

Cuantificación de los cambios en la superficie cubierta por los manglares de Cancún mediante imágenes Landsat en el periodo 2005 a 2019

Hermenegildo E. Pinheiro Hebo

Proyecto de Título presentado al

Departamento de Ciencias Geodésicas y Geomática

Universidad de Concepción, Campus Los Ángeles

En cumplimiento del requisito parcial

Para obtener el título de

Ingeniero Geomático

Escrito bajo la orientación del profesor

Dr. Ing. Guido Staub (Departamento de Ciencias Geodésicas y Geomática)

Aprobado por la comisión

Mg. Gustavo Godoy Uribe (Departamento de Ciencias Geodésicas y Geomática)

Ing. Andrew Rifo Pereira (Departamento de Ciencias Geodésicas y Geomática)

Los Ángeles

Diciembre, 2020

RESUMEN

Los manglares tienen gran importancia ecológica y socioeconómica. Sin embargo, son unos de los ecosistemas más amenazados en el mundo. Según algunos estudios, la cobertura de manglar de Cancún ha ido disminuyendo debido al impacto de la expansión urbana y de la industria del turismo principalmente. En este contexto, el objetivo de este estudio fue cuantificar los cambios en la superficie cubierta por los manglares para los años 2005, 2016 y 2019 a través de imágenes de satélites Landsat y, analizar el impacto ambiental de las actividades antropogénicas. Se empleó la técnica de clasificación supervisada, basada en el algoritmo de máxima verosimilitud, para obtener los mapas temáticos de cobertura de suelo de los respectivos periodos. Estos mapas fueron evaluados para conocer su grado de confiabilidad temática mediante una matriz de confusión y con datos de referencia. A partir de la sobreposición de estos mapas, se elaboró una matriz de cambios que comprende a la dinámica de los manglares de Cancún en el periodo 2005-2016 y 2016-2019. Los resultados obtenidos indican que se redujeron aproximadamente 18% de los bosques de manglares entre 2005-2016, las cuales fueron ocupadas mayoritariamente por la categoría “Urbano/Suelo”. Por otro lado, entre 2016-2019 hubo un incremento de 2,08 % de estos ecosistemas. A pesar de que hay varios factores de disminución de los manglares, en este estudio, se determinó como causa principal de decrecimiento, las actividades antrópicas asociada a proyectos turísticos.

Palabras claves: Manglares, Cancún, Malecón Tajamar, Percepción remota, SIG, Landsat, Clasificación supervisada.

DEDICATORIA

“Cuando todo parece perdido, busque a Dios. Él te ayudará a encontrar la fuerza que hay dentro de ti ...” - Desconocido



AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos van a todos aquellos que directa o indirectamente contribuyeron para lograr esta batalla.



Índice de Contenidos

RESUMEN	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
Indice de Contenidos.....	v
Lista de Tablas	viii
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Símbolos, Nomenclatura o Abreviaciones	10
1. Introducción.....	11
1.1. Objetivo general.....	14
1.2. Objetivos específicos.....	14
2. Marco Teórico.....	15
2.1. Manglares.....	15
2.2. Marco legal.....	20
2.3. Percepción remota.....	22
2.4. Imágenes Landsat	25
2.5. Tratamiento de imágenes satelitales	28
3. Metodología.....	33
3.1. Datos de referencia	33
3.2. Área de estudio	35
3.3. Selección y adquisición de las imágenes	37
3.4. Preprocesamiento de las imágenes.....	38
3.5. Procesamiento de imágenes	40
3.6. Detección de cambios.....	42
4. Resultados	43
4.1. Mapas de cobertura	43
4.2. Evaluación de exactitud de los mapas....	47
4.3. Dinámica de cambios en la superficie cubierta por los manglares.....	50
4.4. Comparación de los resultados con los datos de referencia.....	55
5. Análisis de los resultados.....	59
6. Conclusión.....	69
7. Referencias.....	71

8. Anexos.....84



Lista de Tablas

Tabla 1: Características del sensor ETM+ Landsat 7	26
Tabla 2: Características de los sensores OLI y TIRS Landsat 8.	27
Tabla 3: Grado de confianza del índice kappa	32
Tabla 4: Tipo de Sensor y fechas de adquisición de las imágenes.....	37
Tabla 5: Matriz de cambio.....	42
Tabla 6: Extensión de las categorías en hectáreas de 2005, 2016 y 2019.....	43
Tabla 7: Variaciones en la superficie de los manglares.....	43
Tabla 8: Matriz de confusión para el año 2005.....	48
Tabla 9: Matriz de confusión para el año 2016.....	49
Tabla 10: Matriz de confusión para el año 2019.....	49
Tabla 11: Matriz de cambio periodo 2005-2016.....	50
Tabla 12: Matriz de cambio periodo 2002-2010.....	51
Tabla 13: Descripción de la simbología para los mapas de cambios.....	52
Tabla 14: Extensión en hectáreas de la superficie cubierta por manglares de Cancún (datos de referencia)	56
Tabla 15: Variaciones de las superficies de la cobertura de manglares en hectáreas. Comparación con los datos de CONABIO.....	56
Tabla 16: Variaciones de las superficies en hectáreas de la cobertura de manglares. Comparación con los datos de CONABIO.....	56

Lista de Figuras

Ilustración 1: Bosque de Manglares	11
Ilustración 2: Distribución global de los manglares.....	15
Ilustración 3: Actuación de los manglares como protección natural.....	17
Ilustración 4: Funciones ecológicas de los manglares	18
Ilustración 5: Espectro electromagnético	23
Ilustración 6: Caracterización de los bosques de manglares a partir de diferentes combinaciones de bandas.....	28
Ilustración 7: Localización de la zona de estudio	35
Ilustración 8: Crecimiento de la población del municipio de Benito Juárez.....	36
Ilustración 9: Esquema para generar la matriz de confusión.....	41
Ilustración 10: Distribución de los manglares de Cancún para el año 2005.....	44
Ilustración 11: Distribución de los manglares de Cancún para el año 2016.....	45
Ilustración 12: Distribución de los manglares de Cancún para el año 2019.....	46
Ilustración 13: Mapa cambio de cobertura periodo 2005-2016.....	53
Ilustración 14: Mapa cambio de cobertura periodo 2016-2019.....	54
Ilustración 15: Distribución de los manglares de Cancún (comparación).....	55
Ilustración 16: Distribución de los manglares de Cancún (comparación).....	57
Ilustración 17: Distribución de los manglares de Cancún (comparación).....	58
Ilustración 18: Evolución de los manglares de Cancún.....	60
Ilustración 19: Crecimiento urbano de Cancún.....	61
Ilustración 20: Sitio Ramsar “Manglares de la laguna Nichupté”.....	62

Ilustración 21: Daños anuales esperados de las inundaciones.....65

Ilustración 22: Malecón tajamar67



Lista de Símbolos, Nomenclatura o Abreviaciones

- ANAM-ARAP: Autoridad Nacional del Ambiente y Autoridad de los Recursos Acuáticos de Panamá
- CONABIO: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (México)
- CONAFOR: Comisión Nacional Forestal de México
- CONANP: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas
- DOF: Diario Oficial (México)
- FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
- FONATUR: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (México)
- INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México)
- MCSMT: Movimiento Ciudadano Salvemos el Manglar Tajamar
- MMA: Ministerio del Medio Ambiente de Colombia
- NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration
- PEHCO: Programa Estatal de Humedales Costeros de Oaxaca (México)
- PROFEPA: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (México)
- RAMSAR: Convención sobre los Humedales de Importancia Internacional
- SECTUR: Secretaría de Turismo (México)
- SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (México)
- ONU: Organización de las Naciones Unidas
- USGS: Servicio Geológico de Estados Unidos

1. Introducción

Los manglares, son bosques que se encuentran principalmente en las costas y aborde de los ríos (ver ilustración 1), cubriendo una superficie de 15,2 millones de hectáreas en 124 países (FAO, 2007). El entorno de estos bosques, están compuesto típicamente por arbustos y árboles que pueden alcanzar aproximadamente 30 a 40 metros de altura (NASA, (s.f.-a); FAO, 2007).

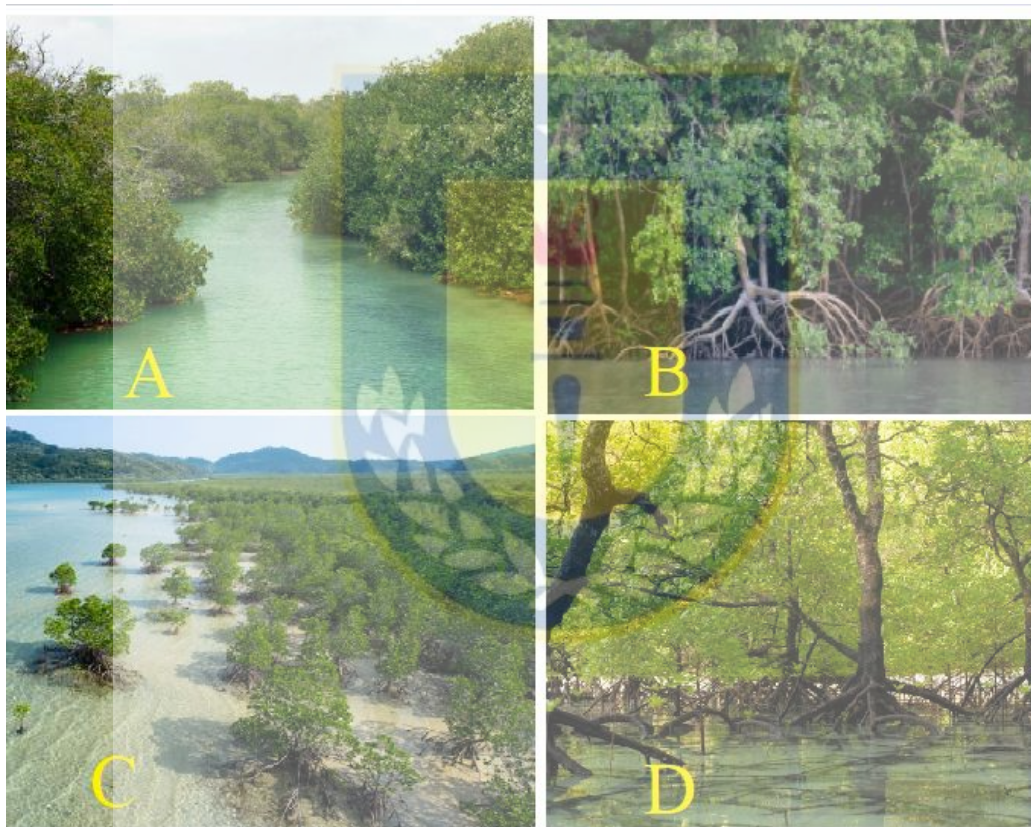


Ilustración 1: A) Manglares en la Biosfera de Sian Ka'an, Quintana Roo, México. Foto: Getty Images (s.f.-a). Crédito: Ippei Naoi. B) Bosque de manglares cerca de la Isla Romana, región del Amazonas en Abade (Estado de Pará), Brasil. Foto: Getty Images (s.f.-b). Crédito: Ricardo Lima. C) Manglares del Parque Nacional Iriomote-Ishigaki de las Islas Yaeyama, Okinawa en Japón. Foto: Getty Images (s.f.-c). Crédito: Ippei Naoi. D) Bosque de manglares en la isla de Surin, Thailand. Foto: Getty Images (s.f.-d). Crédito: Hannares.

De acuerdo con (Giri, 2016), los manglares son una de las unidades ecológicas más productivas del mundo. Su importancia se radica en que estos bosques, son parte del ecosistema de varias especies (como la tortuga de agua dulce, el cocodrilo del río, la iguana, etc.) y también proporcionan varios beneficios para la vida humana, tales como combustibles, zona de crianza de peces y mariscos, mitigación del cambio climático, alto nivel de producción de oxígeno, protección de las costas contra huracanes, ciclones y tsunamis y, mucho más (ANAM-ARAP, 2013; Erazo Álvarez y Andrea Belén, 2014; Sari y Rosalina, 2016; Giri, 2016).

Por su ubicación privilegiada y su riqueza, estos ecosistemas son muy codiciados, por lo cual están sujetos a la destrucción principalmente por las actividades humanas y también por fenómenos naturales (FAO, 2007). La destrucción del ecosistema de manglares, no solo afecta a la flora y fauna localmente, sino que también a los seres humanos, ya que estos manglares poseen alto valor ecológico, social, cultural y económico para nuestro planeta (Calderón et al., 2009; Chen et al., 2017).

México es uno de los cinco países del mundo con mayor extensión en superficie cubierta por manglares, con 5 % después de Nigeria (7%), Brasil (7%), Australia (10%) y Indonesia con 19 % (FAO, 2007). Como en muchos otros países las zonas de manglares en México han disminuido notablemente. Según los datos disponibles, se estima que en 2015 existían en México unos 775 555 de hectáreas de manglares, lo que supone una disminución con respecto a los 856 405 de hectáreas de 1981 (CONABIO, 2015).

En Cancún, esa disminución se da principalmente por la expansión urbana y construcción de infraestructuras (turísticas, comerciales y portuarias), como es el caso del proyecto turístico “Malecón Tajamar” ocurrido entre 2006 y 2016 en donde se fragmentaron aproximadamente 74 ha de manglares para la construcción de un Centro urbano-turístico (FONATUR y SECTUR, 2016; Aragón,2019).

La percepción remota es una herramienta indispensable para la cartografía de los bosques de manglares, ya que gran parte de estos ecosistemas se extienden por zonas donde el acceso es limitado e inaccesibles (Pham and Yoshino, 2015). La integración los datos de percepción remota y de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), permiten comprender la dinámica de los cambios en la cobertura de los manglares (Osuna-Osuna et al, 2015).

Es por ello, que el presente estudio tiene como objetivo cuantificar la magnitud de los cambios en la cobertura de los manglares de Cancún de los años 2005, 2016 y 2019 utilizando imágenes satelitales y analizar sus impactos en el medio ambiente.

1.1.Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Cuantificar los cambios de cobertura en la superficie de los manglares mediante imágenes satelitales desde 2005 a 2019 en la ciudad de Cancún, Quintana Roo-México.

1.1.2. Objetivos específicos

- Elaborar mapas temáticos de cobertura de suelo de los años 2005, 2016 y 2019 mediante la clasificación supervisada.
- Cuantificar la extensión de los manglares para los periodos de análisis.
- Analizar los cambios de cobertura de los periodos 2005-2016 y 2016-2019, para comprender los procesos de cambio y la dinámica en la superficie cubierta por los manglares.
- Identificar los principales factores de cambio de los manglares de Cancún entre los periodos 2005-2019 y, analizar sus efectos en el medio ambiente.

2. Marco teórico

2.1. Manglares

Los manglares son bosques característicos de las regiones tropicales y subtropicales, distribuidas globalmente (representado en color verde en la ilustración 2) en zonas costeras, estuarios protegidos y a lo largo de las orillas de los ríos y lagunas del planeta tierra (Vera Andrade, E. A. 2018; Taureau et al., 2019; Yuvaraj et al., 2014; Chen et al., 2017; FAO, 2007). Mundialmente los manglares se distribuyen en 124 países de lo que se tiene conocimiento, ocupando un área de aproximadamente 15,2 millones de hectáreas (FAO, 2007).

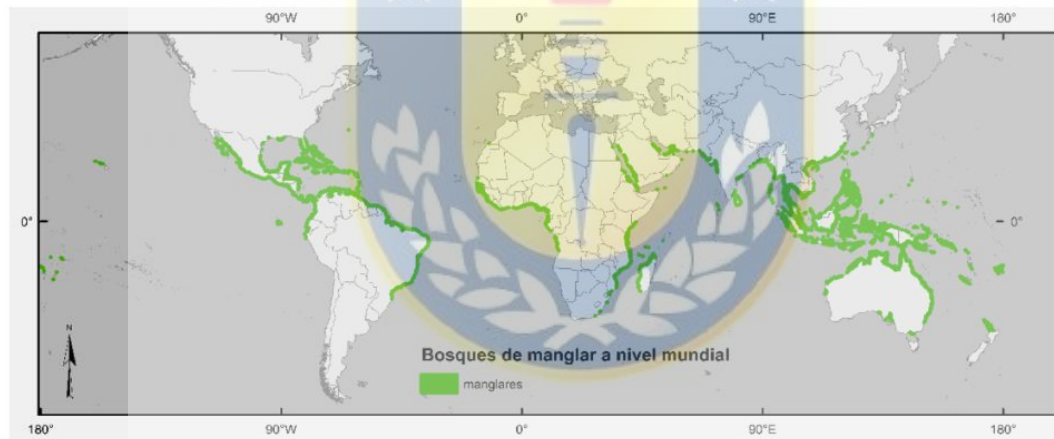


Ilustración 2: Distribución global de los manglares. Fuente: Younes. y Erazo-Mera (2019), modificado de Giri et al. (2000).

Particularmente, México tiene aproximadamente 5 % de los manglares del mundo y es el quinto país con mayor cantidad de estos recursos, cubriendo una superficie de 775 555 hectáreas en el año de 2015. Estos manglares se distribuyen a lo largo de las costas, en 17 estados del país. La mayor cobertura se encuentra en la península de Yucatán, donde se

ubica la zona de estudio (CONABIO, 2015). No obstante, estos van disminuyendo a una tasa de 1 a 2,5 % anualmente, producto de actividades antropogénica principalmente. (INE-SEMARNAT, 2005).

Pese a que México cuenta con políticas para la conservación y protección de estos ecosistemas, no obstante, se han dado situaciones que ponen en duda la importancia de estos, principalmente en Cancún donde se han realizado proyectos de infraestructuras que causaron la destrucción de los manglares, tal como el puerto de Cancún y el proyecto turístico “Malecón Tajamar” (Calderón, Aburto y Ezcurra, 2009; Pérez y Carrascal, 2000; FONATUR y SECTUR, 2016).

2.1.1. Importancia de los Manglares

Pese a que estos bosques cubren solo 0.1 % de la superficie del planeta, llegan a capturar o almacenar juntamente con sus suelos, aproximadamente 22,8 millones de toneladas métricas de carbono por año, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático, ya que ese carbono almacenado no entrará a la atmosfera, mientras existan los manglares y, además, producen alto nivel de oxígeno (Giri et al. 2011; ANAM-ARAP, 2013).

Son el hábitat de una gran diversidad de especies (aves, moluscos, reptiles) que buscan refugio y alimento y, también son zonas de crianza de mariscos (camarones) y peces, etc. Estos bosques, actúan como filtro de aguas residuales (Padilla, 2015).

Además, debido a su belleza, ubicación y biodiversidad, son un atractivo turístico y (FAO, 2007; Tovilla, 2009; ANAM-ARAP, 2013; Giri, 2016; Islam, 2017; Banco mundial, 2019).

Los manglares actúan como barrera natural, que protege principalmente las zonas costeras de fenómenos naturales, tales como los huracanes, tsunamis, ciclones, inundaciones y erosiones (FAO, 2007; Giri, 2016). Esto se refleja en un estudio realizado por Losada et al (2018), sobre los beneficios sociales y económicos de la protección costera que proporcionan los manglares, en lo cual señalan que estos ecosistemas disminuyen la exposición a las inundaciones y a la erosión de las costas (ver ilustración 3).

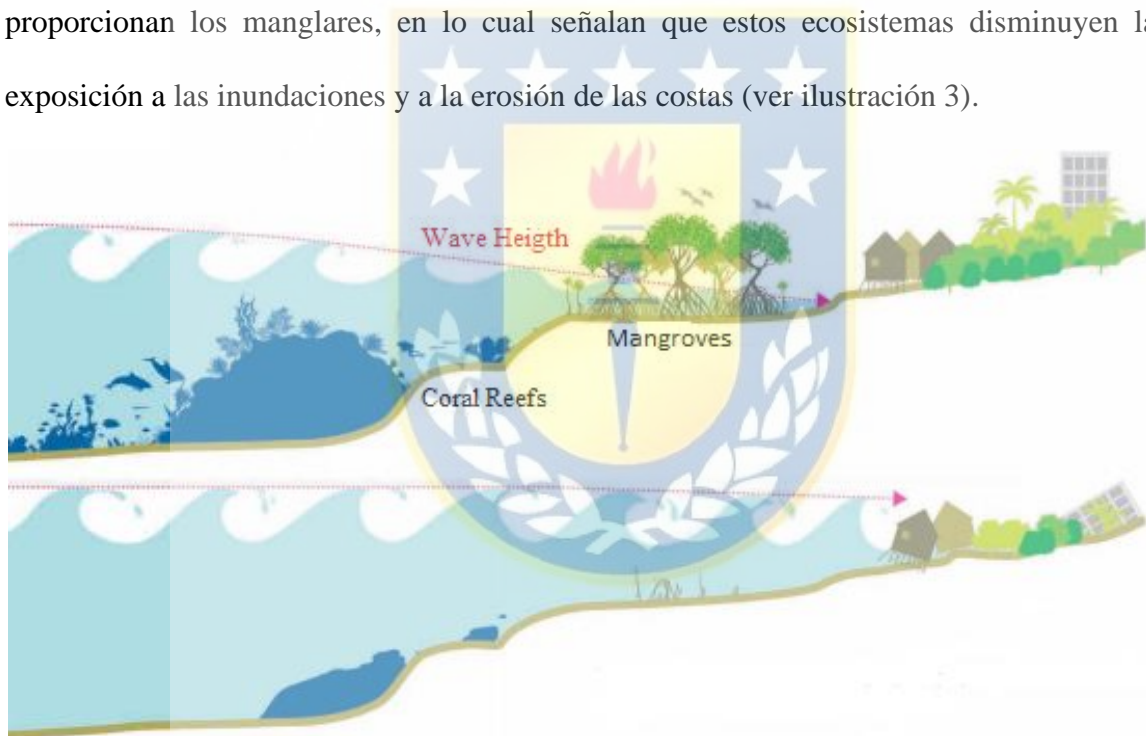


Ilustración 3: Actuación de los manglares como protección natural. Fuente: Losada et al (2018).

