicador UEDI: primero, cuando el índice de diferenciación es mayor a 1 ($UEDI > 1$) en este caso la unidad espacial será categorizada como rápida en comparación a la región de estudio; segundo, cuando el índice sea menor a 1 ($UEDI < 1$), esto querrá decir que la unidad espacial será considerada como lenta en relación a la región de estudio; finalmente cuando el valor del índice sea igual a uno ($UEDI = 1$) se dirá que la

¹⁸ Más adelante se señala qué umbrales se usaron en la presente investigación.

unidad espacial tendrá un crecimiento espacial moderado respecto a la región de estudio. Si bien los autores presentan tres indicadores, sólo los dos primeros son de utilidad para la presente investigación ya que no estamos realizando un estudio sobre una metrópolis en específico sino de un conjunto de ciudades.

3. El crecimiento de la extensión urbana de las ciudades costeras de la península de Yucatán

Fuentes de información

A lo largo de tres décadas se han generado diversas bases de datos producto de sensores remotos, algunos ejemplos son: *Global Rural-Urban Mapping Project (GRUMP)*, *Global Impervious Surface Area data*, *MODIS land cover data* y *CORINE* (Chowdhury et al., 2018, p. 93). Sin embargo, este tipo de información es de baja resolución por lo cual tiene limitantes al no poder detallar cambios finos en las áreas urbanas, así como no tener una actualización periódica, dificultando el monitoreo del cambio urbano a lo largo del tiempo. Pero gracias a una mayor disponibilidad de imágenes remotas de alta calidad, además de mayores recursos computacionales y nuevas formas de procesamiento de imágenes, es posible hoy en día contar con nuevas bases de datos de asentamientos urbanos como: *Global Urban Footprint*, *LandScan Settlement Layer* y *Global Human Settlement Layer (GHSL)* (Chowdhury et al., 2018, p. 94).

GHSL permite estudiar tanto a la población como a la superficie construida de todas las ciudades de una forma consistente y comparable desde una escala internacional hasta una escala particular. Además GHSL es una de las bases más completas y actualizadas¹⁹ para el análisis territorial a escala global (Melchiorri y Siragusa, 2018, pp. 153, 164). Considerando estas ventajas la presente investigación usará esta base de datos.

GHSL fue desarrollada por el *Joint Research Centre* de la Comisión Europea. La base contiene información de escala fina sobre población y áreas construidas a lo largo de todo el

¹⁹ Tal es el caso que la página web para el acceso a la información ha sido recientemente actualizada, permitiendo ser aún más accesible e intuitivo el uso de la información en comparación a versiones anteriores en el transcurso de la elaboración de la presente tesis.

planeta para los años de 1975, 1990, 2000 y 2014 (Pesaresi et al., 2016). La base GHSL es parte de la información clave del *Group on Earth Observation (GEO) Human Planet Initiative*, que además es apoyada por la Dirección General de Política Regional y Urbana de la Comisión Europea. La base GHSL ofrece la posibilidad de analizar asentamientos humanos individuales en una forma consistente y comparativa a lo largo del globo (Melchiorri y Siragusa, 2018, p. 152). GHSL contiene tres principales conjuntos de información temática: la primera capa de información registra superficie construida de asentamientos humanos; la segunda capa contiene información de población basado en celdas de población y finalmente, la tercera capa clasifica a los asentamientos en urbanos o rurales. Los conceptos y pasos metodológicos para la producción de GHSL son descritos por (Pesaresi et al., 2016). La información base de la GHSL procede del procesamiento de grandes masas de información procedentes de tres fuentes: primero, sensores satelitales de observación terrestre (imágenes de satélite Landsat); segundo, celdas poblacionales con base en encuestas estadísticas nacionales recolectadas por el *Center for International Earth Science Information Network (CIESIN)*; finalmente, otras fuentes como información geográfica voluntaria (Melchiorri y Siragusa, 2018, p. 153). El principal producto de GHSL es una capa de información de resolución de 38 metros que describe la existencia (o no) de construcciones en cada pixel existente. A partir de este producto se agrega la capa a dos resoluciones diferentes, una a 250 metros y otra de 1 kilómetro, cada pixel (ya sea de una u otra resolución) expresará la cantidad de área (o superficie) construida²⁰ en valores porcentuales, en otras palabras, muestra la proporción del área total del pixel²¹ cubierta por alguna edificación²² (Melchiorri y Siragusa, 2018, p. 153). Para la presente investigación se utilizará sólo el primer conjunto de información, a saber, la información sobre superficie construida a una resolución de 250 metros.

Si bien medir la urbanización a partir del espacio construido se trata de una aproximación restringida, tiene la ventaja de hacer comparables lo que es una ciudad en diferentes momentos y partes del mundo, en palabras de Polése: “La definición de lo que

²⁰ En inglés *built-up area*.

²¹ Para los pixeles con resolución de 250 metros el área total será de 62,500 m², mientras tanto los pixeles a una resolución de 1 kilómetro su área total será de 1,000,000 m² (ó 1 km²). En este sentido si el valor de un pixel es 100% la superficie construida del pixel será igual a su área total de acuerdo a su resolución.

²² En inglés *building-footprint area*.

constituye una ciudad o una zona urbana, varía de un país a otro y de una época a otra. Ciertos países se apoyan en criterios de densidad, es decir, en el número de habitantes por kilómetro cuadrado, mientras que otros utilizan solamente la población: localidades de 1000 habitantes y más, de 5000 habitantes o más, etc. La dicotomía urbano-rural dista de estar claramente definida; las zonas pobladas se multiplican a medida que los primeros asentamientos urbanos, la suburbanización y la extensión empiezan a hacerse presentes en el paisaje, o como consecuencia de ello. Los indicadores sobre la urbanización deben, de esta manera, utilizarse con prudencia, sobre todo para fines comparativos.” (Polèse, 1998, p. 30).

Para delimitar qué ciudades de la costa yucateca se estudiarían se empleó la información del Sistema Urbano Nacional 2012 y la Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2010, respectivamente (SEDESOL-CONAPO-INEGI, 2018; SEDESOL y CONAPO, 2012). Conforme a lo establecido en esos documentos se obtuvieron un total de 10 ciudades (3 conurbaciones y 7 centros urbanos) y 2 zonas metropolitanas en la península de Yucatán. Para delimitar qué ciudades son costeras se consideró el criterio propuesto por McGranahan, Balk y Anderson (2007) donde establecen que las zonas costeras de baja elevación (ZCBE) son aquellas áreas contiguas a lado de la costa con una elevación menor a 10 metros sobre el nivel del mar (2007, p. 21). Para medir la elevación de la península de Yucatán e identificar las ZCBE se utilizó información satelital del proyecto MERIT (*Multi-Error-Removed-Improved-Terrain*), MERIT es un modelo digital de elevación (DEM por sus siglas en inglés), por lo cual muestra la altitud del terreno. En ese sentido los DEM han sido usados para identificar las zonas de baja elevación y evaluar la elevación del nivel del mar (Gesch, 2018, p. 2). MERIT fue seleccionada debido a la mayor precisión de sus estimaciones. Cada modelo de elevación existente tiene un grado de precisión en la medición de la altura, a dicha precisión se le conoce como “precisión vertical”. Es importante considerar este grado de error de cada modelo ya que estas incertidumbres pueden influir directamente en la determinación de las áreas bajas de estudio y, por consiguiente, influye en los resultados de la evaluación en el grado de exposición del nivel del mar. En los estudios de evaluación de inundaciones es muy común el uso del modelo SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), sin embargo, se ha demostrado que este modelo presenta imprecisiones, mismas que han sido mejoradas en el modelo de MERIT (Hawker, Bates, Neal, y Rougier, 2018, p. 4).

Acorde con este criterio de elevación y con esta base de datos se obtuvieron sólo 8 ciudades (3 conurbaciones y 5 centros urbanos) y una zona metropolitana, por lo cual la presente investigación comprenderá 9 ciudades de estudio en la península de Yucatán: Campeche, Ciudad del Carmen, Champotón, Progreso, Cancún, Chetumal, Cozumel, Playa del Carmen y Tulum (véase Mapa 2).

Mapa 2. Ciudades costeras de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Una vez establecido qué ciudades costeras se estudiarán se prosiguió a establecer el área urbana de estudio. Ello supone dos tareas. Primero, definir qué tipo de ocupación (intensidad de construcción) se considerará como indicativo de lo urbano y, segundo, identificar el territorio o delimitación de una ciudad determinada. Para el primer punto se utilizó el conjunto de datos de cuadrícula de edificación de la GHSL. De acuerdo con la literatura el umbral de edificación para identificar píxeles urbanos es de 50%, en la literatura se ha usado este criterio ya que es el que oficialmente se ha usado por parte de la Unión Europea y de ONU Habitat (European Union y United Nations Human Settlements Programme, 2016) como una variable proxy de lo urbano. Sin embargo, considerando las sugerencias de Balk et al. (2018), se considerará un umbral del 25% de edificación sobre

cada pixel. Este umbral tiene la virtud de capturar mejor los procesos de expansión urbana extensiva (relativamente baja y dispersas edificaciones) en ciertas áreas de ciudades costeras, sobre todo aquellas con fuerte presencia de actividades turísticas o de la industria extractiva. Para el segundo aspecto y a fin de delimitar los núcleos urbanos se emplearon los polígonos urbanos del marco geoestadístico nacional del 2010 de INEGI, estos ofrecen una primera delimitación de la ciudad que se usa como referencia para hacer las mediciones de la intensidad de la expansión urbana en cada ciudad²³. En ese sentido consideramos como pixeles urbanos a los que cumplen con las dos condiciones en cualquier periodo de tiempo (1975, 1990, 2000 y 2014): tener una superficie edificada de por lo menos 25% y estar dentro de la frontera del polígono urbano de INEGI. A continuación, se presentarán los resultados del análisis espacial de superficies edificadas en cada una de las ciudades de estudio. El análisis se llevó a cabo con el sistema de información geográfica ArcMap 10.4.1.

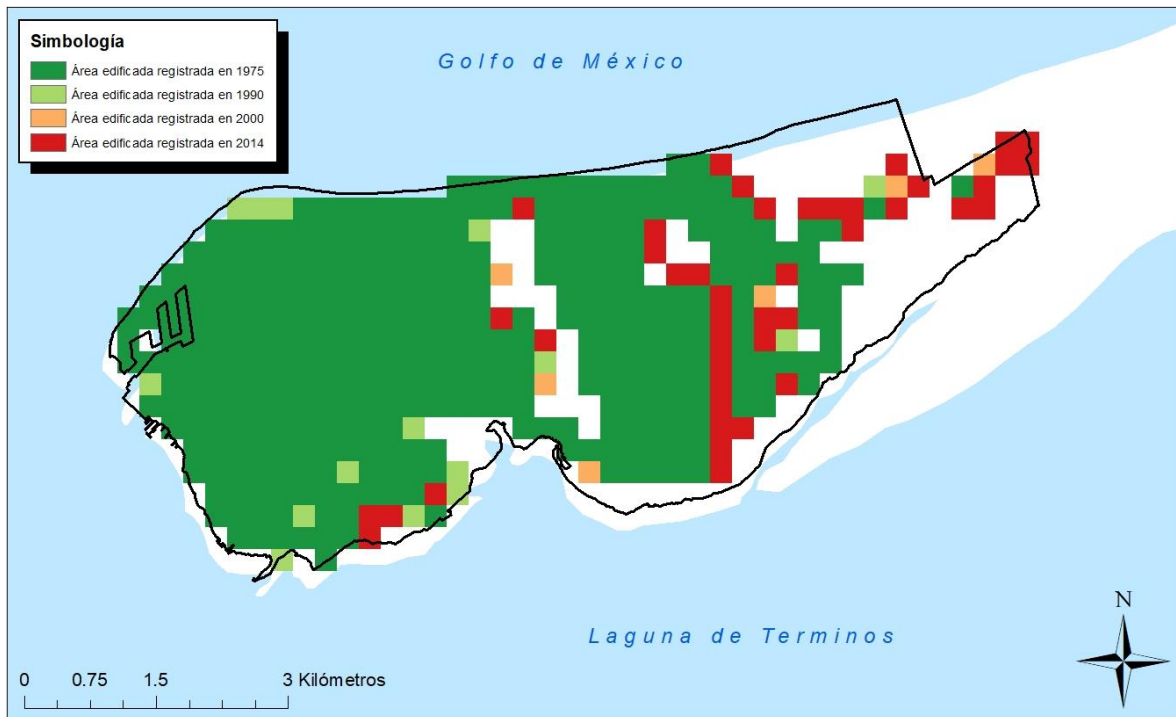
Estimaciones de la evolución de la extensión de las ciudades costeras en la península yucateca

Los siguientes mapas muestran la evolución de la extensión de las nueve ciudades de estudio. Como puede apreciarse, cada color indica los espacios definidos como urbanos en los cuatro puntos de tiempo analizados, lo que permite visualizar el cambio en el tiempo de la urbanización tanto en términos del área total que ocupa, su ubicación en el territorio y la cantidad del mismo.

Para el caso de Ciudad del Carmen vemos en el Mapa 3 cómo el asentamiento urbano para el año 1975 ya tenía una gran extensión en la costa oeste y la parte central de la isla y conforme al transcurso del tiempo se fue extendiendo las edificaciones hacia la costa este, sobre todo, para el año 2014 hubo un mayor aumento de áreas urbanas.

²³ Cabe destacar que la literatura que emplea la base de GHSL o alguna otra información de sensores remotos no deja claro qué tipo de frontera de la ciudad se usa. Por ejemplo, en el trabajo de Melchiorri y Siragusa (2018) no mencionan de forma explícita los límites de la ciudad de estudio. Mencionan como los límites de la ciudad de Beijing o Guangzhou son tomados del año 2015, sin embargo, no dicen si es con base al criterio político-administrativo o con base a GHSL en el último periodo que es el año 2015.

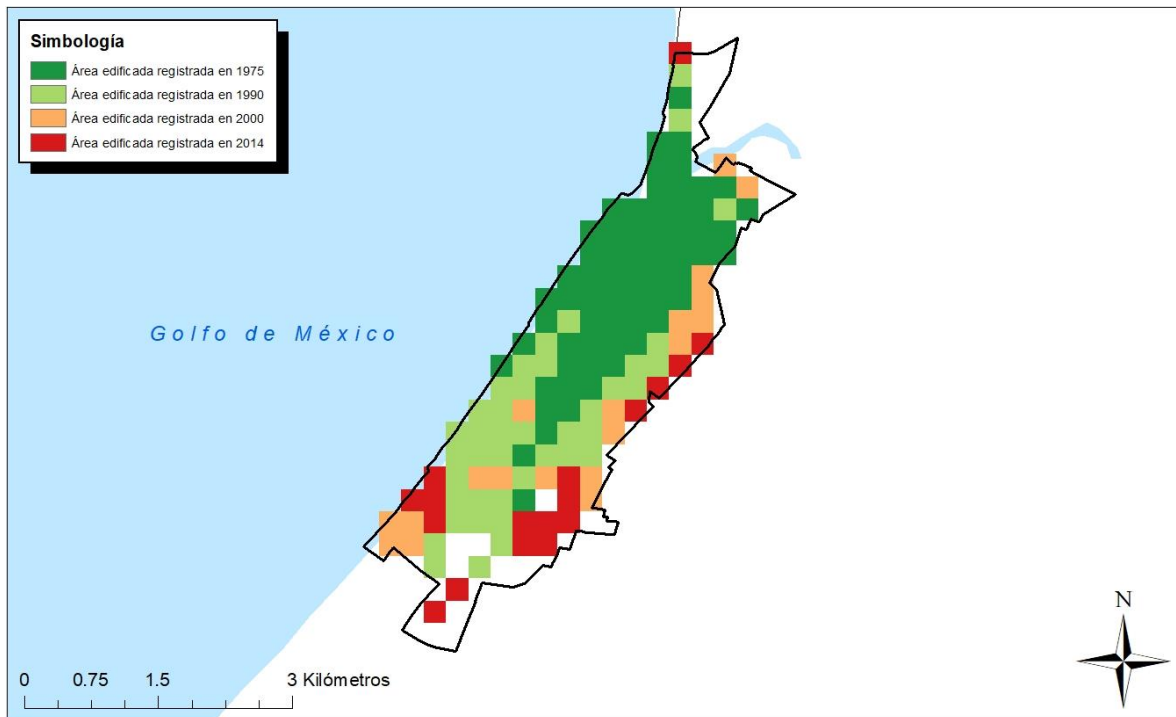
Mapa 3. Cambio histórico de Ciudad del Carmen



Fuente: Elaboración propia.

En la ciudad de Champotón (Mapa 4) se contaba en 1975 de un asentamiento cerca de la costa, con el tiempo se fue dando una expansión continua sobre la costa. Para 1990 hubo un mayor crecimiento sobre la costa, pero para el año 2000 y 2014 se llegó a construir lejos de ella.

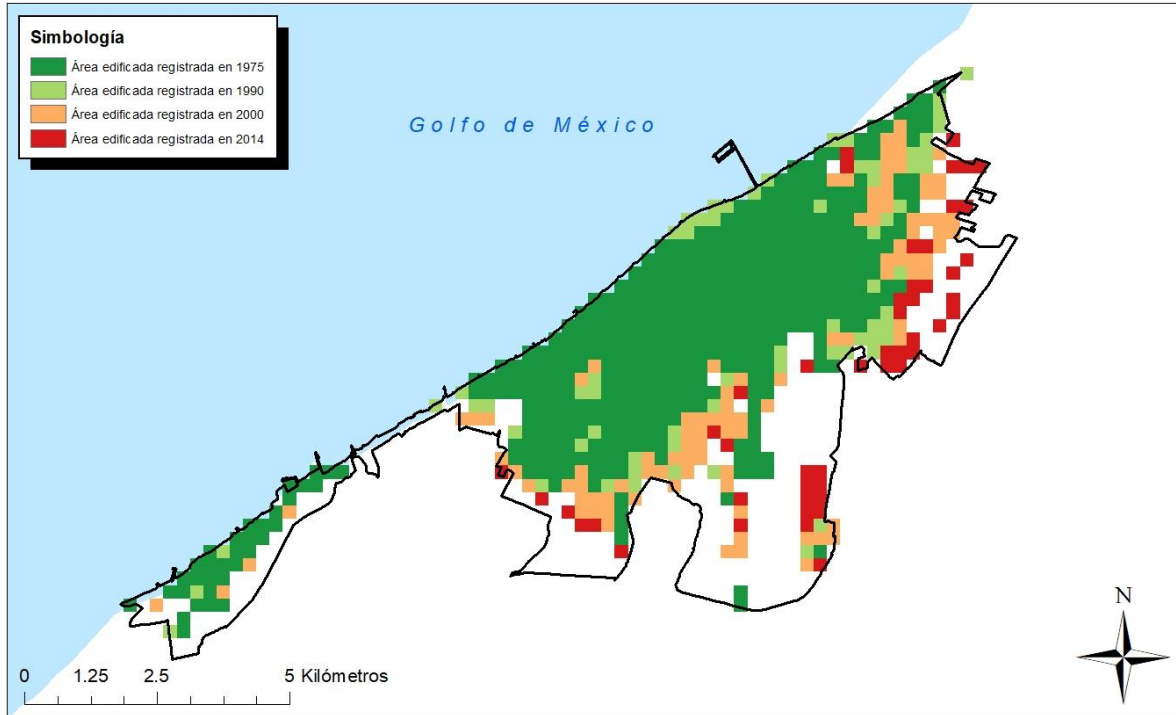
Mapa 4. Cambio histórico de la ciudad de Champotón



Fuente: Elaboración propia.

En el caso de Campeche, véase el Mapa 5, podemos ver cómo la ciudad para 1975 ya contaba con una gran extensión, localizada hacia la zona continental y a lo largo de la costa, para los siguientes años si bien hubo una expansión en algunas partes costeras, si bien la mayoría se localizó hacia dentro del continente.

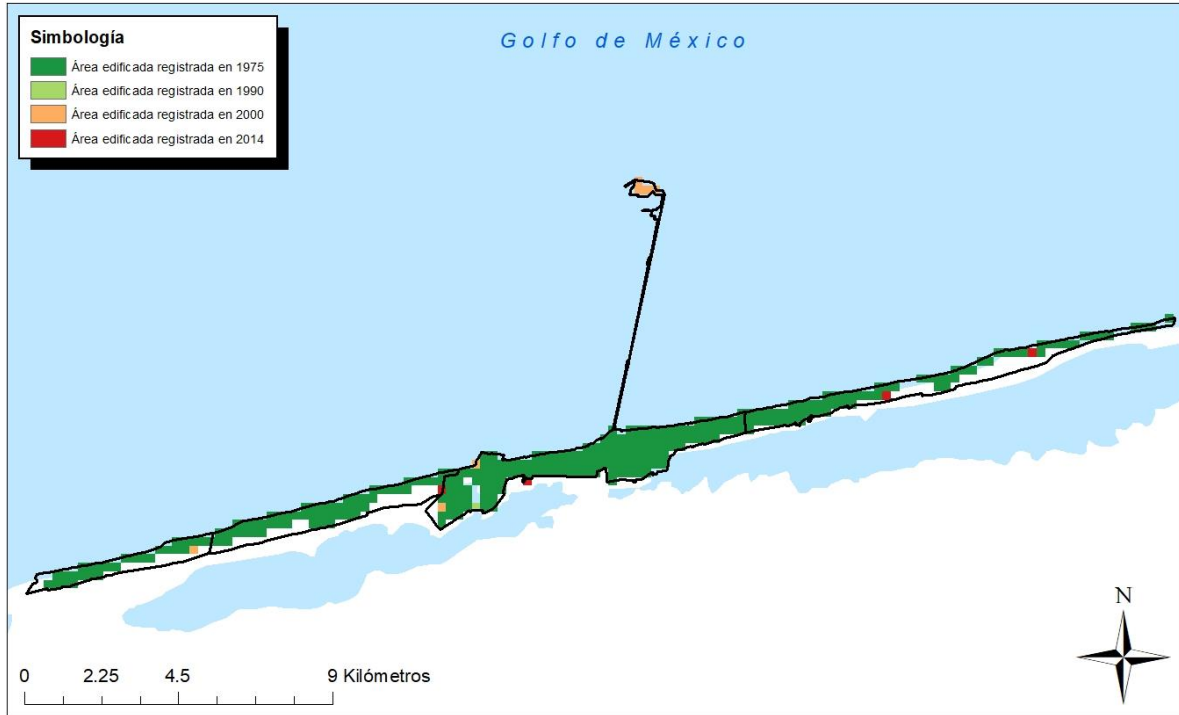
Mapa 5. Cambio histórico de la ciudad de Campeche



Fuente: Elaboración propia.

Gracias al Mapa 6 podemos observar las condiciones geográficas particulares en las que se halla Progreso, y que por lo mismo no se han podido crear nuevas expansiones territoriales fuera de las que se logran observar en 1975. Podemos ver que desde 1975 Progreso tiene una vocación meramente costera y que a lo largo del periodo de tiempo sólo se destaca la creación de su muelle. Si bien no se puede observar una expansión vertical de la zona urbana, más adelante se podrá ver que el crecimiento de Progreso fue en un sentido intensivo en vez de extensivo.

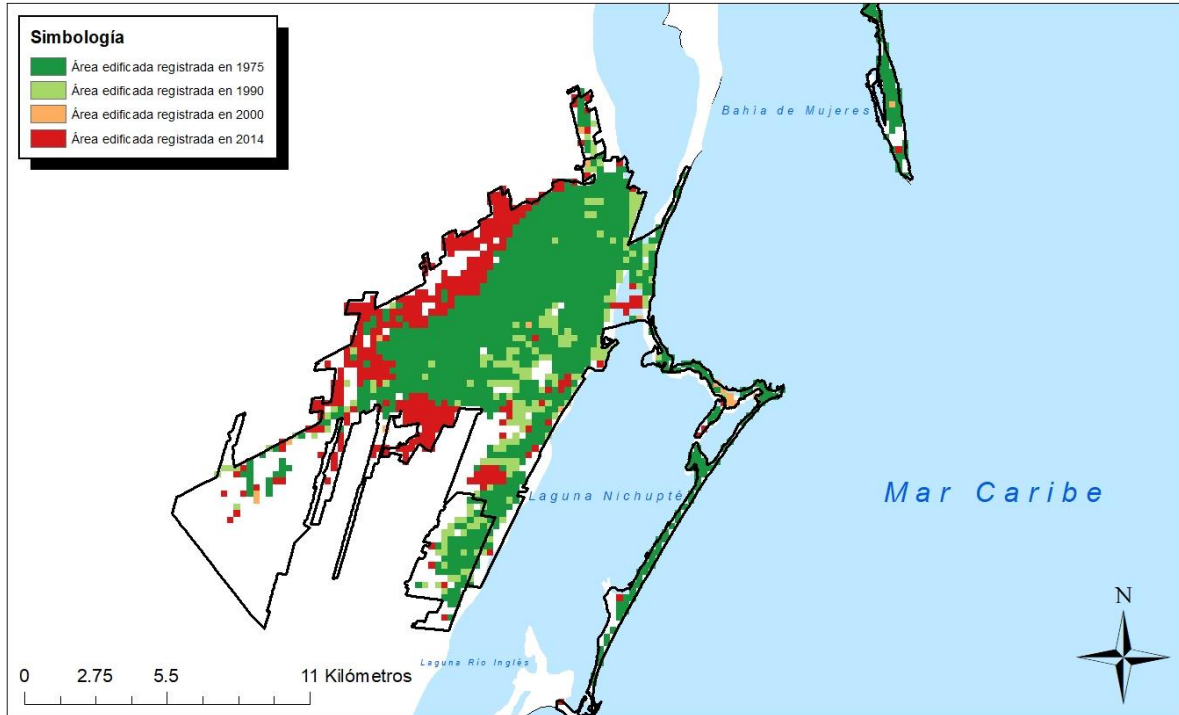
Mapa 6. Cambio histórico de la ciudad de Progreso



Fuente: Elaboración propia.

En el caso de Cancún podemos ver que desde 1975 ya contaba con una gran extensión territorial, tanto en la zona costera como en la zona continental (principalmente del lado oeste). Para los años 1990 y 2000 se pueden registrar nuevas zonas urbanas principalmente en la zona hotelera. Mientras que para el 2014 se da un gran incremento en la zona continental.

