



SEMARNAT
SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES



**QUINTANA
ROO** UNIDOS PARA
TRANSFORMAR
2022|2027



PROGRAMA DE ORDENAMIENTO ECOLÓGICO LOCAL DEL MUNICIPIO DE TULUM

ETAPA DE PRONÓSTICO

ELABORADO POR:



Consultores
Gppa.

Febrero de 2025

CONTENIDO

9	PRONÓSTICO	4
9.1	INTRODUCCIÓN	4
9.2	MODELO CONCEPTUAL DEL SISTEMA SOCIOAMBIENTAL	5
9.2.1	MÉTODO.....	7
9.2.1.1	TALLERES DE PARTICIPACIÓN SOCIAL	8
9.2.2	RESULTADOS.....	10
9.2.3	ANÁLISIS DE CARGAS Y BENEFICIOS	20
9.3	IMAGEN OBJETIVO	24
9.3.1	RESULTADOS.....	24
9.3.1.1	EJES ESTRATÉGICOS	26
9.4	ESCENARIO TENDENCIAL	36
9.4.1	CAMBIO DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN	37
9.4.1.1	RESULTADOS.....	40
9.4.1.2	PÉRDIDA DE COBERTURA FORESTAL.....	52
9.4.1.3	TENDENCIA	55
9.4.1.3.1	RESULTADOS.....	58
9.4.2	BIODIVERSIDAD	66
9.4.3	CRECIMIENTO URBANO, DINÁMICA DEMOGRÁFICA Y DESARROLLO DEL SECTOR TURÍSTICO	67
9.4.3.1	CRECIMIENTO URBANO, DINÁMICA DEMOGRÁFICA Y DESARROLLO DEL SECTOR TURÍSTICO DE LA COSTA DE QUINTANA ROO.....	72
9.4.3.2	FACTORES QUE INCIDEN EN EL DESARROLLO URBANO.....	77
9.4.3.3	IMPACTOS EN EL DESARROLLO URBANO DE TULUM.	80
9.4.3.4	ESTADO ACTUAL DEL TURISMO EN EL MUNDO Y PERSPECTIVAS DE CRECIMIENTO	81
9.4.3.4.1	RECUPERACIÓN DEL TURISMO EN QUINTANA ROO	83
9.4.3.4.2	PERSPECTIVAS DE CRECIMIENTO DEL TURISMO	85
9.4.3.4.3	RESUMEN DEL MERCADO TURÍSTICO EN MÉXICO Y EL MUNDO	86
9.4.3.4.4	SECTOR TURÍSTICO EN TULUM	87
9.4.3.5	PROYECTOS FEDERALES DE INFRAESTRUCTURA	88
9.4.3.5.1	DEMANDA DE INFRAESTRUCTURA GENERADA POR LOS PROYECTOS FEDERALES.....	92
9.4.3.6	RESUMEN Y CONCLUSIONES	100
9.4.4	OTROS SECTORES ECONÓMICOS	103
9.4.5	CAMBIO CLIMÁTICO	110

9.4.5.1	MÉTODO	112
9.4.5.2	MODELOS Y ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO	118
9.4.5.2.1	ANÁLISIS DE LA TENDENCIA DE LAS VARIABLES CLIMATOLÓGICAS MENSUALES Y ANUALES	121
9.4.5.2.2	EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS CICLONES TROPICALES 150	
9.4.6	DISPONIBILIDAD DE AGUA.....	157
9.4.6.1	DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL MUNICIPIO DE TULUM.....	162
9.4.6.2	DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL PROYECTADA	167
9.4.7	DISPONIBILIDAD PERCÁPITA	172
9.5	ESCENARIO CONTEXTUAL	173
9.5.1	RESULTADOS.....	175
9.6	ESCENARIO ESTRATÉGICO	186
9.6.1	RESULTADOS.....	189

9 PRONÓSTICO

9.1 INTRODUCCIÓN

En el contexto del ordenamiento territorial, es crucial comprender la evolución de los conflictos ambientales y anticiparse a los cambios en el uso y ocupación del territorio. Bajo este contexto el pronóstico desempeña un papel fundamental al permitir anticipar y planificar el desarrollo futuro del territorio.

La importancia del pronóstico radica en su capacidad para informar y orientar la toma de decisiones estratégicas, ayudando a identificar oportunidades de desarrollo, mitigar riesgos y garantizar la sostenibilidad a largo plazo. La participación de diversas partes interesadas es fundamental para garantizar la robustez y la relevancia de los pronósticos, así como su alineación con los objetivos de desarrollo sostenible y las aspiraciones de las comunidades locales.