De modo a resaltar los beneficios de estos ecosistemas, Losada et al (2018), realizaron otro estudio sobre los efectos importantes de la presencia de los manglares en más de 115 países y 700 000 kilómetros de zonas costeras, con el apoyo de la Iniciativa Internacional para el Clima de Alemania (IKI). Sus resultados señalan que:

- Sin los manglares, 18 millones más de personas en el mundo sufrirían los impactos de las inundaciones anualmente.
- Sin la protección natural que ofrecen los bosques de manglares, los daños a la propiedad costarían 82.000 millones de dólares más.
- Actualmente, solo Vietnam, China, Filipinas, Estados Unidos y México ahorran 57.000 millones de dólares en daños a la propiedad residencial e industrial gracias a la función de protección que ofrecen los manglares que tienen en sus territorios.
- Si los manglares desaparecieran, un 32% más de personas se verían afectadas por las inundaciones una vez cada 10 años y un 16% más de personas se verían afectadas una vez cada 100 años.

De forma resumida, se puede observar en la ilustración 4, el diagrama conceptual que muestra las importantes funciones ecológicas que proporcionan los manglares.

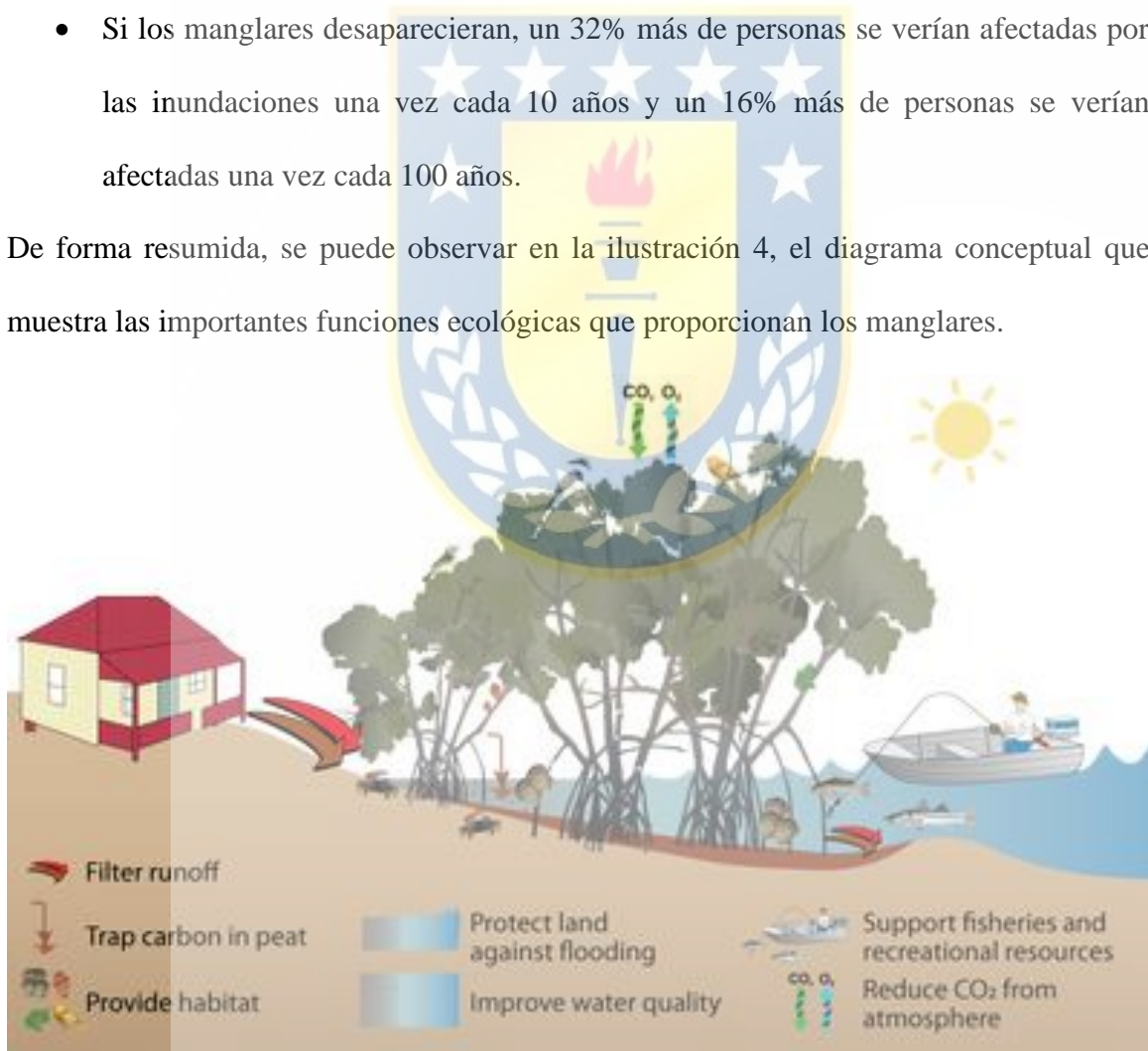
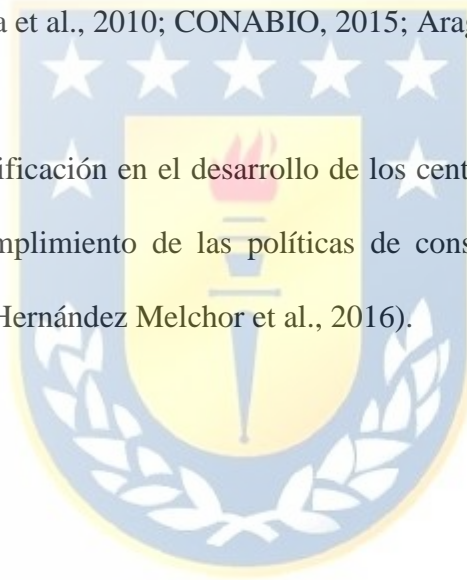


Ilustración 4: Funciones ecológicas de los manglares. Fuente: Red de Integración y Aplicación, Centro de Ciencias Ambientales de la Universidad de Maryland. Elaborado por Kris Beckert (2012).

2.1.2. Amenazas a los ecosistemas de Manglares

Los manglares se encuentran entre los más amenazados del planeta (Calderón et al., 2009; Chen et al., 2017). La disminución de estos bosques, puede darse por factores como la erosión y sedimentación, tsunamis, huracanes, entre otros fenómenos naturales. Por ejemplo, el huracán Rosa (1994) en México que afectó un área considerable de estos ecosistemas (Tovilla y Orihuela, 2004). Pero la principal amenaza es por las actividades antrópicas, como construcción de carretera, puertos, proyectos turísticos (Pérez-Villegas y Carrascal, 2000; Hiraes-Cota et al., 2010; CONABIO, 2015; Aragón, 2018).

Además, por la falta de planificación en el desarrollo de los centros poblados de la zona costera, por faltas o no cumplimiento de las políticas de conservación, controversias legislativas (PEHCO, 2012, Hernández Melchor et al., 2016).



2.2. Marco legal

Debido a la importancia de los manglares y de que a su vez, estos han experimentado una disminución acelerada a lo largo de los años, varios países se comprometen a buscar formas que permitan hacer un uso sostenible de estos ecosistemas (Ramsar, 2015; PEHCO, 2012). Entre las convenciones y leyes que ayudan a proteger y a regular estos ecosistemas, se destacan las siguientes:

2.2.1. Convención Ramsar

El 2 de febrero de 1971, en la ciudad Ramsar, Irán se firmó el tratado mundial de “La Convención Relativa a los Humedales, de Importancia Internacional”, comúnmente conocido como “Convención Ramsar” con la finalidad de; *“Conservar y usar racionalmente todos los humedales, mediante acciones locales, regionales, nacionales e internacionales que contribuyan al logro de un desarrollo sostenible en todo el mundo”*(Ramsar, 2015; PEHCO, 2012).

La designación de un “sitio Ramsar”, es de responsabilidad de la Autoridad Administrativa nacional de cada país, y actualmente hay 171 Partes Contratantes en la Convención y 2 413 humedales registrados en Ramsar, ocupando una superficie total de 254 534 395 hectáreas (Ramsar, 2015; s.f.-a, en prensa).

2.2.2. Legislaciones en México

En México, la responsabilidad de promover la conservación y el buen manejo de los humedales, es de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), el cual se coordina con gobiernos y actores locales (Sustentable, 2012). México hace parte de “La

Convención Ramsar” desde 4 de noviembre de 1986 y cuenta con 142 “sitios Ramsar” que cubren un área de 8 657 057 hectáreas (Ramsar, s.f.-b; PEHCO, 2012).

Ademas de hacer parte de “La Convención Ramsar”, México cuenta con algunas normas y leyes que permiten conservar a los manglares tales como: la NORMA Oficial Mexicana NOM-022-SEMARNAT-2003 “Que establece las especificaciones para la preservación, conservación, aprovechamiento sustentable y restauración de los humedales costeros en zonas de manglar”; la NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 que permite la “Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo”; la Ley General De Vida Silvestre (DOF 1 de febrero de 2007), que en su Artículo 60 TER, frisa que “ Queda prohibida la remoción, relleno, trasplante, poda, o cualquier obra o actividad que afecte la integridad del flujo hidrológico del manglar; del ecosistema y su zona de influencia; de su productividad natural; de la capacidad de carga natural del ecosistema para los proyectos turísticos; de las zonas de anidación, reproducción, refugio, alimentación y alevinaje; o bien de las interacciones entre el manglar, los ríos, la duna, la zona marítima adyacente y los corales, o que provoque cambios en las características y servicios ecológicos. Se exceptuarán de la prohibición a que se refiere el párrafo anterior las obras o actividades que tengan por objeto proteger, restaurar, investigar o conservar las áreas de manglar”.

2.3. Percepción Remota

La percepción remota se puede definir como la ciencia que consiste en obtener información a distancia sobre objetos o superficies desde sensores incorporados en plataformas tales como satélites o aviones (NOAA, s.f.). Para que esta observación sea posible, es necesario que exista algún tipo de interacción energética entre el sensor y el objeto; el sensor detecta y registra el flujo de energía que es reflejada y emitida por el objeto (Chuvienco, 1995).

El registro del dicho flujo energético se da en distintas longitudes de ondas o frecuencias del espectro electromagnético, establecidas en una serie de bandas, como se muestra en la ilustración 5.



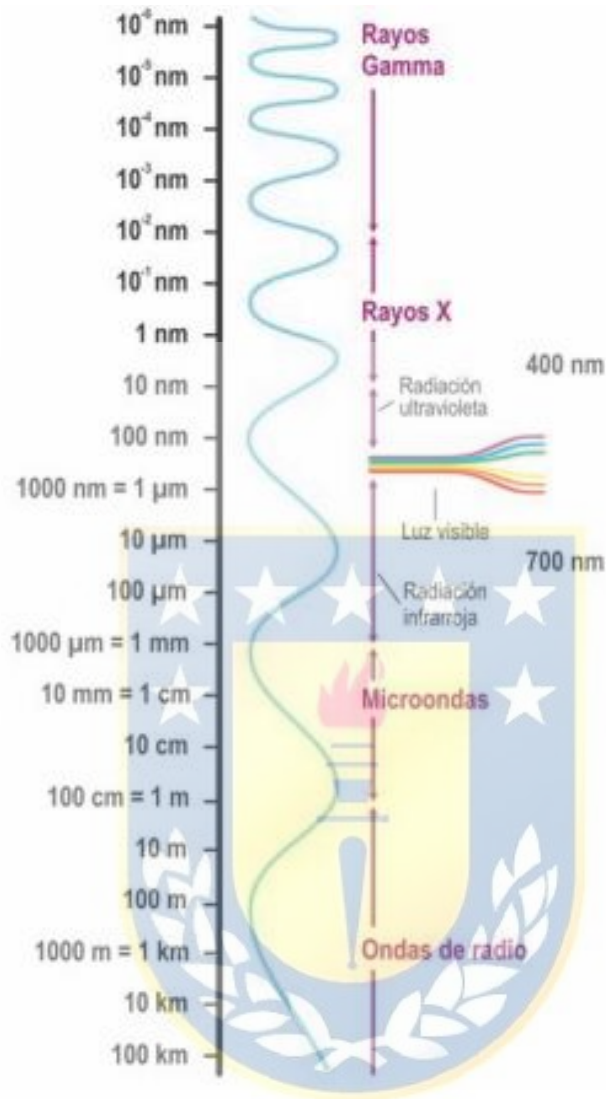


Ilustración 5: Espectro electromagnético. Fuente: Labrador, Évora, y Arbelo, 2012.

En la percepción remota, la resolución (de los datos o imágenes) y la aplicación de interés son fundamental al elegir el tipo de sensor a utilizar (NASA (s.f.-a); Rodríguez Zúñiga et al., 2018) y, según Chuvieco (1995), hay que considerar al menos las resoluciones siguientes:

- **Resolución espectral:** Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor.

- **Resolución espacial:** se refiere al objeto más pequeño que se puede distinguir en la imagen.
- **Resolución temporal:** se refiere a la periodicidad con las imágenes son adquiridas de la misma porción de la superficie terrestre.
- **Resolución radiométrica:** describe la sensibilidad del sensor, es decir, indica la cantidad de niveles digitales en la que es posible almacenar los datos.

Los datos de los sensores remotos se utilizan para muchas aplicaciones, incluyendo para el estudio (monitoreo, cuantificación, mapeo, etc.) de los manglares. Por ejemplo, SILVA, J. B. D (2012) usó imágenes TM de Landsat para el análisis espacio-temporal de la vegetación de los manglares de Pernambuco de 1987-2010. Islam, M. M., et al. (2019) usaron las imágenes satelitales para el monitoreo de los cambios de cobertura en la cubierta forestal de los manglares en la costa de Bangladesh de 1976 a 2015. Majumdar et al. (2019) analizaron los efectos del tsunami sobre el ecosistema de manglares de Mayabunder en la India. Yuvaraj et al. (2014) evaluaron la densidad de vegetación del bosque de manglar en la isla South Andaman utilizando técnicas de teledetección y SIG. Sari y Rosalina. (2016) mapearon y monitorearon los cambios de densidad de los manglares en la zona de minería de estaño. Rahman et al. (2013) realizaron una comparación de los métodos de clasificación de imágenes Landsat para detectar los bosques de manglares en Sundarbans.

2.4. Imágenes Landsat

Entre los productos ofrecido por el programa Landsat, se encuentran las series Landsat 7 y Landsat 8 que son unos de los sensores más utilizados que proporcionan, además de una resolución espacial (con los detalles necesarios para el análisis de fenómenos como el retratado en este proyecto), una resolución temporal (16 días) que permite hacer análisis de series de tiempo, así como la facilidad para la adquisición, sin costo monetario de las imágenes (Giri, 2016; Rodríguez Zúñiga et al., 2018).

2.4.1. Landsat 7

El Landsat 7 lleva incorporado el sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), que es una versión mejorada del sensor Thematic Mapper (TM) a bordo del Landsat 5 (USGS, s. f.-a). Una imagen de Landsat 7 está compuesta por 8 bandas (ver tabla 1), cuyas combinaciones permiten distinguir los manglares de otras coberturas (categoría). Por ejemplo, al combinar las bandas 432 (ver ilustración 6), los manglares se destacan presentando un tono rojo oscuro (en algunas partes presentan un color marrón rojizo), debido la reflexión de los objetos de vegetación de la banda infrarrojo cercano (Maia et al, 2005; Julzarika et al, 2019).

Tabla 1: Características del sensor ETM+ Landsat 7. Fuente: NASA.

Band Number	Band Name	Resolution (m)	Wavelength (μm)
1	Blue	30	0.450 – 0.515
2	Green	30	0.525 – 0.605
3	Red	30	0.630 – 0.690
4	Near Infrared (NIR)	30	0.775 – 0.900
5	Short Wavelength Infrared (SWIR 1)	30	1.550 – 1.750
6	Thermal	60	10.000 – 12.500
7	Short Wavelength Infrared (SWIR 2)	30	2.090 – 2.350
8	Panchromatic	15	0.520 – 0.900

2.4.2. Landsat 8

El Landsat 8 lleva incorporado dos instrumentos, el Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS). El sensor OLI, recoge datos con resolución espacial de 30 metros para las bandas multiespectral y de 15 metros para la pancromática, cubriendo amplias áreas de la superficie terrestre y proporciona detalles suficientes para la distinción de varias coberturas (NASA, s. f.-a).

Las 11 bandas (ver tabla 2), que componen una imagen de Landsat 8, permiten discriminar los manglares de otras coberturas (Homer, 2015; Julzarika et al, 2019). Por ejemplo, combinando las bandas 5-6-7, los manglares presentan un tono anaranjado más llamativo en comparación con otra vegetación (ver ilustración 6), pues el valor de la respuesta

espectral de los manglares en el infrarrojo cercano (NIR) es menor en comparación con otra vegetación (Homer, 2015).

Tabla 2: Características de los sensores OLI y TIRS Landsat 8. Fuente: NASA.

Band Number	Band Name	Resolution (m)	Wavelength (μm)
1	Coastal/Aerosol	30	0.433 – 0.453
2	Blue	30	0.450 – 0.515
3	Green	30	0.525 – 0.600
4	Red	30	0.630 – 0.680
5	Near Infrared (NIR)	30	0.845 – 0.885
6	Short Wavelength Infrared (SWIR 1)	30	1.560 – 1.660
7	Short Wavelength Infrared (SWIR 2)	30	2.100 – 2.300
8	Panchromatic	15	0.5000 – 0.680
9	Cirrus (SWIR)	30	1.360 – 1.390
10	Thermal infrared (TIRS 1)	100	10.600 – 11.200
11	Thermal infrared (TIRS 2)	100	11.500 – 12.500

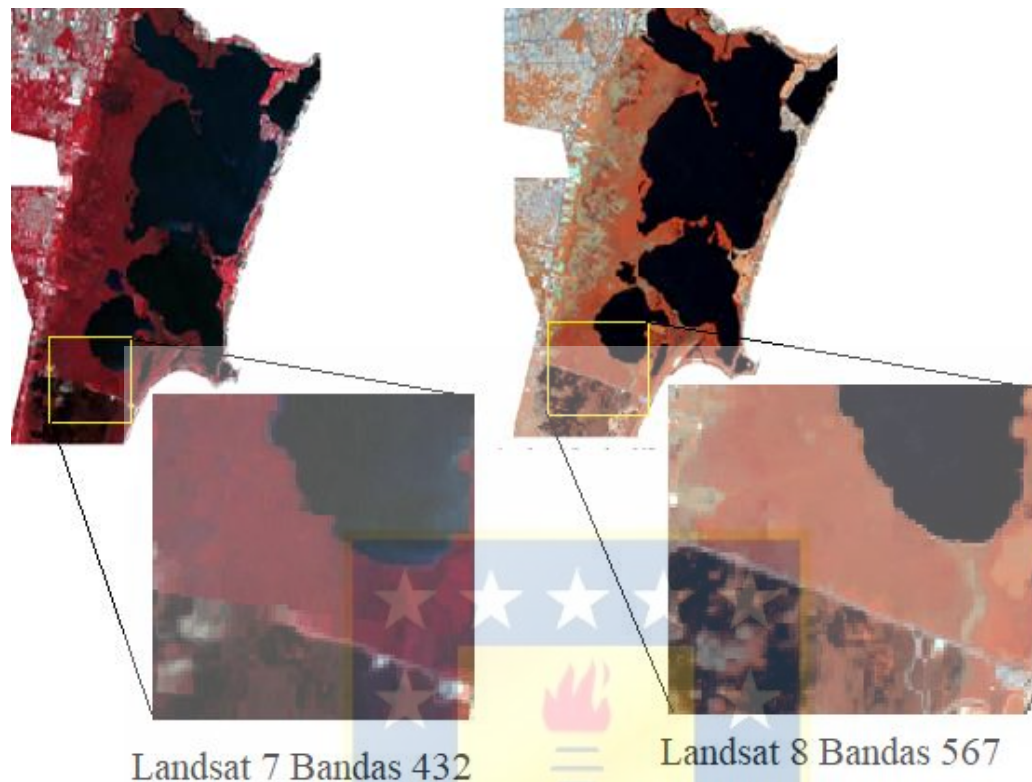


Ilustración 6: Caracterización de los bosques de manglares a partir de diferentes combinaciones de bandas.

2.5. Tratamiento de imágenes satelitales

Para extraer información en una imagen, comúnmente es necesario la realización de algunos procesos tales como el preprocesamiento que corresponde a la etapa *correcciones* y procesamiento en donde se aplica los *métodos de clasificación*.