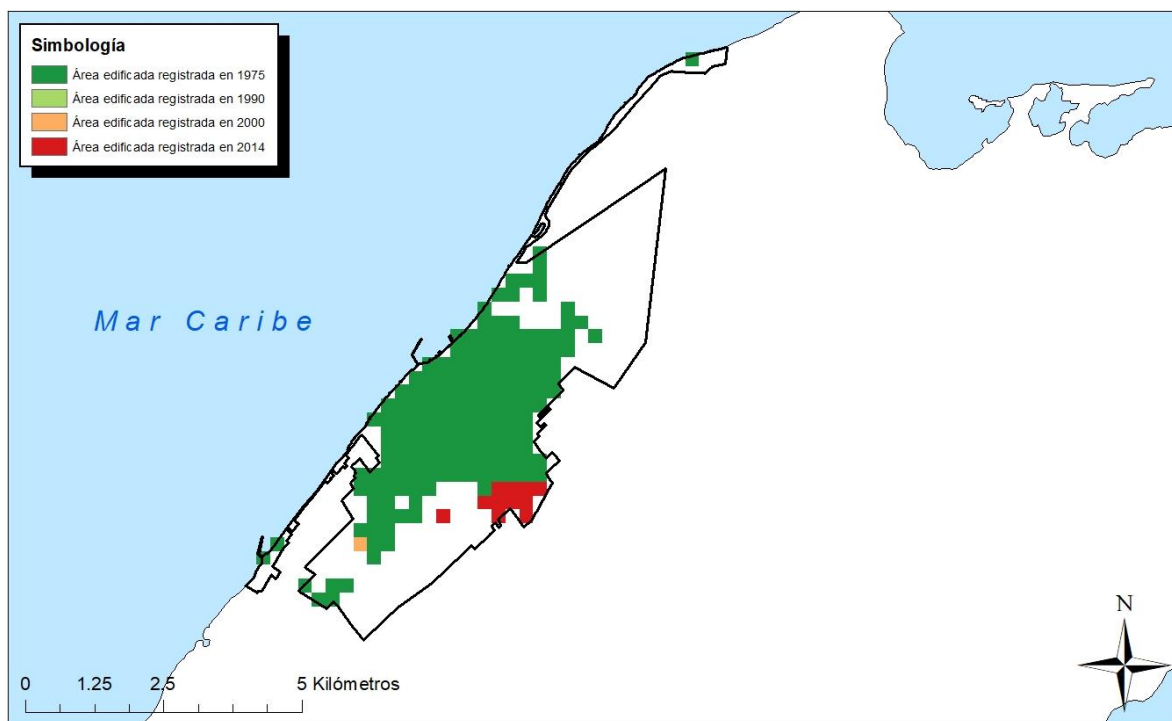
Mapa 7. Cambio histórico de la zona metropolitana de Cancún



Fuente: Elaboración propia.

Con el Mapa 8 se puede observar que la extensión urbana de Cozumel no ha variado mucho desde 1975. Aunque cabe considerar que su crecimiento puede estar sujeto a su condición de estar en una isla. Las nuevas edificaciones en forma extensiva se presentan para el año 2014 (más adelante veremos su crecimiento intensivo). También cabe destacar su gran papel que tiene como lugar turístico en la zona y que se verá reflejado con la siguiente ciudad, Playa del Carmen.

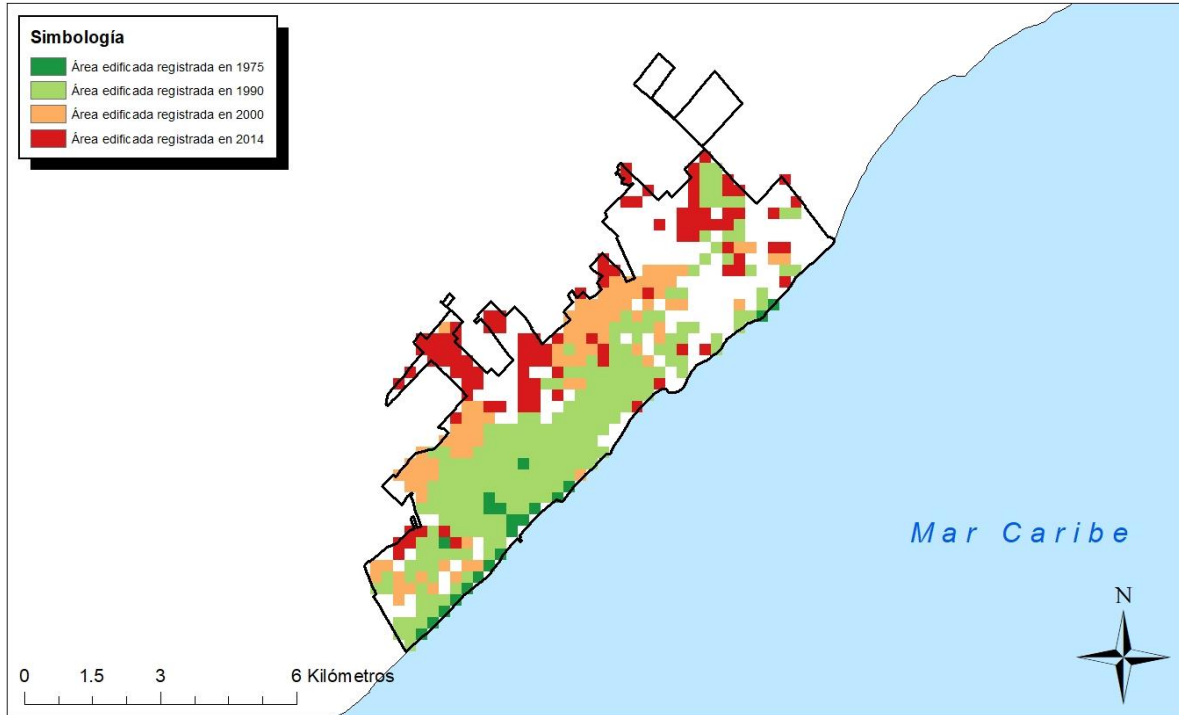
Mapa 8. Cambio histórico de la ciudad de Cozumel



Fuente: Elaboración propia

Playa del Carmen para el año 1975 no era un gran asentamiento humano, sin embargo, la vocación turística que se le ha dado a este lugar ha influido extraordinariamente en su expansión. Tan sólo cabe apreciar en el Mapa 9 su extraordinaria expansión para el año 1990, misma que se mantiene para 2000 y 2014. En el caso de 1990 la expansión se dio a lo largo de la costa y la parte continental, mientras que para el 2000 y 2014 fue principalmente tierra adentro. Dicha expansión se podría explicar a la cercanía que tiene con Cozumel ya que éste es un centro turístico a la cual se puede acceder por avión o por barco desde Playa del Carmen.

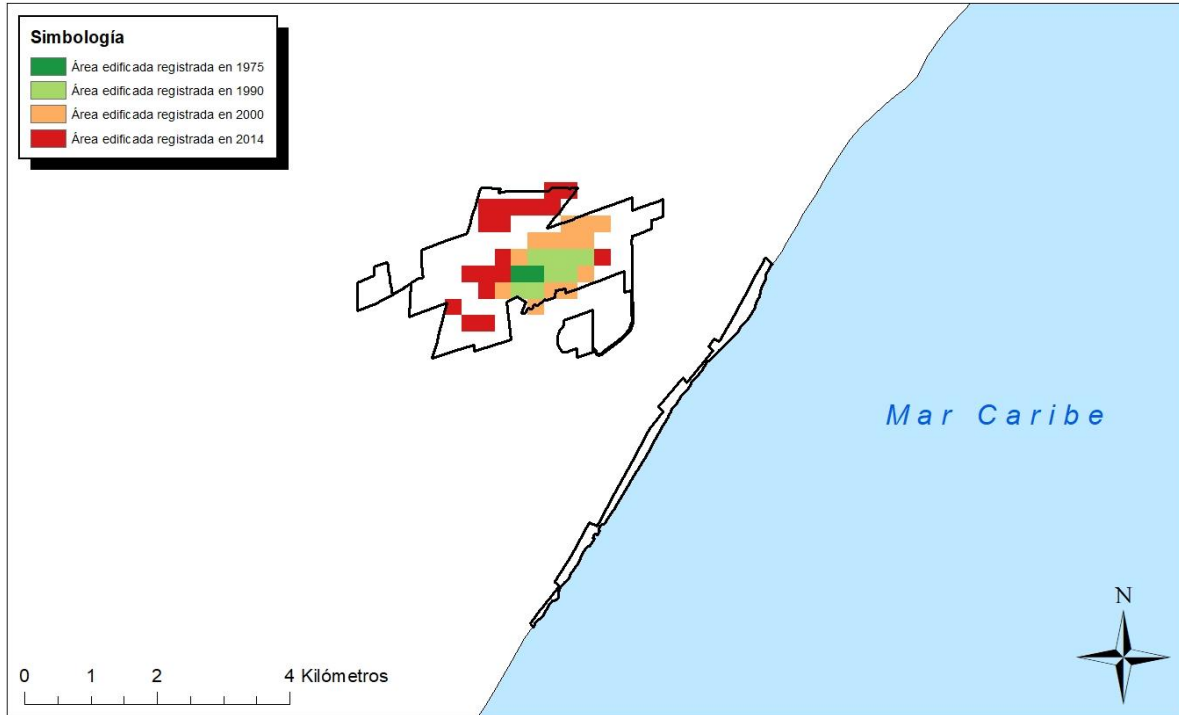
Mapa 9. Cambio histórico de la ciudad de Playa del Carmen



Fuente: Elaboración propia.

Continuando con las ciudades en la Riviera Maya, Tulum es la ciudad más pequeña respecto a las demás, aunque ha tomado importancia por irse volviendo polo de turismo gracias a su zona arqueológica y formar parte de la Riviera Maya. Vemos en el Mapa 10 que en 1975 y 1990 seguía siendo un pequeño asentamiento, pero para el año 2000 y 2014 fue expandiéndose a sus alrededores.

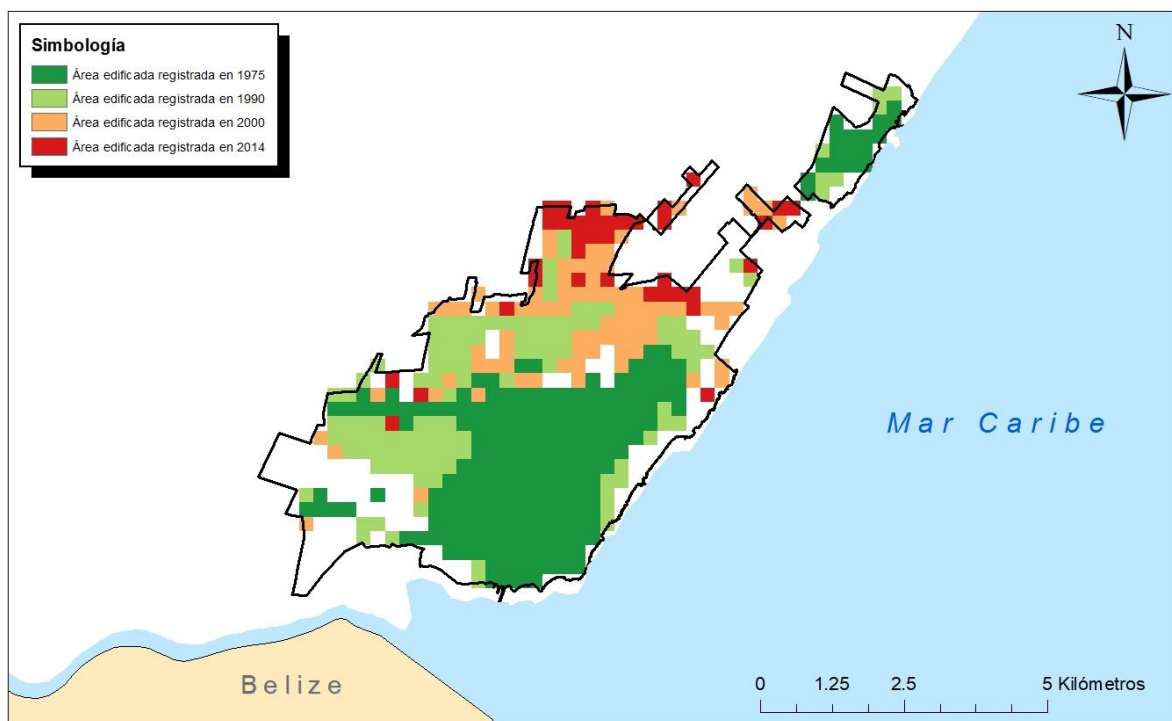
Mapa 10. Cambio histórico de la ciudad de Tulum



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la ciudad de Chetumal tenía una extensión costera al sur y este de su territorio para el año 1975, como lo muestra el Mapa 11. Mientras que para los años 1990 y 2000 la expansión se fue dando en la parte costera y en la parte continental de la zona. Para el año 2014 gran parte del crecimiento se localizó en el norte de la zona continental.

Mapa 11. Cambio histórico de la ciudad de Chetumal



Fuente: Elaboración propia.

Una vez presentado de manera visual la expansión de cada una de las ciudades de estudio se proseguirá a presentar las estimaciones de los indicadores presentados en la sección 2 del presente capítulo. Con relación al crecimiento absoluto y su tendencia de crecimiento de cada una de las ciudades podemos observar, a partir de la Tabla 1 y la Gráfica 1, cómo las áreas construidas han ido creciendo en cada ciudad para cada año. Vemos cómo Cancún y Campeche son las ciudades más grandes en términos de km^2 con 80.5 y 32.2 km^2 , respectivamente, para el año 2014. Asimismo, podemos ver como Champotón y Playa del Carmen en 1975 empezaron siendo pequeños asentamientos, para ese entonces Champotón tenía 2.3 km^2 y Playa del Carmen tenía 0.5 km^2 de superficie construida, conforme transcurrió el tiempo fueron creciendo, ya que para el 2014 Champotón ya tenía 6.7 km^2 y Playa del Carmen tenía 20.2 km^2 . En el caso de Tulum vemos que es la ciudad más pequeña de todas en cada periodo. Cabe resaltar cambios que se dieron en las superficies construidas que no pudimos ver del todo en la presentación visual. Por ejemplo, los casos de Progreso y Cozumel donde no se había podido observar un cambio significativo en su expansión, vemos que

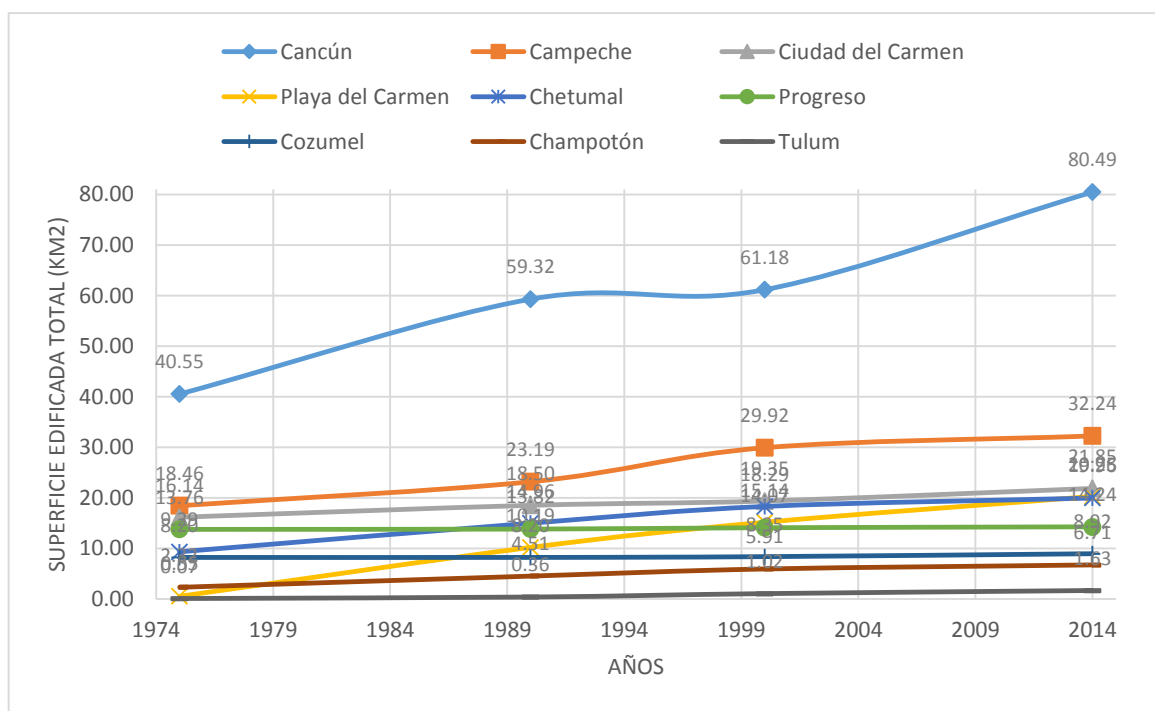
ambas ciudades fueron aumentando ligeramente su superficie construida a lo largo del tiempo, a pesar de sus condiciones geográficas.

Tabla 1. Superficie edificada total y área de estudio para cada ciudad, de 1975 a 2014.

Ciudades	Área total del polígono de INEGI (km2)	Superficie edificada total (km2)			
		1975	1990	2000	2014
Cancún	143.06	40.55	59.32	61.18	80.49
Campeche	54.45	18.46	23.19	29.92	32.24
Ciudad del Carmen	31.92	16.14	18.50	19.35	21.85
Playa del Carmen	39.95	0.55	10.19	15.14	20.25
Chetumal	34.47	9.29	14.96	18.29	19.96
Progreso	22.59	13.76	13.82	14.07	14.24
Cozumel	21.84	8.20	8.20	8.35	8.92
Champotón	10.04	2.32	4.51	5.91	6.71
Tulum	6.44	0.07	0.36	1.02	1.63

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 1. Tendencia de crecimiento de la superficie construida en cada ciudad costera, 1975-2014



Fuente: Elaboración propia.

En términos de superficie construida respecto al área urbana delimitada por el INEGI se puede observar en la Tabla 2 como cada ciudad fue aumentando la ocupación del territorio delimitado. Sin embargo, ninguna ciudad llega a tener tasas de ocupación del 100%, pero esto sugiere que aún hay espacios abiertos que podrían ser utilizados en un futuro crecimiento urbano.

Tabla 2. Superficie edificada relativa al área total de estudio para todas las ciudades, de 1975 a 2014.

Ciudades	1975	1990	2000	2014
Ciudad del Carmen	50.57	57.96	60.63	68.46
Champotón	23.06	44.96	58.84	66.82
Progreso	60.91	61.17	62.31	63.05
Campeche	33.91	42.60	54.95	59.22
Chetumal	26.96	43.41	53.07	57.90
Cancún	28.35	41.46	42.77	56.26
Playa del Carmen	1.37	25.51	37.91	50.68
Cozumel	37.57	37.57	38.25	40.84
Tulum	1.06	5.59	15.86	25.25

Fuente: Elaboración propia.

Si bien la superficie construida en términos absolutos nos ayuda a tener una idea intuitiva del crecimiento de cada ciudad, es a partir de tasas medias anuales de crecimiento en que podemos saber el crecimiento promedio de algo a lo largo del tiempo año por año, pero al estar estudiando un objeto espacial se usa la tasa de expansión urbana media anual, esta es indicativa de la tasa promedio de crecimiento anual de la superficie construida de cada ciudad. Esto permite observar qué ciudades tuvieron altas tasas de crecimiento durante cada periodo y qué otras ciudades se fueron desacelerando. De ese modo en la Tabla 3 podemos observar en el periodo de 1975 a 1990 cómo Playa del Carmen y Tulum presentaron tasas de crecimiento de hasta dos cifras, mientras que Cozumel junto a Progreso presentaron las tasas más bajas de crecimiento urbano para el mismo periodo. Para el lapso de 1990 al 2000 Tulum, Playa del Carmen y Champotón son las ciudades que presentaron las tasas más altas de crecimiento, donde las dos primeras se caracterizan por tener tasas de más de 4 puntos porcentuales. Ciudades como Cancún, Chetumal y Ciudad del Carmen presentaron disminuciones considerables en sus tasas de crecimiento media anual para dicho lapso de años. Para los años que transcurren del 2000 al 2014 todas las ciudades costeras presentaron

tasas de crecimiento más lentas ya que sólo Tulum, Playa del Carmen y Cancún superaron tasas de 1 punto porcentual, sólo el caso de Progreso presenta una tasa de crecimiento muy baja, que sugiere que la ciudad no aumentó significativamente su superficie construida del año 2000 al 2014. A lo largo de todo el periodo de estudio, 1975 al 2014, Playa del Carmen, Tulum y Champotón presentaron las mayores tasas de expansión media anual, de forma contraria, Ciudad del Carmen, Cozumel y Progreso presentaron las tasas más bajas, que se pueden explicar por sus condiciones geográficas ya que Cozumel está en una isla y Progreso se extiende a lo largo de toda la costa y tiene dos humedales al sur de su localización, si bien Ciudad del Carmen también es una isla, presentó una tasa mayor a las de Cozumel y Progreso.

Tabla 3. Tasa de expansión urbana media anual para todas las ciudades en cada periodo.

Ciudades	1975-1990	1990-2000	2000-2014	1975-2014
Playa del Carmen	21.53	4.04	2.10	9.70
Tulum	11.69	10.99	3.38	8.46
Champotón	4.55	2.73	0.91	2.77
Chetumal	3.23	2.03	0.62	1.98
Cancún	2.57	0.31	1.98	1.77
Campeche	1.53	2.58	0.54	1.44
Ciudad del Carmen	0.91	0.45	0.87	0.78
Cozumel	0.00	0.18	0.47	0.21
Progreso	0.03	0.18	0.08	0.09

Fuente: Elaboración propia.

Como se describió líneas arriba, el índice de intensidad de la expansión urbana (IIEU) nos ayuda a clasificar la velocidad de crecimiento de cada ciudad en cada periodo ya que la tasa de crecimiento media anual se hace relativa al área total de estudio para cada ciudad. Cabe señalar que los valores obtenidos para todas las ciudades en cada periodo fueron organizados en cinco clases (muy rápido, rápido, moderado, lento, muy lento) de acuerdo con la clasificación por *natural breaks* como lo sugiere originalmente Liu *et al.* (2000).

En la Tabla 4 podemos observar como para el lapso de 1975 a 1990 las ciudades con una velocidad muy rápida de su expansión fue Playa del Carmen y Champotón, de forma contraria, Cozumel y Progreso crecieron en una velocidad muy lenta. Entre los años 1990 y 2000 Playa del Carmen y Champotón continuaron teniendo una velocidad muy rápida, por su parte Campeche, pasó de tener un crecimiento moderado a muy rápido en este periodo.

Cozumel y Progreso mantuvieron la misma velocidad pasada, mientras que una gran Ciudad como Cancún tuvo un crecimiento lento. Durante los años 2000 al 2014, ciudades turísticas como Playa del Carmen y Cancún crecieron de rápidamente, mientras tanto Champotón, Tulum y Ciudad del Carmen crecieron moderadamente. Las demás ciudades tuvieron un crecimiento lento, a excepción de Progreso el cual fue muy lento. De forma general, a lo largo del periodo de estudio, 1975 al 2014, sólo Playa del Carmen creció muy rápidamente, seguida de Champotón y Chetumal con un crecimiento rápido. Por su parte Cancún, Campeche, Tulum y Ciudad del Carmen tuvieron un crecimiento moderado. Siendo así Cozumel y Progreso ciudades más lentas en su crecimiento.

Tabla 4. Índice de intensidad de la expansión urbana para todas las ciudades en cada periodo.

Ciudades	1975-1990	1990-2000	2000-2014	1975-2014	Caracterización	Rango
Playa del Carmen	1.61	1.24	0.91	1.26	Muy lento	0 - 0.13
Champotón	1.46	1.39	0.57	1.12		
Chetumal	1.10	0.97	0.34	0.79	Lento	0.14 - 0.34
Cancún	0.87	0.13	0.96	0.72		
Campeche	0.58	1.24	0.30	0.65	Moderado	0.35 - 0.72
Tulum	0.30	1.03	0.67	0.62		
Ciudad del Carmen	0.49	0.27	0.56	0.46	Rápido	0.73 - 1.12
Cozumel	0.00	0.07	0.19	0.08		
Progreso	0.02	0.11	0.05	0.05	Muy rápido	1.13 - 1.61

Fuente: Elaboración propia.

Los mapas y estimaciones anteriores se enfocan en el crecimiento extensivo de cada ciudad, sin embargo, es importante ver también el crecimiento intensivo de cada urbe, es decir, el cambio en la proporción de superficie construida en cada espacio urbano (representado por un pixel) de 250 m². En ese sentido la Tabla 5 muestra los grados promedios de edificación de los pixeles urbanos en cada ciudad. Con excepción de Progreso, todas las ciudades presentan una intensificación en la ocupación del suelo.

Del año 1975 a 1990 llama la atención el caso de Playa del Carmen que presentó un aumento considerable en el uso del suelo urbano, ya que de un uso promedio menor al 50% a uno de hasta el 65%. Para el año 1990 llaman la atención Champotón, Tulum y Playa del Carmen pues continúan en un proceso de intensificación del uso del suelo urbano, pero están por debajo de las demás ciudades. Es hasta el año 2000 en que todas las ciudades tienen un

valor mínimo promedio de intensificación del uso de suelo del 70%, intensidad que no varía mucho en el valor promedio al año 2014, pero que sí disminuye la desviación estándar para este último año para todas las ciudades, a excepción de Progreso y Tulum, lo cual es indicativo de procesos de ocupación más homogéneos.

Tabla 5. Porcentaje promedio de edificación en cada pixel en cada ciudad, de 1975 a 2014.

Ciudades	Media del porcentaje edificado de todos los pixeles urbanos				Desviación estándar del porcentaje edificado de todos los pixeles urbanos			
	1975	1990	2000	2014	1975	1990	2000	2014
Ciudad del Carmen	74.00	81.32	83.68	84.65	21.31	21.04	20.73	20.57
Cozumel	78.60	78.60	79.54	79.72	23.06	23.06	23.00	22.40
Campeche	68.22	74.21	79.64	79.36	23.57	22.41	22.80	22.52
Cancún	61.15	74.96	76.30	78.43	21.24	22.91	23.81	22.65
Progreso	77.23	77.28	76.84	76.71	21.33	21.43	22.15	22.44
Champotón	57.88	68.79	76.23	75.60	18.70	21.58	22.26	22.22
Chetumal	70.47	72.77	71.73	71.91	21.95	22.94	24.12	23.43
Tulum	54.84	57.59	71.06	63.47	27.52	16.54	22.35	23.03
Playa del Carmen	41.66	65.21	70.43	72.62	13.26	23.98	25.82	25.47

Fuente: Elaboración propia.

4. La forma urbana: aproximación conceptual y metodológica

En el capítulo 1 vimos que la estructura urbana es continente de los conceptos de forma urbana y expansión urbana. Negrete (2016) considera cinco aspectos de la estructura espacial urbana: el carácter político-administrativo; carácter monocéntrico; segregación; conectividad y finalmente, el carácter disperso o compacto de una ciudad. Éste se relaciona directamente con la densidad urbana, la cual se puede medir con indicadores poblacionales, habitacionales o de construcción. Empleando la información de la base GHSL descrita previamente se buscará medir cuán compactas son las ciudades de estudio. Específicamente, interesa identificar si el crecimiento urbano es urbano continuo y compacto y para ello se empleará 3 métricas: el índice de forma del paisaje –*Landscape shape index*; índice de cohesión de

fragmentos²⁴; e índice de división. Cabe señalar que existe una amplia variedad de indicadores de forma urbana, pero esta tesis ocupa solamente las dimensiones de continuidad y compactes en tanto están estrechamente vinculadas con el crecimiento de las ciudades y la dirección o localización de éstas. Se parte del argumento de que ciudades más fragmentadas tenderán a crecer de manera más acelerada y pueden propiciar la ocupación del suelo costero.

El índice de forma del paisaje (LSI, por sus siglas en inglés) proporciona una medida estandarizada del borde total o densidad del borde que se ajusta al tamaño del paisaje. A razón de que el índice es estandarizado, tiene una interpretación directa. El LSI además puede ser interpretado como una medida de agregación o desagregación de fragmentos urbanos, en otras palabras, conforme el valor de LSI aumente, los fragmentos se vuelven cada vez más desagregados. La fórmula se expresa como:

$$LSI = \frac{E}{\min E}$$

Donde E es la longitud total del borde en un paisaje en términos del número de celdas de superficie (incluye todos los límites de paisaje y segmentos de borde de fondo) y min E es la longitud total mínima del borde en un paisaje en términos de celdas de superficie. En otras palabras. El LSI es igual a la longitud total del borde en el paisaje, dado un número de celdas de superficie, dividido por la longitud total mínima de borde posible, también dado un número de celdas de superficie, lo cual se logra cuando el paisaje consiste en un solo fragmento. Los valores que puede tener LSI van de uno a infinito, $LSI \geq 1$, el índice será igual a 1 cuando el paisaje consista en un solo fragmento semejante a una forma cuadrada; conforme el valor del índice vaya aumentando la forma de los fragmentos se irá volviendo más irregular.