Considerando lo establecido en el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Ordenamiento Ecológico la etapa de Pronóstico tiene como objetivo examinar la evolución de los conflictos ambientales, a partir de la previsión de las variables naturales, sociales y económicas, considerando¹:

- I. El deterioro de los bienes y servicios ambientales;
- II. Los procesos de pérdida de cobertura vegetal, degradación de ecosistemas y de especies sujetas a protección;
- III. Los efectos del cambio climático;
- IV. Las tendencias de crecimiento poblacional y las demandas de infraestructura urbana, equipamiento y servicios urbanos;
- V. Los impactos ambientales acumulativos considerando sus causas y efectos en tiempo y lugar; y
- VI. Las tendencias de degradación de los recursos naturales y de cambio de los atributos ambientales que determinan la aptitud del territorio para el desarrollo de las actividades sectoriales.

Para lograr el objetivo que plantea, se empleó un enfoque prospectivo que permitió modelar el comportamiento futuro de los atributos ambientales clave, incluyendo la consideración del deterioro de los bienes y servicios ambientales, las tendencias de crecimiento poblacional y urbano, así como las condiciones socioeconómicas de la región.

¹ Artículo 44 del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Ordenamiento Ecológico.

Este análisis se llevó a cabo bajo tres escenarios distintos: tendencial, contextual y estratégico. Cada escenario ofreció una perspectiva única sobre cómo podrían desarrollarse los conflictos ambientales y el uso del territorio en el futuro, permitiendo así una planificación más robusta y adaptativa.

De acuerdo a lo anterior, en este apartado, se presenta como fue abordado el análisis y qué aspectos se consideraron para modelar cada escenario, que tienen como fin el proporcionar una base sólida para la toma de decisiones informadas y la gestión sostenible del territorio.

9.2 MODELO CONCEPTUAL DEL SISTEMA SOCIOAMBIENTAL

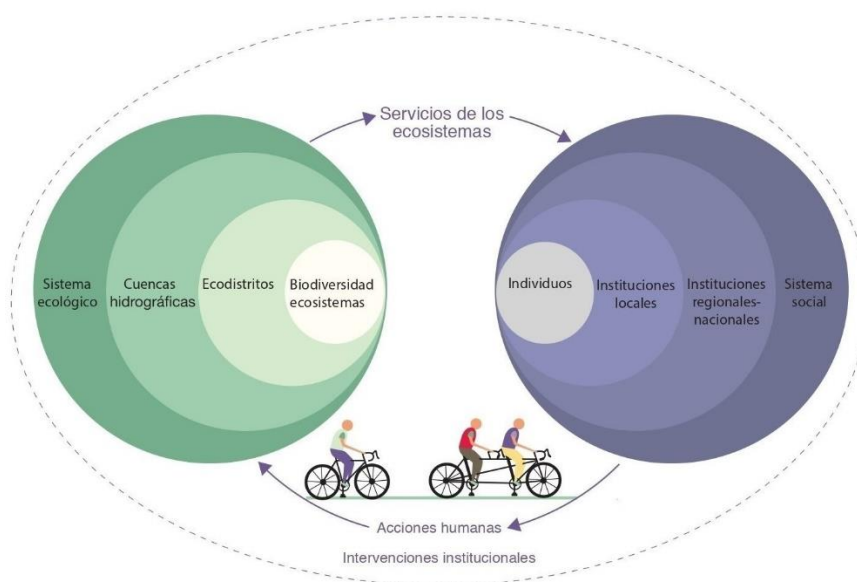
Los sistemas socioambientales, también llamados sistemas socioecológicos, se entienden como un sistema complejo y adaptativo en el que distintos componentes culturales, políticos, sociales, económicos, ecológicos y tecnológicos interactúan de manera continua, aportan una visión integral, mediante un enfoque interdisciplinario, necesarios para abordar problemas ambientales complejos, como la gestión de ecosistemas y gobernanza (Bardsley & Wiseman, 2016; Kopperoinen, Luque, Tenerelli, Zulian & Viinikka, 2017 citados por Cerón et al., 2019)².

En la Figura 1 se presenta un diagrama conceptual desarrollado por Martín-Lotes et al. (2009), que define las características de un sistema socioambiental. En este diagrama se observa que el sistema social está compuesto por individuos, grupos locales e instituciones a mayor escala, así como por las relaciones que se establecen entre ellos. Además, se muestra que el sistema ecológico incluye las distintas escalas de biodiversidad, las cuales están en constante interacción y retroalimentación. Finalmente, se evidencia que ambos sistemas, el social y el ecológico, están interconectados y se relacionan de manera continua (Rincón-Ruíz, et al., 2014)³.