2.5.1. Correcciones

Existen varios factores que alteran geométrica y radiométricamente las imágenes adquiridas por los sensores remotos, por lo cual se hace necesario la aplicación de procesos

para eliminar o disminuir las anomalías presentes en las imágenes (Chuvieco, 1995; Soca, 2017). Algunos de estos procesos de correcciones se describen a continuación:

- **Correcciones radiométricas**

De acuerdo a Chuvieco (1995), hablar de correcciones radiométricas es una forma genérica de referirse aquellas técnicas que engloban algunos conceptos como: corrección de bandeo de una imagen, derivado del mal calibrado entre los detectores que forman el sensor (como es el caso de los sensores MSS Y TM de la serie Landsat); conversión de números digitales a parámetros físicos (radiancia y reflectividad), que permite realizar con vigor el ratio entre las bandas; corrección atmosférica debido a que la radiación o energía electromagnética que capta un sensor, se ve afectada por distintos componentes presentes en la atmosfera.

- **Correcciones geométricas**

Este proceso, se refiere a los cambios en la posición que ocupan los pixeles en una imagen, es decir, los desplazamientos geométricos presentes en una imagen debido a factores como la rotación de la tierra, inclinación de la orbita, la posición del sensor en el momento de la toma de una imagen (Chuvieco, 1995; Lora López, 2016).

2.5.2. Clasificación digital

La clasificación es un proceso que permite agrupar mediante estadísticos, los pixeles de una imagen en grupos (con características similares), que representan los objetos del mundo real basado en sus números digitales (Meneses y Almeida, 2012). En la clasificación digital de una imagen se pueden distinguir tres fases: fase de entrenamiento

(definición de las categorías), fase de asignación (algoritmos de clasificación) y la fase de evaluación de exactitud.

2.5.2.1. Fase de entrenamiento

Corresponde a la etapa de definición de las categorías de interés que se pretenden discriminar en una imagen. Tradicionalmente se pueden distinguir dos métodos de clasificación: supervisado y no supervisado, de acuerdo a la forma que son obtenidos las estadísticas de entrenamiento (Chuvienco, 1995).

- **Clasificación supervisada**

Método en que el operador o analista participa activamente en el proceso de digitalización de las áreas de entrenamientos y generalmente se requiere de un conocimiento previo de la zona de estudio, a partir de cual se seleccionan las muestras para cada una de las categorías a discriminarse (Chuvienco, 1995; Meneses y Almeida, 2012).

- **Clasificación no supervisada**

Método en lo cual no se requiere de un conocimiento previo de la zona de estudio por lo que el proceso es prácticamente automatizado, el operador solo necesita especificar los parámetros para que el software realice el procesamiento a partir de grupos de valores homogéneos dentro de una imagen (Chuvienco, 1995; Meneses y Almeida, 2012).

2.5.2.2. Fase de asignación

Corresponde a los algoritmos de clasificación que permiten establecer las fronteras estadísticas entre las categorías seleccionadas, de los cuales el comúnmente utilizado

corresponde al de *máxima verosimilitud* por su robustez y por ajustarse con más rigor a la disposición original de los datos (Chuvieco, 1995).

Este algoritmo considera que los números digital de cada categoría se ajustan a una distribución normal y calcula la probabilidad de que un determinado píxel pertenezca a una categoría específica (Meneses y Almeida, 2012).

2.5.2.3. Fase de evaluación de exactitud

Debido a que cualquier clasificación tiene un margen de error, es fundamental aplicar un procedimiento de verificación, que permita cuantificar ese error, a través de lo cual se puede valorar la calidad final del trabajo (Chuvieco, 1995; Borràs et al., 2017).

Uno de los procedimientos para la validación de la exactitud consiste en la selección, con posterioridad a la clasificación, de una serie de *muestras de test* que sean representativas para cada categoría utilizada en la clasificación, por lo cual, se puede generar una tabla o matriz de confusión entre los valores de las muestras de entrenamientos (resultante de la clasificación) y de test (Chuvieco, 1995). De esa matriz, se derivan estadísticos como; la fiabilidad global, que relaciona los elementos de la diagonal con el total puntos o píxeles muestreados; la índice kappa, que refleja el grado de concordancia de las observaciones (Chuvieco, 1995; Borràs et al., 2017).

La índice kappa toma valores desde -1 a 1, los valores que se acercan a 1, tienen mayor grado de concordancia y los que se acercan a -1, presentan menor grado de confianza, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3: Grado de confianza del índice kappa. Fuente: Landis y Koch (1977)

Indice kappa	Grado de confianza
0,00	Pobre
0,00 – 0,20	Leve
0,21 – 0,40	Aceptable
0,41 – 0,60	Moderada
0,61 – 0,61	Considerable
0,81 – 1,00	Casi perfecta



3. Metodología

3.1. Datos de referencias

Como información de referencia para la validación de los resultados de este proyecto, se obtuvieron polígonos de los manglares de la zona de estudio, extraídos de los shapfiles del “Mapa de uso de suelo y vegetación de la zona costera asociada a los manglares, Región Península de Yucatán (1981, 2005 y 2015)” en el portal de Geoinformación que es el resultado de los programas llevado a cabo por CONABIO, con la colaboración de varias instituciones públicas y privadas y de varios especialistas (CONABIO, 2007).

Este programa denominado “Proyecto *GQ004 (Los manglares de México: estado actual y establecimiento de un programa de monitoreo a largo plazo)*”, tuvo la primera etapa entre 2006 -2007 (en 2009 se publicó los resultados mejorados), la segunda y tercera etapa, tuvo inicio en 2008 y terminó en 2013, obteniendo como resultado principal; Base de Datos, Cartografía, Fotografías e Informe (que se puede encontrar en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>). Y posteriormente se hizo para el 2015, y se espera que se haga el monitoreo a cada 5 años (CONABIO, 2007).

Para la realización del programa, se contaron con 134 imágenes SPOT (10 m) y se utilizaron algunas imágenes Landsat 7 (30m), solamente para cubrir 0,1 % de las áreas que no cubrían las imágenes SPOT. Estas imágenes fueron rectificadas geográficamente, tomando como base las ortofotos digitales del INEGI, y corregidas radiométricamente (CONABIO, 2007). En cada una de las imágenes SPOT se determinaron al menos 20 Puntos de Control, con el apoyo de las ortofotos del INEGI. Se aplicó una máscara de elevación considerando el Modelo Digital de Terreno (MDT) del INEGI (resolución

espacial de 30 m), para eliminar las áreas con altitud mayor a 50 m, considerando que los manglares se distribuyen en zonas costeras planas (CONABIO, 2007). Las características de las ortofotos son las siguientes:

- Resolución espacial de 1.5 y 2 m
- Formato *.bil
- Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) c
- Datum ITRF92
- Elipsoide GRS 80

Los resultados se obtuvieron mediante dos métodos: clasificación no supervisada con el algoritmo ISODATA; clasificación supervisada y jerárquica con base en objetos y píxeles. Todos los análisis se hicieron utilizando ERDAS Imagine 9.1. Para generar la cartografía a escala 1:50 000, se consideró la escala mínima cartografiable 1 hectárea (CONABIO, 2007).

La extensión estimada de manglares en México para el 2005 fue de 683 881 hectáreas en la primera etapa (2006 a 2007) posteriormente actualizado a 774 134 hectáreas (CONABIO, 2013). La exactitud del mapa resultante se evaluó mediante recorridos de campo a través de vuelos bajos en helicópteros de la SEMAR. Las precisiones obtenidas para el resultado de 2005 son: Exactitud general (90,5 %), Índice Kappa (0,81 %), Error de producción (< 12,4 %) y Error de Comisión (< 7,2 %), (CONABIO, 2009).

3.2. Área de estudio

El área de estudio (como se muestra en el *polígono rojo* de la ilustración 7), está ubicado en el municipio Benito Juárez (Cancún) del estado de Quintana Roo, México, entre las coordenadas aproximadas de 21° 11' y 20° 59' de latitud norte y 86° 48' y 86° 51' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 930 km². Se encuentra a una altitud aproximada de 10 metros sobre el nivel del mar, presenta un clima cálido subhúmedo con una temperatura media anual de 26°C y precipitación media anual de 1300 mm (INEGI, 2016). El municipio colinda al sur con Puerto Morelos, al norte con Isla Mujeres, al oeste con Puerto Morelos y Lázaro Cárdenas y al este con el Mar Caribe, es el municipio más poblado del estado, con 743 626 de habitantes según los datos de INEGI para 2015, (INEGI, 2015, 2016, en prensa).

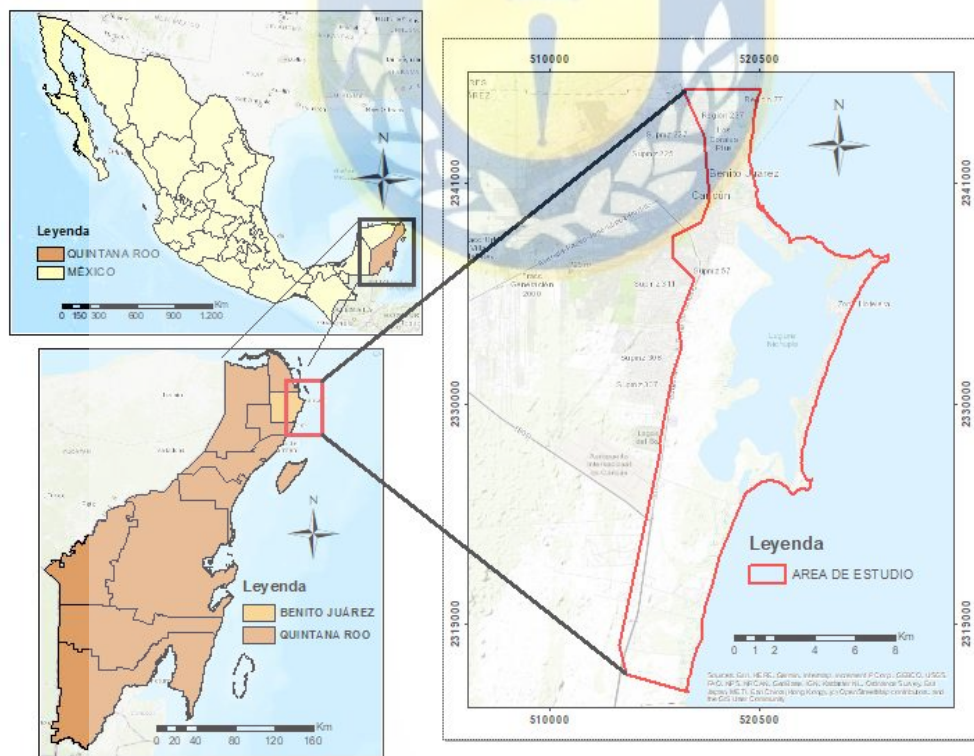


Ilustración 7: Localización de la zona de estudio (*polígono rojo*). Elaboración propia. Fuente: CONABIO (2015).

Según Calderón y Orozco (2009), el municipio Benito Juárez cuya cabecera es la ciudad de Cancún, presenta un crecimiento urbano desordenado producto del crecimiento poblacional (ver ilustración 8), generando un cambio cobertura de suelo, por los cuales las demás coberturas como los manglares, van cediendo espacio a la expansión urbana y desarrollo turístico (Pérez y Carrascal, 2000).

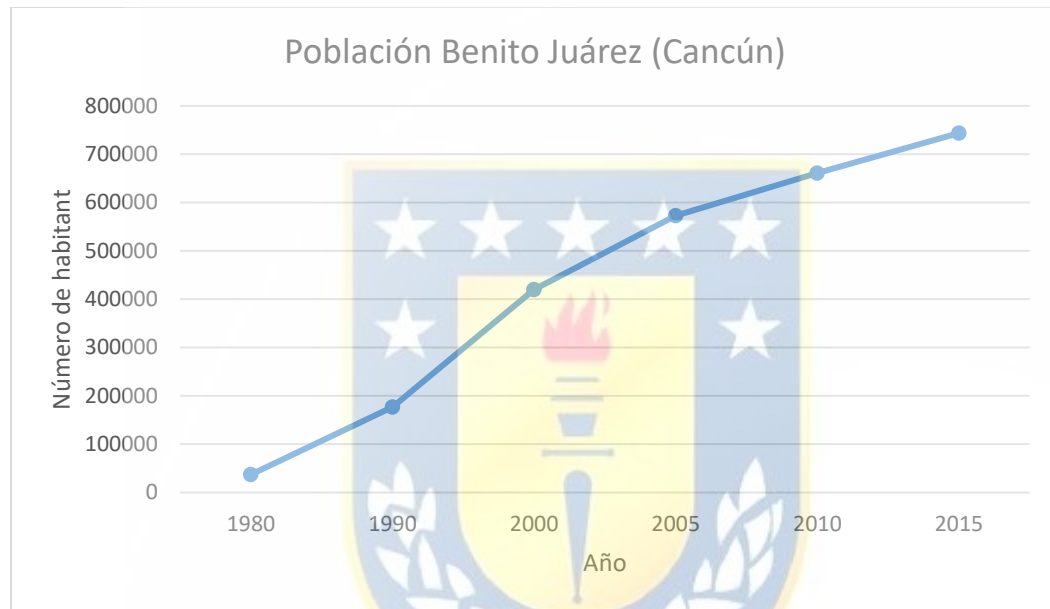


Ilustración 8: Crecimiento de la población del municipio de Benito Juárez, Quintana Roo. Fuente: INEGI.

Además de las actividades antropogénicas que modifican la cobertura de suelo, el municipio, por su ubicación, está vulnerable a los impactos de fenómenos naturales como huracanes, lo cual, ya se han registrado dos huracanes que impactaron la zona; el huracán Gilberto en 1988 y Wilma en 2005, como mencionan Maya y Ferrusca (2014).

Cabe destacar que el turismo es la principal actividad económica del municipio y, a pesar que tiene aproximadamente 5 década de su fundación, este se ha convertido en un destino

turístico nacional e internacional, con sus centros turísticos y hoteles principalmente en la franja costera, alterando el medio ambiente y, potencializando el crecimiento urbano y poblacional de la ciudad (Calderón y Orozco, 2009; Vargas et ál. 2013; Padilla, 2015).

3.3. Selección y adquisición de las imágenes

En este proyecto, tres imágenes de la serie Landsat (ver tabla 4) fueron adquiridas del sitio Web de la *United States Geological Survey* (USGS). Estas imágenes corresponden al año: 2005, considerado el año base antes de la deforestación de manglares producto de un proyecto turístico que tuvo inicio al principio de 2006 en la zona de estudio; 2016, fue el año que se dio el fin el respectivo proyecto; 2019 para observar la evolución de estos ecosistemas posterior al periodo de deforestación. Se eligieron aquellas imágenes con la menor presencia de nubes en la zona de estudio.

Tabla 4: Tipo de Sensor y fechas de adquisición de las imágenes para el estudio.

Sensor	Date	Path/ Row
Landsat 7 EMT+	22/11/2005	18/45
Landsat 8 OLI_TIRS	17/03/2016	18/45
Landsat 8 OLI_TIRS	11/03/2019	18/45

3.4. Preprocesamiento de imágenes

En esta etapa, se llevó a cabo el proceso de corrección para mejorar la calidad de las imágenes satelitales para posterior clasificación.

3.4.1. Corrección de Bando

Dado que las imágenes de Landsat 7 vienen con error de bando (gap fill; líneas paralelas en las imágenes que, presentan pérdidas de informaciones, para el análisis de las mismas), debido a la falla en el SLC a bordo del satélite, fue necesario corregir la imagen para recuperar la información. Para lo cual se empleó el comando Fix Landsat 7 Scanline Errors (Daniels, 2012), en ArcGIS “*Landsat Toolbox > Fix Landsat 7 Scanline Errors*”.

3.4.2. Corrección radiométrica

La conversión de los Números digitales (DNs), a valores de radiancia (Chander et al., 2009), para las todas las bandas, se realizó empleando la fórmula siguiente:

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{CALMAX} - Q_{CALMIN}} \right) * (Q_{CAL} - Q_{CALMIN}) + LMIN_{\lambda}$$

Donde:

L_{λ} = Radiancia espectral en la apertura del sensor [W/(m² sr μm)]

$LMAX_{\lambda}$ = Radiancia espectral del sensor que se escala a Q_{CALMAX} [W/(m² sr μm)]

$LMIN_{\lambda}$ = Radiancia espectral del sensor que se escala a Q_{CALMIN} [W/(m² sr μm)]

Q_{CAL} = Valor de píxeles calibrados cuantificados [DN]

Q_{CALMAX} = Valor máximo de píxeles calibrados cuantificados correspondiente a $LMIN_{\lambda}$ [DN]

Q_{CALMIN} = Valor mínimo de píxeles calibrados cuantificados correspondiente a $LMIN_{\lambda}$
[DN]

3.4.3. Corrección Atmosférica

Se convirtieron los valores de radiancia a reflectancia TOA (Chander et al., 2009), a partir de la siguiente fórmula:

$$\rho_{\lambda} = \left(\frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{ESUN_{\lambda} * \cos\theta_s} \right)$$

Donde:

ρ_{λ} = Reflectancia atmosférica

π = Constante matemática cuyo valor aproximado es 3.14159.

L_{λ} = Radiancia espectral en la apertura del sensor [W/(m² sr μ m)]

d = Distancia entre el sol y la tierra en unidades astronómicas (AU).

$ESUN_{\lambda}$ = Irradiancia solar exoatmosférica media [W/(m² μ m)]

θ_s = Ángulo solar sobre el zenit en grados sexagesimales

3.4.4. Corrección atmosférica modelo FLAASH

Para la corrección atmosférica de las imágenes Landsat 8, se aplicó el modelo FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes), que viene incorporado en el software utilizado para la corrección (ENVI 5.3). FLAASH es “una herramienta de modelado de corrección atmosférica de primer orden para recuperar la reflectancia espectral de las imágenes de radiación hiperespectral” (ITT Visual Information Solutions,

2009, p.251). Según (Soca, 2017), este modelo corrige las longitudes de onda en los rangos del espectro visible, infrarrojo cercano y en el infrarrojo medio hasta los 3 μm .

3.5. Procesamiento de Imágenes

3.5.1. Definición de las categorías

La definición de las categorías de análisis utilizadas en la clasificación se determinó, en función de las posibilidades de discriminación que tiene el productor, respecto de las coberturas, durante el proceso de interpretación de las imágenes y por la problemática a estudiar: identificación de los cambios en la cobertura de los manglares, resultado de la sustitución de otras coberturas. Estas categorías o clases de análisis corresponden a: 1) manglares; 2) cuerpos de agua; 3) otra vegetación (todo tipo de vegetación que no sea manglares; 4) urbano y suelo (asentamientos urbanos y suelos desnudo).

3.5.2. Clasificación Supervisada

La clasificación supervisada se hizo mediante el software Envi 5.3. Para lo cual se, digitalizaron las áreas de entrenamientos las correspondientes categorías, usando la combinación de bandas (4-3-2 para la imagen de 2005 y 5-6-7 para las imágenes de 2016 y 2019), ver ilustración 6. Enseguida se aplicó el algoritmo de *Maximum Likelihood*, obteniendo como resultado, una imagen digital con pixeles clasificados representado en polígonos homogéneos para cada variable considerada. Y a cada imagen resultante, se aplicó

un filtro (Majority filter), para mejorar el resultado de la clasificación, resultando así en los mapas de cobertura para los respectivos años.

3.5.3. Evaluación de exactitud

Con la finalidad de conocer la exactitud de los resultados obtenidos en la clasificación, se obtuvo la matriz de confusión, teniendo como datos de entradas las muestras de entrenamiento (clasificación) y de control (test). Para ello, se digitalizaron las muestras de test, ocupando las respectivas imágenes y apoyándose en los datos de referencia de CONABIO, seleccionando aquellas áreas con mayor grado de probabilidad de pertenecer a las respectivas muestras. En la ilustración 9 se muestra el esquema para obtener la matriz de confusión.

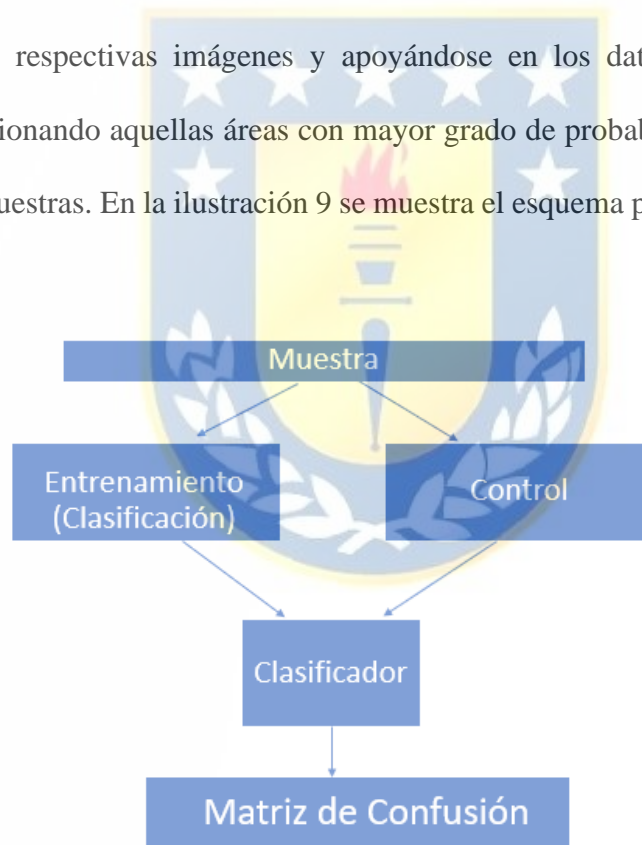


Ilustración 9: Esquema para generar la matriz de confusión.