El índice de cohesión de fragmentos mide la conexión de los diferentes fragmentos. La cohesión de fragmentos incrementa con forme los fragmentos se vuelven más agrupados o agregados en su distribución, por lo tanto, físicamente más conectados. La fórmula se expresa de la siguiente forma:

$$COHESION = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n p_{ij}}{\sum_{i=1}^n p_{ij} \sqrt{a_{ij}}} \right] \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{A}} \right]^{-1} \cdot (100)$$

²⁴ Por fragmentos o fragmentos urbanos se refiere a aquel conjunto de pixeles contiguos espacialmente. Puede haber fragmentos conformados por un solo pixel o bien, por más de uno. En la literatura anglosajona se le denomina *patch* y en plural *patches*.

Donde p_{ij} es el perímetro del fragmento ij en términos del número de celdas de superficie, a_{ij} es el área del fragmento ij en términos del número de celdas y A es el número de celdas en el paisaje. Es decir, el índice es igual a 1 menos la suma del perímetro del fragmento (en términos de celdas de superficie) dividido por la suma del perímetro de fragmentos multiplicado por la raíz cuadrada del área del fragmento (en términos de número de celdas), dividido por 1, menos 1 sobre la raíz cuadrada del número total de celdas en el paisaje, multiplicado por 100 para convertirlo en porcentaje. El rango de valores del índice van de 0 a 100 ($0 \leq COHESION \leq 100$), el valor se acerca a 0 conforme la proporción del paisaje comprendido decrece y se vuelve cada vez más subdividido y físicamente menos conectado.

El índice de división está basado en la distribución acumulativa del área del fragmento y es interpretada como la probabilidad de que dos celdas seleccionadas aleatoriamente en el paisaje no estén ubicadas en el mismo fragmento. La fórmula es:

$$DIVISION = \left[1 - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_{ij}}{A} \right)^2 \right]$$

Donde a_{ij} es el área en m^2 del fragmento ij y A^{25} es el área total del paisaje en m^2 . Por lo cual el índice iguala 1 menos la suma del área del fragmento (m^2) dividido por el área total del paisaje (m^2), cantidad elevada al cuadrado sumado a través de todos los fragmentos en el paisaje. El valor del índice va desde cero hasta menos de uno ($0 \leq DIVISION < 1$), el valor es igual a 0 cuando el paisaje consiste en un solo fragmento. El índice obtiene su máximo valor si el paisaje está dividido al máximo, es decir, cuando cada celda del paisaje se vuelve un fragmento separado. Para el cálculo de los indicadores se usó el programa FRAGSTATS versión 4.

5. La forma urbana de las ciudades costeras de la península de Yucatán

A continuación, se describen los resultados obtenidos de los indicadores. A manera de panorama general a través de la Tabla 6 se puede ver cómo las ciudades fueron dividiéndose en diferentes fragmentos de superficie urbana, o de forma contraria, hubo un crecimiento contiguo de las ciudades unificando los diferentes fragmentos. Para 1975 las ciudades con

²⁵ El área total del paisaje (A) incluye cualquier fondo interno presente.

mayor cantidad de fragmentos fue Cancún, Campeche y Playa del Carmen con 38, 8 y 6 fragmentos urbanos respectivamente. De esas ciudades solo la de mayor fragmentación, Cancún, redujo sus fragmentos a sólo 25 para el año 2014, mientras que Campeche y Playa del Carmen aumentaron, esta última a casi el doble pues paso de 6 a 11 fragmentos urbanos. De forma contraria, en 1975, Ciudad del Carmen, Tulum y Champotón fueron las ciudades menos fragmentadas y su expansión fue dándose de forma contigua dado que para 2014 disminuyeron sus fragmentos, a excepto de Tulum, destacándose Champotón que llegó a ser la única ciudad de tener una superficie urbana contigua.

Tabla 6. Número de fragmentos urbanos

Ciudades	1975	1990	2000	2014
Cancún	38	31	30	25
Playa del Carmen	6	11	8	11
Campeche	8	10	8	9
Chetumal	5	5	8	6
Progreso	5	5	6	5
Cozumel	4	4	4	5
Ciudad del Carmen	3	3	3	2
Tulum	1	1	1	2
Champotón	3	1	1	1

Fuente: Elaboración propia.

En términos de saber que ciudades se asemejan más a una forma cuadrada²⁶ se usa el índice de forma del paisaje (resultados que se pueden ver en la Tabla 7). Para 1975 la única ciudad que presento un valor de 1, es decir, presentaba una forma sumamente regular fue Tulum. De forma contraria, Cancún fue la ciudad más irregular con un valor de hasta 8, seguida de Progreso y Campeche, con valores de 5 y 4 respectivamente. Para el siguiente periodo de tiempo, Cancún, Campeche, Ciudad del Carmen y Champotón fueron presentando una menor irregularidad, de forma inversa, Tulum fue perdiendo su compacidad al igual que Chetumal y Playa del Carmen. Para el año 2000, Cancún, Ciudad del Carmen y Tulum ganaron dispersión, mientras que las demás mejoraron su compacidad. Finalmente, en 2014, Cancún se mantuvo como la ciudad más dispersa, seguida de Progreso y Playa del Carmen

²⁶ El índice tiene como forma ideal de compacidad un cuadrado dado el tipo de información que se usa es de tipo raster, es decir celdas de formas cuadrículas, por lo cual las formas más simétricas será una celda (1x1) o un conjunto de celdas que presenten una forma cuadrícula (2x2, 3x3, 4x4 etc.)

con valores de 6.6, 5.2 y 4.6 respectivamente, mientras que Ciudad del Carmen, Tulum y Champotón, a pesar de no contar con valores de 1, fueron las ciudades más compactas respecto a las demás. Cabe mencionar que a lo largo de los años Cozumel mantuvo su mismo grado de compacidad hasta 2014 cuando aumento su grado de dispersión, además, Tulum que fuera el asentamiento más compacto en 1975 no pudo mantener ese grado de compacidad hasta 2014.

Tabla 7. Índice de forma del paisaje

Ciudades	1975	1990	2000	2014
Cancún	8.15	6.69	6.82	6.63
Progreso	5.21	5.21	5.17	5.17
Playa del Carmen	3.80	4.66	4.26	4.63
Campeche	3.95	3.84	3.26	3.63
Chetumal	2.70	3.30	3.29	3.19
Cozumel	2.62	2.62	2.62	2.74
Ciudad del Carmen	2.92	2.82	2.92	2.56
Tulum	1.00	1.14	1.30	2.31
Champotón	2.44	2.19	2.04	2.13

Fuente: Elaboración propia.

En referencia al grado de división y a la conexión física de los fragmentos de cada ciudad vemos que para 1975 el índice de cohesión señala a Tulum como el asentamiento más conectado físicamente (véase tabla 8), de forma contraria, Playa del Carmen fue la ciudad menos conectada físicamente al presentar el valor más bajo de todos, 72. Para 1990 Champotón y Tulum presentaron el mayor grado de conexión física de la extensión urbana con un valor de 100, mientras que Playa del Carmen, Cancún y Cozumel presentaron los valores más bajos de cohesión, con 96.5, 97.3 y 98.1 respectivamente. En el año 2000 Champotón y Tulum se mantuvieron como las ciudades mejor conectadas, seguidas de Ciudad del Carmen con un índice de 99.5. Contrariamente, Cancún fue la ciudad menos conectada con una cohesión de 97.4. Para 2014 Champotón se mantuvo como la ciudad con mayor cohesión física mientras que Tulum presentó un crecimiento que la hizo disminuir su cohesión y volverla la ciudad menos conectada respecto a las otras. Respecto al año inicial, 1975, Ciudad del Carmen, Playa del Carmen, Chetumal, Cancún y Campeche mejoraron su grado de conexión física, aunque no llegaron a presentar un índice de 100. De forma inversa, Progreso, Cozumel y Tulum disminuyeron sus grados de cohesión de 1975 a 2014.

Tabla 8. Índice de cohesión

Ciudades	1975	1990	2000	2014
Champotón	98.34	100.00	100.00	100
Ciudad del Carmen	99.78	99.73	99.58	99.58
Playa del Carmen	72.06	96.53	98.52	98.47
Chetumal	96.93	98.26	98.11	98.44
Progreso	98.36	98.36	98.13	98.29
Cancún	96.31	97.32	97.47	98.26
Campeche	97.46	98.36	98.29	98.22
Cozumel	98.11	98.11	98.11	97.98
Tulum	100	100	100	96.67

Fuente: Elaboración propia.

Respecto al último indicador, el índice de división, podemos ver que en 1975, de acuerdo a la Tabla 9, Playa del Carmen y Cancún presentaban probabilidades de hasta 72% y 45%, respectivamente, algunas de sus celdas urbanas estuvieran en fragmentos urbanos diferentes. Para el siguiente año las reducciones probabilísticas más considerables fueron Playa del Carmen y Cancún al reducir 45 y 16 puntos porcentuales respectivamente. Para el año 2000 Progreso aumentó su probabilidad a 21% respecto de un 19% en 1990, mientras que Playa del Carmen disminuyó su división al pasar de una probabilidad de 27% a tan sólo 15%. Para el último año de estudio, Tulum, que no presentaba división alguna, pasó a una división probabilística de 13%, por su parte Playa del Carmen y Cancún presentaron mayores mejoras durante el periodo de estudio al pasar de un valor de 72% y 45% en 1975 respectivamente, a valores de 15% y 23% para 2014 respectivamente.

Tabla 9. Índice de división

Ciudades	1975	1990	2000	2014
Cancún	0.454	0.292	0.292	0.237
Progreso	0.195	0.194	0.214	0.213
Campeche	0.239	0.170	0.173	0.194
Chetumal	0.216	0.180	0.170	0.163
Playa del Carmen	0.721	0.277	0.155	0.150
Tulum	0.000	0.000	0.000	0.136
Cozumel	0.092	0.092	0.092	0.097
Ciudad del Carmen	0.011	0.016	0.027	0.043
Champotón	0.061	0.000	0.000	0.000

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

En el presente capítulo se definió el concepto de expansión urbana, se estableció dos medidas principales para estimar el área urbana edificada de cada ciudad, la tasa de crecimiento, así como la velocidad de crecimiento. De igual forma se describió el concepto de forma urbana y se establecieron diferentes métricas para observar la compacidad de cada una de las ciudades. En cuanto a la expansión del área edificada, Cancún es la ciudad más grande con 80 km² de superficie construida, seguida de Campeche con 32 km². De forma contraria, Tulum es la ciudad más pequeña con apenas un kilómetro cuadrado de superficie construida. En términos de expansión media anual, la ciudad de Progreso tuvo la tasa más baja entre todas las demás ciudades dentro del periodo de estudio (1975 a 2014) con una tasa de 0.09%, mientras que Playa del Carmen fue la ciudad costera con la mayor tasa media de expansión debido a que dentro del periodo de 39 años dado que creció en promedio cada año 9.7%.

En cuanto a la velocidad de las ciudades costeras de estudio se pudo observar que el periodo de 1975 a 1990 se presentaron velocidades rápidas de crecimiento para algunas ciudades: Playa del Carmen, Champotón, Chetumal y Cancún, mientras que para el periodo de 1990 a 2000 las mismas ciudades se mantuvieron a excepto de Cancún. El periodo de 2000 a 2014 fue un periodo de crecimiento lento para casi todas las ciudades de estudio, con excepción de Playa del Carmen que creció a una velocidad rápida, y que de hecho es la única ciudad que creció a esa velocidad durante todo el periodo de estudio. En contraste, Champotón se caracterizó por crecer a una velocidad rápida durante todo el periodo de estudio, mientras que las ciudades restantes crecieron a una velocidad moderada o lenta.

Respecto a la forma urbana podemos ver que Cancún durante el periodo de estudio mantuvo el valor más alto del índice del paisaje, es decir fue la ciudad con la forma menos compacta de todas, sin embargo, conforme transcurrió el tiempo fue reduciendo su dispersión, pasando de un valor de 8.1 en 1975 a 6.6 en 2014. De forma contraria, Champotón ha sido de las ciudades más compactas a lo largo del tiempo, fue hasta 2014 en que se consolidó como la más compacta de todas, seguida de Tulum, Ciudad del Carmen y Cozumel. Las ciudades de Playa del Carmen, Chetumal y Tulum fueron aumentando su valor de compacidad de 1975 hasta 2014, si bien vemos que Tulum es de las más compactas en 2014, vemos que en 1975 era sumamente compacta. En términos de qué tan fragmentado está cada

ciudad y cómo fue dándose su crecimiento de expansión urbana, vemos que Cancún fue la ciudad más fragmentada en 1975 al contar con 38 fragmentos, sin embargo, el crecimiento que se dio en esta ciudad fue por contigüidad ya que para 2014 los fragmentos se redujeron a 25. Casos similares de crecimiento contiguo fueron Ciudad del Carmen y Champotón. Caso muy contrario fue Playa del Carmen, que de tener 6 fragmentos en 1975 en 2014 pasó a tener 11, casi el doble de fragmentos, por lo cual tuvo varias áreas urbanas nuevas que surgieron por salto de rana.

Capítulo 3 Expansión urbana y exposición a riesgos por elevación del nivel del mar

Introducción

El aumento de las actividades humanas, entre ellas, el crecimiento urbano, influyen en el cambio climático, aumento en la temperatura atmosférica y de los mares son ejemplo de ello. De seguir esa tendencia se espera el incremento del nivel del mar y el aumento de frecuencia e intensidad de ciclones tropicales, a partir de eso se prevé mayores probabilidades de inundaciones, principalmente en las zonas costeras bajas ya que son las zonas más vulnerables a inundaciones (McGranahan, Balk, y Anderson, 2008, p. 165).

El proceso de crecimiento de una ciudad está asociado a un aumento en la cantidad de edificios construidos, de su población, así como de la cantidad de actividades económicas que se dan en la ciudad. Pero este crecimiento también implica una relación con el medio ambiente circundante, mismo que influye en los fenómenos naturales que ocurren en una ciudad. Las ciudades costeras por su localización y por estar en zonas de baja elevación (menos de 10 metros sobre el nivel del mar) son propensas a sufrir las afectaciones por elevación del nivel del mar. En ese sentido, el crecimiento físico de una ciudad en zonas de baja elevación, en dirección al mar y sin considerar ninguna medida adaptativa a algún tipo de peligro de la zona, contribuye a la configuración del riesgo de inundación.

En este capítulo se evalúa la configuración de este tipo de riesgo a partir de la estimación de la superficie construida ubicada en las zonas más propensas a inundarse; para ello se analizarán la intensidad de construcción y los patrones de expansión de cada uno de los nueve asentamientos urbanos de estudio que se encuentran en zonas menores a 10 metros sobre el nivel del mar, así como su cercanía con la costa.

1. La configuración del riesgo de inundación por el aumento del nivel del mar

El aumento del nivel del mar puede ocasionar inundaciones; existen dos tipos de aumentos del nivel del mar, por consiguiente, dos tipos de inundaciones. Por una parte, está el aumento extremo del nivel del mar, esto refiere cuando se incrementa el nivel promedio del mar a causa de un ciclón tropical (a esto también se le conoce como marea de tormenta), este tipo

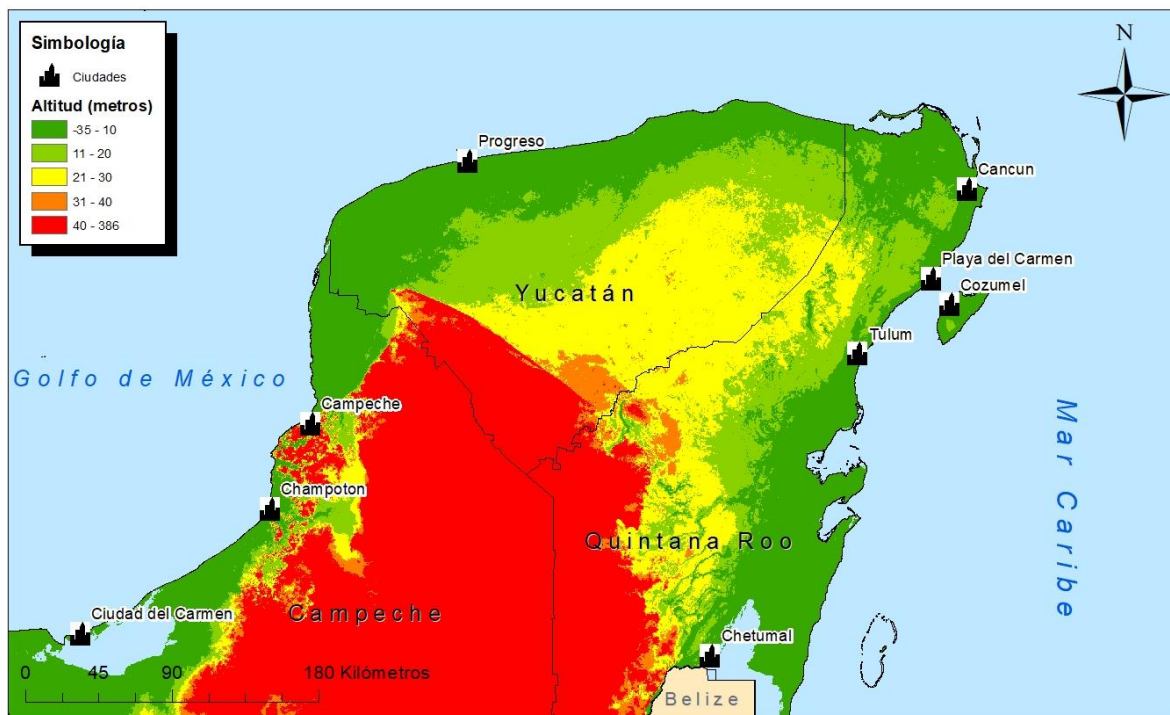
de variación ocasiona inundaciones de forma temporal, es decir, terminan una vez que el ciclón ha pasado. Por otra parte, hay cambios que duran varias décadas o siglos que se asocian a cambios en la atmosfera y en los océanos, por ejemplo, el aumento de las temperaturas atmosféricas y oceánicas contribuye, por una parte, al descongelamiento de los glaciares que aumentan el flujo de los océanos y por otra, a la expansión del volumen del agua del océano (El Colegio de México, 2018, p. 91; Pedrozo-Acuña et al., 2015, p. 230), a esto se le denomina inundaciones permanentes las cuales ocurren en zonas costeras de baja elevación. Si bien McGranahan et al. nos advierten que la “marea alta, marea de tormenta, subsidencia, intrusión salina y otros procesos se combinarán para asegurar que la altitud máxima de impacto son metros severamente más altos que los metros (o fragmentos de metros) del aumento del nivel del mar resultado del cambio climático” (2008, p. 170). Por lo cual es necesario considerar ambos aspectos en conjunto, debido a que las magnitudes de las inundaciones pueden ser mayores. Además, no hay que olvidar que no sólo los ciclones tropicales ocasionan inundaciones temporales, sino que los ciclones se volverán más frecuentes e intensos de continuar la tendencia del cambio climático, por tanto, el riesgo e inundaciones por olas aún más altas se volverá mayor (G. McGranahan et al., 2007, p. 18).

De forma general los niveles del mar continuamente han aumentado en décadas recientes y han contribuido al incremento en los niveles extremos del nivel del mar en varias partes del planeta (Reguero et al., 2015, p. 2). En la zona de la península de Yucatán se estima que bajo los escenarios climáticos no tan drásticos como el RCP 2.6, 4.5 y 6.0 habrá un aumento de 39 centímetros para finales del siglo XXI, mientras que para escenarios más drásticos como el RCP 8.5 se espera un aumento de 91 cm para final del siglo (Carnero-Bravo et al., 2016, p. 1068). De forma particular, en el Caribe la probabilidad de ocurrencia de aumentos extremos del nivel del mar ha aumentado notablemente de 1950 al 2008. Información histórica muestra mayor frecuencia de aumentos extremos en Latinoamérica, principalmente en la zona del Caribe y en Rio de Plata (Reguero et al., 2015, p. 3).

De la zona de estudio se puede enfatizar dos características, una geográfica y otra climática. En cuanto a la geográfica la zona litoral del Golfo de México y del Mar Caribe, es mayoritariamente plana, con el Mapa 12 podemos observar la altitud de la península de Yucatán, donde se constata que la costa de la península es ampliamente plana -salvo una

pequeña área cerca de Campeche-, por lo tanto, pequeños aumentos del nivel del mar repercuten en extensiones amplias al interior de la zona continental, siendo entonces estas áreas vulnerables²⁷ a eventos climáticos, hidrológicos y marinos (Ortiz y Méndez, 2004, p. 309; Torres-Rodriguez et al., 2011, p. 415).

Mapa 12. Altitud en la península de Yucatán.



Fuente: Elaboración propia con base a información de MERIT.

En cuanto a la característica climática tenemos que la península de Yucatán es zona de actividad ciclónica. Tan sólo con información del Atlas Climático Digital de México del Centro de Ciencias de la Atmosfera de la UNAM, durante el periodo de junio de 1851 a noviembre de 2015 se han presentado en Ciudad del Carmen 77 ciclones tropicales con un radio de influencia de 150 km y 191 ciclones con un radio de 350 km; Champotón 212 de 350 km y 87 de 150 km de radio de influencia; en la ciudad de Campeche ha habido 85 de 150 km y 225 de 350 km; en Progreso ha habido 253 con 350 km de influencia y 81 con 150

²⁷ Recuérdese que en el capítulo 1 se definió a la vulnerabilidad como aquellas zonas en las que se puede presentar un fenómeno natural considerado como amenaza, en este caso la amenaza referida es el aumento del nivel del mar.

km; Cancún 136 con 150 km y 295 con 350 km; Cozumel 292 con 250 km y 125 con 150 km; Playa del Carmen 130 con 150 km y 286 con 350 km; Tulum 267 con 350 km y 110 con 150 km; finalmente, en Chetumal 94 con 150 km y 230 con 350 km.

Para identificar las zonas de inundación costera el método frecuentemente utilizado consiste en dos aspectos, el primero consiste en delimitar un nivel de mar esperado, el segundo, es determinar la altitud de la zona a partir de modelos digitales de elevación y así poder identificar las áreas que están debajo del aumento del nivel del mar esperado (Gesch, 2018, p. 2). Respecto a la delimitación de un nivel del mar esperado estudios recientes han demostrado la importancia de considerar los efectos conjuntos del aumento del nivel del mar por cambio climático y las mareas de tormenta al momento de analizar adecuadamente el riesgo de inundaciones costeras (Pedrozo-Acuña et al., 2015, p. 230). A pesar de la incertidumbre de cuanto aumentará el nivel del mar a causa del cambio climático, se reconoce que un aumento de 38 cm en el nivel del mar incrementara una quinta parte el número de personas que sufran inundaciones por mareas de tormenta (Pedrozo-Acuña et al., 2015, p. 228). Esto refuerza la idea de que a pesar de que el aumento del nivel del mar por el cambio climático es relativamente lento y progresivo, la combinación con fenómenos como ciclones vuelve al aumento del nivel del mar una amenaza latente. Sin embargo, también se debe tomar en cuenta que el incremento a exposición de inundaciones en áreas costeras no sólo se debe al cambio climático sino también al crecimiento de las poblaciones y sus activos y algunos otros fenómenos como la subsidencia (Pedrozo-Acuña et al., 2015, p. 228). Finalmente, en caso de que el riesgo de inundación deje de ser una posibilidad y se materialice en forma de desastre, habrá efectos socioeconómicos directos e indirectos, es por ello conveniente evaluar la magnitud de las posibles repercusiones a pesar de que siga habiendo nuevas proyecciones del futuro aumento del nivel del mar.

2. Estimaciones de exposición a la amenaza del incremento del nivel del mar en las ciudades de estudio

Anteriormente en el capítulo 1 pudimos ver que el riesgo está compuesto por 3 factores, la amenaza, la vulnerabilidad y la exposición. Para el presente trabajo el riesgo que se está tratando es el de inundación. En cuanto a la amenaza se refiere al incremento del nivel del mar, mientras que a vulnerabilidad hace referencia a la característica topográfica de baja

altitud, denominado aquí como zonas costeras de baja elevación (menor a 10 msnm). Finalmente, en cuanto a la exposición, el lector debe recordar que ésta se define como la cantidad de personas o infraestructura en localizadas en áreas susceptibles a amenazas (Pesaresi et al., 2017, p. 20). En este caso, la exposición que se estimará será en términos de superficie construida, por lo cual la unidad de medida será kilómetros cuadrados.

En cuanto a las zonas costeras de baja elevación, McGranahan et al. (2007) consideran que zonas menores a 10 metros sobre el nivel del mar son propensas a riesgos como el aumento del nivel del mar. Asimismo, de acuerdo con el Programa Espacial de Fenómenos Hidrometeorológicos, de la Coordinación Estatal de Protección Civil de Quintana Roo existen diferentes umbrales de altura de las olas de acuerdo con la categoría de los huracanes. Un huracán categoría uno puede presentar oleadas de tormenta de 1 a 1.7 metros; uno de categoría dos oleaje de 1.8 a 2.6 metros; uno categoría 3 puede generar olas de 2.7 a 3.8 metros; uno de categoría 4 sus olas van de 3.9 a 5.6 metros y finalmente, un huracán categoría 5 sus olas son mayores a 5.6 metros (Molina et al., 2001, p. 17). En ese sentido, y con base al aumento del nivel del mar que ha ocurrido en la segunda mitad del siglo XX, así como los niveles del mar que se han registrado y se esperan por ciclones tropicales, en el presente trabajo se utiliza una altura máxima de inundación de 10 metros, dividido en dos umbrales, un umbral menor a 5 metros para registrar los oleajes debido a tormentas de menor intensidad, y otro mayor a 5 metros pero menor o igual a 10 metros para capturar los aumentos de nivel de mar a causa de tormentas de mayor intensidad.

En cuanto a la determinación de la altura se usa un modelo digital de elevación. Cada modelo de elevación existente tiene una “precisión vertical” es decir un grado de error. Es importante considerar este grado de error ya que puede influir directamente en la determinación de las áreas bajas de estudio y, por consiguiente, influye en los resultados de la evaluación en el grado de exposición del nivel del mar. En los estudios de evaluación de inundaciones es muy común el uso del modelo SRTM, sin embargo, se ha demostrado que este modelo presenta imprecisiones, mismas que han sido mejoradas en el modelo de MERIT (Hawker et al., 2018, p. 4). El modelo SRTM presenta un error promedio de 5.57 metros, lo que significa un grado de confianza del 63% en alturas menores a 10 metros, mientras que MERIT presenta una confianza de 89% para la misma altitud (Gesch, 2018, p. 12), en ese

sentido la determinación de la altitud en las zonas de estudio se estimó a partir del modelo de MERIT.

Por otra parte, Molina et al. (2001) señalan que la cercanía a la costa influye en el grado de afectaciones por tormentas, estos autores consideran un radio de 40 a 400 metros, señalando que la superficie de tierra es vulnerable a la erosión y a los efectos de tormentas (Molina et al., 2001, p. 33). En ese mismo sentido, Hauer *et al.* (2019) realizan un estudio de las repercusiones del aumento del nivel del mar en las costas de Louisiana, Estados Unidos, durante el siglo XX. En dicho estudio se halla que las principales repercusiones por el aumento del nivel del mar se encuentran cerca de la costa, asimismo los movimientos poblacionales por este fenómeno se analizan en una distancia de 1 kilómetro. Por estas razones en el presente trabajo se utilizará una franja costera con un ancho de un kilómetro para el análisis a la cercanía del mar como otro fundamento de riesgo a inundaciones.