² Cerón, V., Fernández, G., Figueroa, A. y Restrepo, I. 2019. El Enfoque de Sistemas Socioecológicos en las Ciencias Ambientales. Investigación y Desarrollo, vol. 27, núm. 2 pp. 85-109. Fundación Universidad del Norte.

³ Rincón-Ruíz, A., Echeverry-Duque, M., Piñeros, A. M., Tapia, C. H., David, A., Arias-Arévalo, P. y Zuluaga, P. A. 2014. Valoración integral de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos: Aspectos conceptuales y metodológicos. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá, D. C. Colombia, 151 pp.

Figura 1. Diagrama conceptual del sistema socioambiental.



Fuente: Martín-Lotes et al., 2009.

La sociedad depende de los ecosistemas para satisfacer sus necesidades, pero estas acciones también implican modificaciones y transformaciones en los ecosistemas, generando dinámicas de cambio continuo (Berkes et al., 2003 citado por Rincón-Ruíz, et al., 2014).

La modelación de los sistemas socioambientales permite comprender las interacciones entre los procesos sociales, económicos, ambientales y políticos en un territorio desde una perspectiva holística. Esto genera una herramienta eficaz para la gestión de los servicios ecosistémicos. El propósito de la modelación de los sistemas socioambientales puede incluir predicción, comprensión, aprendizaje o como herramienta para el proceso de toma de decisiones.

La conceptualización se refiere a la premisa básica del funcionamiento del sistema, es decir, explicar como la estructura genera el comportamiento del sistema socioambiental, incluyendo una definición clara de variables (Gotts et al., 2018; Kelly et al., 2013 citados por Berrío, 2020)⁴.

⁴ Berrío, L. 2020. Dinámica de Sistemas Socioecológicos en Cuencas Hidrográficas de Media Montaña, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas Departamento de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín, Colombia.

9.2.1 MÉTODO

La construcción del modelo conceptual del sistema socioecológico para el municipio de Tulum se realizó mediante la elaboración de un diagrama causal. Este tipo de diagramas permite conocer la estructura de un sistema dinámico. Esta estructura viene dada por la especificación de las variables que aparecen en el mismo y por el establecimiento de la existencia o no existencia de una relación entre cada variable.

En este diagrama las diferentes relaciones están representadas por flechas. Las flechas van acompañadas de un signo (+ o -) o indicadas en un color, que muestran el tipo de influencia ejercida por una variable sobre la otra. Un signo “+” o color “azul” significa que un cambio en la variable origen de la flecha producirá un cambio del mismo sentido en la variable destino. El signo “-” o color “rojo” simboliza que el efecto producido será en sentido contrario (Aracil, J. 1995⁵; García, J, 2003⁶).

Ejemplo:

Si el incremento de A produce un incremento de B, o si la disminución de A provoca una disminución de B, se reconoce como una relación positiva (Figura 2).

Figura 2. Relación positiva.



Si el incremento de A, produce una disminución de B, o si bien una disminución de A provoca un aumento de B, tendremos una relación negativa (Figura 3).

Figura 3. Relación negativa.



⁵ Aracil, J. 1995. Dinámica de Sistemas. Madrid, España.

⁶ García, J. 2003. Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas. Barcelona España.

Para establecer la intensidad de las relaciones, se utilizó una escala lingüística asociada a una escala cardinal (Tabla 1), siendo positivas o negativas de acuerdo a la relación establecida entre variables, de acuerdo a lo presentado en párrafos previos.

Tabla 1. Escala para determinar la intensidad de las relaciones entre variables.

Expresión lingüística	Clave	Valor cardinal	
		Interacción positiva	Interacción negativa
Muy fuerte	MF	9	-9
Fuerte	F	7	-7
Moderada	M	5	-5
Baja	B	3	-3
Muy baja	MB	1	-1
Nula	N	0	0

Fuente: Merino-Benítez, T. y L. A. Bojórquez-Tapia. 2021.

Las interacciones también se evaluaron en términos de su efecto, siendo α una relación de efecto acumulativo y β una relación de efecto instantánea. En la relación acumulativa el efecto de la variable generadora, x_j , se almacena en la variable receptora x_i . En la relación instantánea, el efecto sobre la variable receptora x_i solamente se manifiesta cuando la variable generadora, x_j , cambia de valor en un período.

9.2.1.1 TALLERES DE PARTICIPACIÓN SOCIAL

El esquema del diagrama del sistema socioambiental, derivó de un ejercicio colectivo de participación del Comité Técnico del Programa de Ordenamiento Ecológico Local de Tulum, mediante la aplicación de la metodología previamente descrita, siguiendo un enfoque sistémico y considerando las siguientes premisas:

- Actividades económicas que inciden en el territorio, así como los sectores conservación y asentamientos humanos.
- Elementos ambientales (agua, suelo, aire, vegetación, etc.).
- Problemáticas ambientales (degradación, contaminación, sobreexplotación, etc.).
- Programas y proyectos gubernamentales que ejecutan acciones compatibles con las actividades sectoriales.