3.6. Detección de cambios

Para la determinación de los cambios temporales, se construyó una matriz cruzada o de cambio (ver tabla 5), que proporciona las transiciones producidas entre los periodos de estudios (2005-2016, 2016-2019), donde los valores de la diagonal indican las categorías sin cambios y los demás valores indican las clases con cambios (Chuvieco,1998). La matriz se generó en el software *ArcGIS*, con la herramienta *intersect*, a partir las imágenes clasificadas en donde para cada imagen se agregó un nuevo campo asignándoles valores de 1-4 y de 10-40.

Tabla 5: Matriz de cambio.

Matriz de Cambio			Año 2			
			Manglares	Cuerpos de agua	Otra vegetación	Urbano /suelo
			1	2	3	4
Año 1	Manglares	10	11	12	13	14
	Cuerpos de agua	20	21	22	23	24
	Otra vegetación	30	31	32	33	34
	Urbano /Suelo	40	41	42	43	44

4. Resultados

4.1. Mapas de cobertura

En las ilustraciones 10, 11 y 12 se pueden observar los mapas resultantes de la clasificación correspondientes a los años 2005, 2016 y 2019 (para más detalles ver anexos 1, 2 y 3), cuyas superficies en hectáreas se muestran en la tabla 6, para las respectivas coberturas.

Las variaciones en superficie de los manglares se indican en la tabla 7.

Tabla 6: Extensión de las categorías en hectáreas de 2005, 2016 y 2019.

Año	2005 (ha)	2016 (ha)	2019 (ha)
Categoría			
Manglar	4871	3996	4079
Otra Vegetación	1718	1220	1230
Cuerpos de Agua	4943	4518	4550
Urbano/Suelo	4298	6120	5991
Total	15830	15854	15850

Tabla 7: Variaciones en la superficie de los manglares.

Año	2016-2005		2019-2016	
	ha	%	ha	%
Manglar	-875	17,9	+83	2,08

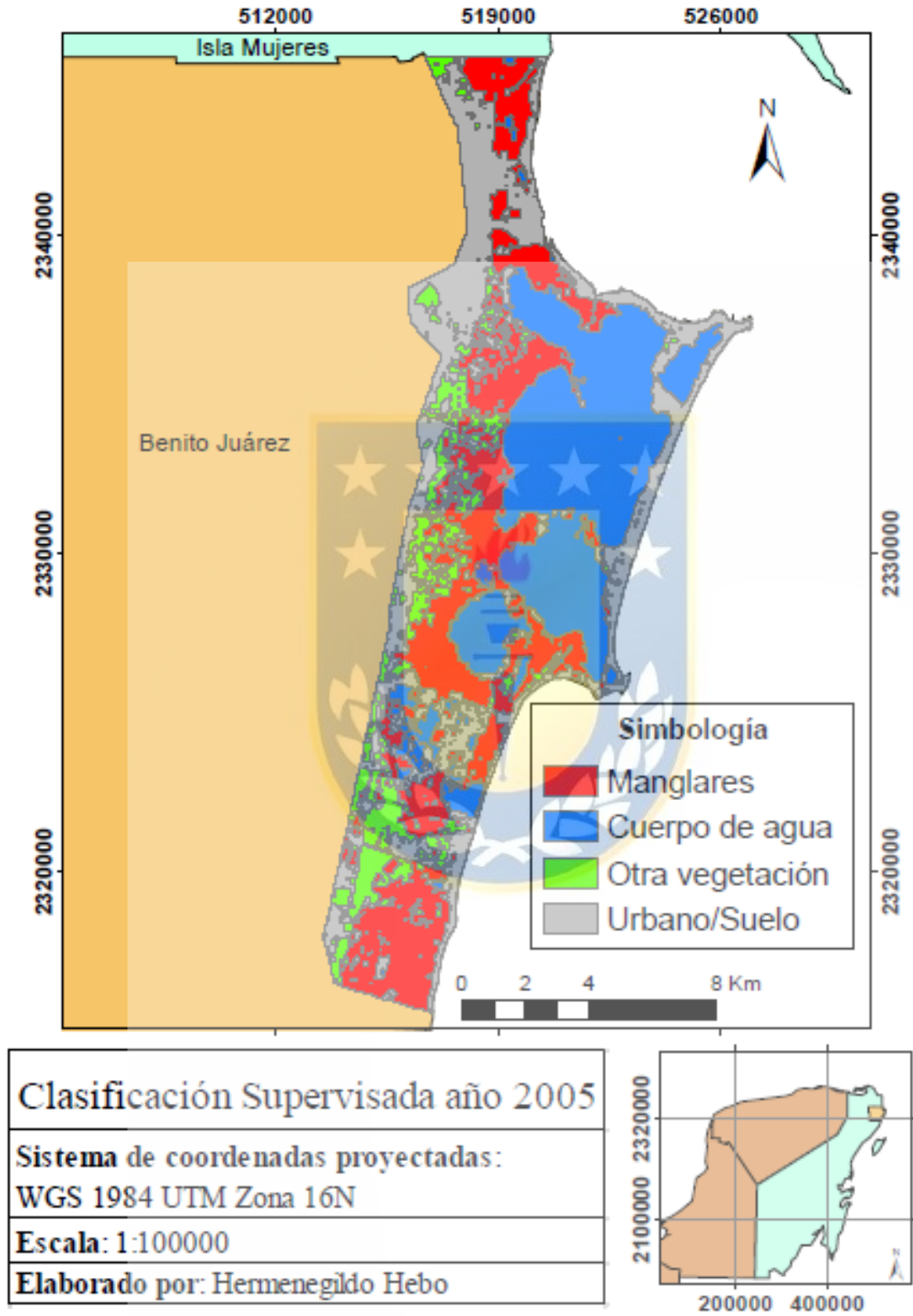
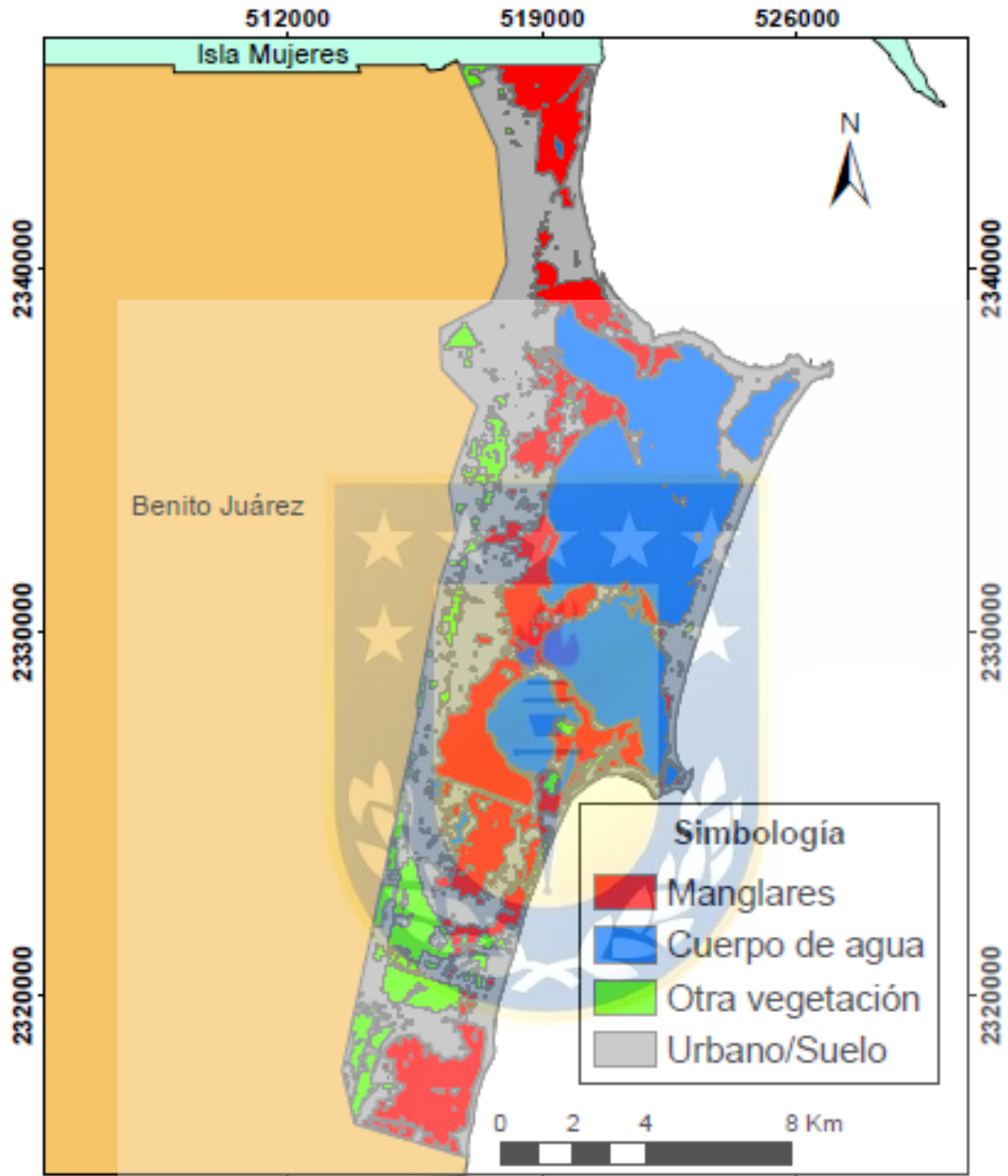


Ilustración 10: Distribución de los manglares de Cancún para el año 2005.



Clasificación Supervisada año 2016
Sistema de coordenadas proyectadas: WGS 1984 UTM Zona 16N
Escala: 1:100000
Elaborado por: Hermenegildo Hebo

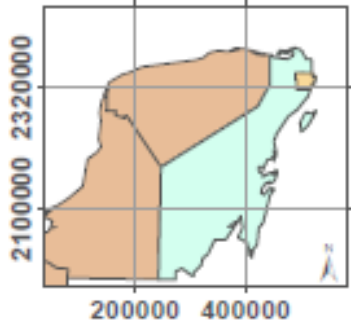
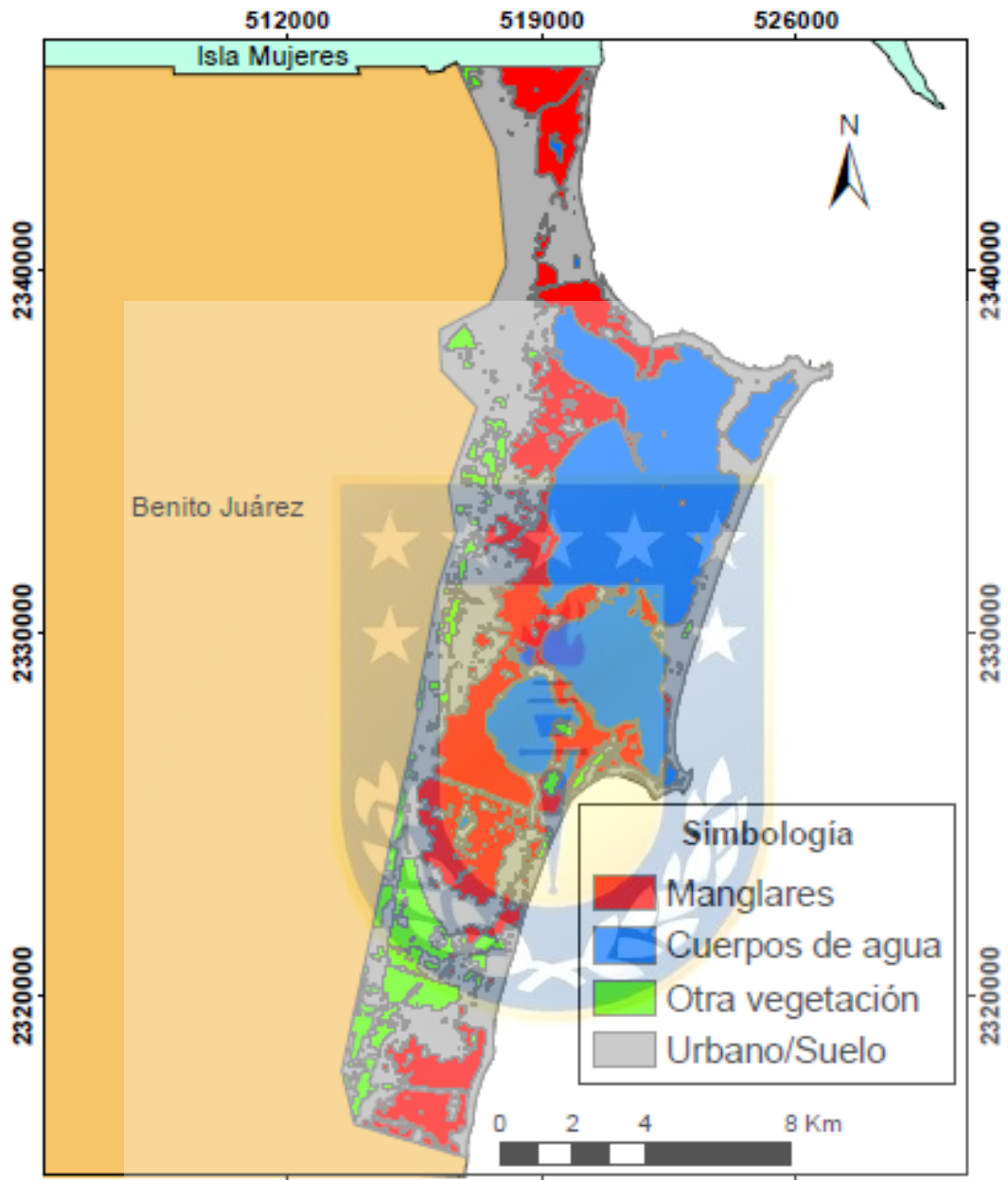


Ilustración 11: Distribución de los manglares de Cancún para el año 2016.



Clasificación Supervisada año 2019

Sistema de coordenadas proyectadas:
WGS 1984 UTM Zona 16N

Escala: 1:100000

Elaborado por: Hermenegildo Hebo

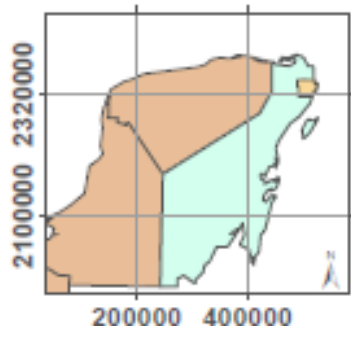


Ilustración 12: Distribución de los manglares de Cancún para el año 2019.

4.2. Evaluación de exactitud de las clasificaciones

Los mapas resultantes de las clasificaciones (ilustración 10, 11 y 12), fueron validados a partir de la selección aleatoria de una serie de *muestras de test* en cada imagen, que eran representativa para cada categoría.

Del cruce entre los píxeles o puntos de muestreo de test (categoría de referencia) y las áreas de entrenamientos (categoría del mapa), producto de la clasificación se derivaron las matrices de confusión para los respectivos años de estudio. En estas matrices se indican los estadísticos de fiabilidad: la confiabilidad global, el intervalo de confianza (índice kappa), el error de comisión (EC) y el error de omisión (EO).

Para el año 2005, del total de 4207 puntos verificados, 3874 coincidieron con las categorías de la leyenda del mapa clasificado y 333 corresponden a una categoría distinta respecto de los píxeles clasificados, arrojando de forma general una confiabilidad global de 92,09% y el intervalo de confianza de 0,88 (ver tabla 8). Respecto a la categoría de interés (manglares), solamente 25 de los píxeles que pertenecían a esta cobertura se clasificaron como otras categorías, producido un error de omisión de 2,5 %. Por otro lado, 226 píxeles que pertenecían a otras categorías, se clasificaron como manglares resultando en un error de comisión de 20,68 %.

Con respecto al año 2016, del total de 3665 puntos examinados, 3454 coincidieron con las categorías de la leyenda del mapa clasificado y 211 representan a una categoría diferente, de lo cual se obtiene una confiabilidad global de 95,47% y el intervalo de confianza de 0,85 (ver tabla 9). Para los manglares solamente 2 de los píxeles que pertenecían a esta

cobertura se clasificaron como otras categorías, lo cual produjo un error de omisión de 0,96 %. Por otro lado, 54 pixeles que correspondían a otras categorías, se clasificaron como manglares resultando en un error de comisión de 20,77 %.

En cuanto al año 2019, del total de 3999 puntos analizados, 3899 coincidieron con las categorías de la leyenda del mapa clasificado y 100 pertenecen a una categoría diferente, generando una confiabilidad global de 97,49% y el intervalo de confianza de 0,94 (ver tabla 10). Estos resultados suponen que no se clasificaron pixeles de manglares a otras categorías, resultando en un error de omisión de 0,00 %. Por otro lado, 9 pixeles de otras categorías, se clasificaron como manglares, producido un error de comisión de 1,78 %.

Tabla 8: Matriz de confusión para el año 2005.

Clase	Manglar	Otra Vegetación	Cuerpos de Agua	Urbano/Suelo	Total	EO (%)	EC (%)
Manglar	867	43	3	180	1093	2,80	20,68
Otra Vegetación	8	484	0	36	528	13,26	8,33
Cuerpos de Agua	0	0	2250	0	2250	0,79	0,00
Urbano/Suelo	17	31	15	273	336	44,17	18,75
Total	892	558	2268	489	4207		

Precisión general = 92,09 %

Índice Kappa = 0,88

Tabla 9: Matriz de confusión para el año 2016.

Clase	Manglar	Otra Vegetación	Cuerpos de Agua	Urbano/Suelo	Total	EO (%)	EC (%)
Manglar	206	6	38	10	260	0,96	20,77
Otra Vegetación	0	171	0	0	171	6,04	0,00
Cuerpos de Agua	0	0	2972	0	2972	4,59	0,00
Urbano/Suelo	2	5	105	150	262	6,25	42,75
Total	208	182	3115	160	3665		

Precisión general = 95,47 % | Índice Kappa = 0,85

Tabla 10: Matriz de confusión para el año 2019.

Clase	Manglar	Otra Vegetación	Cuerpos de Agua	Urbano/Suelo	Total	EO (%)	EC (%)
Manglar	497	2	7	0	506	0,00	1,78
Otra Vegetación	0	224	0	0	224	2,18	0,00
Cuerpos de Agua	0	0	2983	0	2983	3,09	0,00
Urbano/Suelo	0	3	88	195	286	0,00	31,82
Total	497	229	3078	195	3999		

Precisión general = 97,49 % | Índice Kappa = 0,94

De forma resumida, los resultados de las tres matrices muestran una confiabilidad global mayor al porcentaje mínimo (80 %) aceptable para la validación de los resultados de la clasificación (Mas et al., 2003; Lesschen et al., 2005; Franco et al., 2006a, como se citó en Camacho-Sanabria et al., 2015). Los índices kappa, presentan un nivel de exactitud satisfactorio para el proceso de clasificación (Landis y Koch, 1977).

La mayor confusión de la cobertura de manglares, se dio en los resultados de 2005, esto se debe a que en algunas zonas de la imagen esta no se diferenciaba claramente de las otras coberturas, como es el caso de las imágenes de 2016 y 2019, en donde aproximadamente se podría distinguir (utilizando varias combinaciones de bandas) con mayor claridad la cobertura de manglares de las otras categorías asignadas para este estudio.

4.3. Dinámica de cambios en la superficie cubierta por los manglares

Las tablas 11 y 12, corresponden a la matriz de cambios entre los periodos 2005-2016 y 2016-2019. En estas tablas se detallan las transiciones de cada categoría en termino de permanecía, incremento o disminución que caracterizan el área de estudio.

Tabla 11: Matriz de cambio periodo 2005-2016.

Matriz de Cambio		Año 2016				Total año 2005
		Manglares	Cuerpos de agua	Otra vegetación	Urbano /suelo	
Año 2005	Manglares	3291	10	197	1387	4885
	Cuerpos de agua	167	4434	0	339	4940
	Otra vegetación	53	0	859	808	1720
	Urbano /Suelo	494	72	174	3553	4293
Total año 2016		4005	4516	1230	6087	15838

Para el año 2005, los manglares ocupaban una superficie de 4885 hectáreas ha y para el año 2016, solamente permanecieron como manglares 3291 ha. Durante este periodo, se registró una disminución de 1594 hectáreas de manglares, las cuales fueron convertidas en otras categorías; cuerpos de agua 10 ha, otra vegetación 197 ha y urbano /suelo 1387 ha.

Por otro lado, de la superficie de manglares conservada (3291 ha), se adicionaron 167 ha que pertenecían a cuerpos de agua, 53 ha a otra vegetación y 494 ha a urbano /suelo, sumando un total de 714 ha. En general, para el periodo de 2005-2016, se ha registrado una notable disminución de 880 ha (18 %) en la superficie ocupada por los manglares.

Tabla 12: Matriz de cambio periodo 2016-2019.

Matriz de Cambio		Año 2019				Total año 2016
		Manglares	Cuerpos de agua	Otra vegetación	Urbano /suelo	
Año 2016	Manglares	3620	20	37	328	4005
	Cuerpos de agua	25	4459	0	32	4516
	Otra vegetación	7	0	1076	148	1231
	Urbano /Suelo	434	72	130	5484	6120
Total año 2019		4086	4551	1243	5992	15872

De acuerdo con la tabla 12, en 2016, los manglares cubrían una superficie de 4005 ha y en el año 2019, permanecieron como manglares 3620 ha. Se registró una disminución de 385 ha de manglares, las cuales fueron reemplazadas por otras categorías; cuerpos de agua 20 ha, otra vegetación 37 ha y urbano /suelo 328 ha. Por otro lado, de la superficie conservada (3620 ha), se adicionaron 25 ha que pertenecían a cuerpos de agua, 7 a otra vegetación y 434 a urbano /suelo, con un total de 466 ha. En general, hubo un ligero incremento en la superficie ocupada por los manglares de 81 ha (2,08%) para el periodo 2016-2019.