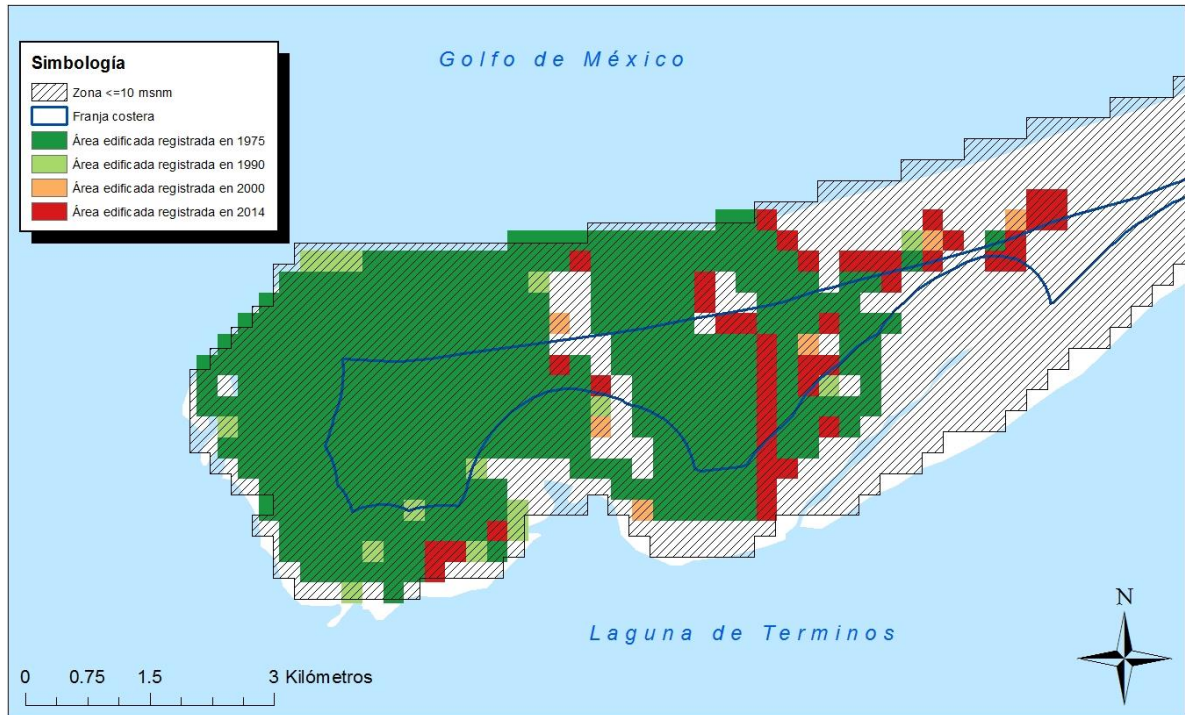
Los análisis de riesgo de inundación se basan en los resultados de un sistema de información geográfica que identifica las zonas que están en mayor riesgo debido a que se encuentran en zonas con una altura igual o menor a lo que se estima del aumento del nivel del mar. Para el presente caso para identificar zonas vulnerables a aumentos del nivel del mar se utilizará un criterio de elevación del terreno (menor o igual a 10 msnm) y otro de cercanía a una franja costera (1 km de distancia de la costa). La siguiente serie de mapas presentará de forma visual las áreas expuestas en cada ciudad, así como las áreas con mayor riesgo por contar con ambos criterios. La línea azul delimita la franja de tierra a 1 km de la costa, mientras que la trama de los pixeles denota la altitud (menor o igual a 10 msnm). Adicionalmente, las tonalidades de cada pixel indican si el área estaba urbanizada para el momento del registro de la información de la base de datos. En combinación, el mapa permite distinguir si las zonas hacia donde se ha extendido la ciudad a lo largo del tiempo tienden a ubicarse en áreas de alta vulnerabilidad.

En el caso de Ciudad del Carmen, al encontrarse en una isla gran parte de su territorio se encuentra dentro de la franja costera, desde 1975 a 2014 la proporción del área construida en esta zona respecto al total fue del 67%²⁸. La isla en la que se encuentra la ciudad es de

²⁸ Las cifras que se refieran al área construida en la franja costera, a la superficie construida en zonas de baja elevación o en ambas situaciones se encuentran más adelante en la Tabla 10.

baja elevación ya que, durante todo el periodo de estudio, el 98% de las construcciones estuvieron en una altura menor o igual a 10 msnm.

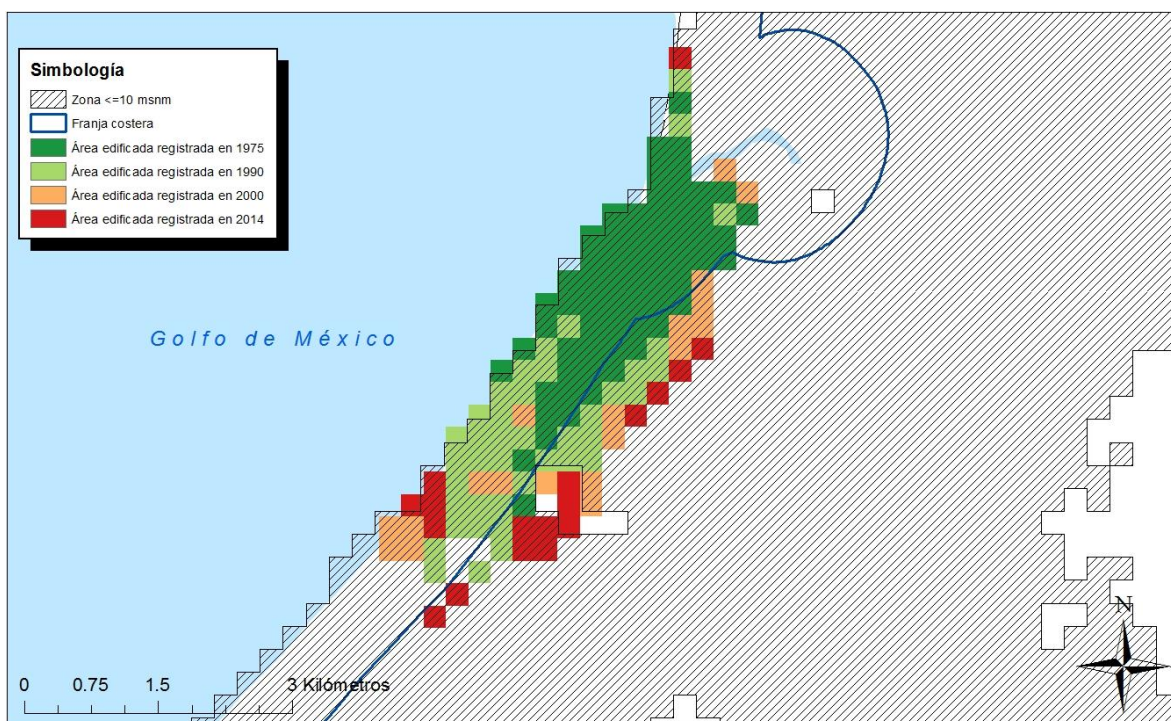
Mapa 13. Áreas urbanas expuestas en Ciudad del Carmen



Fuente: Elaboración propia.

En el caso de Champotón podemos ver cómo la ciudad se fue expandiendo cerca de la costa dentro de la franja costera y a pesar de que hubo crecimiento lejos de la franja, las edificaciones continuaron en zonas menores a 10 msnm, de tal suerte que para el año 2014 éstas representaban el 95% del total del área construida.

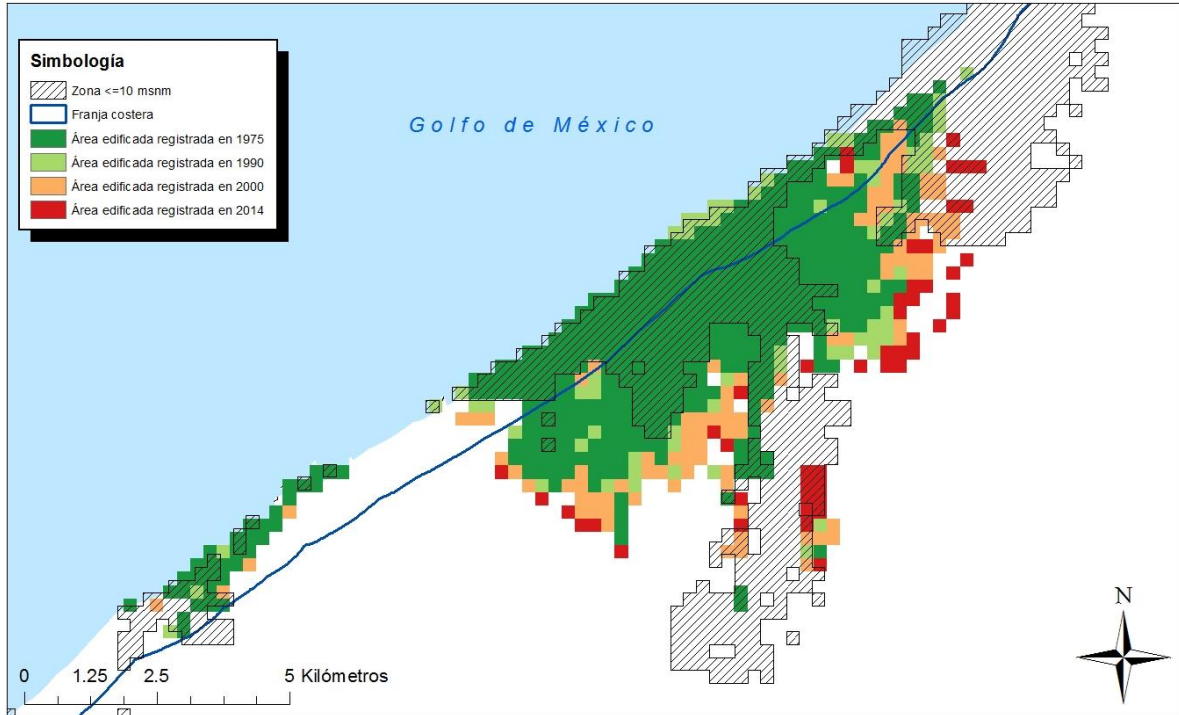
Mapa 14. Áreas urbanas expuestas en la ciudad de Champotón



Fuente: Elaboración propia.

Campeche para 1975 tenía un 40% de su área construida dentro de la franja costera, pero conforme pasó el tiempo las nuevas edificaciones se fueron localizando tierra adentro hasta llegar a 2014 con sólo 31% de su área a 1 km de distancia del mar. El crecimiento tierra adentro de Campeche se fue ubicando en zonas mayores a 10 msnm pues en 1975 contaba con un 62% de su área en zonas de baja elevación a tan sólo un 48% para 2014. Este caso ilustra cómo se combinan elementos biofísicos y sociales en la construcción del riesgo pues la menor exposición de la ciudad se construyó tanto porque la ciudad creció hacia el lado continental como porque la morfología de esta zona es más elevada que otras regiones de la península (aunque debe recordarse que no supera los 380 msnm).

Mapa 15. Áreas urbanas expuestas en la ciudad de Campeche



Fuente: Elaboración propia.

Progreso es la ciudad más icónica en términos de su exposición, ya que durante cada periodo de tiempo 91% de su superficie construida se encuentra en una zona de baja elevación y cercana al mar. Esto explicado principalmente por su ubicación geográfica, ya que al contar con dos cuerpos de agua tierra adentro y de forma horizontal, ha orillado a la ciudad el expandirse cerca de la costa y de forma horizontal. Asimismo, en el Mapa 16 podemos ver como esta zona en general tiene una altura menor a 10 msnm. El mapa muestra también que esta configuración del riesgo ha sido característica de esta ciudad desde 1975 y los crecimientos más recientes no han modificado su vulnerabilidad.

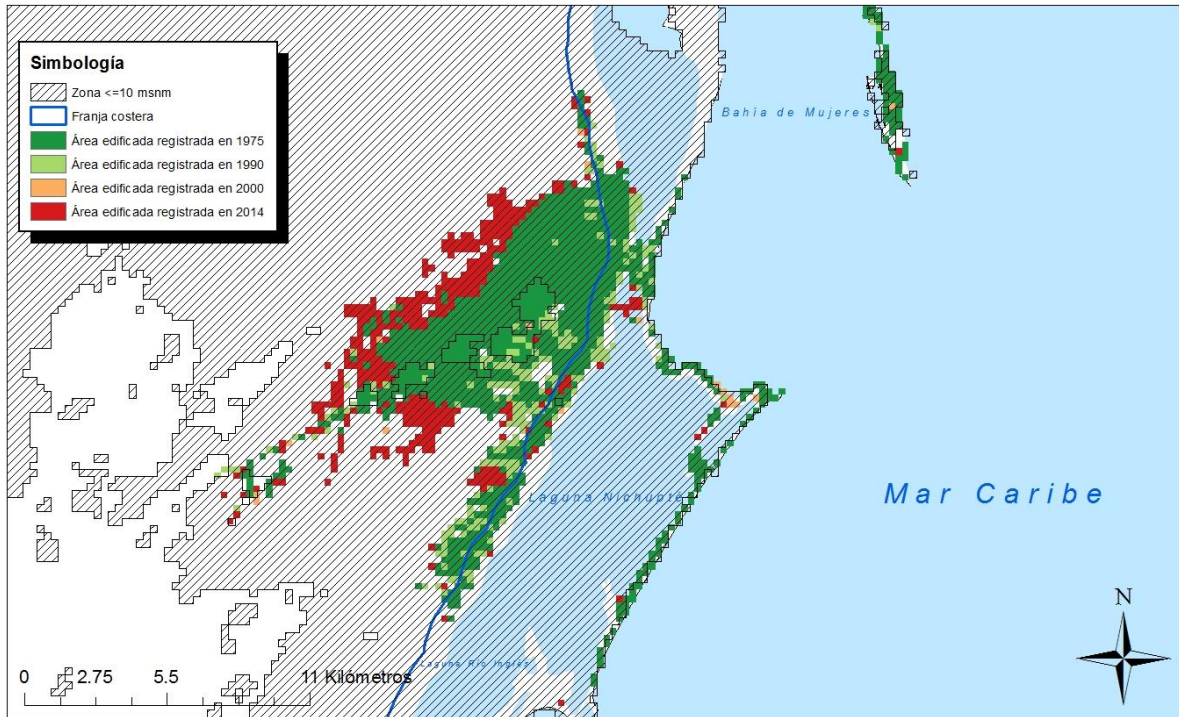
Mapa 16. Áreas urbanas expuestas en la ciudad de Progreso



Fuente: Elaboración propia.

La zona metropolitana de Cancún se caracteriza que su zona hotelera se encuentra cerca del mar y de los cuerpos de agua de la ciudad, esta cercanía representa tan sólo aproximadamente 30% de su superficie construida de 1975 al 2000 y de 25% en 2014. Cancún también se caracteriza por tener gran parte de su área urbana tierra adentro, así como su expansión se ha dado en la misma dirección, principalmente en 2014. Sin embargo, dichas áreas siguen encontrándose en zonas de baja elevación, de hecho, aproximadamente 87% de la superficie construida se encuentra en zonas de baja altura, siendo esta cifra consistente a lo largo del tiempo.

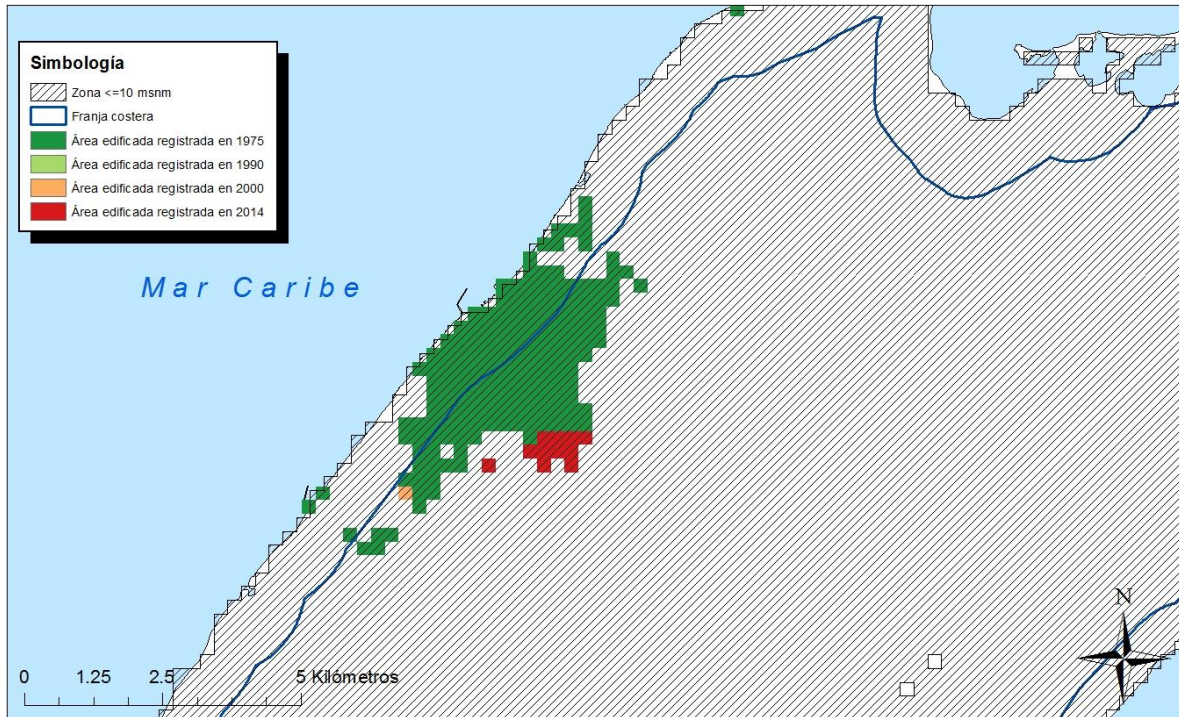
Mapa 17. Áreas urbanas expuestas en Cancún



Fuente: Elaboración propia.

Cozumel es otra ciudad que se encuentra dentro de una isla, como podemos apreciar en el Mapa 18, ésta se encuentra en zonas de baja elevación y por lo tanto la ciudad misma también. De hecho, para los cuatro años de estudio cerca del 99% del área urbana se encontraba a baja altitud. Pero esto no es igual respecto a la cercanía con el mar ya que sólo aproximadamente del 43% de la extensión urbana de Cozumel se encuentra cerca del mar para los 4 periodos de estudio.

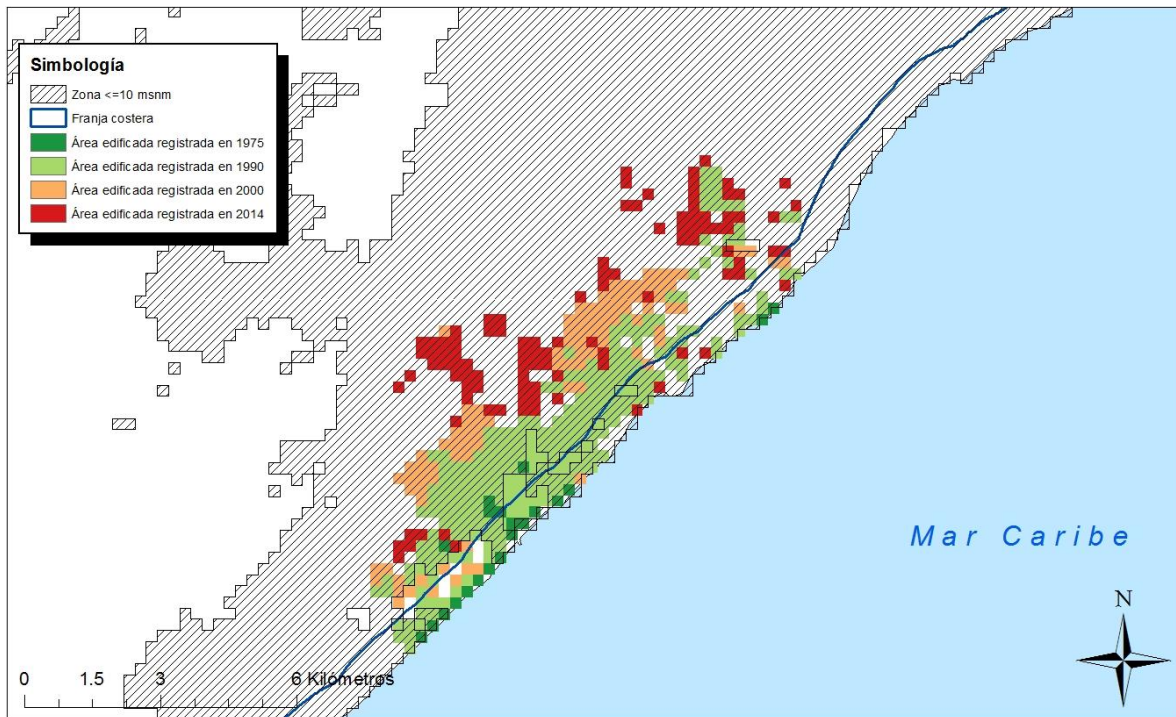
Mapa 18. Áreas urbanas expuestas en la ciudad de Cozumel



Fuente: Elaboración propia.

Playa del Carmen fue aumentando de gran forma su superficie, tanto cerca de la costa como tierra adentro pero siempre siguiendo la línea costera. Esto se refleja en que cerca de un tercio de la ciudad se hallaba dentro de la franja costera para 1990 y el año 2000, mientras que para 2014 el crecimiento urbano ocurrió principalmente tierra adentro. A pesar de ello, las nuevas áreas edificadas seguían encontrándose en zonas de baja elevación: en 1975 58% de la superficie construida estaba en zonas bajas y con el transcurso del tiempo fue aumentando hasta llegar a 17 km² de área construida que significó el 87% del total de la ciudad para el año 2014.

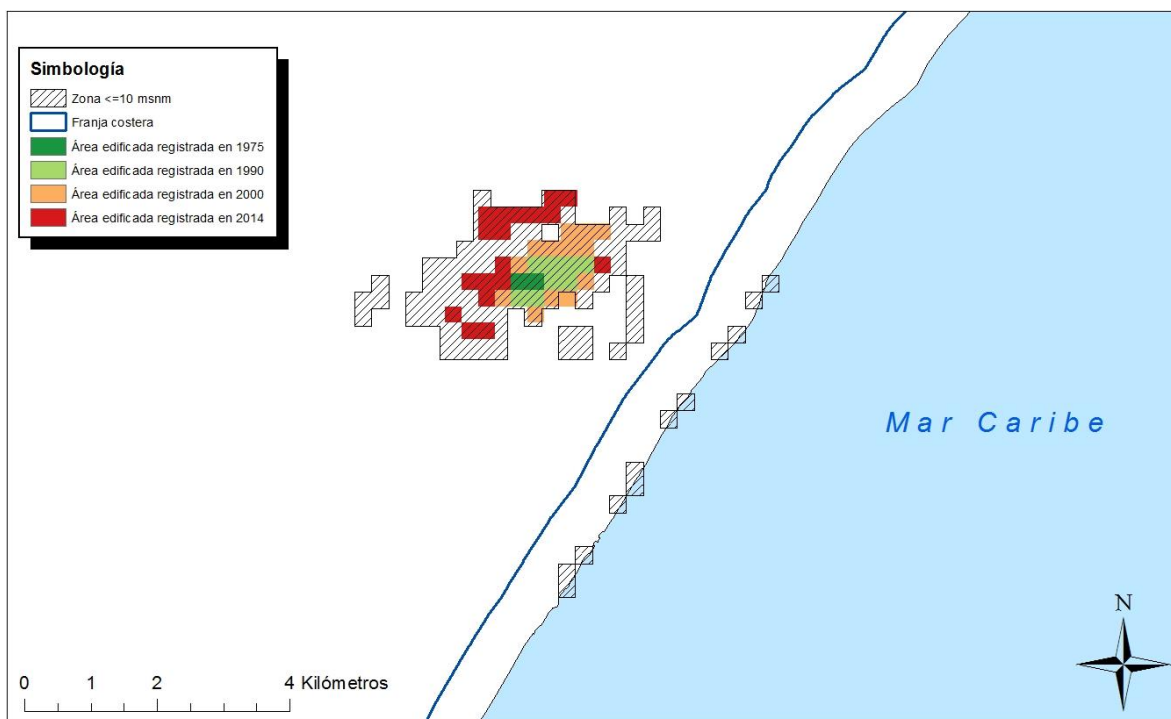
Mapa 19. Áreas urbanas expuestas en la ciudad de Playa del Carmen



Fuente: Elaboración propia.

Tulum es la única ciudad costera que se encuentra asentada lejos de la franja costera, como se puede apreciar en el Mapa 20 no hay superficie urbana cerca del mar por lo cual 0% de su superficie urbana está dentro de la franja o se encuentra dentro de ésta con una zona de baja elevación. Sin embargo, la zona en la cual se encuentra asentada la ciudad es una zona de baja elevación, tan sólo para los años 1975 y 1990 toda la ciudad se hallaba en dicha zona, fue hasta el año 2000 en que la cifra bajó a un 97% pero en 2014 subió a un 98%.

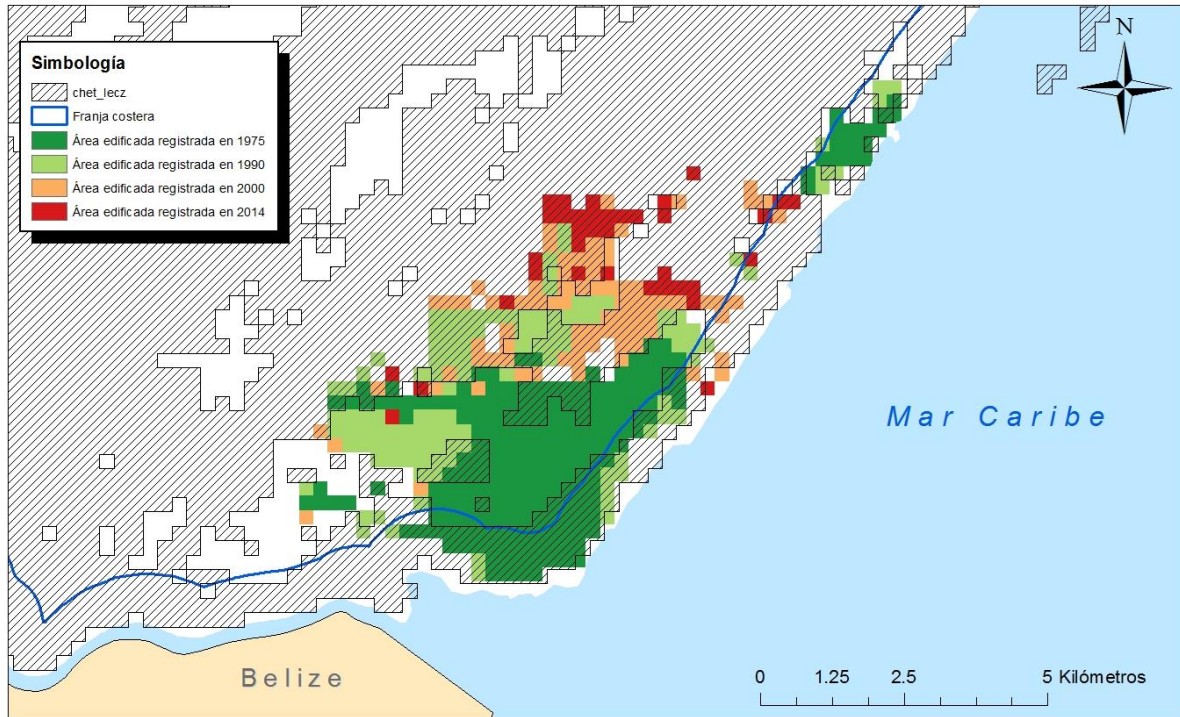
Mapa 20. Áreas urbanas expuestas en la ciudad de Tulum



Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la última ciudad costera, Chetumal, es una ciudad que se ha asentado cerca del mar, pero cuyo crecimiento ha sido en dirección opuesta al mar, para 1975, 31% de su superficie se hallaba en una distancia menor a 1 km, pero para 2014 la cifra disminuyó a 21%. En el Mapa 21 podemos constatar que la zona de la ciudad presenta una gran heterogeneidad en cuanto a su elevación, por lo cual sólo ciertas partes de la ciudad se han localizado en zonas bajas; para 1975 sólo el 41% del área urbana se encontraba en una zona de baja elevación pero para 2014 la situación cambió a un total del 53% de la superficie construida.