En la conceptualización del modelo se incluyó solo aquellos elementos identificados como de influencia razonable en el comportamiento del sistema, elementos clave o limitantes.

Foto 1. Registro fotográfico del trabajo grupal.

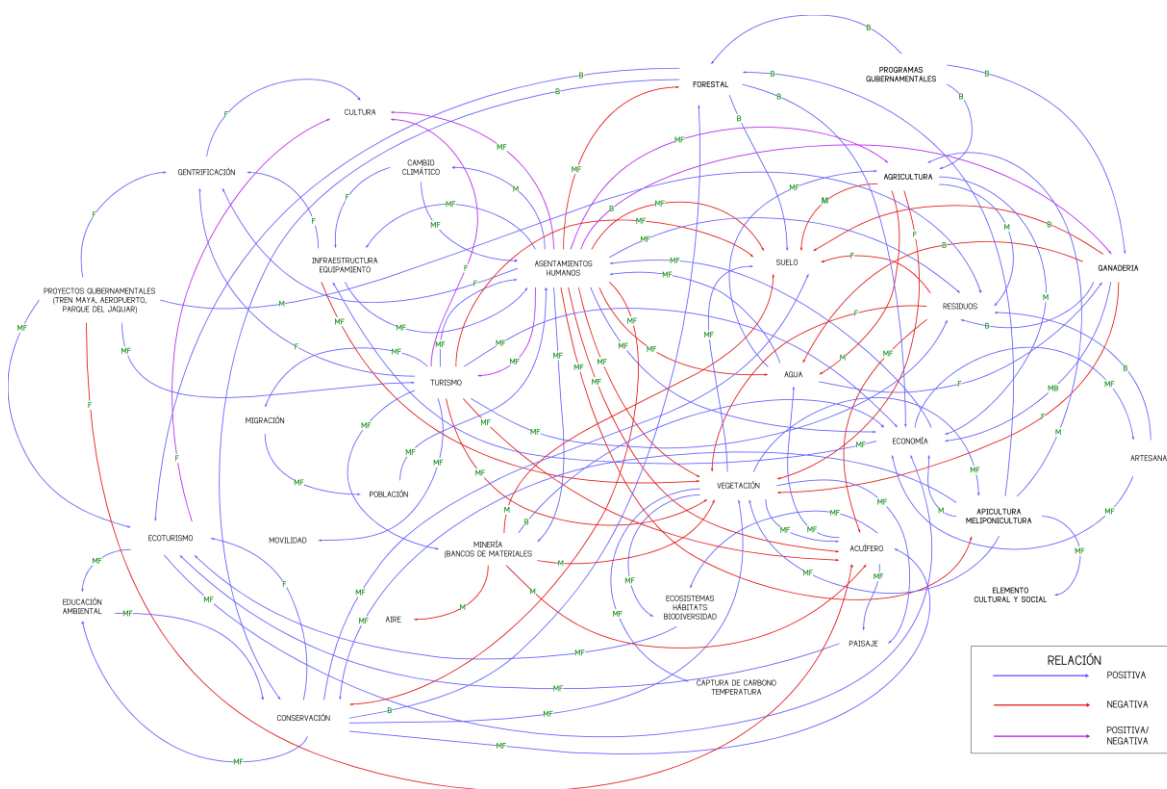


9.2.2 RESULTADOS

En la Figura 4, se presenta un detallado sistema socioambiental, el cual ilustra la compleja composición lograda a partir de la información recopilada durante el trabajo colaborativo llevado a cabo por el Comité Técnico. Los datos obtenidos posteriormente fueron analizados e integrados en un modelo conceptual unificado.

El modelo resultante no solo refleja la interrelación entre los componentes sociales y ambientales, sino que también proporciona una visión comprensiva de las dinámicas y sinergias que caracterizan el sistema socioambiental del municipio de Tulum.

Figura 4. Modelo conceptual del sistema socioambiental del municipio de Tulum.



Fuente: Elaboración propia con información obtenida en los talleres de participación social.

Así mismo, este modelo aporta una comprensión profunda y amplia de la interdependencia que existe entre los sistemas ecológico y social, identificándose como elementos críticos, para el desarrollo de las actividades económicas, el suelo, agua, vegetación y acuífero.