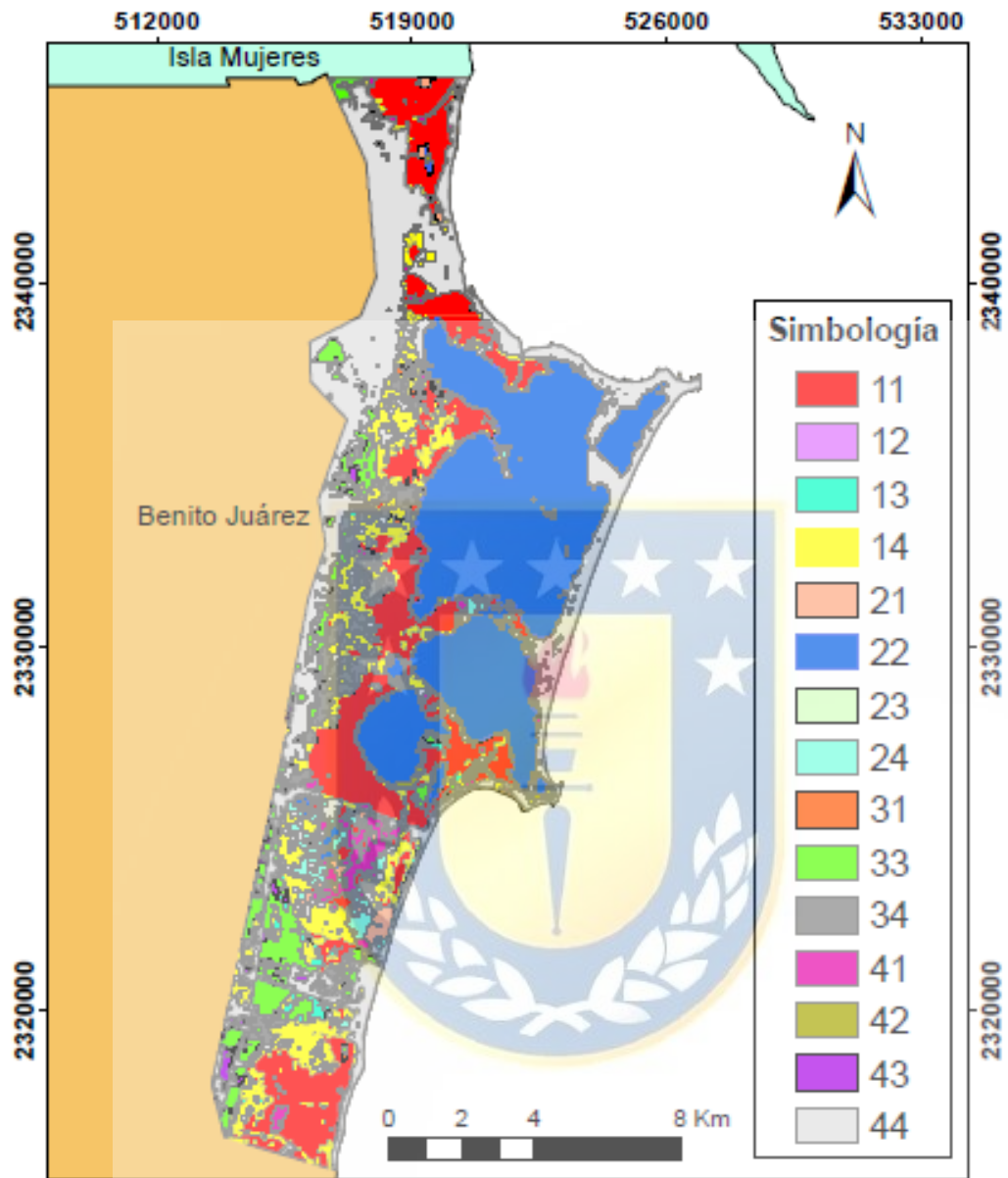
Atendiendo a la distribución espacial de todos estos cambios, se puede observar la dinámica de los manglares a partir de los mapas de cambios. En el mapa 13, del periodo 2005-2016 (ver anexo 4 para más detalles), se nota en rojo las áreas de manglares que

permanecieron inalteradas, en amarillo se destaca el proceso de transición de manglares a urbano/suelo. De igual modo, en el mapa 14, del periodo 2016-2019 (ver anexo 5 para más detalles), se nota en rojo las áreas de manglares que permanecieron conservadas, pero las transiciones respecto a los manglares, no se observan claramente.

En la tabla 13, se describen las simbologías de los mapas de cambios, de los cuales, las transiciones relacionadas a los manglares (categoría de interés) se resaltan en negrita.

Tabla 13; Descripción de la simbología para los mapas de cambios.

Simbología	Descripción
11	Manglares (Sin cambio)
12	Manglares a Cuerpos de agua
13	Manglares a Otra vegetación
14	Manglares a Urbano/ Suelo
21	Cuerpos de agua a Manglares
22	Cuerpos de agua (Sin cambio)
23	Cuerpos de agua a Otra vegetación
24	Cuerpos de agua a Urbano/ Suelo
31	Otra vegetación a Manglares
32	Otra vegetación a Cuerpos de agua
33	Otra vegetación (Sin cambio)
34	Otra vegetación a Urbano/ Suelo
41	Urbano/ Suelo a Manglares
42	Urbano/ Suelo a Cuerpos de agua
43	Urbano/ Suelo a Otra vegetación
44	Urbano/ Suelo (Sin cambio)



Cambios de las coberturas (2005-2016)
Sistema de coordenadas proyectadas: WGS 1984 UTM Zona 16N
Escala: 1:100000
Elaborado por: Hermenegildo Hebo

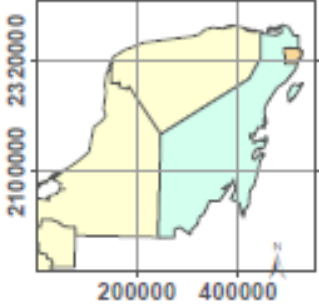
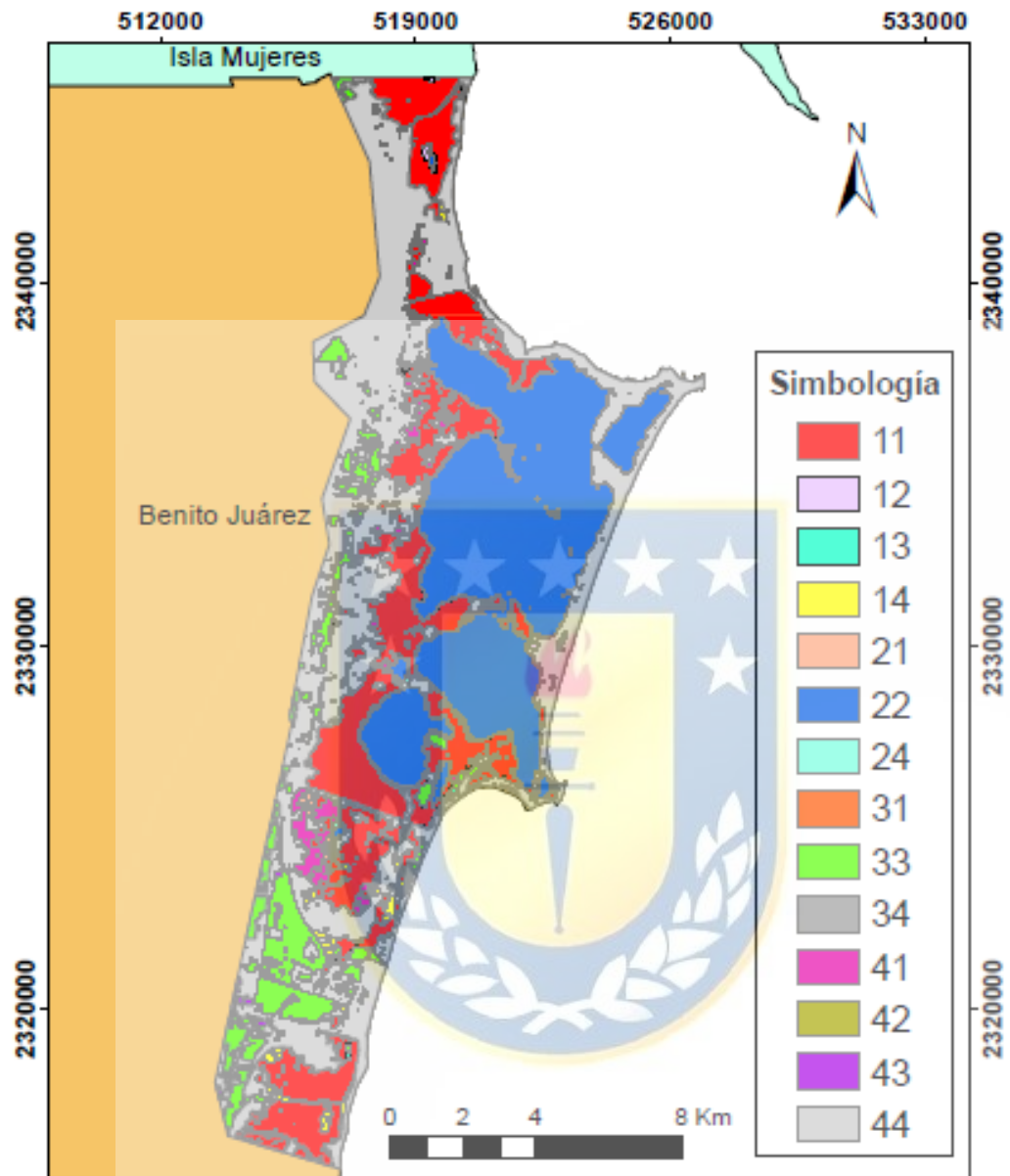


Ilustración 13: Mapa cambio de cobertura periodo 2005-2016.



Cambios de las coberturas (2016-2019)
Sistema de coordenadas proyectadas: WGS 1984 UTM Zona 16N
Escala: 1:100000
Elaborado por: Hemenegildo Hebo

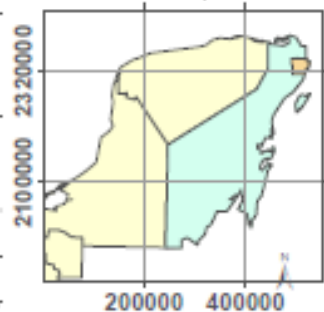


Ilustración 14: Mapa cambio de cobertura periodo 2016-2019.

4.4. Comparación de los resultados con los datos de referencia

Para verificar que tanto se ha acercado a la realidad, se recurrió a los datos de CONABIO, que cumple como información de referencia para este estudio (Justice et al., 2000; Chuvieco, 2008; CONABIO, 2012, como se citó en Rodríguez Zúñiga et al., 2018).

Aunque se cuenta con datos oficiales sobre la dinámica de los manglares de Benito Juárez para 2005, estos no son suficientes para verificar o cuantificar los cambios ocurridos entre 2005 y 2016. Porque en los datos de CONABIO para el año de 2005, no se refleja la superficie deforestada entre 2006 y 2016, es decir, lo consideran como otra categoría, aunque esta correspondía a la cobertura de manglares según los resultados del propio CONABIO para el año de 1981, como se muestra en el *circulo azul* de la ilustración 15.

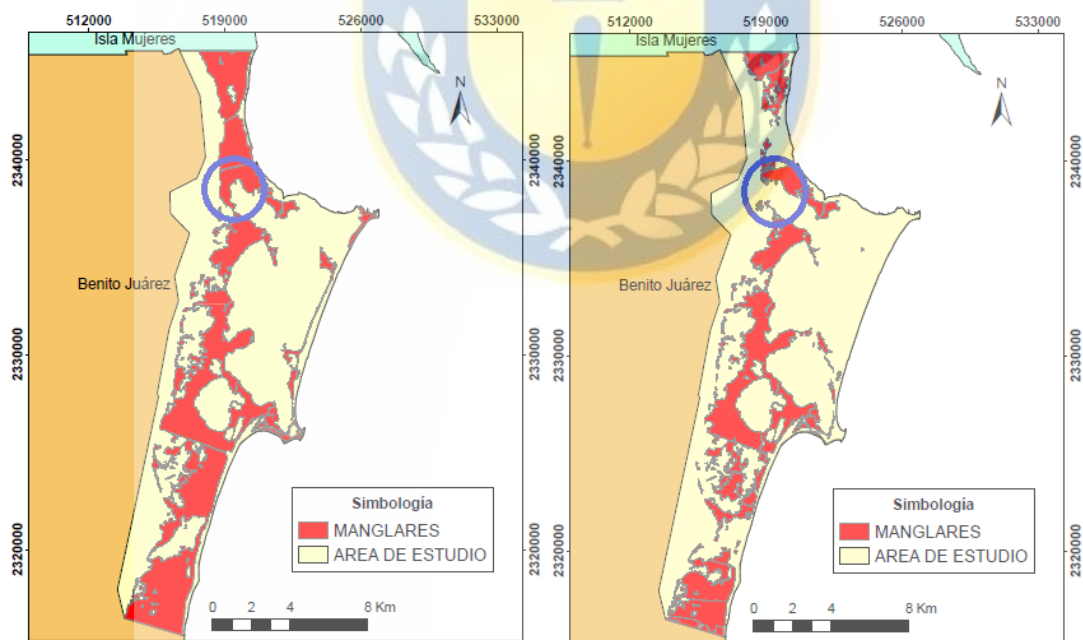


Ilustración 15: Distribución de los manglares de Cancún. A la izquierda, manglares de 1981 y a la derecha manglares de 2005. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de CONABIO.

Tabla 14: Extensión en hectáreas de la superficie cubierta por manglares de Cancún. Fuente CONABIO.

Datos	CONABIO 1981 (A1)	CONABIO 2005 (A2)	CONABIO 2015 (A3)	Variación A2-A1	Variación A3-A2
Uso de suelo					
Manglar	5489	4196	4172	-1293	-24

Tabla 15: Variaciones de las superficies de la cobertura de manglares en hectáreas. Comparación con los datos de CONABIO.

Datos	CONABIO 2005 (A1)	Este estudio 2005 (B1)	Variación B1-A1 (error)
Manglar	4196	4871	±675

Tabla 16: Variaciones de las superficies en hectáreas de la cobertura de manglares. Comparación con los datos de CONABIO.

Datos	CONABIO 2015 (A2)	Este estudio 2016 (B2)	Variación B2-A2 (error)
Manglar	4172	4081	±91

Nota: La letra A, representa los datos de CONABIO y, la letra B, los datos de este estudio.

La comparación se hizo con los resultados de 2005 y 2015 obtenidos por CONABIO, pues son los datos más cercanos a las fechas del presente estudio. La inclusión de los resultados de 1981, permite corroborar los resultados de la clasificación de este estudio (para el mapa de 2005 y 2016).

En la tabla 10, se verifica el error resultante de la comparación entre el resultado de este estudio en el año 2005 con el de CONABIO en el 2005, que es de 675 hectáreas. Este resultado muestra una diferencia considerable que se aleja mucho al dato de referencia, por lo cual, refleja una menor confianza. Esa diferencia se puede observar espacialmente en la ilustración 16.

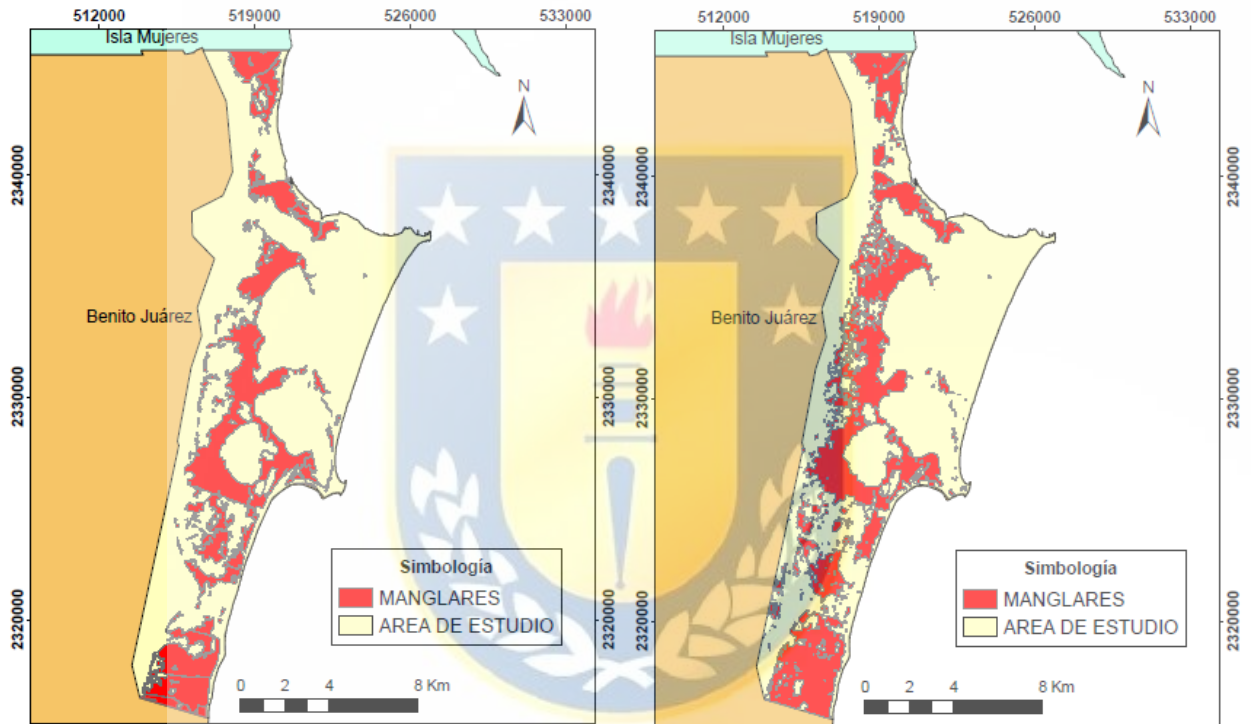


Ilustración 16: Distribución de los manglares de Cancún. A la izquierda, manglares de 2005 (elaboración propia a partir de los datos de CONABIO) y a la derecha manglares de 2005 (elaboración propia a partir de los datos de la clasificación).

Con el resultado de 2016, se obtuvo un error de 91 hectáreas y, considerando el hecho de que la superficie de manglares destruidas por el proyecto turístico “Malecón Tajamar”, no se refleja en el mapa 2015 elaborado por CONABIO, el error obtenido puede ser menor, ya que la superficie deforestada por el proyecto turístico es de aproximadamente 74

hectáreas (FONATUR y SECTUR, 2016). En la ilustración 17, se puede observar el resultado de los dos estudios.

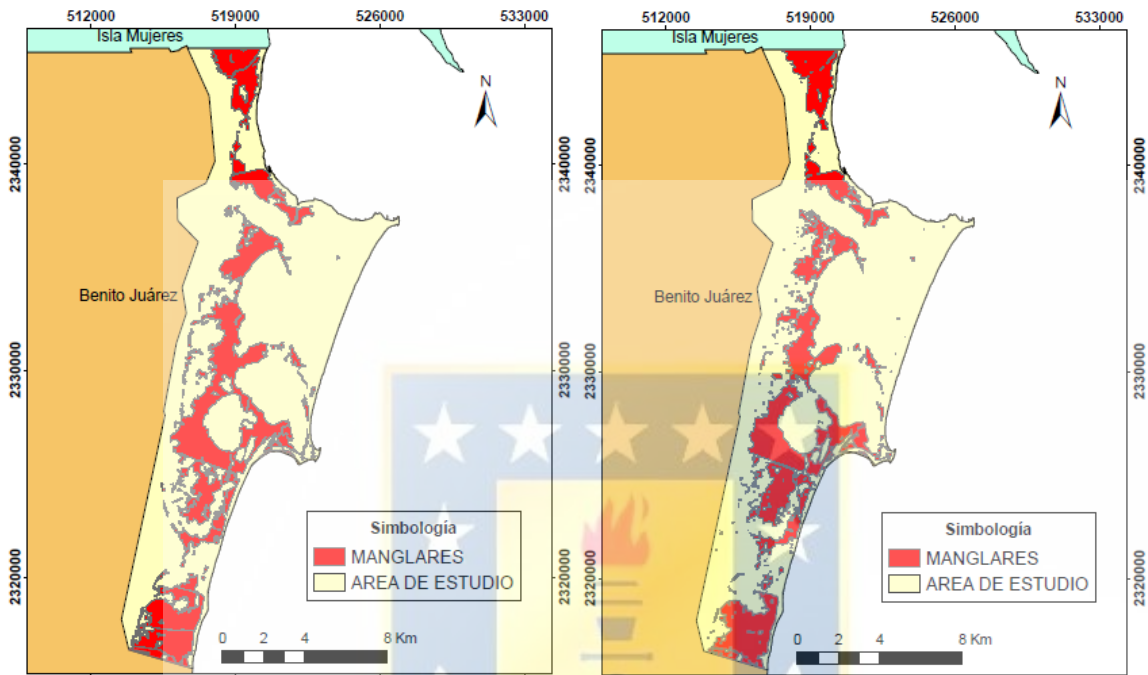


Ilustración 17: Distribución de los manglares de Cancún. A la izquierda, manglares de 2015 (elaboración propia a partir de los datos de CONABIO) y a la derecha manglares de 2016 (elaboración propia a partir de los datos de la clasificación).