Mapa 21. Áreas urbanas expuestas en la ciudad de Chetumal



Fuente: Elaboración propia.

Lo anteriormente descrito se ve reflejado en la Tabla 10, en la cual se presentan tres diferentes situaciones en qué la superficie construida se encuentra expuesta: la situación uno hace referencia a la superficie construida que se encuentra en una zona de baja elevación de menor o igual a 10 msnm; la situación 2 hace referencia a la superficie edificada que se halla en la franja costera, donde ésta es la zona a 1 km de distancia del mar; finalmente, la situación 3 refiere a la cantidad de superficie construida que se encuentran simultáneamente en la situación 1 y 2, es decir, es la cantidad de edificaciones que se encuentran en la franja costera con una baja elevación. Acorde a eso, podemos ver cómo Progreso es la ciudad con mayor cantidad de superficie construida expuesta ante los tres diferentes escenarios con tasas de más del 90% de su área urbana. Posteriormente está Champotón que cuenta con 95% de su superficie en zonas de baja elevación para 2014 y aproximadamente tres cuartas partes de su área en la franja costera, por su parte el área en situación 3 sigue siendo más de la mitad de la ciudad con un 68% de la ciudad. Ciudad del Carmen se caracteriza principalmente por su ubicación en una isla de baja elevación teniendo tasas de hasta 97% de su territorio para cada periodo de tiempo. Cozumel es la ciudad que para 2014 se encontraba casi toda su superficie

en una altitud baja, sin embargo, a diferencia de Ciudad del Carmen, presenta tasas de exposición menor en la situación 2 y 3. Caso similar es el de Cancún, donde 90% de su territorio se encuentra en una zona de baja elevación, pero un cuarto de su área urbana se encuentra en la situación 2 y 3. Playa del Carmen se encuentra en una situación similar a Cancún, pero el grado de exposición a la situación 3 es mucho menor, con una tasa de 14% para el 2014. Por otra parte, Campeche y Chetumal se caracterizan por tener aproximadamente la mitad de su territorio en una zona de baja elevación, pero cuya superficie en la franja costera es del 31% y 21% respectivamente. Finalmente, Tulum es de las ciudades menos expuestas, ya que su área urbana sólo se encuentra expuesta por su baja altura, sin embargo, la cifra es alta pues su grado ha sido en promedio de 98% a lo largo del periodo de estudio, pero no presenta construcciones dentro de la franja de 1 km.

Tabla 10. Diferentes situaciones de exposición en las que se encuentra cada ciudad en términos absolutos y relativos de 1975 a 2014

Ciudades	Tipo de situación	1975		1990		2000		2014	
		km2	%	km2	%	km2	%	km2	%
Progreso	1	12.59	91.53	12.64	91.51	12.83	91.17	12.98	91.17
	2	13.76	100	13.82	100	14.07	100	14.24	100
	3	12.59	91.53	12.64	91.51	12.83	91.17	12.98	91.17
Chamotón	1	2.24	96.94	4.34	96.08	5.70	96.53	6.38	95.13
	2	2.07	89.42	3.66	81.10	4.50	76.12	4.84	72.06
	3	2.00	86.37	3.48	77.18	4.31	72.96	4.61	68.73
Ciudad del Carmen	1	15.71	97.32	18.03	97.47	18.88	97.55	21.36	97.75
	2	10.88	67.43	12.67	68.49	13.20	68.23	14.74	67.46
	3	10.45	64.74	12.20	65.95	12.73	65.78	14.25	65.21
Cozumel	1	8.15	99.36	8.15	99.36	8.30	99.36	8.87	99.40
	2	3.59	43.80	3.59	43.80	3.60	43.11	3.61	40.43
	3	3.54	43.16	3.54	43.16	3.55	42.47	3.55	39.83
Campeche	1	11.57	62.65	13.34	57.53	14.91	49.82	15.67	48.61
	2	7.30	39.56	8.77	37.83	9.80	32.77	10.01	31.06
	3	5.96	32.28	6.83	29.45	7.19	24.02	7.26	22.52
Cancún	1	35.03	86.38	51.81	87.35	53.46	87.38	72.36	89.90
	2	12.63	31.15	18.17	30.63	18.71	30.58	20.41	25.36
	3	10.56	26.04	15.87	26.75	16.39	26.79	18.00	22.37
Chetumal	1	3.90	41.96	6.71	44.82	9.10	49.74	10.59	53.07
	2	2.90	31.25	3.86	25.78	4.12	22.53	4.29	21.49
	3	2.25	24.22	2.99	20.00	3.18	17.41	3.33	16.67

Playa del Carmen	1	0.32	58.51	7.92	77.67	12.51	82.62	17.55	86.68
	2	0.47	85.21	3.96	38.89	4.53	29.93	4.82	23.79
	3	0.24	43.71	2.32	22.75	2.70	17.83	2.93	14.47
Tulum	1	0.07	100	0.36	100	1.00	97.42	1.60	98.26
	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0

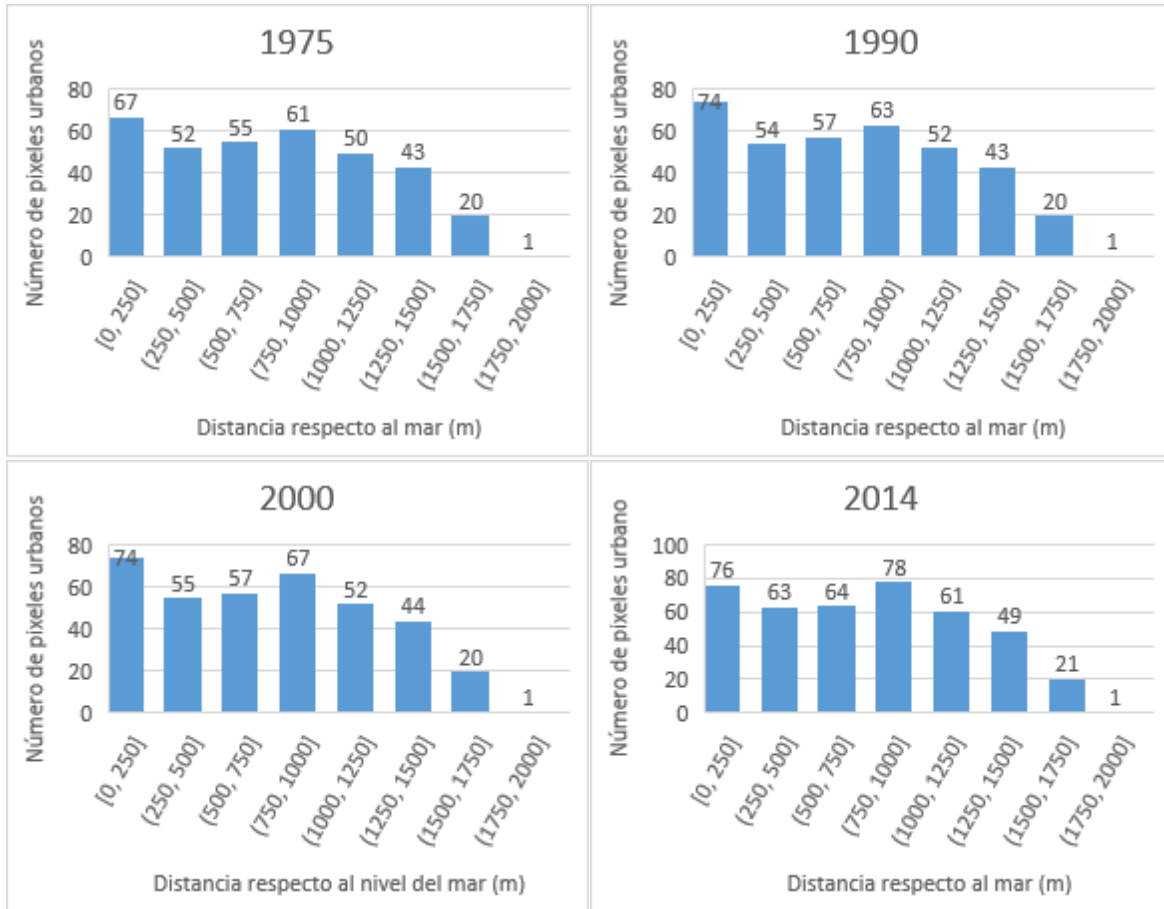
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, haremos una revisión más particular en cuando a cada pixel que conforma el área urbana de cada ciudad. Esto con el propósito de vislumbrar cómo cada ciudad se encuentra distribuida espacialmente en dirección del mar, así como poder examinar el grado de intensidad del uso del suelo urbano, es decir, qué tanta ocupación de edificaciones hay en cada área de 250 m². Ello con el propósito de poder ver la intensidad del uso del suelo cerca de la línea costera puesto que la exposición estaría determinada no sólo por el área sino por el volumen de edificaciones asentadas en esas zonas.

3. Intensidad del uso del suelo en las ciudades costeras de estudio

A continuación, se presentarán el aumento de pixeles urbanos dentro de rangos de distancia respecto al mar para cada ciudad en cada año de estudio. En el caso de Ciudad del Carmen (Figura 4) ha habido un crecimiento concentrado dentro de una distancia menor a 1 km respecto al mar, por ejemplo, los pixeles más cercanos han pasado de 67 en 1975 a 76 en 2014, mientras que los del último rango dentro de un kilómetro incrementaron de 61 a 78 pixeles.

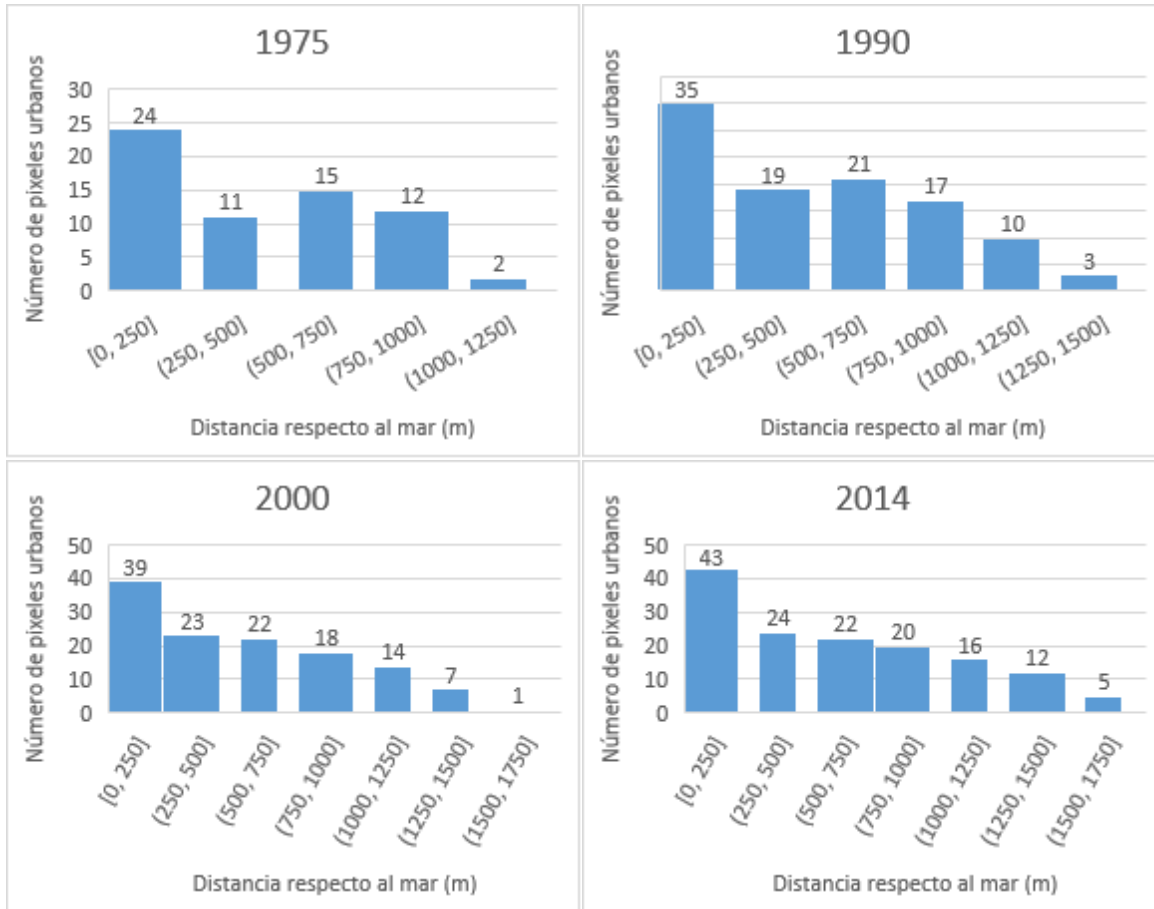
Figura 4. Frecuencia de pixeles urbanos respecto a su distancia de la costa en Ciudad del Carmen, 1975-2014



Fuente: elaboración propia.

En el caso de Champotón vemos que hubo un crecimiento considerable dentro de la franja costera, incremento sobre todo en un radio de 250 metros respecto al mar pues en 1975 sólo había 24 pixeles, los cuales aumentaron a 43 en 2014. Sin embargo, Champotón también muestra un crecimiento lejos del mar ya que en 1975 la distancia más lejana respecto del mar de algún pixel urbano fue 1250 metros, para 2014 la distancia más lejana pasó a 1750 metros.

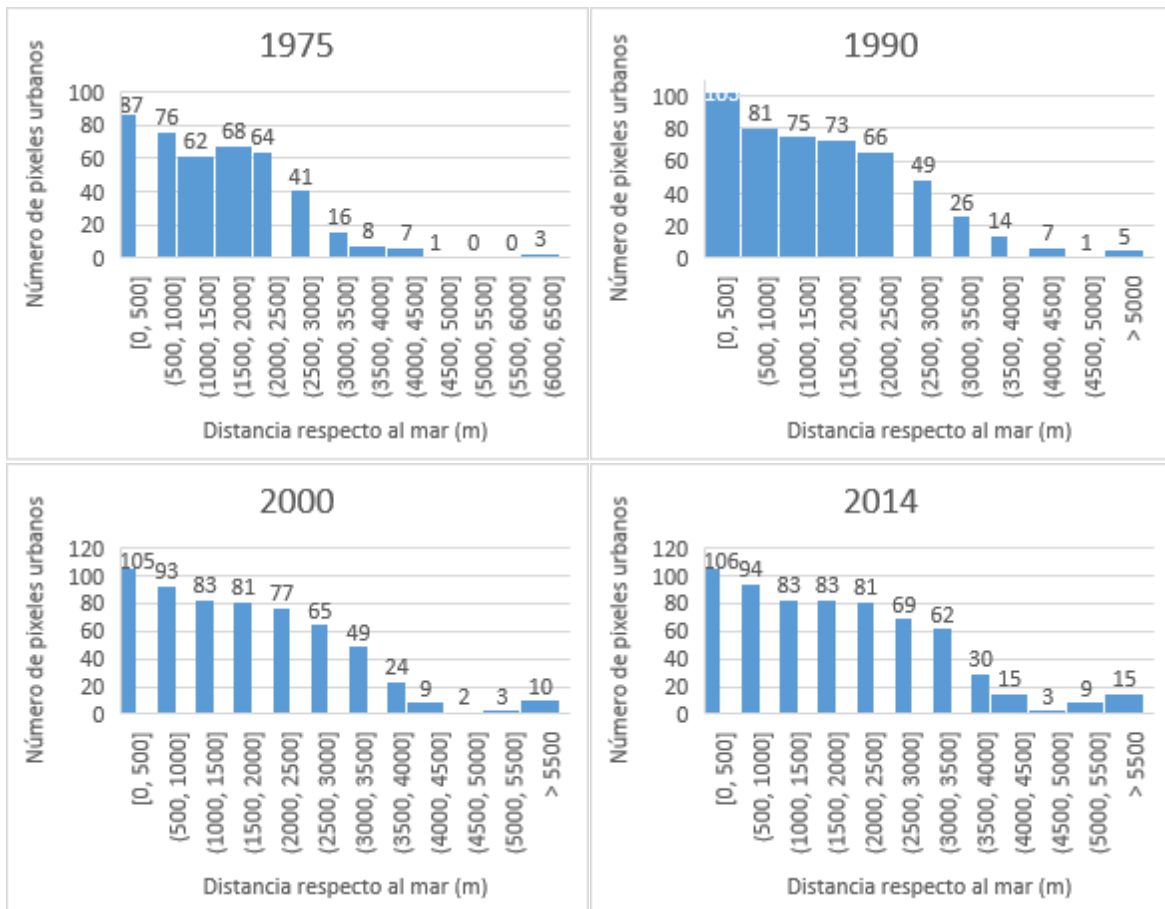
Figura 5. Frecuencia de pixeles urbanos respecto a su distancia de la costa en Champotón, 1975-2014



Fuente: elaboración propia.

En la ciudad de Campeche se puede observar que, si bien es una ciudad grande, una la mayor frecuencia de pixeles urbanos se encuentra en un rango de 1 km respecto al mar durante los 4 años. A pesar de esta concentración hacia la costa, a partir de 1990 también se dio un aumento a partir de los 2500 metros de distancia, así como una concentración de pixeles pasando los 5500 metros.

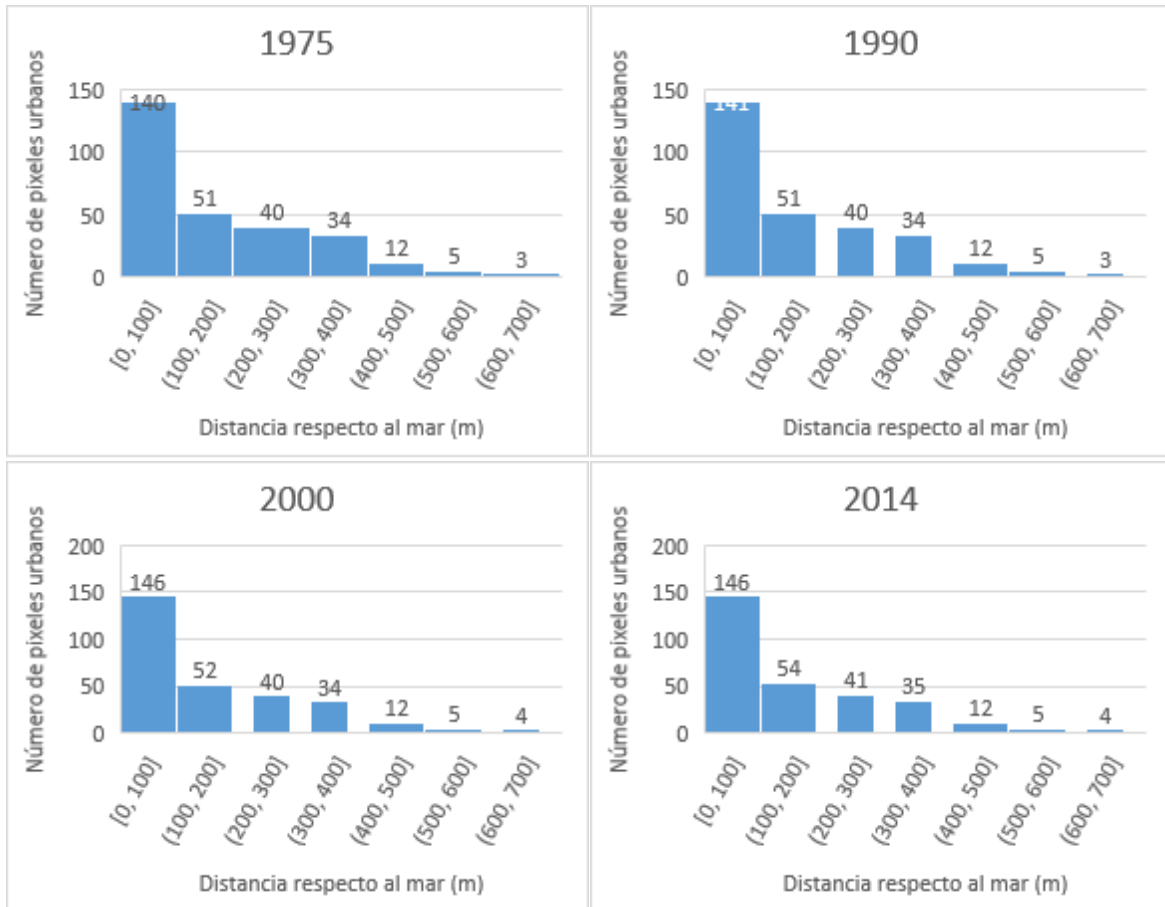
Figura 6. Frecuencia de pixeles urbanos respecto a su distancia de la costa en Campeche, 1975-2014



Fuente: elaboración propia.

La ciudad Progreso se encuentra en una zona muy peculiar, por lo cual todos sus pixeles urbanos se encuentran dentro de una distancia de 1 kilómetro, pero la concentración de pixeles urbanos se da principalmente en una distancia de 100 metros, denotando su importancia de carácter de puerto.

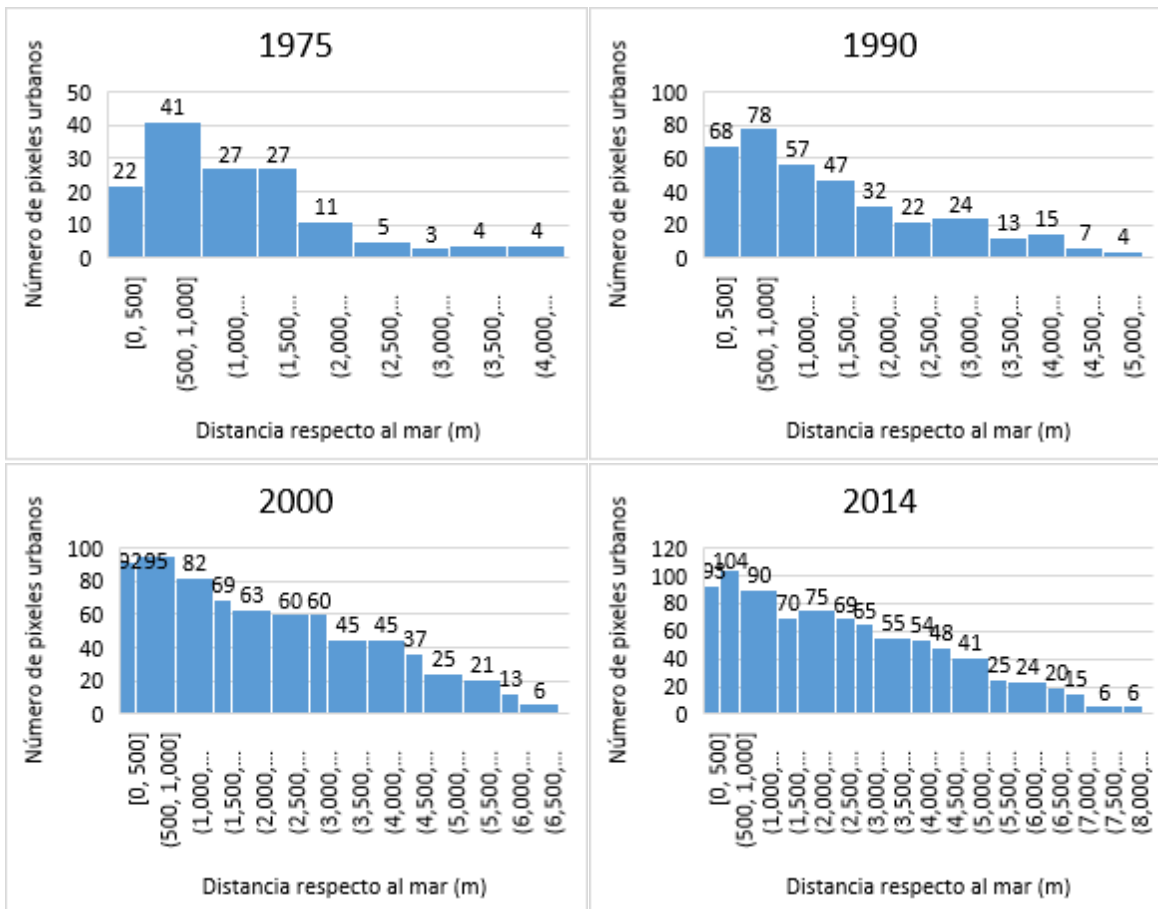
Figura 7. Frecuencia de pixeles urbanos respecto a su distancia de la costa en Progreso, 1975-2014



Fuente: Elaboración propia.

Cancún es la ciudad más grande de todas, como podemos observar en la Figura 8 su concentración cerca de la costa se da principalmente entre 1975 y 1990, la ciudad expandió cada vez más tierra adentro, donde hasta 2014 llega a una distancia máxima de 8 km. Sin embargo, la urbanización en la franja costera de 1 km siguió siendo la más relevante.

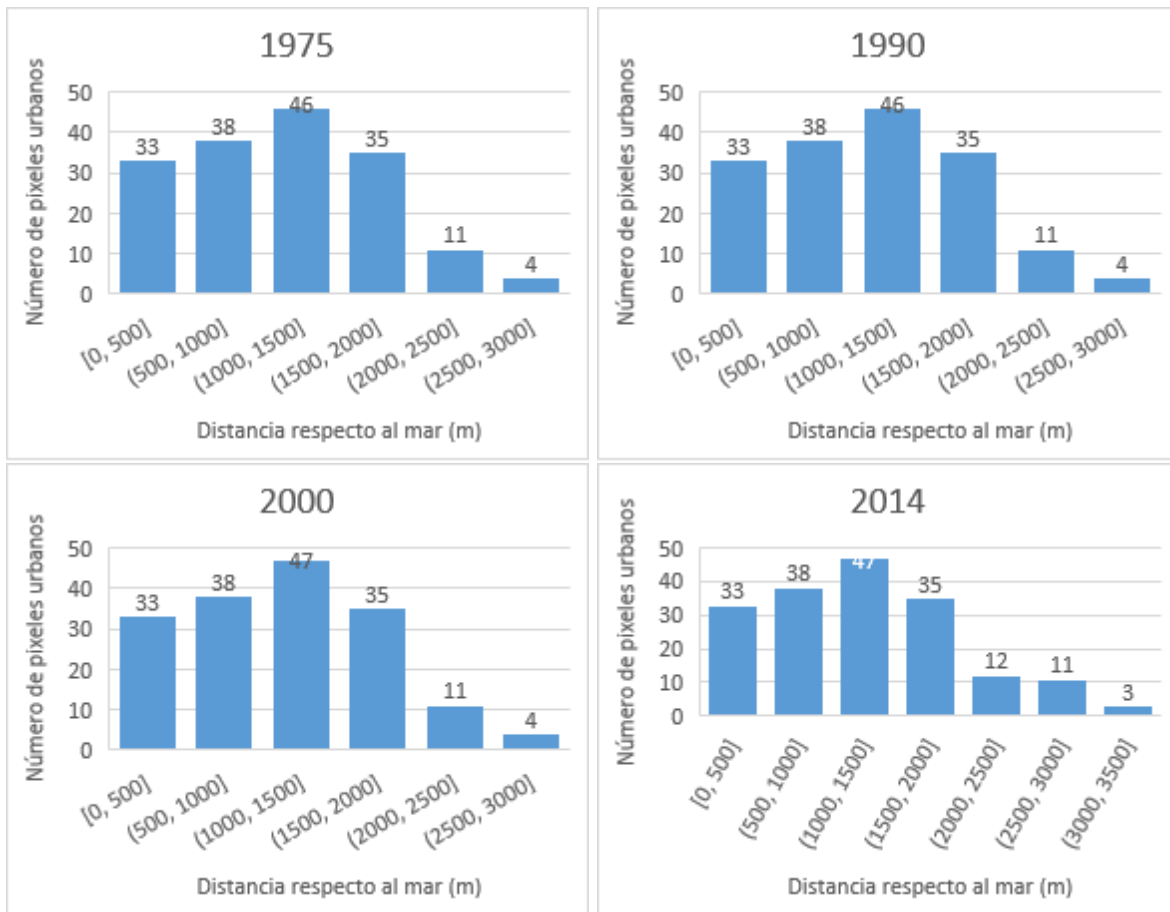
Figura 8. Frecuencia de pixeles urbanos respecto a su distancia de la costa en Cancún, 1975-2014



Fuente: elaboración propia.