El sector asentamientos humanos y la actividad turística, los cuales están estrechamente relacionados y registran un crecimiento exponencial en los últimos años, determinan gran parte de la dinámica territorial, siendo fuertes catalizadores del crecimiento de otras actividades y principales fuentes de presión sobre los recursos.

El sector conservación representa un elemento importante en el mantenimiento de la biodiversidad, hábitats, ecosistemas y servicios ecosistémicos, indispensables para el desarrollo de los sectores productivos en Tulum.

En la siguiente Tabla 2, se presenta una breve descripción de las interacciones entre variables identificadas para este sistema socioambiental.

Tabla 2. Descripción de las interacciones entre variables del sistema socioambiental. MF = Muy fuerte; F = Fuerte; M = Moderada; B = Baja; MB = Muy baja y N = Nula.

Generadora	Variable Receptora	Influencia	Intensidad	Efecto	Relación entre variables
Asentamiento humano	Turismo	+/-	MF	A	Los asentamientos humanos proveen de la infraestructura, servicios y atracciones necesarias para el turismo. El turismo por su parte, representa un propulsor del desarrollo económico y crecimiento de los asentamientos humanos. De igual manera, el turismo conlleva un intercambio cultural y en algunos casos, la transformación de las costumbres y modos de vida locales.
Turismo	Asentamiento humano	+	MF	A	
Asentamiento humano	Infraestructura y equipamiento	+	MF	A	Los asentamientos humanos demandan infraestructura y equipamiento para satisfacer las necesidades de la población. También determinan la distribución, tipo y cantidad de infraestructura y equipamiento requerido. La actividad económica que genera los asentamientos humanos financia la construcción y mantenimiento de infraestructura y equipamiento. La infraestructura y equipamiento facilitan el desarrollo y la expansión de los asentamientos humanos.
Infraestructura y equipamiento	Asentamiento humano	+	MF	A	
Asentamiento humano	Agricultura	+/-	MF	A	La población de los asentamientos humanos

Generadora	Variable Receptora	Influencia	Intensidad	Efecto	Relación entre variables
Asentamiento humano	Ganadería	+/-	B	A	necesita alimentos, lo cual impulsa la producción agrícola y ganadera para satisfacer esta demanda. La proximidad a áreas urbanas mejora el acceso a infraestructura como carreteras, mercados y servicios básicos, lo que facilita la producción, transporte y comercialización de productos agrícolas y ganaderos. La expansión de los asentamientos humanos puede llevar a la conversión de tierras agrícolas y ganaderas en terrenos urbanos, disminuyendo la superficie disponible para estas actividades.
Asentamiento humano	Apicultura /meliponicultura	-	MF	A	El crecimiento de los asentamientos humanos conlleva la conversión de áreas naturales, lo que implica la reducción de hábitat disponible para las abejas y de superficie forestal.
Asentamiento humano	Forestal	-	MF	A	
Asentamiento humano	Agua	-	MF	A	La demanda de agua aumenta en la medida que los asentamientos humanos crecen. Los asentamientos humanos también pueden generar contaminación de este recurso a través del desarrollo de diversas actividades. La disponibilidad de recursos hídricos influye en la localización y expansión de asentamientos humanos.
Agua	Asentamiento humano	+	MF	I	
Asentamiento humano	Vegetación	-	MF	A/I	El establecimiento de los asentamientos humanos y desarrollo turístico requiere de la eliminación de la cobertura vegetal y suelo para dar paso a construcciones y otras infraestructuras.
Asentamiento humano	Suelo	-	MF	A/I	
Turismo	Vegetación	-	MF	A/I	
Turismo	Suelo	-	MF	A/I	
Asentamiento humano	Acuífero	-	MF	A	Los asentamientos humanos y el desarrollo turístico reducen la superficie permeable, disminuyendo la recarga natural del acuífero. La población de los asentamientos humanos y turística, llevan a cabo actividades que posibilitan la contaminación del acuífero. La construcción de infraestructura requerida para los asentamientos humanos y el turismo conllevan la alteración del paisaje
Turismo	Acuífero	-	MF	A	