A pesar de las diferencias entre los resultados este estudio con los datos de referencia, la destrucción de los manglares en la zona del proyecto turístico “Malecón Tajamar” es claramente notable, tanto en los resultados de CONABIO, como en los del presente estudio.

5. Análisis de los resultados

5.1. Variación en la superficie cubierta por los manglares

La percepción remota ofrece herramientas fiables que permiten discriminar los manglares de las otras categorías. Pero para poder obtener mejores resultados, es fundamental tener en cuenta las características del sensor a utilizar, incluso en la discriminación de los manglares. Por ejemplo, para este estudio, a pesar de que ambos sensores tienen resolución espacial de 30 metros (en sus bandas multiespectrales), con el sensor Landsat 8 se obtuvo mejores resultados como indican los estadísticos y los mapas temáticos en comparación con los datos de referencia.

Los resultados de las tablas 7 y 11, indican que la superficie de los bosques de manglares disminuyó aproximadamente un 18% entre 2005 y 2016. A partir de la matriz de cambios, se pudo notar que en este periodo la categoría *urbanos /suelo* fue la que produjo mayor impacto en la reducción de los manglares. De esta reducción se destaca la destrucción de los manglares de Tajamar producto del proyecto turístico “Malecón Tajamar” como uno de los factores de cambio.

Por otro lado, hubo un cambio positivo a favor de los manglares, siendo que un total de 167 ha que pertenecían a cuerpos de agua pasaron a manglares. Otro proceso de disminución no menos importante se dio por la sustitución de los manglares por la categoría “otra vegetación”.

Al observar la matriz de cambio entre 2016 y 2019, se nota que los manglares también han experimentado un proceso de disminución. Sin embargo, en ese lapso de tiempo se registró un incremento neto de 81 hectáreas en la superficie cubierta por manglares, lo cual representa un cambio positivo en este periodo.

Este incremento es mayoritariamente producto de la transición de la categoría “urbano /suelo”, por lo que genera dos posibles escenarios: 1) el aumento pudo darse debido a la capacidad que estos ecosistemas tienen de recuperarse principalmente cuando no hay intervenciones antropogénicas o, por un proceso de reforestación de estos recursos, así como la colonización de nuevas áreas (CONABIO, 2015); 2) el incremento pudo haberse dado por un error en la clasificación ya que es poco usual que una categoría artificial como el urbano, puede experimentar un proceso de reducción para una categoría natural como los manglares. Por lo tanto, a pesar de lo anterior, se puede decir que entre 2016 y 2019, la superficie de los manglares de Cancún no ha reducido.

En la ilustración 18, se muestra la dinámica de los manglares desde 2005 a 2019.

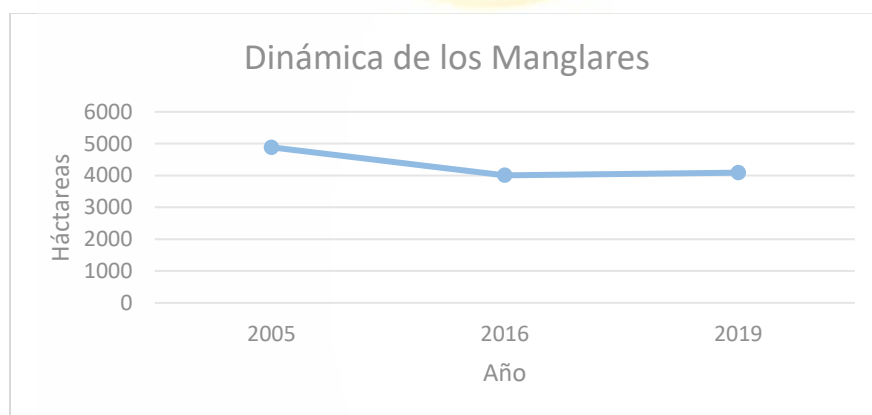


Ilustración 18: Evolución de los manglares de Cancún, Fuente: Elaboración propia.

5.2. Impacto ambiental de los cambios en la superficie de los manglares

Aunque la reducción de estos ecosistemas se origina por diversos factores, particularmente los manglares en Cancún pierden lugar ante el desarrollo de actividades antrópicas, principalmente por las infraestructuras turísticas (FAO, 2007; Hiraes-Cota et al., 2010; CONABIO, 2013).

Así como se constata en este estudio (ejemplo, el proyecto turístico “Malecón Tajamar”) y, en una reciente publicación de la NASA (2020), que muestra la transición de la mancha urbana de Cancún de 1985-2019, las actividades antrópicas sustituyen la vegetación, incluyendo a los manglares como se observa en el círculo rojo (que muestra la superficie de los manglares, reemplazada por una infraestructura portuaria) de la ilustración 19.



Ilustración 19: Crecimiento urbano de Cancún. La imagen a la izquierda corresponde al año 1985 y de la a 2019. Fuente: modificado de NASA (2020).

Los efectos de las destrucciones de estos ecosistemas, van más allá de la alteración del espacio físico de un hermoso paisaje (Padilla, 2015; Giri, 2016; Losada et al., 2018). Por ejemplo, la superficie de manglares talada por el proyecto turístico “Malecón Tajamar”. Aunque, la superficie no constaba en los sitios Ramsar (FONATUR y SECTUR, 2016), esta conectaba los dos polígonos Ramsar de los manglares de la laguna Nichupté, considerados como zona de conservación cómo se observa en la ilustración 20.

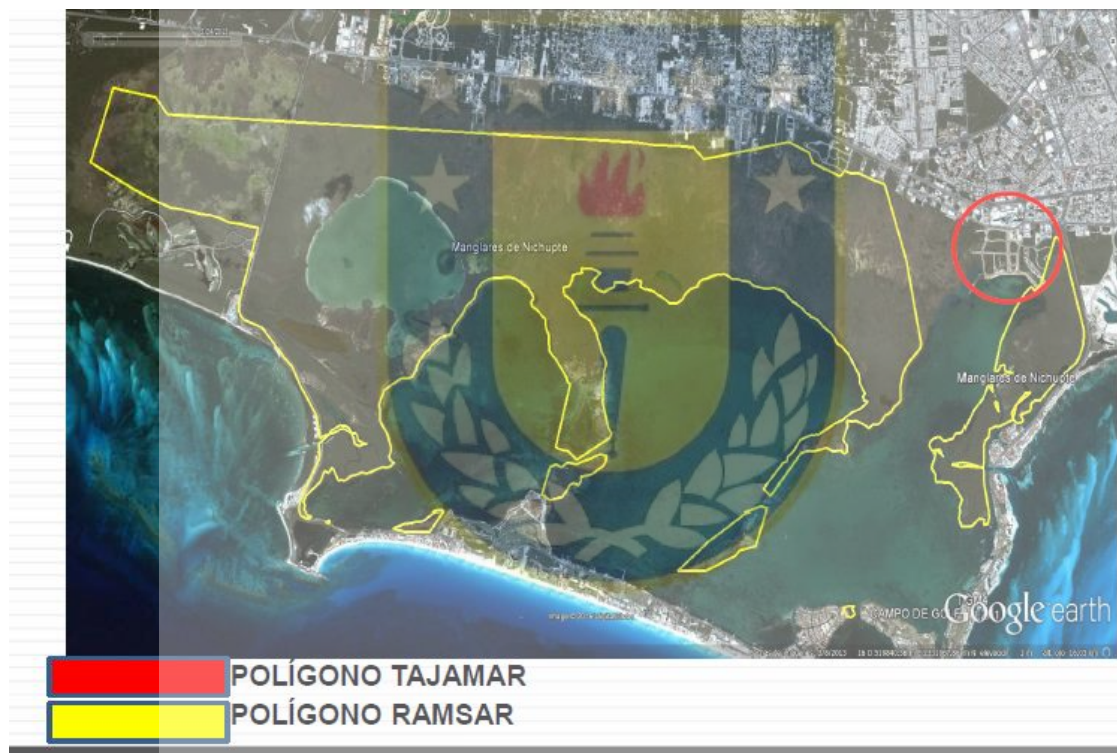


Ilustración 20: Sitio Ramsar “Manglares de la laguna Nichupté. Fuente: (FONATUR y SECTUR, 2016).

Uno de los efectos negativos de la tala de los manglares del Malecón Tajamar, se refleja en la limitación del traslado que realizaban algunas especies (por ejemplo, reptiles) de un lugar al otro (entre los dos polígonos). También en la eliminación de un ecosistema que

sirve como hábitat y como refugio para muchas especies de moluscos, aves, reptiles, crustáceos y peces durante las etapas tempranas de su vida, antes de que migren a mar abierto (ANAM-ARAP, 2013).

Además, con la destrucción de esta superficie, torna el polígono menor de la ilustración 20 (polígono Ramsar a la derecha) vulnerable a los futuros proyectos visto que actualmente, este se encuentra separado del polígono mayor, pudiendo los responsables que aprueban los proyectos argumentar que, aunque genere impactos negativos, la remoción no pondría en peligro el ecosistema de manglares de Quintana Roo, ya que se consideraría que la extensión no es tan significativa en comparación a la cantidad de superficie que estos recursos ocupan en el estado, como sucedido con los manglares del Malecón Tajamar (Castrillón, 2016).

Las ventajas económicas del proyecto turístico el Malecón Tajamar, son indudables, visto que la ciudad cuenta con el ingreso del turismo y, directa o indirectamente estos programas generan muchos empleos (FONATUR y SECTUR, 2016). Sin embargo, a la larga las consecuencias pueden ser mayores, principalmente para comunidad local ya que, la reducción de los manglares debilita el sistema de protección que ofrecen estos recursos costeros, contra los impactos de los desastres naturales y, aunque no llegan a contenerlos en su totalidad, disminuyen los efectos causados por estos fenómenos naturales, luego muchos daños se pueden mitigar con la existencia de estos ecosistemas (Giri, 2016).

Lo anterior se refleja en un estudio liderado por investigadores de la Universidad de Cantabria y la Universidad de Santa Cruz (California). donde, “se evalúa globalmente el riesgo de inundación a lo largo de 700 000 km de costa y 59 países, y el servicio de protección (simulado en la ilustración 21) que proporcionan los manglares para reducir las pérdidas económicas y la afección a la población que vive en la costa” Menéndez et ál. (2020). Sin contar los efectos indirectos, estos autores señalan que:

En zonas protegidas por manglares, el riesgo de inundación esperado cada año supera los 730 000 millones de dólares en pérdidas asociadas a daños directos a bienes inmuebles. Esta cifra se incrementaría en 65 000 millones de dólares más en caso de no contar con este ecosistema como primera línea de defensa costera.

En otro estudio sobre la “valoración de los servicios de protección de manglares en Filipinas” realizado por Wealth Accounting and the Valuation of Ecosystem Services (WAVES, 2017), se cuantifican estos servicios o beneficios (ver ilustración 22) de protección que ofrecen los manglares:

- Sin los manglares, las inundaciones y los daños a las personas, la propiedad y la infraestructura aumentarían anualmente en aproximadamente un 25%.
- A nivel nacional, los manglares filipinos reducen las inundaciones a 613.000 personas anualmente, de las cuales más del 23% vive por debajo de la pobreza.
- Los manglares evitan anualmente más de 1.000 millones de dólares en daños a las existencias residenciales e industriales.

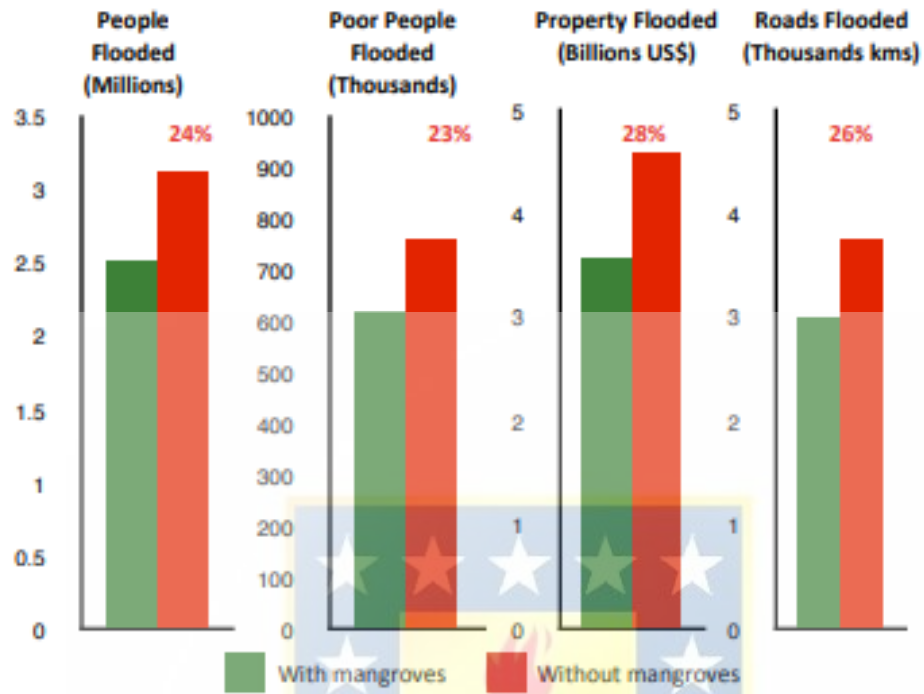


Ilustración 21: Las barras muestran los daños anuales esperados de las inundaciones en Filipinas, incluyendo el porcentaje de incremento anual de los daños a la gente y a la propiedad, con manglares (en verde) y sin manglares (en rojo). Fuente: WAVES (2017).

Con estos estudios se torna evidente la capacidad de protección de los manglares, y que, si las autoridades en Cancún no toman medidas para evitar la tala de estos ecosistemas, las consecuencias ante una eventual inundación podrían ser mucho mayor (Casasola, 2002).

Aún sobre el proyecto Malecón Tajamar, de acuerdo con algunos medios de comunicación, no solo destruyeron el hábitat de varias especies (animal), sino que, algunos animales, fueron muertos en el proceso de desmonte de los manglares, tal como se observa en la ilustración 22 (Mares, 2016; Adan, 2016; Martínez, 2016). Aunque, según la PROFEPA y SEMARNAT, se ha realizado el rescate y traslado de la fauna local antes de la tala de estos manglares y que las fotos que circulaban eran falsas (PROFEPA y SEMARNAT, 2016).

Sin embargo, los activistas dicen lo contrario, afirmando que si así hubiesen actuado no habría necesidad de destruir los manglares como ladrones (de madrugada y con policías) y, que imágenes como de la foto superior izquierda de la ilustración 22, que el movimiento ciudadano Salvemos el Manglar Tajamar, facilitó a Animal Político (periódico), muestra las edificaciones que permiten identificar que fue tomada en Tajamar, por lo cual sirve como evidencia de que los responsables por el proyecto no realizaron el traslado y rescate de algunas especies (Martínez, 2016; Mares, 2016).



Ilustración 22: Malecón tajamar. A) Cocodrilos en la zona talada de Tajamar. Foto: MCSMT. Fuente: Martínez, (2016). B) Reptiles muertos en la zona talada de Tajamar. Fuente: Adan (2016). C) Aves en la zona talada de Tajamar. Foto: MCSMT. Fuente: Martínez, (2016). D) Animales en la zona talada de Tajamar. Foto: MCSMT. Fuente: Mares (2016).

El crecimiento urbano de Cancún que culmina con la alteración directa y masiva del medio ambiente costero (incluyendo la zona de manglares), es implosionado por la industria del turismo (Vargas et ál. 2013; Padilla, 2015). A pesar de ser una gran fuente de ingreso para la ciudad, esta industria tiene como uno de los principales impactos en el medio ambiente costero de Cancún, la contaminación del agua. Debido a las aguas residuales (gran parte sin tratamiento) de los hoteles, que terminan en el mar y se convierten en una amenaza para los ecosistemas acuáticos, además otra parte se filtran a través del subsuelo a los cuerpos de agua afectando la calidad del agua (Padilla, 2015; NASA, 2020).

Estos residuos se pueden gestionar con la presencia de manglares, reduciendo así sus efectos en el medio ambiente. Pues de acuerdo a la comisión europea (2012), “la comunidad científica dedicada al estudio del medio ambiente natural se ha percatado de que los bosques de los manglares son capaces por naturaleza de filtrar grandes cantidades de agua residual no tratada procedente de arroyos”.

La reducción de los manglares de Cancún, afecta mundialmente a las personas y el planeta. Porque al destruirlos, se reduce un ecosistema que es una “super solución” en la lucha contra el cambio climático ya que los manglares secuestran 4 veces más carbono que los bosques terrestres (ONU, 2019; NASA, 2019).

La destrucción de los manglares de Cancún, como en el caso de los manglares del “Malecón Tajamar”, refleja un problema de fiscalización o la aplicación de políticas económicas productivistas orientadas hacia la obtención de ganancias a corto plazo, así como de

desinterés por parte de las instituciones y autoridades responsables, a pesar de que México cuenta con numerosas políticas para la conservación de estos ecosistemas (Casasola, 2002; Aragón, 2017).



6. Conclusión

La integración de los SIG y la percepción remota proporcionó información útil sobre la magnitud de los cambios y la dinámica de los manglares de Cancún durante el periodo 2005-2016 y 2016-2019. A partir de la sobreposición de los mapas de las clasificaciones, se pudo observar la dinámica de estos ecosistemas.

Los resultados presentados muestran que efectivamente hubo una reducción 18 % en la superficie cubierta por los manglares, en el periodo 2005-2016, asociada principalmente a la expansión urbana ligada a infraestructura para actividades turísticas. Aunque estos resultados muestran una mayor disminución de estos ecosistemas, no se pudo identificar, además del área destruida por el proyecto turístico “Malecón Tajamar” entre los años de 2006 y 2016, la ocurrencia de otros factores antrópicos o natural que impactaron directamente estos manglares.

Por otro lado, entre 2016 y 2019, se registró un incremento en la superficie de los manglares de 81 ha. Sin embargo, no se tiene claras las razones por las que aumentaron en extensión.

Al ser una zona costera y al borde de un sistema lagunar, la fragmentación de los manglares de Cancún, independientemente de los factores que los causan, incrementará la vulnerabilidad ante posibles inundaciones en esta ciudad.

La contaminación del agua en Cancún, es una de las consecuencias de la reducción de un ecosistema que podría filtrar efectivamente los residuos producido por la industria turística, ya que está comprobado que los manglares podrían establecerse como un método natural rentable e innovador para la gestión de estos desechos.

Tal como demostraron algunos estudios, las consecuencias de la destrucción de los manglares de Cancún van más allá de la alteración del medio físico. Por lo tanto, sale más baratos preservar estos ecosistemas, que destruirlos para un beneficio económico a corto plazo.



7. Referencias

- Acosta Velázquez, J. M. T. Rodríguez Zúñiga. 2007. Programa de monitoreo de los manglares de México a largo plazo: Primera Etapa. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. DQ056. México D. F.
- Adan (23 de enero de 2016). Ecocidio en Tajamar: sepultaron vivos a los cocodrilos. Recuperado el 15 de noviembre de 2020, de <http://paginawebleon.mx/wp/ecocidio-en-tajamar-sepultaron-vivos-a-los-cocodrilos/>.
- [ANAM-ARAP] Autoridad Nacional del Ambiente y Autoridad de los Recursos Acuáticos de Panamá. 2013. Manglares de Panamá: importancia, mejores prácticas y regulaciones vigentes. Panamá: Editora Novo Art, S.A., XX pp.
- Aragón, M. M. (2017). Impactos ambientales generados por el caso “Malecón, Cancún (Proyecto Tajamar)”, Quintana Roo, México. Reflexiones para el desarrollo sustentable del turismo. *Ciencia y Mar*, 21(62), 37-55.
- Banco mundial. (13 de enero de 2019). Cinco razones para cuidar los manglares Recuperado el 28 de junio de 2020 de file:///C:/Users/Hermenegildo/Documents/SEMESTRE%202020-1/INFORME/CAUSAS_IMPACTOS/Cinco%20razones%20para%20cuidar%20los%20manglares.html.
- Borràs, J., Delegido, J., Pezzola, A., Pereira, M., Morassi, G., & Camps-Valls, G. (2017). Clasificación de usos del suelo a partir de imágenes Sentinel-2. *Revista de Teledetección*, (48), 55-66.
- Calderón, C., Aburto, O., & Ezcurra, E. (2009). El valor de los manglares. CONABIO.

Biodiversitas, 82, 1-6.

Calderón-Maya, J. R., & Orozco-Hernández, M. E. (2009). Planeación y modelo urbano: el caso de Cancún, Quintana Roo. *Quivera Revista de Estudios Territoriales*, 11(2), 18-34.

Casasola, P. M., Galaviz, J. L. R., Lomelí, D. Z., Pérez, M. A. O., Domínguez, A. L. L., & Vázquez, T. S. (2002). Diagnóstico de los manglares de Veracruz: distribución, vínculo con los recursos pesqueros y su problemática. *Madera y Bosques*, 8(Es1), 61-88.