La ciudad de Cozumel es una isla, lo cual ha influido que a lo largo de los años la cantidad de pixeles urbanos en cada rango de distancia no varíe demasiado, pues sólo hasta 2014 se crearon nuevos pixeles en distancias mayores a 2 km, pero a pesar de eso existe una mayor frecuencia de concentración de pixeles urbanos en una distancia entre 1000 y 1500 metros.

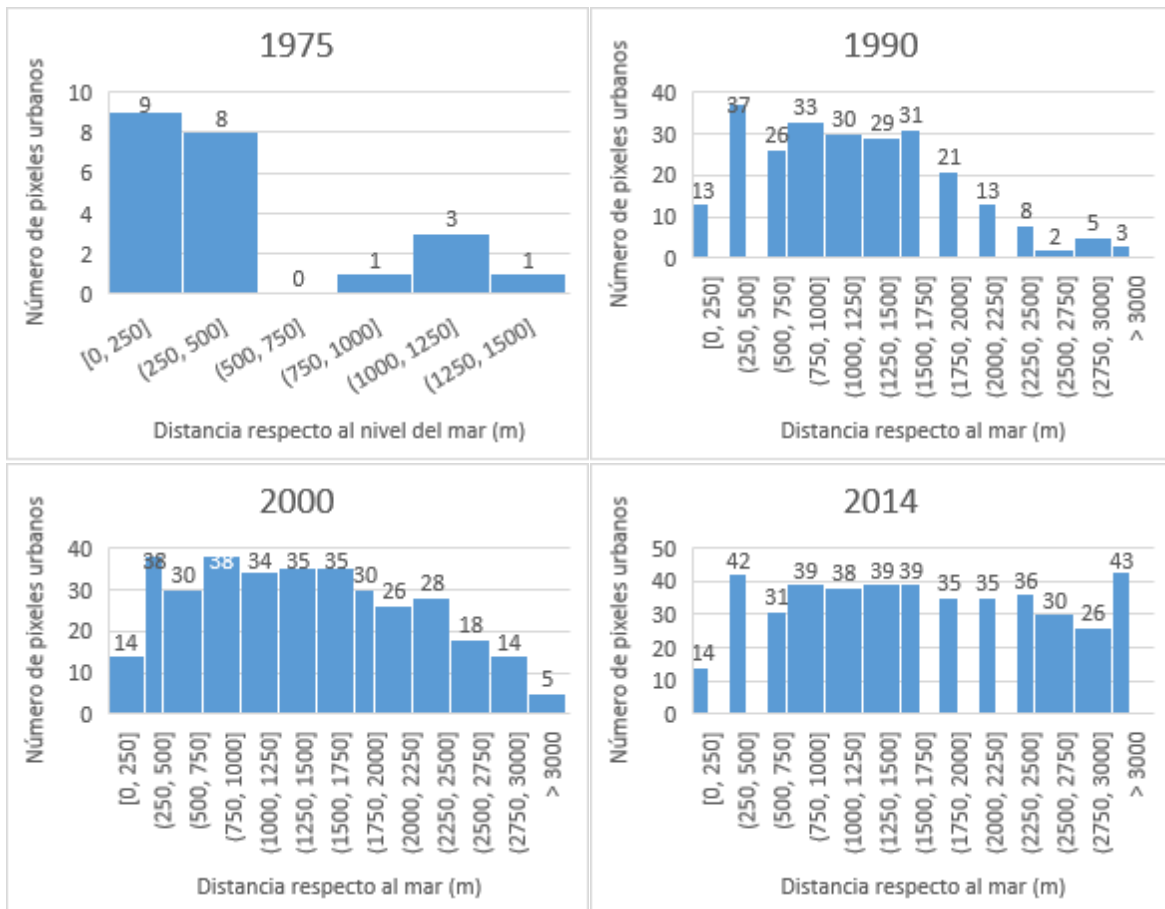
Figura 9. Frecuencia de pixeles urbanos respecto a su distancia de la costa en Cozumel, 1975-2014



Fuente: Elaboración propia.

En el caso de Playa del Carmen presenta una forma diferente a las anteriores, puesto que en 1975 inició siendo un asentamiento muy pequeño y concentrado en la costa. Posteriormente, en 1990 hubo un incremento considerable en la franja costera pero también en una distancia entre 1 a 2 km respecto a la costa. Y conforme pasó el tiempo en el año 2000 y 2014 Playa del Carmen presentó una forma muy homogénea en la frecuencia de pixeles en cada rango de distancia respecto al mar.

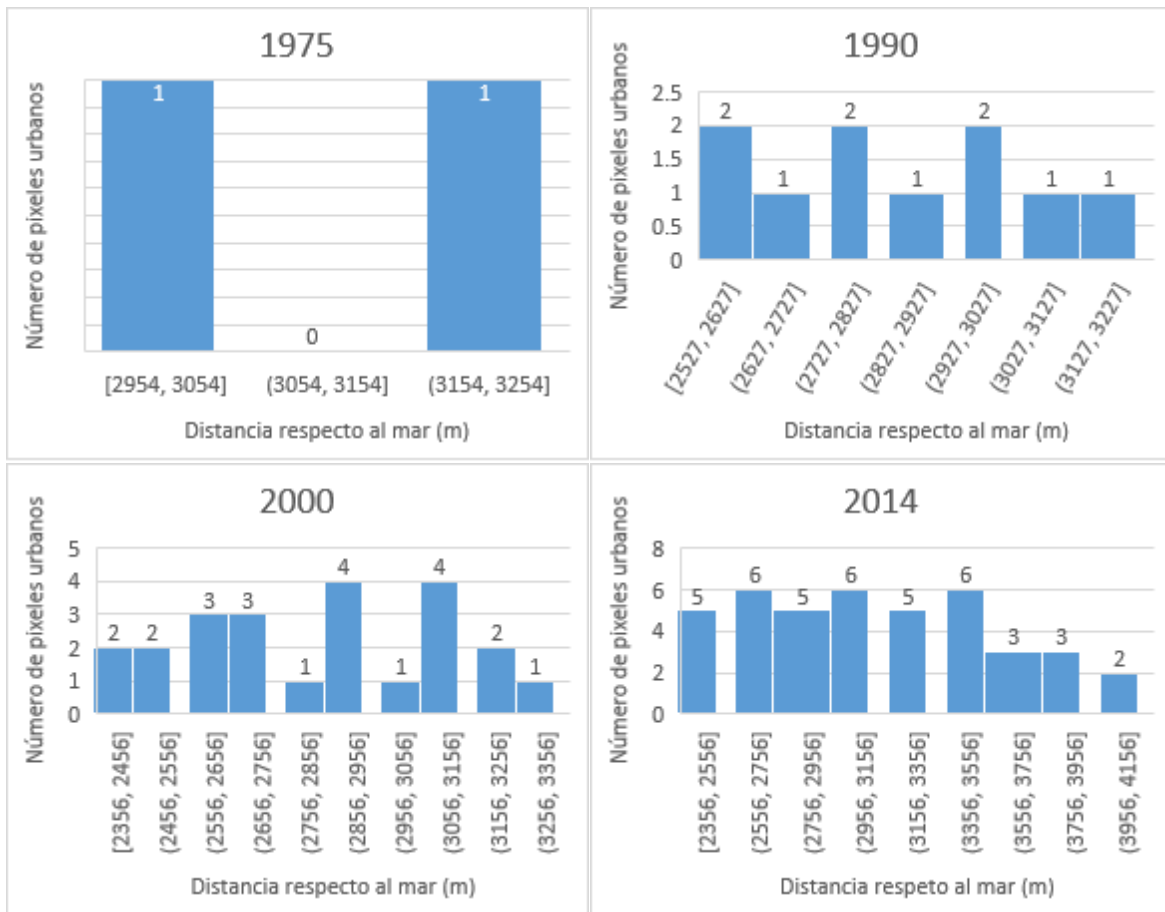
Figura 10. Frecuencia de pixeles urbanos respecto a su distancia de la costa en Playa del Carmen, 1975-2014



Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, Tulum es la ciudad que no está asentada dentro de la franja costera, por lo cual la ubicación de los pixeles urbanos que la conforman se encuentran después de los 2 km de distancia como se expresa en la Figura 11. Aunque dicha distancia se fue disminuyendo a partir de 1990 pero el crecimiento ha sido homogéneo en esta ciudad y no sólo concentrado en dirección al mar.

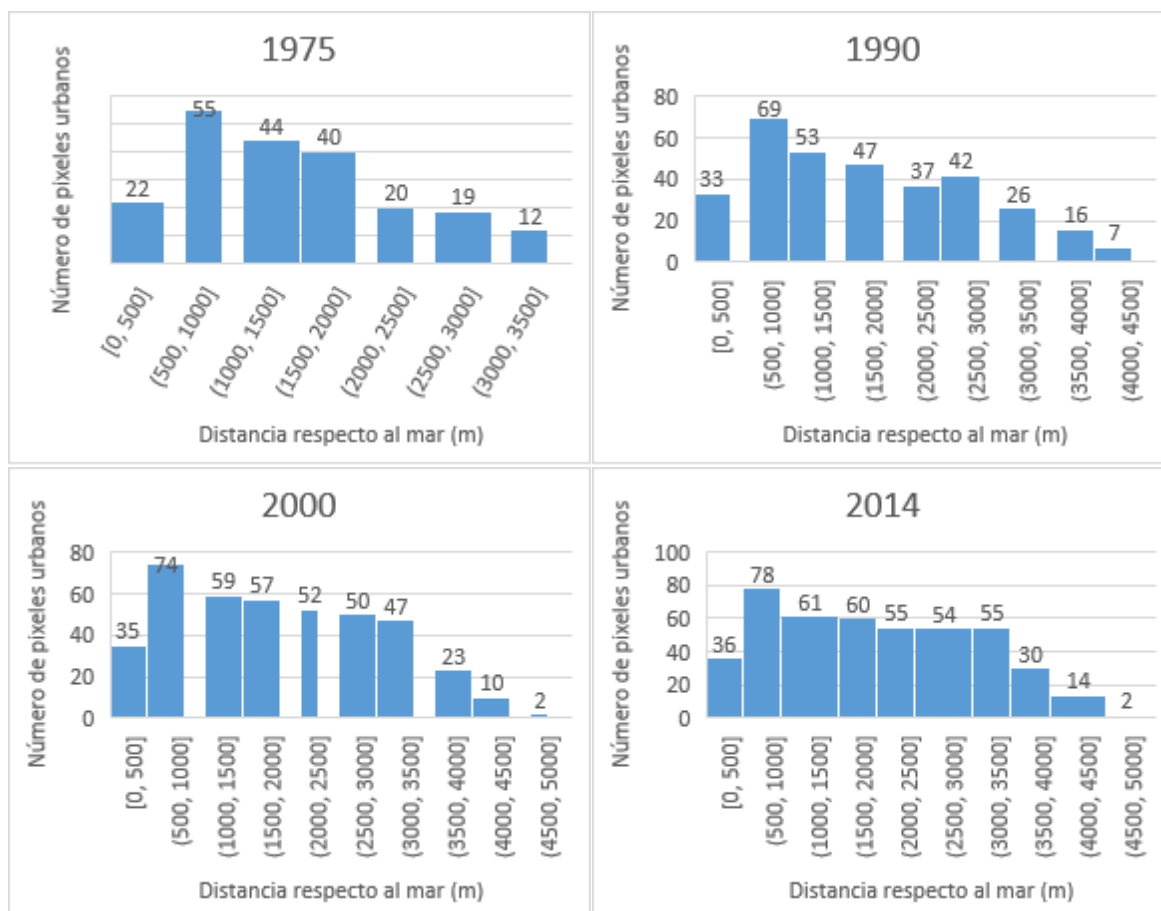
Figura 11. Frecuencia de pixeles urbanos respecto a su distancia de la costa en Tulum, 1975-2014



Fuente: Elaboración propia.

La ciudad costera de Chetumal para 1975 concentraba gran parte de sus pixeles urbanos en una distancia menor a los 1000 metros, pero para los siguientes periodos el crecimiento se fue dando a una distancia de 2 km, para 2014 el crecimiento se fue homogeneizando a las distancias entre 500 a 3500 metros respecto al mar.

Figura 12. Frecuencia de pixeles urbanos respecto a su distancia de la costa en Chetumal, 1975-2014



Fuente: Elaboración propia.

De forma general, en la Tabla 11 podemos ver las distancias promedio de cada ciudad respecto al mar, así como las distancias máximas y mínimas para cada año de estudio. Progreso es la ciudad más cercana al mar, en términos promedio, pero al menos 6 ciudades tienen edificaciones en la franja costera la costa durante cada año de estudio. Tulum es la ciudad más alejada del mar.

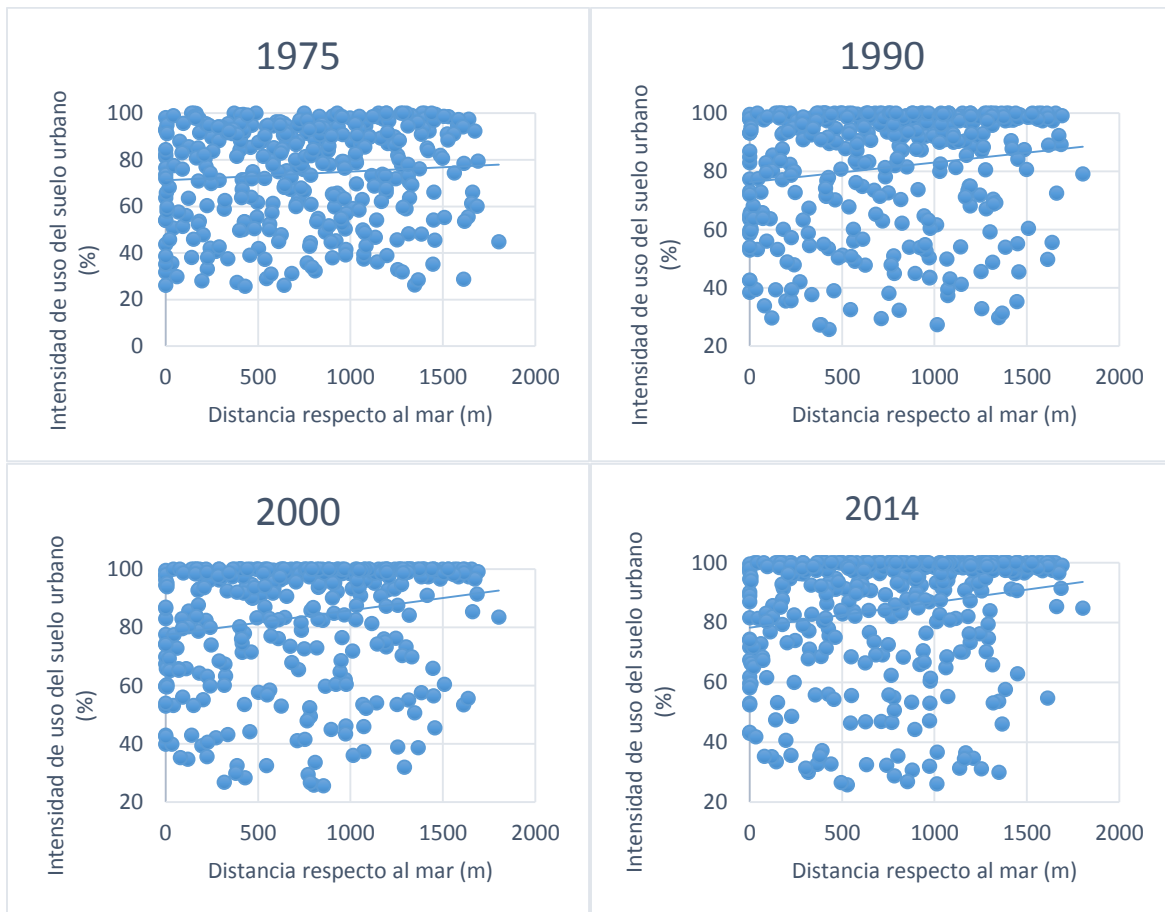
Tabla 11. Distancia promedio de cada ciudad respecto al mar para cada año

Ciudades	Distancia promedio del área urbana respecto al mar (m)				1975		1990		2000		2014	
	1975	1990	2000	2014	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
Progreso	147	146	146	147	647	0	647	0	647	0	647	0
Champotón	444	511	554	611	1106	0	1385	0	1591	0	1591	0
Ciudad del Carmen	753	739	740	749	1803	0	1803	0	1803	0	1803	0
Cozumel	1135	1135	1135	1239	2836	0	2836	0	2836	0	3307	0
Playa del Carmen	467	1200	1437	1737	1326	155	3303	1200	4668	155	4782	155
Campeche	1534	1580	1771	1916	6378	0	6378	0	6404	0	6565	0
Chetumal	1449	1766	1921	1989	3433	113	4451	113	4700	113	4700	113
Tulum	3054	2845	2846	3148	3154	2954	3154	2527	3303	2356	4150	2356
Cancún	2594	2501	2504	3146	9988	0	10820	0	10820	0	10820	0

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se verá la intensificación del uso del suelo en cada pixel urbano, es decir, ver qué pixeles de la ciudad tienen su área de 250 m² completamente ocupada por construcciones (o sea al 100%), y también observar cuáles pixeles tienen espacios libres de construcción (menor al 100%), en ambos casos concentrándose en la franja costera de 1 km de ancho. En el caso de Ciudad del Carmen en 1975 se ve una mayor intensificación del uso del suelo en una distancia entre 500 a 1000 metros, conforme pasa el tiempo dicha intensidad sigue aumentando en ese rango de distancia, pero también en una distancia mayor al kilómetro. En la Figura 13 también podemos observar cómo a lo largo del tiempo se fue aumentando la tendencia que a mayor distancia respecto al mar mayor intensificación del uso del suelo, aunque cabe señalar que dichas zonas de mayor intensidad no rebasan los 1700 metros de distancia respecto al mar.

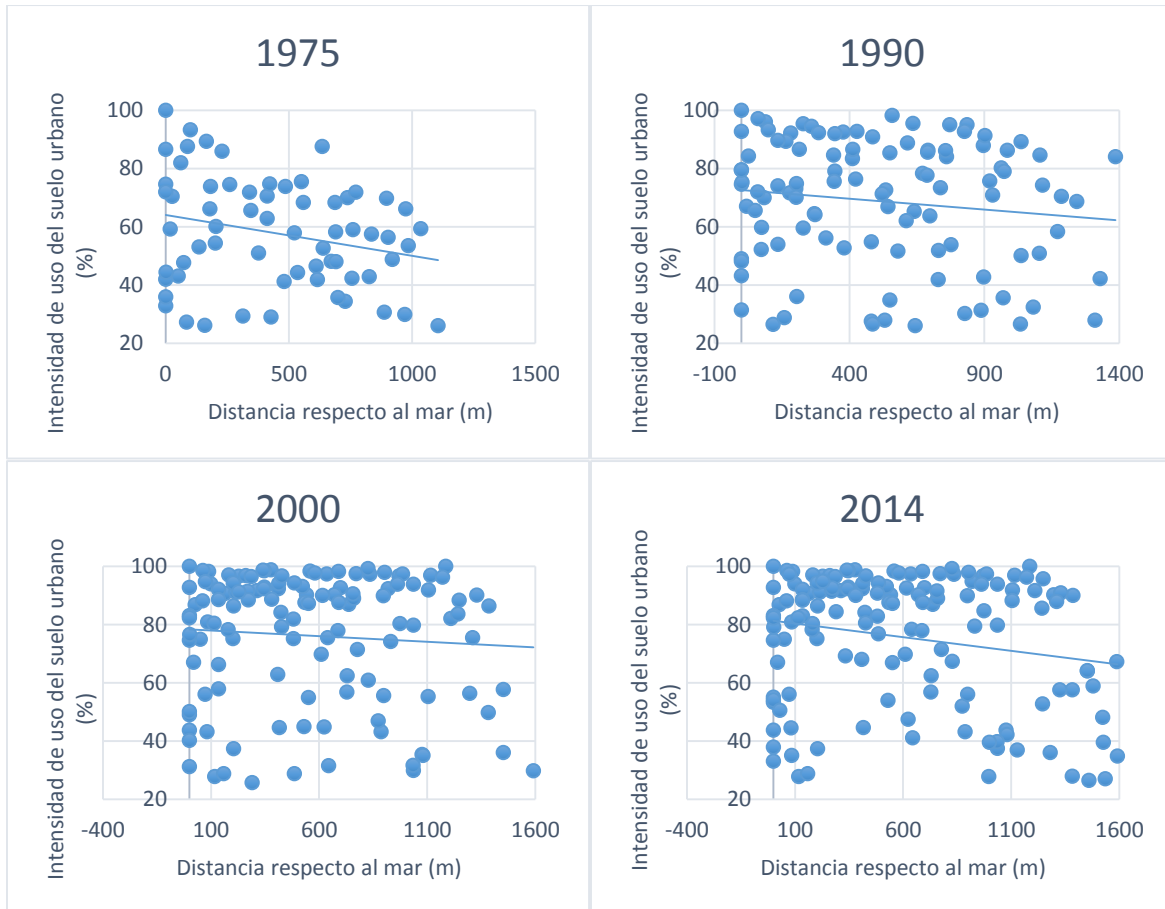
Figura 13. Porcentaje construido de los pixeles urbanos respecto a su distancia de la costa en Ciudad del Carmen, 1975-2014



Fuente: Elaboración propia.

En el caso de Champotón podemos observar que tenía grados de uso de suelo relativamente bajos en 1975; para el año 1990 la ciudad fue intensificando su uso del suelo y también creciendo más allá de 1 km de distancia respecto al mar. Sin embargo para el año 2000 y 2014 la ciudad no creció más allá de 1600 metros de distancia de la costa y la intensificación del uso del suelo aumentó, sobre todo dentro de la franja costera. De ese modo podemos apreciar, en la Figura 14, la tendencia de que a mayor cercanía al mar mayor uso del suelo urbano en la ciudad de Champotón.

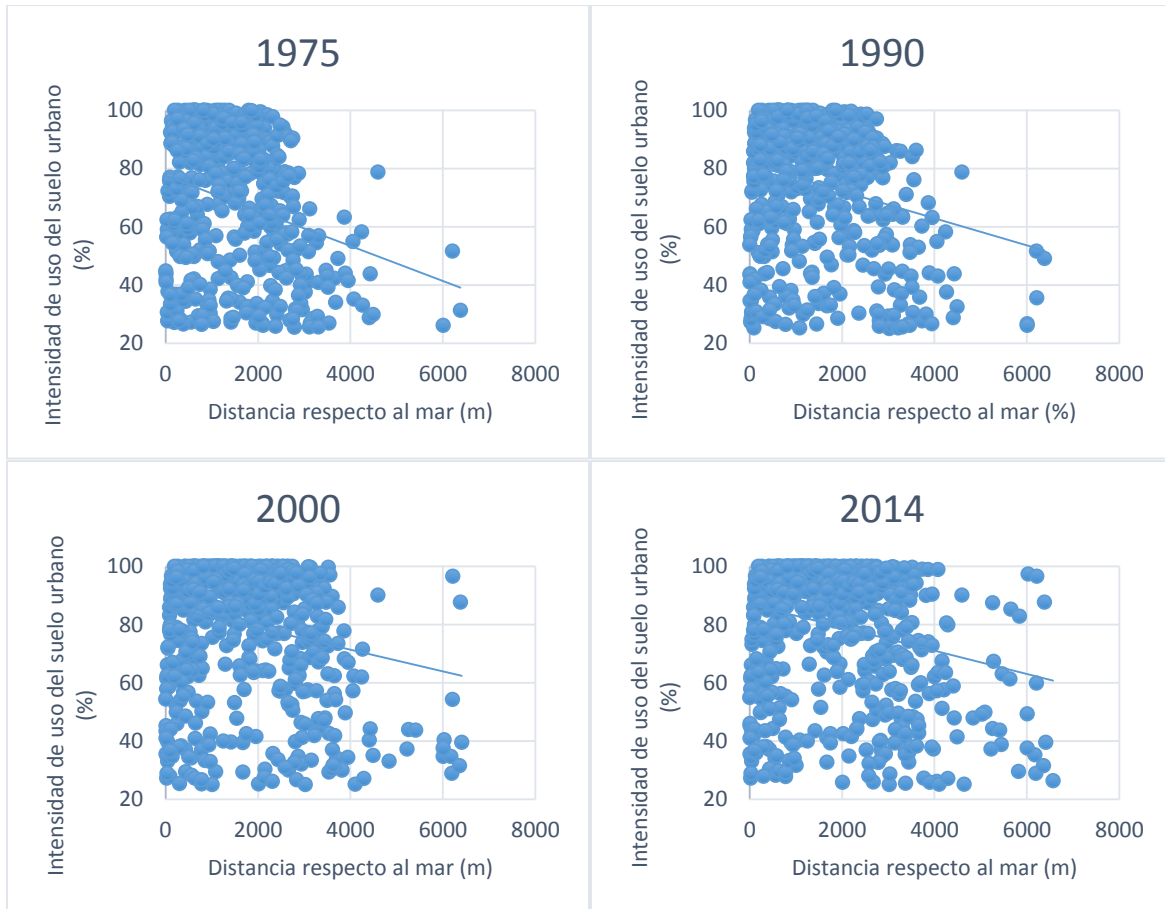
Figura 14. Porcentaje construido de los pixeles urbanos respecto a su distancia de la costa en Champotón, 1975-2014



Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, ya para 1975 Campeche presentaba una gran concentración de pixeles a una distancia no mayor a 2000 metros respecto al mar, además varios de dichos pixeles se encontraban en grados de uso del suelo mayor al 80%. Para los años subsiguientes hubo el asentamiento a distancias mayores a los 4 km, sin embargo también fue aumentando la intensificación del suelo urbano a grados mayores de 80% en distancias menores a 4 km respecto al mar, de ese modo se ha tenido una relación inversa entre distancia e intensidad de construcción durante los 4 años.