Generadora	Variable Receptora	Influencia	Intensidad	Efecto	Relación entre variables
					natural que puede modificar los ciclos hidrológicos locales.
Asentamiento humano	Cambio climático	+	M	A	Los asentamientos humanos son emisores de GEI derivado de actividades como el transporte, industria, demanda de energía y eliminación de vegetación. El cambio climático aumenta la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, que pueden causar afectación a asentamientos humanos e infraestructura asociada.
Cambio climático	Asentamiento humano	+	F	A/I	
Cambio climático	Infraestructura y equipamiento	+	F	A/I	
Asentamiento humano	Cultura	+/-	MF	A	Los asentamientos humanos juegan un papel crucial en la preservación del patrimonio cultural tangible e intangible. El turismo y ecoturismo puede revitalizar y preservar la cultura local, pero también pueden comercializarla y aumentar la presión sobre los recursos y la infraestructura. La gentrificación impulsada por los procesos sociales que se manifiestan en el territorio puede llevar al desplazamiento de residentes locales debido al aumento de precios en la vivienda y el costo de vida. Esto puede erosionar la cohesión social y la identidad cultural de una comunidad, diluyendo las tradiciones y prácticas locales.
Turismo	Cultura	+/-	F	A	
Ecoturismo	Cultura	+/-	F	A	
Gentrificación	Cultura	+	F	A	
Asentamiento humano	Residuos	+	MF	A	Toda actividad humana conlleva la generación de residuos sólidos, líquidos, de manejo especial o peligrosos.
Turismo	Residuos	+	MF	A	
Ganadería	Residuos	+	B	A	
Agricultura	Residuos	+	M	A	
Artesanal	Residuos	+	B	A	
Proyectos gubernamentales (Tren Maya, Aeropuerto, Parque del Jaguar)	Residuos	+	M	A	
Asentamiento humano	Conservación	-	MF	A/I	Los asentamientos humanos pueden ejercer presión sobre los recursos naturales y los ecosistemas a través de su expansión, contaminación, demanda y extracción.
Asentamiento humano	Economía	+	MF	A	Los asentamientos humanos son centros de actividad económica, atraen inversiones, fomentan el comercio y crean
Turismo	Economía	+	MF	A	
Ganadería	Economía	+	MB	A	

Generadora	Variable Receptora	Influencia	Intensidad	Efecto	Relación entre variables
Agricultura	Economía	+	M	A	empleo. Por su parte las diversas actividades contribuyen al crecimiento económico mediante la creación de empleo, la generación de ingresos y la producción de bienes y servicios.
Apicultura / meliponicultura	Economía	+	M	A	
Forestal	Economía	+	B	A	
Ecoturismo	Economía	+	MF	A	
Minería (bancos de materiales)	Economía	+	B	A	
Asentamiento humano	Minería (bancos de material)	+	MF	A	Los asentamientos humanos influyen en los bancos de materiales principalmente a través de la demanda de materiales para la construcción de infraestructura y vivienda. Esta demanda impulsa la expansión de esta actividad económica.
Turismo	Minería (bancos de material)	+	MF	A	
Asentamiento humano	Gentrificación	+	F	A	Los asentamientos humanos a través del desarrollo urbano, las mejoras en la infraestructura, la demanda de vivienda y los proyectos y políticas gubernamentales, influyen en el proceso de gentrificación.
Infraestructura y equipamiento	Gentrificación	+	F	A	
Proyectos gubernamentales (Tren Maya, Aeropuerto, Parque del Jaguar)	Gentrificación	+	F	A	
Turismo	Movilidad	+	MF	A	El turismo impulsa la mejora y expansión de la infraestructura de transporte, para facilitar el acceso y la movilidad del destino turístico. Sin embargo, la población turística puede influir en la sobrecarga y congestión de la infraestructura y sistemas de transporte.
Turismo	Migración	+	MF	A	El turismo genera una amplia gama de empleos en sectores como el hotelaría, el transporte, entretenimiento y servicios, atrayendo a trabajadores migrantes. La migración aporta mano de obra y diversidad cultural a los destinos turísticos. La afluencia de migrantes también puede cambiar la demografía de las áreas turísticas.
Migración	Población	+	MF	A	La migración afecta directamente en la composición y tamaño de la población en las áreas de destino, originando cambios significativos en la dinámica social, en la planificación urbana y el requerimiento de servicios públicos.