Castrillón, L. (6 de febrero de 2016). Tajamar es 'la punta del iceberg': 30 años de omisión en protección a manglares, Animal Politico. Recuperado 28 de junio de 2020 de <https://www.animalpolitico.com/2016/02/tajamar-es-la-punta-del-iceberg-30-anos-de-omision-en-proteccion-a-manglares/>.

Cerda, J., & Villarroel Del, L. U. I. S. (2008). Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Revista chilena de pediatría*, 79(1), 54-58.

Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 sensors. (In Press, *Remote Sensing of Environment*, Manuscript Number: RSE-D-08-00684).

Chen, B., Xiao, X., Li, X., Pan, L., Doughty, R., Ma, J., ... & Sun, R. (2017). A mangrove forest map of China in 2015: Analysis of time series Landsat 7/8 and Sentinel-1A imagery in Google Earth Engine cloud computing platform. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 131, 104-120.

Chuvieco, E. (1998). El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de teledetección*, 10(1-9).

CONABIO. (2007). *PROGRAMA DE MONITOREO A LARGO PLAZO:*

1 RA . E T A P “ Los manglares de México : estado actual y establecimiento de un programa de monitoreo a largo plazo : 1ra . etapa . ” 1–70.

CONABIO. 2009. Manglares de México: Extensión y distribución. 2ª ed. Comisión

Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 99 pp.

Daniels, R. C. (2012). from Landsat TM & ETM + Data Problem : Remote Sensing (RS) data is not being. *ESRI International User Conference 2012 Paper Sessions, 360.*

David Vargas del Rio, Ludger Brenner (2012). Ecoturismo comunitario y conservación ambiental: la experiencia de la Ventanilla, Oaxaca, México. *Estud.soc vol.21 no.41 México ene./jun.2013.*

Erazo Álvarez, A. B. (2014). Uso estratégico del mangle para el desarrollo turístico en el cantón San Lorenzo, provincia de Esmeraldas. Tesis de grado previo la obtención del Título de Licenciada en Turismo Ecológico. Carrera de Turismo Ecológico. Quito: UCE. 168 p.

FAO (Food and Agriculture Organization). (2007). The world's mangroves 1980–2005. *Rome: FAO, FAO Forestry Paper, 153, 77p.*

Getty Images. (s.f.-a). Mangroves in the Sian Ka'an Biosphere, Quintana Roo, Mexico.

Recuperado el 6 de noviembre de 2020, de

<https://www.gettyimages.com.mx/detail/foto/mangroves-in-the-sian-kaan-biosphere-imagen-libre-de-derechos/570282595>.

Getty Images. (s.f.-b). Mangrove Forest Near Romana Island, Amazon Region, Brazil.

Recuperado el 6 de noviembre de 2020, de

[https://www.gettyimages.com.mx/detail/foto/mangrove-forest-near-romana-island-amazon-imagen-libre-de-](https://www.gettyimages.com.mx/detail/foto/mangrove-forest-near-romana-island-amazon-imagen-libre-de-derechos/974024230?irgwc=1&esource=AFF_GI_IR_TinEye_77643&asid=TinEye)

[derechos/974024230?irgwc=1&esource=AFF_GI_IR_TinEye_77643&asid=TinEye](https://www.gettyimages.com.mx/detail/foto/mangrove-forest-near-romana-island-amazon-imagen-libre-de-derechos/974024230?irgwc=1&esource=AFF_GI_IR_TinEye_77643&asid=TinEye)
&cid=GI&utm_medium=affiliate&utm_source=TinEye&utm_content=77643&uiloc

=thumbnail_similar_images_adp.

Getty Images. (s.f.-c). Japan's largest mangrove swamp with clear river water from above, Iriomote-Ishigaki National Park of the Yaeyama Islands, Okinawa.

Recuperado el 6 de noviembre de 2020, de

https://www.gettyimages.com.mx/detail/foto/japans-longest-mangrove-river-iriomote-island-imagen-libre-de-derechos/573018207?irgwc=1&esource=AFF_GI_IR_TinEye_77643&asid=TinEye&cid=GI&utm_medium=affiliate&utm_source=TinEye&utm_content=77643

Getty Images. (s.f.-d). Mangrove forest on Surin island. Recuperado el 6 de noviembre de 2020, de [https://www.gettyimages.com.mx/detail/foto/mangrove-forest-imagen-libre-de-](https://www.gettyimages.com.mx/detail/foto/mangrove-forest-imagen-libre-de-derechos/1011094922?irgwc=1&esource=AFF_GI_IR_TinEye_77643&asid=TinEye&cid=GI&utm_medium=affiliate&utm_source=TinEye&utm_content=77643)

[derechos/1011094922?irgwc=1&esource=AFF_GI_IR_TinEye_77643&asid=TinEye&cid=GI&utm_medium=affiliate&utm_source=TinEye&utm_content=77643.](https://www.gettyimages.com.mx/detail/foto/mangrove-forest-imagen-libre-de-derechos/1011094922?irgwc=1&esource=AFF_GI_IR_TinEye_77643&asid=TinEye&cid=GI&utm_medium=affiliate&utm_source=TinEye&utm_content=77643)

Giri, C. 2016. Observation and monitoring of mangrove forests using remote sensing: Opportunities and challenges. *Remote Sensing*, 8(9), 783. <https://doi.org/10.3390/rs8090783>.

Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L. L., Zhu, Z., Singh, A., Loveland, T., ... & Duke, N. (2011). Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 154-159.

Hernández, C. T., & Belmonte, D. E. O. (2004). Impacto del huracán Rosa sobre los bosques de manglar de la costa norte de Nayarit, México. *Madera y Bosques*, 10(3), 63-75.

Hirales-Cota, M., Espinoza-Avalos, J., Schmook, B., Ruiz-Luna, A., & Ramos-Reyes, R.

(2010). Agentes de deforestación de manglar en Mahahual-Xcalak, Quintana Roo, sureste de México. *Ciencias Marinas*, 36(2), 147–159.

<https://doi.org/10.7773/cm.v36i2.1653>

INEGI. (1992). XI Censo General de Población y Vivienda, 1990. Perfil sociodemográfico, Quintana Roo.

http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825490027/702825490027_1.pdf

INEGI. (2001). XII Censo General de Población y Vivienda, 2000. Tabulados basicos, Quintana Roo.

http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825493820/702825493820_1.pdf

INEGI. (2001). Principales resultados del Censo de Población y Vivienda 2010, Quintana Roo.

http://coespo.groo.gob.mx/Descargas/doc/23_principales_resultados_Censo%20de%20Poblaci%C3%B3n%20Y%20Vivienda%202010%20QROO.pdf

INE, Semanart, 2005. Evaluación preliminar de las tasas de pérdida de superficie de manglar en México. 21 p.

INEGI. (s.f). Información por entidad, Quintana Roo, División municipal. Recuperado el 15 de septiembre de 2020, de

http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/qroo/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=23

ITT Visual Information Solutions (2009). ENVI EX user's guide, p.251.

iagua. (17 noviembre de 2018). Los manglares como hábitat para contrarrestar las

emisiones de carbono. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://www.iagua.es/noticias/dicyt/manglares-como-medio-contrarrestar-emisiones-carbono>.

Islam, M. M. (2017). Tracing mangrove forest dynamics of Bangladesh using historical Landsat data. *Student thesis series INES*.

Ivette Lira. (18 de enero 2016). Movimiento ciudadano. La destrucción en Tajamar, QRo: “Rellenaron el manglar y sepultaron cocodrilos vivos” recuperado de: <https://movimientociudadano.mx/federal/replica-de-medios/la-destruccion-en-tajamar-qroo-rellenaron-el-manglar-y-sepultaron>.

Julzarika, A., Anggraini, N., & Adawiah, S. W. (2019). Detection of True Mangroves in Indonesia Using Satellite Remote Sensing. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 4(3), 157-167.

Kris Beckert (2012). Funciones ecologicas de los manglares- Red de Integración y Aplicación, Centro de Ciencias Ambientales de la Universidad de Maryland. Recuperado el 17 de octubre de 2020, de <https://ian.umces.edu/imagelibrary/displayimage-62-7612.html>

Labrador, M., Évora, J., & Arbelo, M. (2012). Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio. *La Laguna, Spain*.

Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data [La medición de acuerdo al observador para datos categóricos]. *Biometrics*, 33(1), 159–174.

Lora López, J. C. (2016). *Comparativa de sensores espaciales de diferente resolución espectral en la exploración minera* (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

Losada, I.J., Menéndez, P., Espejo, A., Torres, S., Díaz Simal, P., Abad, S., Beck, M.W., Narayan, S., Trespalacios, D., Pfliegner, K., Mucke, P., Kirch, L., 2018. The Global Value of Mangroves for Risk Reduction. Technical Report. The Nature Conservancy, Berlin.

MAIA, L. P., LACERDA, L. D. D., Monteiro, L. H. U., & Souza, G. M. (2005). Estudo das áreas de manguezais do nordeste do Brasil-Avaliação das áreas de manguezais dos Estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. *Documento Técnico, maio de*.

Majumdar, D., Chakraborty, S., Saha, S., & Datta, D. (2019). Geospatial analysis of the effects of tsunami on coral and mangrove ecosystems of Mayabunder in Andaman Islands, India. *Brazilian Journal of Oceanography*, 67.

Manual conozcamos nuestros manglares. Recuperado en :

<http://www.ordenamientoecologico.oaxaca.gob.mx/sites/default/files/pdf/humedales/documentos/ManualConozcamosNuestrosManglares.pdf>.

Mares P. H. (27 de enero de 2016). Devastan manglar en Cancún, donde habitaban grandes cantidades de cocodrilos, boas, águilas, garzas, ranas, ardillas, e iguanas. Recuperado el 15 de noviembre de 2020, de

<https://es.mongabay.com/2016/01/devastan-manglar-en-cancun-donde-habitaban-grandes-cantidades-de-cocodrilos-boas-aguilas-garzas-ranas-ardillas-e-iguanas/>.

Martínez P. (2 de febrero de 2016). El Manglar Tajamar: una década de devastación vista desde el cielo (Video). Recuperado el 15 de noviembre de 2020, de

<https://www.animalpolitico.com/2016/02/el-manglar-tajamar-una-decada-de-devastacion-vista-desde-el-cielo-video/>

- Maya, J. R. C., & Ferrusca, J. R. (2014). Contaminación ambiental del sistema lagunar de Nichupté (Cancún-México).
- Melchor, G. I. H., Sánchez, Á. S., Rosado, O. R., & Hernández, J. I. V. (2016). Controversias legislativas en la protección del ecosistema manglar: el caso Tabasco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (14), 2841-2855.
- Menéndez, P., Losada, I. J., Torres-Ortega, S., Narayan, S., & Beck, M. W. (2020). The global flood protection benefits of mangroves. *Scientific Reports*, 10(1), 1-11.
- Meneses, P. R., & Almeida, T. D. (2012). Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. *Universidade de Brasília, Brasília*.
- Miguel Rivas. (18 de enero de 2016). Greenpeace. Ecocidio en Tajamar, Recuperado de: <https://www.greenpeace.org/archive-mexico/es/Blog/Blog-de-Greenpeace-Verde/ecocidio-en-tajamar/blog/55330/>.
- M.W. Beck y Menendez, P. (2020). Proteger los manglares puede ahorrarnos millones de dólares al año en inundaciones. *The conservation*. <https://theconversation.com/proteger-los-manglares-puede-ahorrarnos-millones-de-dolares-al-ano-en-inundaciones-133559>.
- NASA. (s.f.-a). Mapping Mangroves by Satellite. Recuperado el 29 de septiembre de 2020, de <https://earthobservatory.nasa.gov/images/47427/mapping-mangroves-by-satellite>.
- NASA. (s.f.-b). What is Remote Sensing? Recuperado el 23 de septiembre de 2020, de <https://earthdata.nasa.gov/learn/remote-sensing>.
- NASA. (s.f.-c). Landsat 8. Recuperado el 13 de septiembre de 2020, de <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-data-continuity-mission/>.
- NASA. (s.f.-d). Operational Land Imager (OLI). Recuperado el 13 de septiembre de 2020,

de <https://landsat.gsfc.nasa.gov/operational-land-imager-oli/>.

NASA. (24 de enero de 2020). How Cancún Grew into a Major Resort. Recuperado el 15 de octubre de 2020, de <https://earthobservatory.nasa.gov/images/146194/how-cancun-grew-into-a-major-resort>

NASA. (27 de febrero de 2019). New satellite-based maps of mangrove heightsOperational. Recuperado el 30 de septiembre de 2020, de <https://climate.nasa.gov/news/2843/new-satellite-based-maps-of-mangrove-heights/>.

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). (s.f.). What is remote sensing? Recuperado el 23 de septiembre de 2020 de <https://oceanservice.noaa.gov/facts/remotesensing.html>.

ONU. (28 de noviembre de 2019). Manglares, una súper solución contra el cambio climático. programa para el medio ambiente. Recuperado el 15 de octubre de 2020, de <https://www.unenvironment.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/manglares-una-super-solucion-contr-el-cambio-climatico>

Osuna-Osuna, A. K., Díaz-Torres, J. D. J., Anda-Sánchez, J. D., Villegas-García, E., Gallardo-Valdez, J., & Davila-Vazquez, G. (2015). Evaluación de cambio de cobertura vegetal y uso de suelo en la cuenca del río Tecolutla, Veracruz, México; periodo 1994-2010. *Revista Ambiente & Agua*, 10(2), 350-362.

Padilla, N. S. (2015). The environmental effects of tourism in Cancun, Mexico. *International Journal of Environmental Sciences*, 6(2), 282-294.

Pagkalinawan, H. (2015). Mangrove Forest Mapping Using Landsat 8 Images. *State of the*

Mangrove Summit: Northwestern Luzon Proceedings) Indd, 60-64.

Pham, T. D., & Yoshino, K. (2015, March). Mangrove mapping and change detection using multi-temporal Landsat imagery in Hai Phong city, Vietnam. In *International symposium on cartography in internet and ubiquitous environments* (pp. 17-19).

Pérez Villegas, G., y Carrascal, E. 2000. El desarrollo turístico en Cancún, Quintana Roo y sus consecuencias sobre la cubierta vegetal. En: *Investigaciones geográficas*, (43), 145 -166.

Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (Profepa). Leyes y Normas. Recuperado de: <https://www.gob.mx/profepa/documentos/ley-general-del-equilibrio-ecologico-y-la-proteccion-al-ambiente-63043>;
https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/435/1/NOM_059_SEMARNAT_2010.pdf; <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3281/1/nom-022-semarnat-2003.pdf>

PROFEPA Y SEMARNAT. (2016). MALECÓN TAJAMAR, CANCÚN, QUINTANA ROO. Situación Ambiental y Jurídica. Recuperado el 15 de noviembre de 2020, de <https://docplayer.es/13188018-Malecon-tajamar-cancun-quintana-roo-situacion-ambiental-y-juridica.html>.

Programa Estatal de Humedales Costeros de Oaxaca (PEHCO). 2012. Recuperado de : <https://www.agua.org.mx/wp-content/uploads/2014/04/3-PEHCO.pdf>.

Rahman, M., Ullah, R., Lan, M., Sri Sumantyo, J. T., Kuze, H., & Tateishi, R. (2013). Comparison of Landsat image classification methods for detecting mangrove forests in Sundarbans. *International journal of remote sensing*, 34(4), 1041-1056.

Ramsar. (2015). La convención de ramsar: ¿de qué trata? Recuperado el 6 de julio de 2020,

de https://www.ramsar.org/sites/default/files/fs_6_ramsar_convention_sp_0.pdf.

Ramsar. (s.f.-a). Recuperado el 15 de diciembre de 2020 <https://www.ramsar.org/es>.

Ramsar. (s.f.-b). PERFILES DE LOS PAÍSES. MÉXICO. Recuperado el 6 de julio de 2020 <https://www.ramsar.org/es/humedal/mexico>.

Rodríguez-Zúñiga M.T., Troche-Souza C., Vázquez-Lule A. D., Márquez-Mendoza J. D., Vázquez- Balderas B., Valderrama-Landeros L., Velázquez-Salazar S., Uribe-Martínez A., Acosta-Velázquez J., Díaz-Gallegos J., Cruz-López M. I. y Ressler R. 2012. Los manglares de México: estado actual y establecimiento de un programa de monitoreo a largo plazo: 2ª y 3era etapas. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. GQ004. México, D.F.

Rodríguez Zúñiga, M. T., Villeda-Chávez, E., Vázquez-Lule, A. D., Bejarano, M., Cruz López, M. I., Olguín, M., Villela Gaytán, S. A., & Flores, R. (2018). Métodos para la caracterización de los manglares mexicanos. *Métodos Para La Caracterización de Los Manglares Mexicanos: Un Enfoque Espacial Multiescala.*, 272.

Sari, S. P., & Rosalina, D. (2016). Mapping and monitoring of mangrove density changes on tin mining area. *Procedia Environmental Sciences*, 33, 436-442.

Secretaria De Medio Ambiente Y Recursos Naturales (SEMARNAT) Ley general de vida silvestre. 2007. Recuperado de: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/DO2454.pdf>;

SECTUR-FONATUR. (2016). Malecón Tajamar desarrollo responsable apegado a

- derecho. Recuperado el 25 de septiembre de 2020, de <http://www.fonatur.gob.mx/gobmx/transparencia/Focalizada/tajamar/pdf/04/4.pdf>.
- SILVA, J. B. D. (2012). Sensoriamento remoto aplicado ao estudo do ecossistema manguezal em Pernambuco/Janaína Barbosa da Silva (Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco).
- Soca Flores, R. (2017). Corrección atmosférica SMAC para imágenes del sensor OLI del satélite Landsat-8.
- Taureau, F., Robin, M., Proisy, C., Fromard, F., Imbert, D., & Debaine, F. (2019). Mapping the mangrove forest canopy using spectral unmixing of very high spatial resolution satellite images. *Remote Sensing*, 11(3), 367.
- Tovilla C. 2009. La reforestación de los manglares en la costa de Oaxaca, Manual comunitario. CONAFOR. SEMARNAT. México.
- USGS- United States Geological Survey. (s.f.-a). Land Cover Trends. Recuperado 16 de enero de 2020, de https://www.usgs.gov/centers/wgsc/science/land-cover-trends?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects.
- Valderrama-Landeros, L. H., Rodríguez-Zúñiga, M. T., Troche-Souza, C., Velázquez-Salazar, S., Villeda-Chávez, E., Alcántara-Maya, J. A., ... & Ressler, R. (2017). Manglares de México: actualización y exploración de los datos del sistema de monitoreo 1970/1980-2015. *Ciudad de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*, 128 pp.
- Vargas Martinez, E. E., Castillo Nechar, M., & VIESCA GONZALEZ, F. C. (2013). Ending a touristic destination in four decades: cancen's creation, peak and agony.
- Vasquez Prieto, L. P. (2019). Diseño de una metodología de clasificación de cobertura de

manglar empleando imágenes SAR polarimétricas.

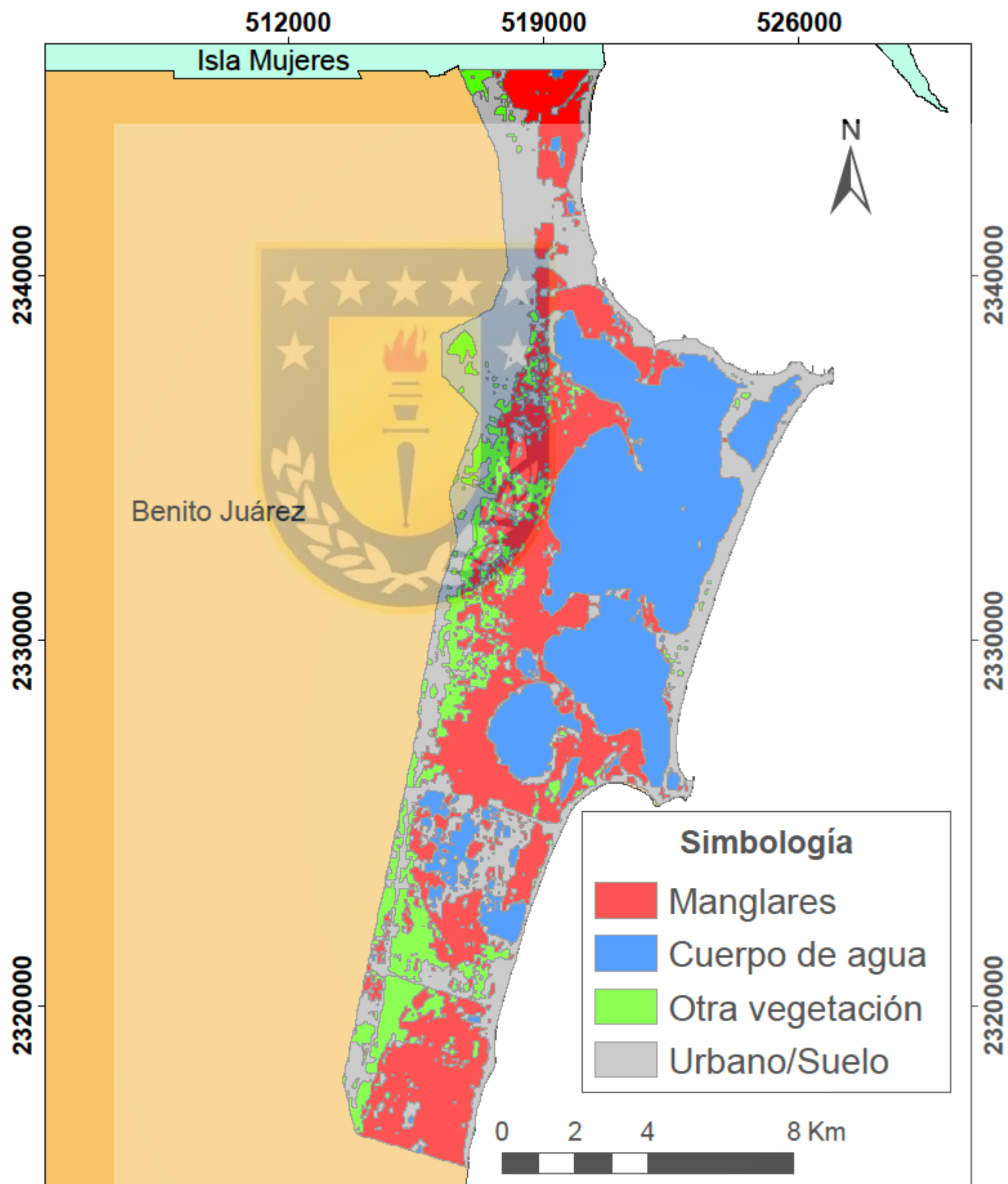
Vera Andrade, E. A. (2018). *Evaluación y análisis de los cambios de cobertura vegetal del manglar del Refugio de Vida Silvestre Manglares Estuario Río Esmeraldas* (Doctoral dissertation, Ecuador-PUCESE-Escuela de Gestión Ambiental).