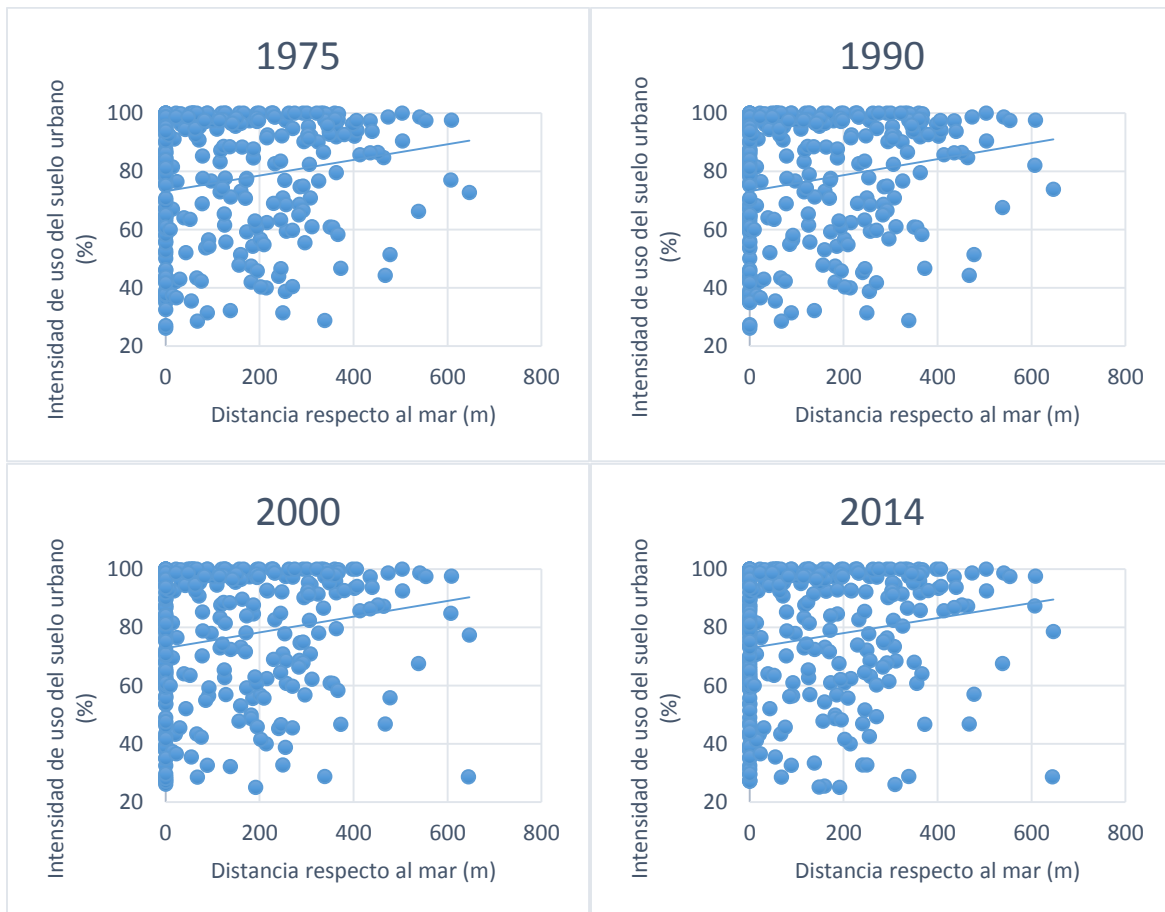
Figura 15. Porcentaje construido de los pixeles urbanos respecto a su distancia de la costa en Campeche, 1975-2014



Fuente: Elaboración propia.

La ciudad de Progreso se encuentra totalmente dentro de la franja costera que no rebasa los 800 metros de distancia del nivel del mar. Si bien en la Figura 16 podemos ver una relación de a mayor distancia mayor intensidad del uso del suelo es necesario hacer notar que gran parte de los pixeles urbanos con un uso del suelo al 100% se concentran a una distancia menor a los 400 metros respecto a la costa.

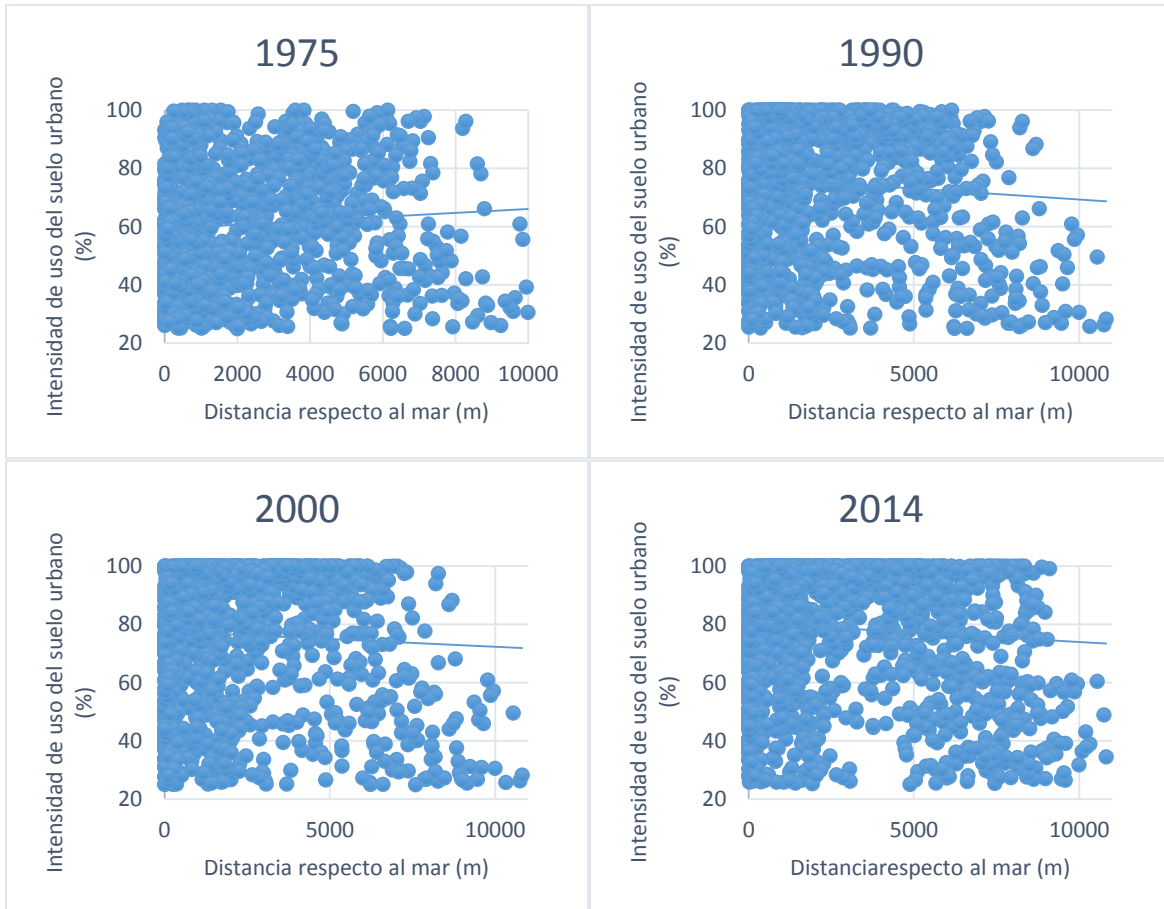
Figura 16. Porcentaje construido de los pixeles urbanos respecto a su distancia de la costa en Progreso, 1975-2014



Fuente: Elaboración propia.

En el caso de Cancún se puede observar que desde 1975 presenta una gran extensión, pero con una heterogeneidad en su uso del suelo, pues a distancias menores a un kilómetro presenta todo tipo de valores de intensidad del uso del suelo y a una distancia de 4 km los valores se concentran entre un 60 y 80%. Para los años subsiguientes se da un mayor uso del suelo urbano en distancias entre 4 a 6 km respecto al mar, mientras que cerca de la costa siguen surgiendo nuevos pixeles así como mayor uso del suelo, ya que al final del periodo, en 2014, se mantuvo una relación inversa entre distancia y uso del suelo.

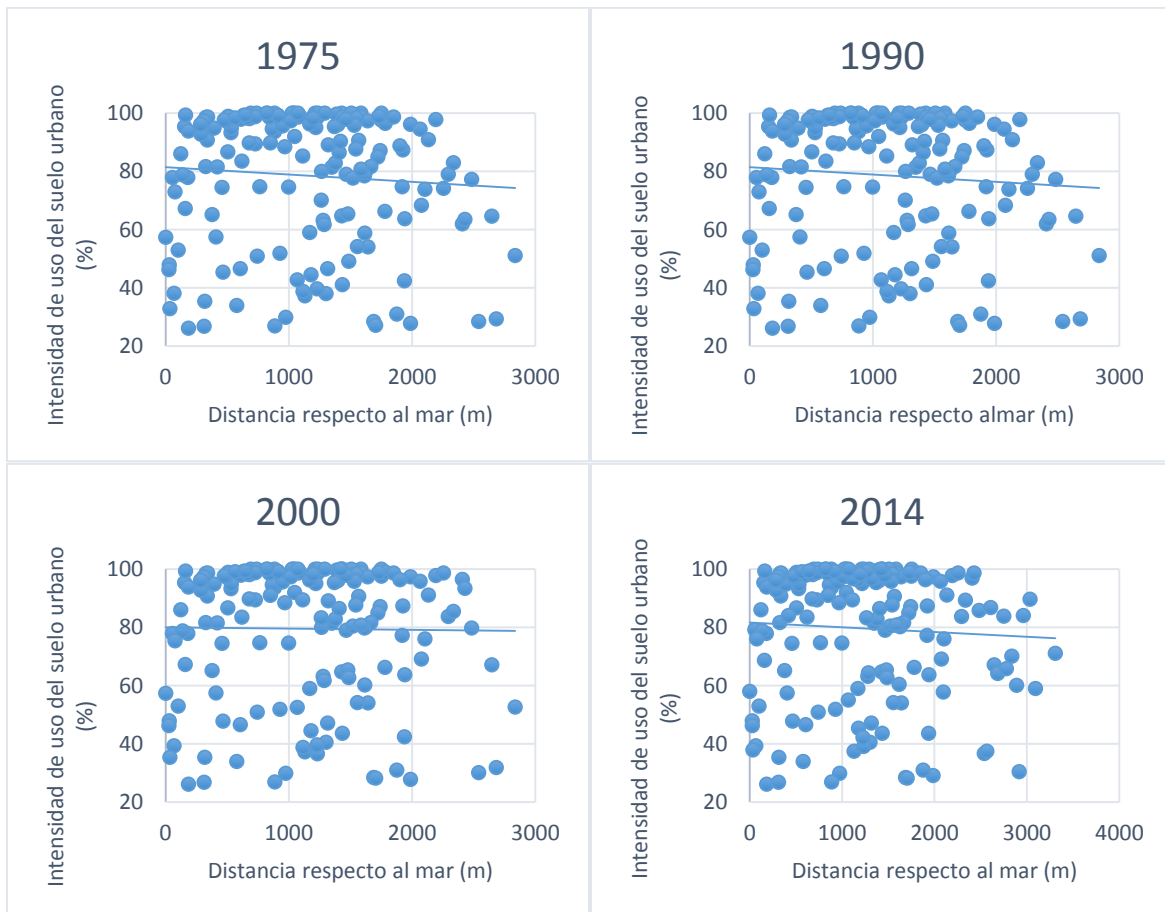
Figura 17. Porcentaje construido de los pixeles urbanos respecto a su distancia de la costa en Cancún, 1975-2014



Fuente: Elaboración propia.

En 1975, Cozumel deja apreciar una distribución heterogénea dentro de los primeros 2 km de distancia, con pixeles urbanos de alta intensidad de construcción pero también áreas con menores grados de uso del suelo. Para los años subsecuentes fue intensificándose el uso del suelo lo que explica por las restricciones geográficas para el crecimiento de la ciudad.

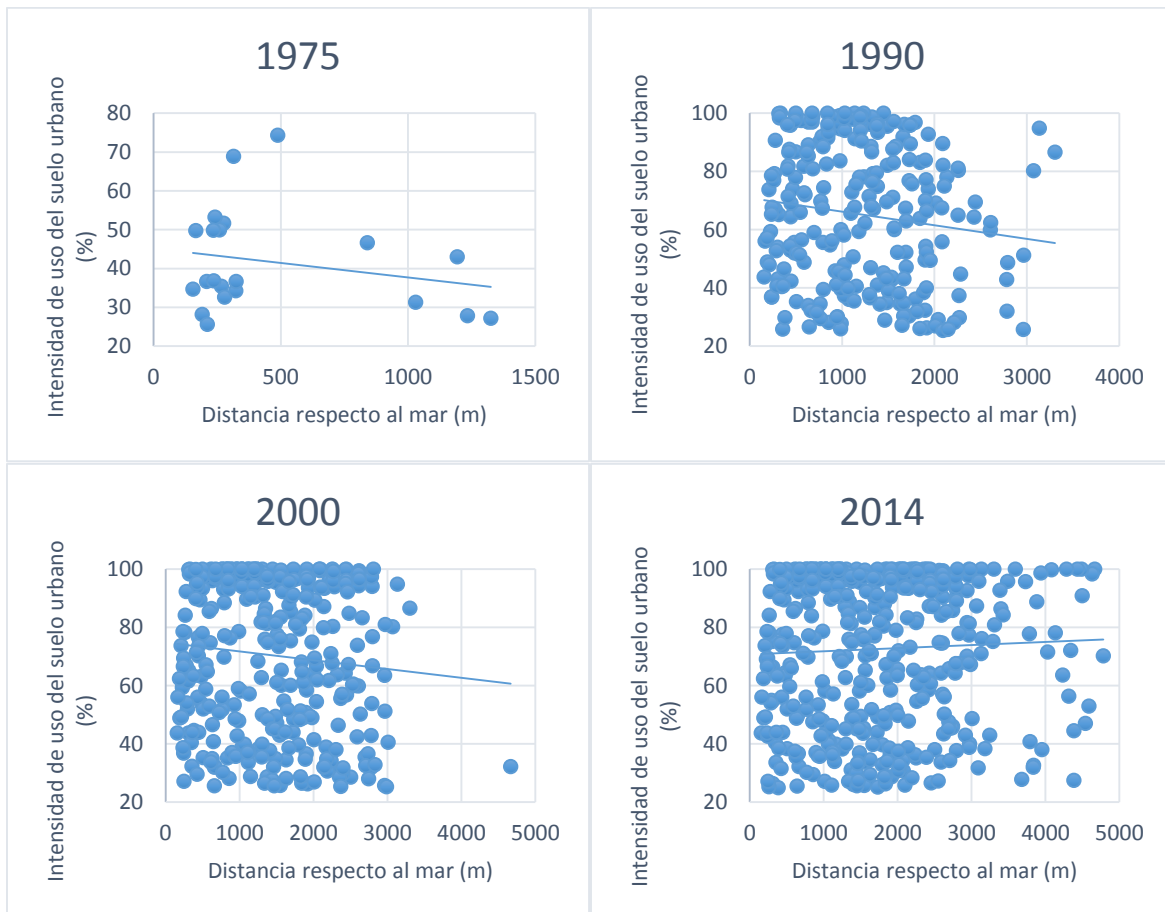
Figura 18. Porcentaje construido de los pixeles urbanos respecto a su distancia de la costa en Cozumel, 1975-2014



Fuente: Elaboración propia.

En Playa del Carmen se presenta un comportamiento muy diverso a lo largo del tiempo. En 1975, se observan pocos pixeles urbanizados aunque concentrados a menos de 500 metros de la costa, con grados menores al 80% del uso de su suelo. Para 1990 ya existen pixeles urbanos con edificaciones al 100% y estos pueden llegar distancias de hasta 3 km respecto al mar. En 2000 se observa que la distancia máxima con pixeles urbanos sigue estando en 3 km, pero la intensificación del uso del suelo continua y se consolida una relación inversa entre distancia e intensificación del uso del suelo. Sin embargo, para 2014, la ciudad se extendió más allá de los 3 km y con nuevos pixeles urbanos que llegaban al 100% del grado de su intensificación, por lo cual cambió la relación entre la distancia y la intensificación del uso del suelo. Este patrón da cuenta también del crecimiento de Playa de Carmen más reciente y rápido que el de las otras ciudades de estudio.

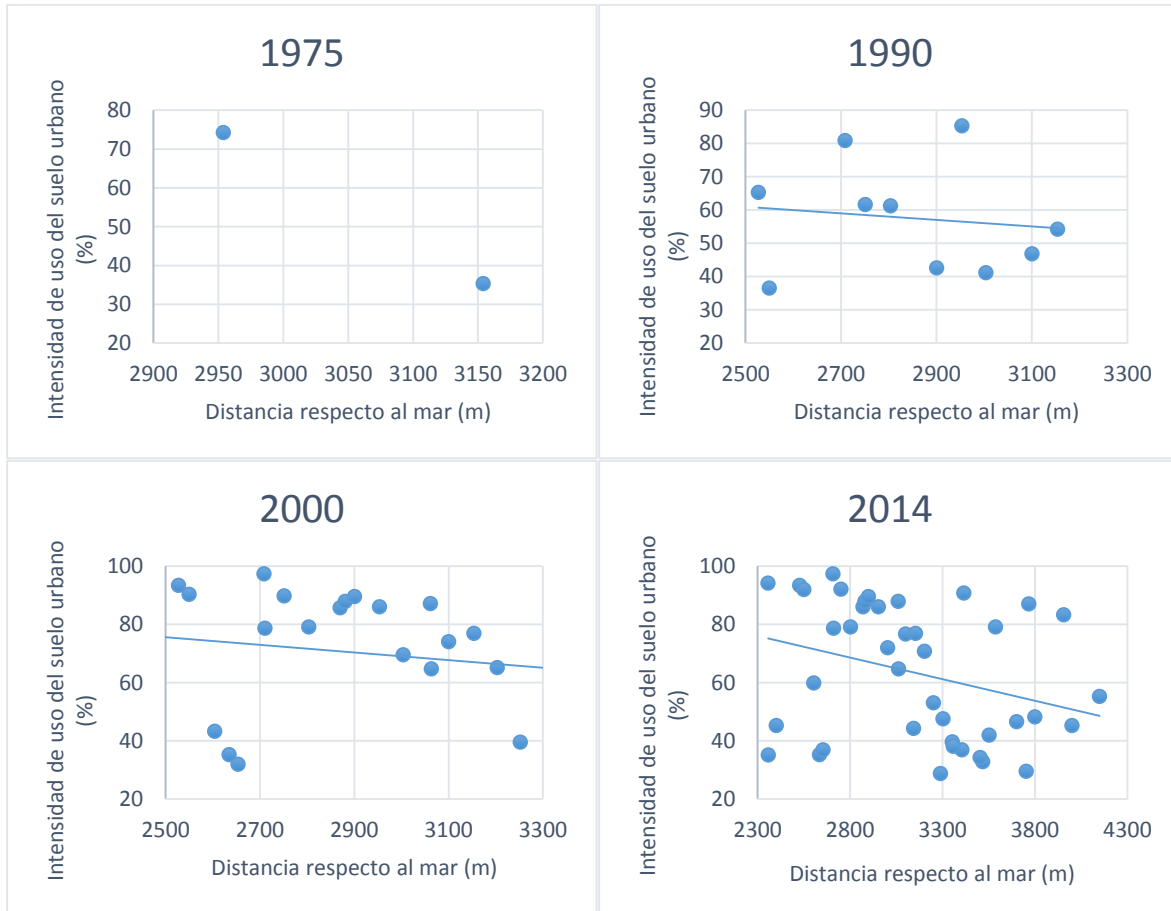
Figura 19. Porcentaje construido de los pixeles urbanos respecto a su distancia de la costa en Playa del Carmen, 1975-2014



Fuente: Elaboración propia.

La ciudad de Tulum es más pequeña y está más lejana al mar, además se caracteriza por niveles bajos de intensidad en el uso del suelo porque a lo largo del tiempo. Finalmente, la relación positiva entre distancia e intensidad es un tanto engañosa en el sentido de que en Tulum no hay algún pixel urbano dentro de la franja costera que nos de cuenta que la cercanía a la playa influye en un mayor uso del suelo, cómo es el caso en ciudades turísticas como Cancún.

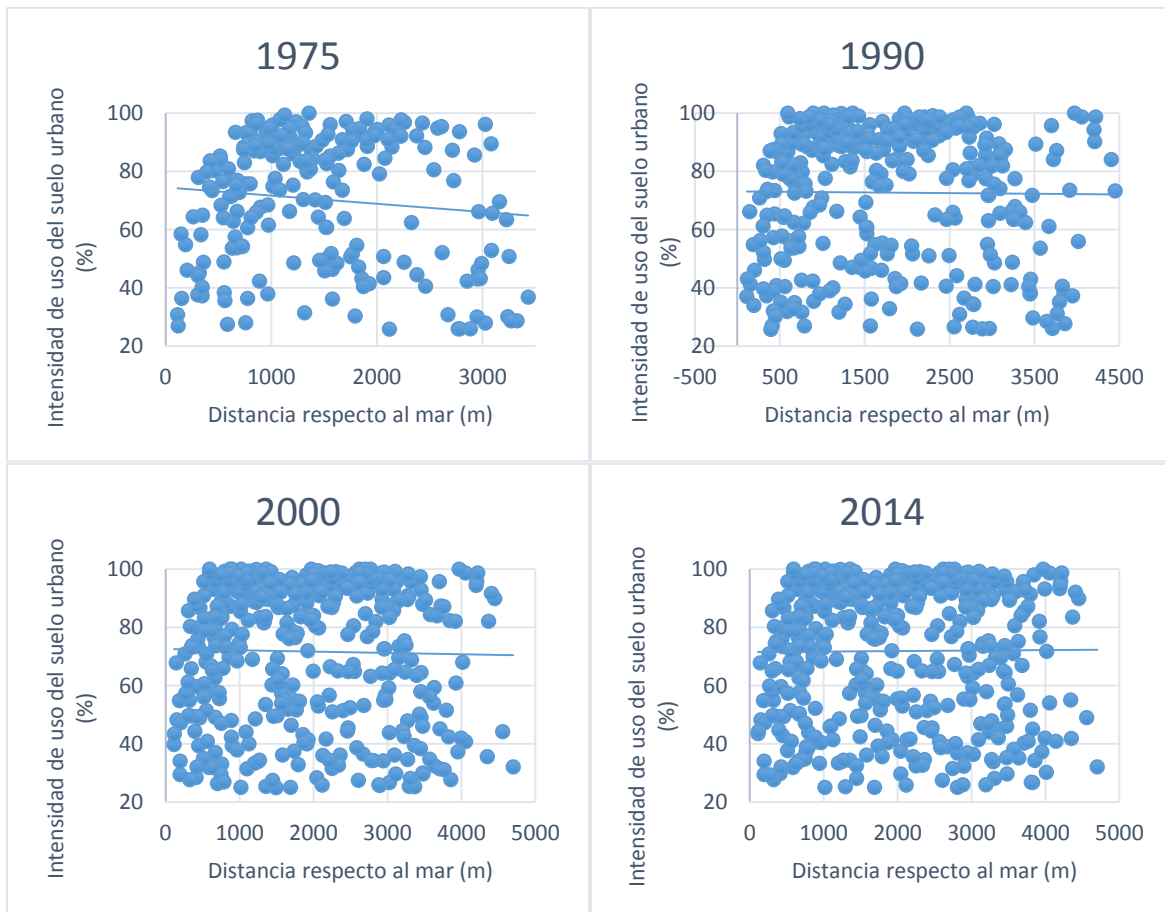
Figura 20. Porcentaje construido de los pixeles urbanos respecto a su distancia de la costa en Tulum, 1975-2014



Fuente: Elaboración propia.

Por último, la ciudad de Chetumal, en 1975, presenta un mayor uso del suelo tanto en la franja costera como más allá de ella, sin embargo los grados más altos se localizan en una distancia entre los 1000 y 2000 metros respecto al mar. Para 1990 hubo nuevos pixeles urbanos asentados a distancias mayores a 3 km, pero los pixeles con un uso más intensivo del suelo se localizaron en distancias entre 500 a 2500 metros respecto a la costa. Esta tendencia aumentó en los años posteriores de tal suerte que la relación entre distancia e intensidad del uso del suelo es ligeramente positiva para la distancia.

Figura 21. Porcentaje construido de los pixeles urbanos respecto a su distancia de la costa en Chetumal, 1975-201



Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

En este capítulo se pudo apreciar qué ciudades han presentado un crecimiento en dirección de la costa y se encuentran en zonas de baja elevación. Además, se presentó la distancia de cada píxel urbano junto con su grado de intensificación del suelo urbano para cada píxel que constituye cada ciudad. Se halló que Progreso es la ciudad más cercana al mar, en términos promedio, de forma contraria, Tulum es la ciudad más alejada del mar y es la única que no cuenta con asentamientos dentro de la franja costera.

En cuanto a la dirección e intensidad podemos ver casos particulares. Por ejemplo, Cancún es una ciudad que se ha extendido mucho hacia la zona continental, sin embargo, su tendencia es que a menor distancia del mar el grado de intensidad de construcción es mayor. Esto podría

explicarse por el carácter turístico de Cancún, pero Cozumel, también ciudad turística, presenta una relación inversa: menor intensificación de construcción cerca de la costa y mayor hacia el centro.

Por otra parte, pudimos ver cómo ciudades como Progreso, Champotón, Ciudad del Carmen, Cancún, Playa del Carmen y Tulum tienen más de cuatro quintas partes de su área construida dentro de áreas de baja elevación. Progreso, además de estar gran parte de su territorio en zona costera baja, tiene toda su mancha urbana dentro de la zona costera, volviéndola la ciudad con mayor grado de exposición a la elevación del nivel del mar, ya sea por cercanía al mar o por una baja elevación. Por otro lado, Tulum, muestra una mayor lejanía al mar y no presenta edificaciones en la zona costera inmediata, si bien la ciudad se encuentra casi en su totalidad en zonas de baja elevación.

Conclusión general

En el siglo XXI continuará el crecimiento de las ciudades a lo largo del mundo. El crecimiento previsto no sólo se expresará en términos poblacionales sino también en términos espaciales. Al mismo tiempo se pronostica que diversos problemas ambientales existentes se volverán más severos, entre ellos destaca el cambio climático. Este último implicará aumento de temperaturas atmosféricas, variación en los patrones de lluvias, aumento de la frecuencia e intensidad de ciclones tropicales, aumento del nivel promedio del mar, entre otras consecuencias. Bajo estas circunstancias es pertinente profundizar en el entendimiento de la relación entre urbanización y cambio climático, tanto en términos de cómo el crecimiento urbano influye en el cambio climático como sobre las consecuencias del cambio climático en el estado y desarrollo de las ciudades.

Con el ánimo de abonar en este sentido, la presente tesis se enfocó en analizar el proceso urbano que tuvo lugar en nueve ciudades costeras localizadas en la península de Yucatán entre 1975 y 2014. La península yucateca se caracteriza por contar con una elevación baja por lo cual sus costas son vulnerables a cambios en el nivel del mar, asimismo esta región es propensa a que se presenten ciclones tropicales de diversa magnitud que pueden generar incrementos en el nivel del mar. Bajo esas premisas se formuló la pregunta que guió la investigación: ¿cómo incide el patrón histórico de la expansión (1975-2014) sobre el riesgo a inundaciones por aumentos en el nivel del mar en las ciudades costeras de la península de Yucatán? Para responder a dicha pregunta se procedió a trabajar en tres capítulos. En el primero se estableció el marco teórico que enmarca el tema discutido. Se puntualizó los aspectos del cambio climático de interés, a la vez que se definió el riesgo urbano y se discutió los aspectos de la expansión y forma urbana. En el capítulo dos se dio paso a la discusión sobre la conceptualización y maneras de medir la expansión y la forma urbana, a la par que se realizaron las estimaciones respectivas sobre estos dos conceptos con base a indicadores de tasas de crecimiento y localización de éste. En el tercer y último capítulo se conjuntó la información obtenida del capítulo dos con información de altitud del terreno y franja costera para establecer las áreas que se encontraban expuestas a aumentos del nivel del mar y se estimó el grado de intensificación del uso del suelo en relación con la distancia a la costa.