Generadora	Variable Receptora	Influencia	Intensidad	Efecto	Relación entre variables
Población	Asentamiento humano	+	MF	A	El tamaño y la distribución de la población influyen en la formación, desarrollo y expansión de los asentamientos humanos. La densidad de población, las necesidades de vivienda, los servicios y la infraestructura están directamente relacionados con la cantidad y ubicación de los asentamientos.
Conservación	Acuífero	+	MF	A/I	Las prácticas de conservación, como la gestión del uso del agua, la protección de zonas de recarga y el mantenimiento o mejora de la cobertura vegetal, contribuyen a la sostenibilidad a largo plazo y garantizan la provisión de servicios ecosistémicos esenciales para la supervivencia y el bienestar humano.
Conservación	Vegetación	+	MF	A/I	
Conservación	Suelo	+	MF	A/I	
Conservación	Forestal	+	B	A/I	La preservación de la biodiversidad, la protección de hábitats y el mantenimiento de paisajes naturales, a través de las prácticas de conservación, contribuyen a una experiencia de ecoturismo enriquecedor. Por otro lado, la gestión adecuada de las selvas, asegura la sostenibilidad a largo plazo de este recurso y elementos asociados, como el suelo, agua, biodiversidad, etc. Además, la gestión forestal adecuada promueve la salud del ecosistema y evita la degradación ambiental.
Forestal	Conservación	+	B	A	
Conservación	Ecoturismo	+	F	A/I	
Ganadería	Vegetación	-	F	A/I	Prácticas de manejo no sostenible de estas actividades requieren de la eliminación de la cobertura vegetal e implican la degradación del suelo. Por otro lado, el acceso a agua limpia y abundante es fundamental para su desarrollo. Fuentes de agua adecuadas aseguran la sostenibilidad de estas actividades.
Ganadería	Suelo	-	B	A/I	
Ganadería	Agua	-	B	A	
Agua	Ganadería	+	F	I	
Agricultura	Vegetación	-	F	A/I	
Agricultura	Suelo	-	M	A/I	
Agricultura	Agua	-	M	A	
Agua	Agricultura	+	MF	I	
Artesanal	Economía	+	MF	A	La actividad artesanal contribuye a la economía local, como el comunitario mediante la generación de ingresos y empleo. También coadyuva en la preservación de las
Economía	Artesanal	+	MF	A	

Generadora	Variable Receptora	Influencia	Intensidad	Efecto	Relación entre variables
					tradiciones culturales y a fortalecer la identidad cultural. Por otro lado, una economía fuerte y favorable provee de los recursos y el apoyo necesario para el desarrollo de la actividad artesanal.
Apicultura / meliponicultura	Agricultura	+	M	A	La gestión adecuada en la apicultura y meliponicultura, puede mejorar la salud de los ecosistemas forestales, aumentando la biodiversidad y la regeneración natural. La apicultura y meliponicultura para la agricultura puede generar beneficios en términos de producción agrícola. Los ecosistemas forestales y cultivos proporcionan recursos cruciales para el mantenimiento y productividad de las abejas.
Apicultura / meliponicultura	Forestal	+	B	A	
Apicultura / meliponicultura	Vegetación	+	MF	A	Las abejas juegan un papel crucial en la polinización de plantas, lo que mejora la reproducción y diversidad de la vegetación. Una polinización efectiva aumenta la producción de semillas y frutos, lo que a su vez beneficia a la fauna local y contribuye a la estabilidad del ecosistema. Además, la meliponicultura contribuye en la conservación de especies de nativas polinizadoras, así como de flora. Una vegetación rica, variada y en buen estado de conservación sostiene la salud y productividad de las colonias de abejas, permitiendo una producción de calidad y constante de productos apícolas.
Apicultura / meliponicultura	Conservación	+	MF	A	
Vegetación	Apicultura /meliponicultura	+	MF	A/I	
Apicultura / meliponicultura	Elemento cultural y social	+	MF	A	La apicultura y la meliponicultura son prácticas profundamente enraizadas en las tradiciones culturales de muchas comunidades. Estas actividades no solo contribuyen a la conservación de ecosistemas e ingresos económicos, sino que también forman parte integral de las prácticas tradicionales y conocimientos ancestrales. La preservación y promoción de estas prácticas enriquecen la

Generadora	Variable Receptora	Influencia	Intensidad	Efecto	Relación entre variables
					identidad cultural y fortalecen el patrimonio cultural local.
Forestal	Ecoturismo	+	B	A	Las prácticas forestales sostenibles pueden mejorar el atractivo de las selvas como destinos ecoturísticos. La gestión adecuada de las selvas, incluyendo la conservación de la biodiversidad, la creación de senderos y la protección de paisajes naturales, aumenta el valor estético y recreativo. Esto atrae a más turistas interesados en experiencias naturales y educativas.
Forestal	Suelo	+	B	A	Las prácticas forestales sostenibles promueven la estabilización de suelo, reducen su pérdida y previenen su erosión.
Ecoturismo	Educación ambiental	+	MF	A	El ecoturismo ofrece un contexto ideal para la educación ambiental. Al proporcionar a los visitantes experiencias directas en la naturaleza se aumenta la conciencia y comprensión de los problemas ambientales. A futuro, esta mayor conciencia puede traducirse en acciones positivas para la conservación y el comportamiento sostenible.
Educación ambiental	Conservación	+	MF	A	
Conservación	Educación ambiental	+	MF	A	A medida que la educación ambiental se extiende y profundiza en una comunidad, se incrementa gradualmente el compromiso y la participación en actividades de conservación. Este aumento en la conciencia y el conocimiento fomenta un apoyo más fuerte y sostenido para las políticas y proyectos de conservación.
Vegetación	Acuífero	+	MF	A/I	La vegetación influye en el microclima local, proporcionando sombra y reduciendo las temperaturas extremas. También ayudan a mantener o mejorar la calidad del aire y funcionan como sumideros de carbono. Es crucial en la prevención de la erosión del suelo y contribuye a mantener o mejorar su calidad con la aportación de materia orgánica. Proveen de áreas recreativas y estéticamente agradables que
Vegetación	Paisaje	+	MF	A/I	
Vegetación	Ecosistemas / hábitats / biodiversidad	+	MF	A/I	
Vegetación	Captura de carbono /regulación de temperatura	+	MF	A/I	
Vegetación	Suelo	+	MF	A/I	