Wealth Accounting and the Valuation of Ecosystem Services (WAVES). (2017). *Valuing the Protection Services of Mangroves in the Philippines*, Policy Briefing, Philippines,.

Younes, N., Erazo-Mera, E. (14 de mayo de 2019). How we use thousands of satellite images to monitor mangroves. Latinamericanscience. Recuperado el 29 de septiembre de 2020 de: <http://latinamericanscience.org/satellite-image-monitor-mangroves>

Yuvaraj, E., Dharanirajan, K., Saravanan, N., & Karpoorasundarapandian, N. (2014). Evaluation of Vegetation density of the Mangrove forest in South Andaman Island using Remote Sensing and GIS techniques. *International Research Journal of Environment Sciences*, 3(8), 19-25.





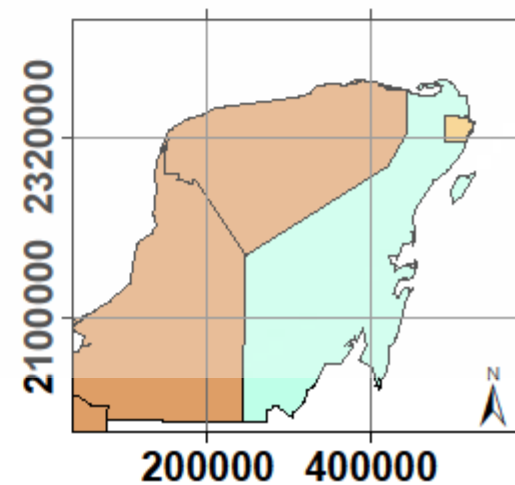
Clasificación Supervisada año 2005

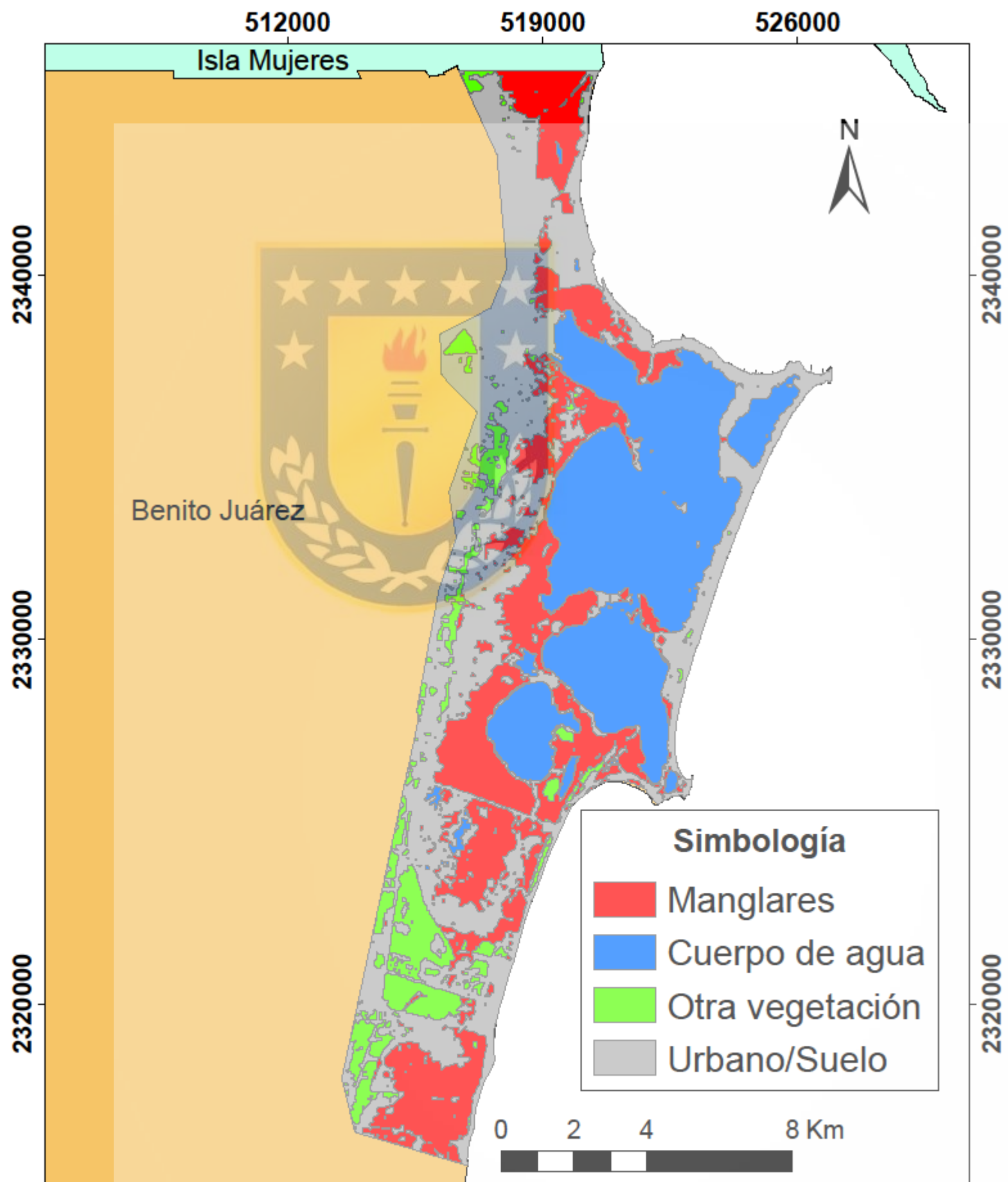
Sistema de coordenadas proyectadas:

WGS 1984 UTM Zona 16N

Escala: 1:100000

Elaborado por: Hermenegildo Hebo





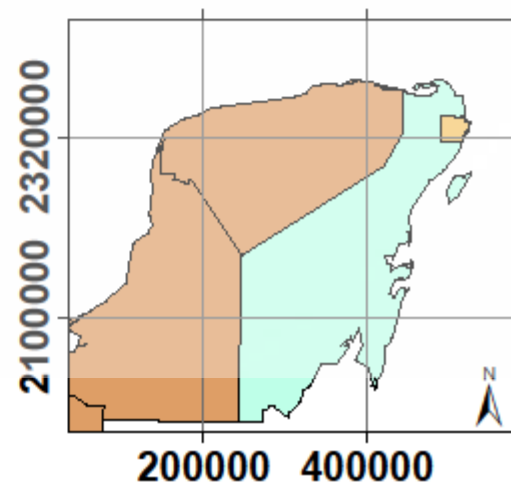
Clasificación Supervisada año 2016

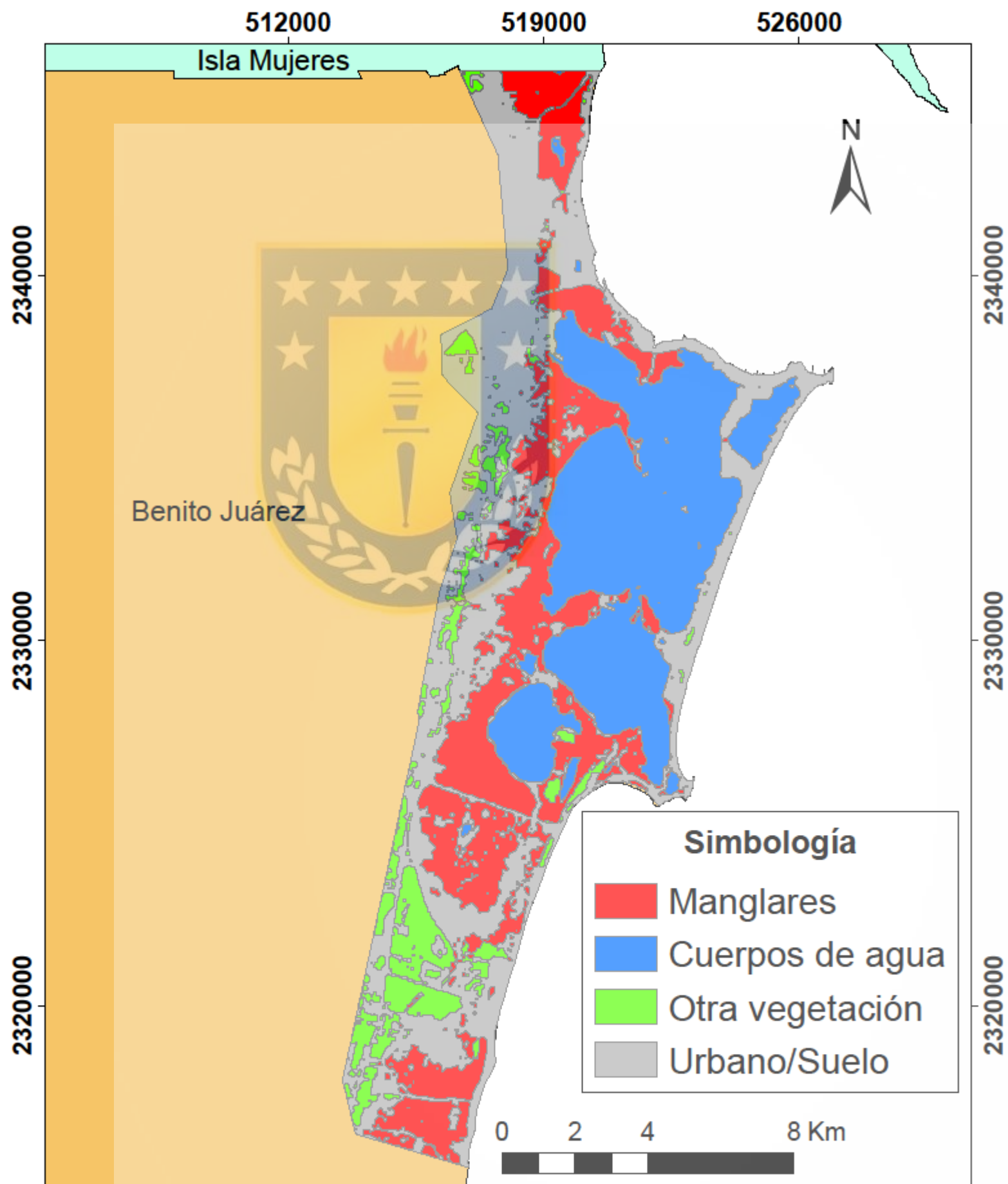
Sistema de coordenadas proyectadas:

WGS 1984 UTM Zona 16N

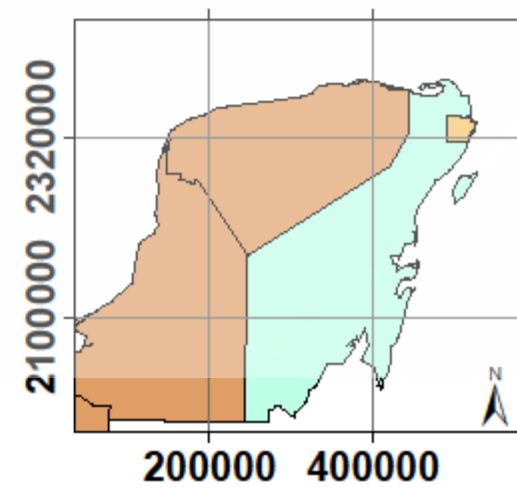
Escala: 1:100000

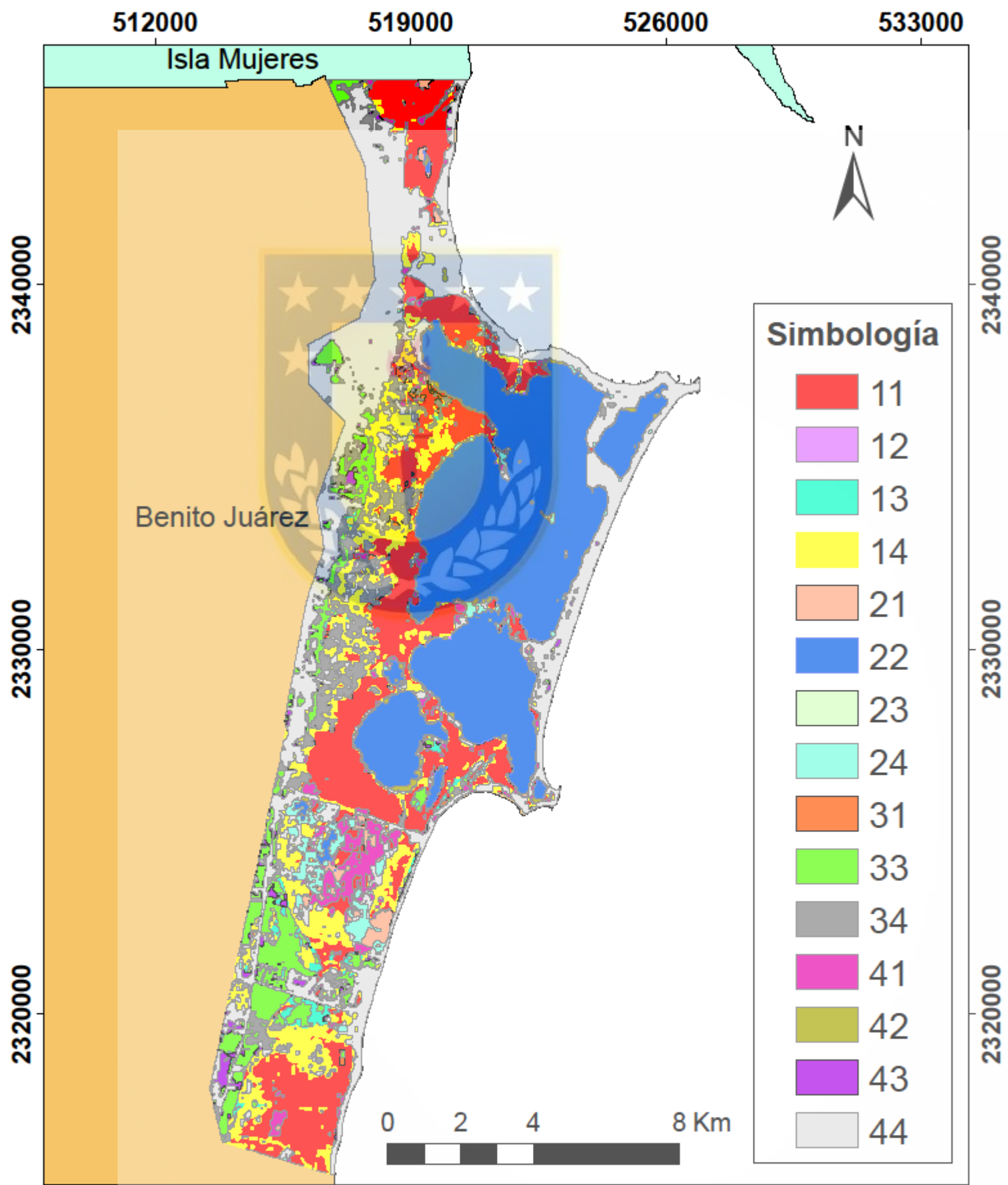
Elaborado por: Hermenegildo Hebo





Clasificación Supervisada año 2019
Sistema de coordenadas proyectadas: WGS 1984 UTM Zona 16N
Escala: 1:100000
Elaborado por: Hermenegildo Hebo



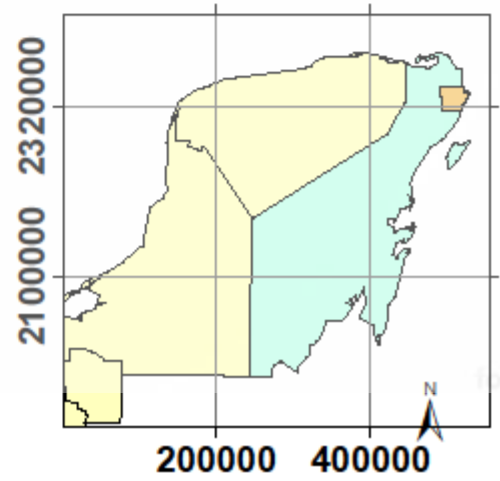


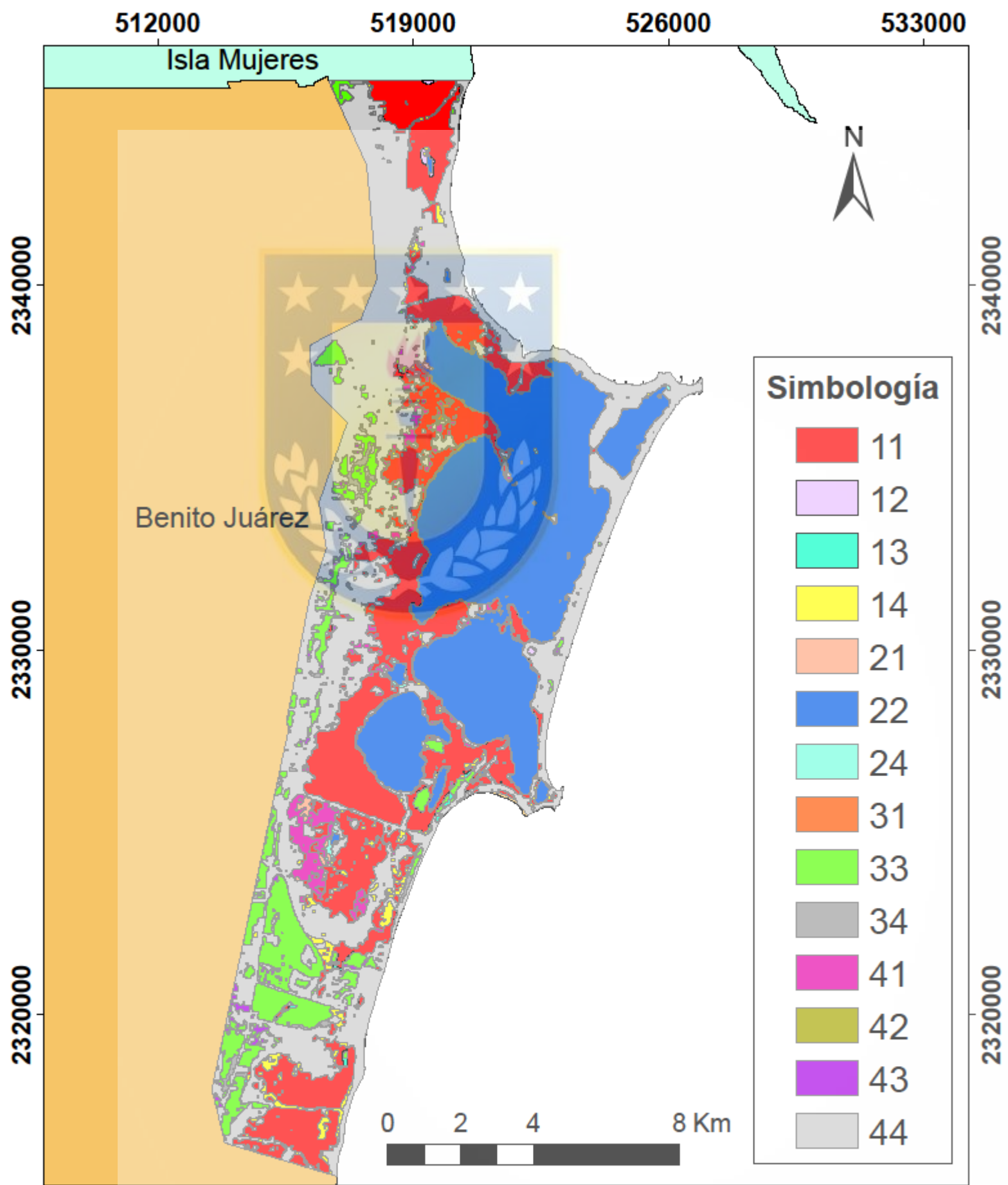
Cambios de las coberturas (2005-2016)

Sistema de coordenadas proyectadas:
WGS 1984 UTM Zona 16N

Escala: 1:100000

Elaborado por: Hermenegildo Hebo





Cambios de las coberturas (2016-2019)

Sistema de coordenadas proyectadas:
WGS 1984 UTM Zona 16N

Escala: 1:100000

Elaborado por: Hermenegildo Hebo