Los hallazgos de la investigación se pueden componer en dos bloques. En el primero, se pudo develar las tasas de crecimiento urbano y establecer los grados de compacidad o dispersión para cada una de las ciudades costeras de la península de Yucatán desde 1975 hasta al 2014. En Ciudad del Carmen la extensión urbana pasó de 16 km² a 22 km² en 1975 y 2014 respectivamente, a lo largo de dichos años la ciudad fue mejorando su grado de compacidad. La ciudad de Champotón triplicó su superficie entre 1975 al 2014 pasando de 2 a 6 km², a pesar de que este crecimiento fue rápido la ciudad de Champotón se destacó por terminar siendo una ciudad compuesta por un solo fragmento urbano, así como tener una alta compacidad. Respecto a la segunda ciudad costera más grande de la región, Campeche, su superficie construida pasó de 18 km² a 32 km² de 1975 al 2014, dentro de esos mismos años redujo su grado de dispersión, pasando de la tercera ciudad más dispersa de todas a ser la cuarta. Progreso fue una ciudad que creció lentamente y poco, pues de 1975 al 2014 sólo aumentó medio kilómetro cuadrado, asimismo se caracterizó por mantener una forma dispersa a lo largo del periodo. Cancún se mantuvo como la ciudad más grande a lo largo del periodo, pasando de 40.5 km² de superficie construida en 1975 a 80.5 km² en 2014; además fue la ciudad con más fragmentos urbanos y su índice de dispersión indicó que fue la ciudad más dispersa a lo largo del periodo. Cozumel, al igual que Progreso, creció muy poco de 1975 al 2014, en ese lapso sólo aumento 0.7 km², dentro de ese periodo de tiempo tuvo una forma compacta. Playa del Carmen fue la ciudad que creció más entre el periodo de estudio, pues de medio kilómetro cuadrado que comprendía la ciudad en 1975, pasó a 20 km², esto represento una velocidad rápida de crecimiento, además éste se caracterizó por ser fragmentado y disperso conforme los años pasaban. Tulum se caracterizó por ser la ciudad más pequeña de todas, para el 2014 alcanzó los 1.6 km², si bien mantuvo una compacidad en los primeros años, para 2014 se volvió más dispersa. Finalmente, Chetumal fue una ciudad de rápido crecimiento, de 9.3 km² que comprendió su extensión en 1975 pasó a 20 km² para el año 2014, dicho crecimiento se fue dando de forma dispersa.

En el segundo bloque tenemos la relación de la expansión urbana con la exposición al aumento del nivel del mar. Ciudad del Carmen presenta tasas de exposición de sus edificaciones de más del 50% ya sea por encontrarse en baja elevación o por encontrarse en la franja costera; sin embargo, un aspecto importante a destacar es que esta ciudad exhibe una tendencia positiva entre distancia del mar e intensidad del uso del suelo urbano.

Champotón aumentó su área urbana expuesta en términos absolutos, sin embargo, disminuyó en relación al total de su superficie construida. La intensidad del uso del suelo también presenta mayores valores en la costa y decrece conforme se incrementa la distancia a ésta. En el caso de Campeche se encontró que el área expuesta aumentó en términos absolutos, pero no relativos, tanto por baja elevación como estar dentro de la franja costera; sin embargo, en esta ciudad la intensidad del uso del suelo decrece con la distancia a la costa. Progreso resultó ser la ciudad más expuesta en términos de baja elevación del nivel del mar o dentro de la franja costera, de tal suerte que el 100% de la superficie construida se encuentra expuesta; si bien la intensificación del uso del suelo es mayor conforme se aleje de la costa, la mayoría de las construcciones quedan dentro de la franja costera. Cancún en 1975 el 86% de su superficie estaba expuesta por localizarse en zona de baja elevación; para el año 2014 la cifra aumentó al 89% y en términos absolutos a 72 km². Respecto a la superficie construida dentro de la franja costera aumentó de 12 km² a 20 km² de 1975 al 2014, pero se encontró una relación inversa entre distancia e intensidad del uso del suelo, en otras palabras, en Cancún hay mayor intensidad del uso del suelo en las costas que conforme se avanza tierra adentro. Cozumel es una ciudad donde el 99% de su superficie construida se encuentra en zona de baja elevación, pero en términos de proporción de la ciudad dentro de la franja costera sólo cuenta con el 40% para el año 2014, esta ciudad que de igual forma tiene una vocación turística como Cancún, presentó gran intensidad del uso del suelo en la zona centro. La ciudad de Playa del Carmen fue una ciudad que si bien aumentó en términos absolutos su superficie dentro de la franja costera, en términos relativos mostró que su crecimiento fue lejos de la costa, sin embargo, para 2014 el 86% de su superficie se encontraba dentro de una zona de baja elevación, su intensificación del uso del suelo fue intensiva cerca de la costa de 1975 hasta el año 2000, para el 2014 gran parte de las nuevas construcciones se realizó e intensificó más lejos de la costa. Tulum es única ciudad que se asienta lejos de la costa por lo cual su exposición por cercanía a la costa es nula, sin embargo, el 98% de su superficie se encuentra en zona de baja elevación. Finalmente, Chetumal aumentó su superficie construida expuesta tanto en a la cercanía al mar como por encontrarse a una baja elevación, sin embargo, en términos relativos al menos la mitad de su territorio para el año 2014 se encuentra expuesta por encontrarse en zona de baja elevación, mientras que sólo una quinta parte de su superficie se encuentra expuesta por su cercanía al mar, en cuanto a la intensidad

del uso del suelo, Chetumal es una ciudad que tenía mayor intensificación conforme se alejaba del mar.

Estos resultados obtenidos contrastan de diferente forma con la hipótesis planteada, ya que el comportamiento urbano de cada ciudad han sido diferentes. Por ejemplo, se observó que ciudades como Progreso y Cozumel han tenido un crecimiento fuertemente influido por sus condiciones geográficas, por lo cual la ubicación de sus edificaciones no varía mucho de los principales asentamientos registrados en 1975, en ese sentido la forma urbana fue determinante en el aumento de la exposición. Sin embargo, en el caso de Progreso, el carácter de puerto que tiene la ciudad ha influido en que su intensificación del uso del suelo se dé muy cerca del mar, así mismo la forma de la ciudad no ha sido compacta por las condiciones geográficas. Si bien se podría pensar que un crecimiento compacto, es decir, menos extensivo, podría reducir la exposición, Champotón muestra que no necesariamente sea así, debido a que tuvo el crecimiento más compacto, pero por su ubicación cerca del mar la ha llevado a tener grados importantes de exposición, de tal suerte que el 68% de sus edificaciones se encuentra localizada en zonas de baja elevación y directamente en la franja costera de 1 km. Otro caso singular es Playa del Carmen, ya que fue la ciudad que más rápido creció en el periodo, si bien su crecimiento fue disperso y fragmentado su exposición por cercanía al mar fue baja en términos relativos, sin embargo, en relación a las zonas de baja elevación, es una ciudad altamente expuesta.

Es importante cuantificar y evaluar los cambios en los patrones del uso de suelo urbano es decisivo para gestionar y prever el crecimiento físico de las ciudades y evitar la expansión urbana insustentable así como los perjuicios asociados estableciendo formas sustentables de crecimiento urbano (Acheampong et al., 2017, p. 824; Lagarias y Sayas, 2018, p.16) a través de generar propuestas que contribuyan a disminuir los riesgos ante este tipo de fenómenos. Entre las opciones se encuentran las de desincentivar los flujos migratorios hacia estas ciudades, es decir, reducir el crecimiento poblacional en zonas altamente expuestas. Sin embargo, este tipo de medidas pueden ser costosas y difíciles de implementar. Otra opción es modificar las formas que tienen los asentamientos costeros en orden de proteger a los residentes de cada ciudad (Gordon McGranahan et al., 2008, p. 165), en ese sentido la planificación urbana tiene un papel importante ya que se puede identificar

las áreas susceptibles a inundaciones y limitar efectivamente la construcción de asentamientos en dichas zonas. Lo anterior no sólo tiene relevancia por el escenario actual, si se consideran futuros proyectos de desarrollo en la península de Yucatán como el “Tren Maya” será importante evaluar las nuevas formas emergentes de las ciudades de la región y establecer políticas para el futuro, con el propósito de contener la dispersión de las ciudades y promover un crecimiento urbano compacto y sustentable (Lagarias y Sayas, 2018, p. 30).

La base de datos GHSL ayuda a generar indicadores para el análisis urbano y además que pueden enfocarse en algunas metas de los Objetivos del Desarrollo Sustentable, por lo cual es relevante la generación de estudios comparativos consistentes del proceso del crecimiento de ciudades a lo largo del mundo (Melchiorri y Siragusa, 2018, p. 164). Sin embargo, la presente investigación sólo utilizó la información sobre superficie construida, por lo cual la presentación de la situación se limita al aspecto físico de la ciudad, considerando que la base GHSL tiene información poblacional se abren nuevos caminos para la investigación. La agenda de investigación puede ampliarse al considerar otro tipo de información además de la poblacional y física, al considerar otro tipo de variables se puede enriquecer los diagnósticos realizados y por ende mejorarse las propuestas de política pública. Finalmente, considerando que estos aspectos han sido poco estudiados en las costas mexicanas desde esta perspectiva y considerando que el proceso urbano es creciente a lo largo del mundo, es necesario seguir estudiando lo urbano más que nunca ante la revolución urbana que está a la vuelta de la esquina.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acheampong, R. A., Agyemang, F. S. K., & Abdul-Fatawu, M. (2017). Quantifying the spatio-temporal patterns of settlement growth in a metropolitan region of Ghana. *GeoJournal*, 82(4), 823–840. <https://doi.org/10.1007/s10708-016-9719-x>
- Almejo-Hernández, R., García, J., & Benítez, I. (2014). La urbanización en México 2010-2030: un esbozo de los retos y oportunidades asociados al crecimiento urbano y regional. In *La situación demográfica de México* (pp. 139–163). CONAPO.
- Amador, L. E., & Moreno-Casasola, P. (2006). Turismo alternativo en los municipios costeros: en busca de un desarrollo sustentable. In P. Moreno-Casasola, E. Peresbarbosa, & A. C. Travieso-Bello (Eds.), *Estrategias para el manejo integral de la zona costera: un enfoque municipal* (pp. 971–988). Xalapa: Instituto de Ecología A.C., CONANP.
- Angel, S., Blei, A., Parent, J., Lamson-Hall, P., Galarza, N., Civco, D., ... Thom, K. (2016). *Atlas of Urban Expansion, volumen 1: Areas and Densities*. New York, Nairobi & Cambridge: New York University, UN-Habitat, Lincoln Institute of Land Policy.
- Antarctic Climate & Ecosystems Cooperative Research Centre. (2008). *Position analysis: climate change, sea-level rise and extreme events: Impacts and adaptation issues*. Australia: Antarctic Climate & Ecosystems, Cooperative Research Centre.
- Aragón-Durand, F. (2007). Urbanisation and flood vulnerability in the periurban interface of Mexico City. *Disasters*, 31(4), 477–494.
- Balk, D. L., Nghiem, S. V., Jones, B. R., Liu, Z., & Dunn, G. (2019). Up and out: A multifaceted approach to characterizing urbanization in Greater Saigon, 2000–2009. *Landscape and Urban Planning*, 187(July 2017), 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.07.009>
- Balk, D., Leyk, S., Jones, B., Montgomery, M. R., & Clark, A. (2018). Understanding urbanization : A study of census and satellite-derived urban classes in the United States , 1990-2010. *PlosOne*, 13(12), 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208487>
- Blackburn, S., & Marques, C. (2013). Mega-urbanisation on the coast. In M. Pelling & S.

- Blackburn (Eds.), *Megacities and the Coast, Risk, Resilience and Transformation* (pp. 1–21). Oxon: Routledge.
- Briones, F., & Lucatello, S. (2018). Crecimiento y configuración de riesgos: Reflexiones sobre la urbanización en la Ciudad de México desde un contexto latinoamericano. In G. C. Delgado Ramos (Ed.), *Ciudad sensibles al cambio climático* (pp. 55–77). México: UNAM, PINCC.
- Cardona, O., Aalst, V., Birkmann, J., Fordham, M., McGregor, G., Perez, R., ... Sinh, B. (2012). Determinants of Risk: exposure and vulnerability. In C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, ... P. M. Midgley (Eds.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge & New York: Cambridge University Press.
- Castro, T., Muñoz, L., & Peralta, O. (2015). *Cambio global, causas y consecuencias*. México: Siglo XXI editores.
- Centro Mario Molina. (2017). *Huracanes y cambio climático*. Retrieved from http://centromariomolina.org/wp-content/uploads/2012/05/PositionPaper-CambioClimático_Oct-2017-1.pdf
- CEPAL. (2018). Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe: Metodologías y herramientas para la evaluación de impactos de la inundación y la erosión por efecto del cambio climático, 120.
- CONAPO, & SEDATU. (2018). *Sistema Urbano Nacional 2018*. México. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/400771/SUN_2018.pdf
- Cook, J., Nuccitelli, D., Green, S., Richardson, M., Winkler, B., Painting, R., ... Skuce, A. (2013). Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. *Environmental Research Letters*, 8(2), 1–7.
- El Colegio de México. (2018). *Desigualdades en México 2018*. Ciudad de México.
- European Union, & United Nations Human Settlements Programme. (2016). *The State of European Cities 2016, Cities leading the way to a better future*.

<https://doi.org/10.2776/636682>

- Field, C., Aalst, V., Adger, N., Arent, D., Barnett, J., Betts, R., ... Losada, I. (2014). Technical Summary. In C. B. Field, V. . Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, ... L. L. White (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaption, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel On Climate Change* (p. 1132). Cambridge & New York: Cambridge University Press.
- Garza, G. (2002). Evolución de las ciudades mexicanas en el siglo XX. *Revista de Información y Análisis*, 19(55), 7–16.
- Gesch, D. B. (2018). Best Practices for Elevation-Based Assessments of Sea-Level Rise and Coastal Flooding Exposure. *Frontiers in Earth Science*, 6(December). <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00230>
- Gonzalez, S., & Larralde, A. H. (2019). La forma urbana actual de las zonas metropolitanas en México: indicadores y dimensiones morfológicas / The current urban shape of metropolitan areas in Mexico: *Estudios Demográficos y Urbanos*, 34(1), 11–42. <https://doi.org/10.24201/edu.v34i1.1799>
- Gutiérrez, M. T., & González, J. (1999). Las costas mexicanas y su crecimiento urbano. *Investigaciones Geograficas, Boletín Del Instituto de Geografía, UNAM*, (40), 110–126. <https://doi.org/10.14350/rig.59098>
- Hauer, M. E., Hardy, R. D., Mishra, D. R., & Pippin, J. S. (2019). No Landward Retreat: Examining 80 years of population migration and shoreline change in Louisiana. *Population and Environment*, 1–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11111-019-00315-8>
- Hawker, L., Bates, P., Neal, J., & Rougier, J. (2018). Perspectives on Digital Elevation Model (DEM) Simulation for Flood Modeling in the Absence of a High-Accuracy Open Access Global DEM. *Frontiers in Earth Science*, 6(December), 1–9. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00233>
- Hogan, D., & Ojima, R. (2008). Urban Sprawl: A Challenge for Sustainability. In *The new*

- Global Frontier. Urbanization, Poverty and Environment in the 21st Century.* UK & USA: Earthscan.
- Hu, Z., Du, P., & Guo, D. (2007). Analysis of urban expansion and driving forces in Xuzhou City based on remote sensing. *Journal of China University of Mining & Technology*, 17(2), 267–271.
- Ibarra, V., Puente, S., & Schteingart, M. (1984). La ciudad y el medio ambiente, XVIII(1), 110–143.
- INEGI. (2017a). *Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2017.* Aguascalientes.
- INEGI. (2017b). Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2017, 641.
- IPCC. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* (C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, ... P. M. Midgley, Eds.). Cambridge & New York: Cambridge University Press.
- IPCC. (2013a). Annex III: Glossary. In T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, ... P. M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contributin of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge & New York: Cambridge University Press.
- IPCC. (2013b). Summary for Policymakers. In V. B. and P. M. M. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia (Ed.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge & New York.
- Juárez, C., & González, R. (2015). El crecimiento de la población y los desequilibrios territoriales en la región costera de México, 7–32.
- Lagarias, A., & Sayas, J. (2018). Urban sprawl in the mediterranean: Evidence from coastal

- medium-sized cities. *Regional Science Inquiry*, X(3), 15–32.
- Lavell, A. (n.d.). *Sobre la Gestión del Riesgo: Apuntes hacia una Definición*. Retrieved from <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd29/riesgo-apuntes.pdf>
- Lavell, A. (1996). Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: hacia la definición de una agenda de investigación. In M. A. Fernandez (Ed.), *Ciudades en Riesgo* (pp. 21–59). Perú: RED-USAID.
- Leyk, S., Uhl, J. H., Balk, D., & Jones, B. (2018). Assessing the accuracy of multi-temporal built-up land layers across rural-urban trajectories in the United States. *Remote Sensing of Environment*, 204(February 2017), 898–917. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.035>
- Liu, S. H., Wu, C. J., & Shen, H. Q. (2000). A GIS based model of urban land use growth in Beijing. *Acta 3 Geographica Sinica*, 55(4), 407–416.
- Lu, S., Guan, X., He, C., & Zhang, J. (2014). Spatio-temporal patterns and policy implications of urban land expansion in metropolitan areas: A case study of Wuhan urban agglomeration, central china. *Sustainability (Switzerland)*, 6(8), 4723–4748. <https://doi.org/10.3390/su6084723>
- Marcotullio, P., Hughes, S., Sarzynski, A., Pincetl, S., Sanchez, L., Romero-Lankao, P., ... Seto, K. (2014). Urbanization and the carbon cycle, Contributions from social science. *Earth's Future*, (2), 496–514.
- McGranahan, G., Balk, D., & Anderson, B. (2007). The rising tide, assessing the risks of climate change and human settlements in Low Elevation Coastal Zone. *Acta Horticulturae*, 662(1), 47–52. <https://doi.org/10.1177/0956247807076960>
- McGranahan, G., Balk, D., & Anderson, B. (2008). Risks of climate change for urban settlements in low elevation coastal zones. In G. Martine, G. McGranahan, M. R. Montgomery, & R. Fernández-Castilla (Eds.), *The New Global Frontier: Urbanization, Poverty and Environment in the 21st Century* (pp. 165–182). UK & USA: Earthscan. <https://doi.org/10.4324/9781849773157>
- Melchiorri, M., & Siragusa, A. (2018). Analyzing cities with the global human settlement

- layer: A methodology to compare urban growth using remote sensing data. In Bisello Adriano, D. Vettorato, P. Laconte, & S. Costa (Eds.), *Smart and Sustainable Planning for Cities and Regions. Results of SSPCR 2017* (pp. 151–165). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75774-2_11
- Molina, M., Sarukhán, J., & Carabias, J. (2017). *El cambio climático*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Molina, Rubinoff, P., & Carranza, J. (2001). *Guidelines for Low-Impact Tourism along the Coast of Quintana Roo, Mexico*. Cancún.
- Monkkonen, P., & Comandon, A. (2016). Expansión urbana, segregación y estructura espacial. *Ciudades*, 111, 50–59.
- Negrete, M. E. (2016). Estructura urbana y procesos de organización del espacio metropolitano. In *La Ciudad de México en el siglo XXI*. México: SECITI.
- ONU-HABITAT. (2017). *Nueva Agenda Urbana*. Ecuador: Secretaría de Habitat III.
- Ortiz, M., & Méndez, A. (2004). Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar y sus implicaciones en las costas bajas del golfo de México y Mar Caribe. In E. Riviera-Arriaga, G. J. Villalobos Zapata, I. Azuz Adeath, & F. Rosado May (Eds.), *El manejo costero en México*. México: EPOMEX.
- Pedrozo-Acuña, A., Damania, R., Laverde-Barajas, M. A., & Mira-Salama, D. (2015). Assessing the consequences of sea-level rise in the coastal zone of Quintana Roo, México: the costs of inaction. *Journal of Coastal Conservation*, 19(2), 227–240. <https://doi.org/10.1007/s11852-015-0383-y>
- Pelling, M. (2003). *The vulnerability of cities, natural disasters and social resilience*. London: Earthscan.
- Pérez-Campuzano, E., & Santos-Cerquera, C. (2016). Entre la pesca y el turismo: cambios económicos y demográficos recientes en la costa mexicana. *Cuadernos Geográficos*, 55(1), 283–308.
- Pesaresi, M., Ehrlich, D., Ferri, S., Florczyk, A. J., Freire, S., Halkia, M., ... Syrris, V. (2016).

Operating procedure for the production of the Global Human Settlement Layer from Landsat data of the epochs 1975, 1990, 2000, and 2014. Joint Research Centre. <https://doi.org/10.2788/253582>

Pesaresi, M., Ehrlich, D., Kemper, T., Siragusa, A., Florczyk, A. J., Freire, S., & Corbane, C. (2017). *Atlas of the Human Planet Hazards 2017*. European Union: Joint Research Centre. <https://doi.org/10.2760/19837>

Pisanty, I., Mazari, M., & Ezcurra, E. (2009). El reto de la conservación de la biodiversidad en zonas urbanas y periurbanas. In *Capital natural de México: Estado de conservación y tendencias de cambio* (Vol. II, pp. 719–759). México: CONABIO.

Polèse, M. (1998). *Economía urbana y regional. Introducción a la relación entre territorio y desarrollo*. Cartago: LUR, BUAP, GIM.

Puente, S. (2014). Del concepto de gestión integral de riesgos a la política pública en protección civil, los desafíos de su implementación. In S. E. Giorguli Saucedo & V. Ugalde (Eds.), *Gobierno, territorio y población: las políticas públicas en la mira*. México: El Colegio de México.

Redclift, M., Manuel-Navarrete, D., & Pelling, M. (2011). *Climate change and human security. The challenge to local governance under rapid coastal urbanization*. Cheltenham & Northampton: Edward Elgar.

Reguero, B. G., Losada, I. J., Díaz-Simal, P., Méndez, F. J., & Beck, M. W. (2015). Effects of climate change on exposure to coastal flooding in Latin America and the Caribbean. *PLoS ONE*, *10*(7), 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133409>

Ren, P., Gan, S., Yuan, X., Zong, H., & Xie, X. (2013). Spatial Expansion and sprawl quantitative analysis of mountain city built-up area. In F. Bian, Y. Xie, X. Cui, & Y. Zeng (Eds.), *Geo-informatics in resource management and sustainable ecosystem* (pp. 166–176). Berlin: Springer.

Rodríguez, H. (2006). Ciudad y ambiente en el Golfo de México. Una mirada al proceso de urbanización y su impacto ambiental en las costas de México. In P. Moreno-Casasola, E. Peresbarbosa, & A. C. Travieso-Bello (Eds.), *Estrategias para el manejo integral de*

la zona costera: un enfoque municipal (pp. 455–476). Xalapa: Intituto de Ecología A.C., CONANP.

Romero-Lankao, P., & Gnatz, D. (2016). Urbanization, vulnerability and risk. In K. C. Seto, W. D. Solecki, & C. A. Griffith (Eds.), *The Routledge Handbook of Urbanization and Global Environmental Change*. London & New York: Routledge.

Romero-Lankao, P., Hughes, S., Qin, H., Hardoy, J., Rosas-Huerta, A., Borquez, R., & Lampis, A. (2014). Scale, urban risk and adaptation capacity in neighborhoods of Latin American cities. *Habitat International*, 42, 224–235. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2013.12.008>

Roy Chowdhury, P. K., Bhaduri, B. L., & McKee, J. J. (2018). Estimating urban areas: New insights from very high-resolution human settlement data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 10(October 2017), 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.03.002>

SEDESOL-CONAPO-INEGI. (2018). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2010*. México. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/344506/1_Preliminares_hasta_V_correcciones_11_de_julio.pdf

SEDESOL, & CONAPO. (2012). *Cátalogo Sistema Urbano Nacional 2012*. México. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/112772/Catalogo_Sistema_Urbano_Nacional_2012.pdf

Solecki, W., Seto, K. C., & Marcotullio, P. J. (2013). It's time for an urbanization science. *Environment*, 55(1), 12–16. <https://doi.org/10.1080/00139157.2013.748387>

Thywissen, K. (2006). *Components of Risk*. Retrieved from <http://collections.unu.edu/eserv/UNU:1869/pdf4042.pdf>

Torres-Rodríguez, V., Márquez García, A., Bolongaro Crevenna, A., Chavarria Hernández, J., Expósito Díaz, G., & Márquez García, E. (2011). Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el estado de Campeche debido a efectos del cambio climático. In A. V.

- Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, & J. L. Rojas Galaviz (Eds.), *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*. México: EPOMEX, UAM-I, UNAM-ICMy, UAC.
- Uhl, J. H., Zoraghein, H., Leyk, S., Balk, D., Corbane, C., Syrris, V., & Florczyk, A. J. (2018). Exposing the urban continuum: implications and cross-comparison from an interdisciplinary perspective. *International Journal of Digital Earth*, 0(0), 1–23. <https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1550120>
- UN-Habitat. (2010). *State of the world's cities 2010/2011: Bridging the urban divide*. Abingdon: Earthscan.
- UN-Habitat. (2011). *Cities and climate change: global report on human settlements*. Kenya: UN-Habitat.
- UN-Habitat. (2016). *Urbanization and development: Emerging Futures, World Cities Report 2016* (Kenya). UN-Habitat.
- United Nations. (2019). *World Urbanization Prospects 2018 Highlights*. New York. Retrieved from <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Highlights.pdf>
- UNWTO. (2018). UNWTO World Tourism Barometer. *World Tourism Barometer*. <https://doi.org/10.18111/wtobarometereng>
- Zavala-Hidalgo, J., Kalman, R., Romero-Centeno, R., & Hernández, F. (2011). Tendencia del nivel del mar en la costas mexicanas. In A. V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, & J. L. Rojas Galaviz (Eds.), *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*. México: UAM-I, UNAM-ICMyL, UAC.

Información:

Pesaresi, M., Ehrlich, D., Florczyk, A., Freire, S., Julea, A., Kemper, T., Soille, P., Syrris, V. (2015): *GHS built-up grid, derived from Landsat, multitemporal (1975, 1990, 2000, 2014)*. European Commission, Joint Research Centre (JRC) [Dataset] PID: http://data.europa.eu/89h/jrc-ghsl-ghs_built_ldsmt_globe_r2015b

Shuttle Radar Topography Mission 30, United States Geological Survey: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS), Centro de Ciencias de la Atmosfera, UNAM, Atlas Climático Digital de México: <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/>

Yamazaki D., D. Ikeshima, R. Tawatari, T. Yamaguchi, F. O'Loughlin, J.C. Neal, C.C. Sampson, S. Kanae & P.D. Bates. A high accuracy map of global terrain elevations, *Geophysical Research Letters*, vol.44, pp.5844-5853, 2017 doi: 10.1002/2017GL072874. MERIT DEM available at: http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/MERIT_DEM