Generadora	Variable Receptora	Influencia	Intensidad	Efecto	Relación entre variables
					influye en el bienestar humano.
Acuífero	Ecosistemas / hábitats / biodiversidad	+	MF	A/I	Los acuíferos son una fuente crucial de agua. Un acuífero saludable y bien gestionado asegura un suministro continuo de agua potable, esencial para la vida y el desarrollo económico. Así mismo un acuífero saludable contribuye a la estabilidad de los ecosistemas locales y a mantener fuentes de agua superficial vitales para la biodiversidad y el bienestar humano.
Acuífero	Agua	+	MF	A/I	
Acuífero	Paisaje	+	MF	A/I	
Minería (bancos de materiales)	Vegetación	-	M	A/I	A través de los procesos geológicos locales, relacionados con el acuífero, se puede apreciar el paisaje actual que caracteriza Tulum.
Minería (bancos de materiales)	Acuífero	-	M	A/I	
Minería (bancos de materiales)	Aire	-	M	I	
Minería (bancos de materiales)	Suelo	-	M	A/I	
Residuos	Acuífero	-	MF	A	La extracción de materiales implica la remoción de la cubierta vegetal y del suelo superficial. La alteración del terreno puede cambiar el flujo superficial y subterráneo del agua. La realización de esta actividad conlleva la generación de polvos que pueden originar otros efectos a nivel ambiental y social.
Residuos	Vegetación	-	F	A	
Residuos	Suelo	-	F	A	
Infraestructura y equipamiento	Vegetación	-	MF	A/I	Las actividades humanas, como el uso de fertilizantes, pesticidas, manejo inadecuado de residuos, puede contaminar el acuífero, suelo y vegetación.
Economía	Infraestructura y equipamiento	+	MF	A	La construcción de infraestructura tiene un impacto inmediato en la vegetación local, ya que requiere la remoción de plantas y árboles en el área de construcción. Esto resulta en la pérdida instantánea de cobertura vegetal y reducción de hábitat para especies.
Paisaje	Ecoturismo	+	MF	I	La economía de un área determina en gran medida la disponibilidad de recursos financieros para desarrollar y mantener infraestructuras y equipamientos. Una economía próspera puede permitir inversiones en proyectos de infraestructura, así como en equipamientos.

Generadora	Variable Receptora	Influencia	Intensidad	Efecto	Relación entre variables
Ecosistemas / hábitats / biodiversidad	Ecoturismo	+	MF	I	Estos elementos son los principales atractivos del ecoturismo. Un paisaje natural diverso y bien conservado, ecosistemas únicos, hábitats diversos y una amplia biodiversidad son lo que atrae a los turistas interesados en experimentar y disfrutar de la naturaleza en su estado original.
Programas gubernamentales	Agricultura	+	B	I	Los programas gubernamentales, pueden tener un impacto significativo en el desarrollo y la gestión de las actividades primarias. Estos programas pueden influir en la planificación de la producción, el uso de la tierra y el acceso a recursos y mercados. Los programas gubernamentales dirigidos a las actividades primarias, sin considerar principios de sostenibilidad pueden originar efectos negativos en el medio ambiente.
Programas gubernamentales	Ganadería	+	B	I	
Programas gubernamentales	Forestal	+	B	I	
Proyectos gubernamentales (Tren Maya, Aeropuerto, Parque del Jaguar)	Turismo	+	MF	A	Influyen en la afluencia de viajeros para Tulum, como destino turístico. Un aumento en el turismo genera demandas adicionales de infraestructura y equipamiento. Así mismo ejerce presión sobre los recursos naturales locales, pero también estimula el desarrollo económico regional.
Proyectos gubernamentales (Tren Maya, Aeropuerto, Parque del Jaguar)	Ecoturismo	+	MF	A	
Proyectos gubernamentales (Tren Maya, Aeropuerto, Parque del Jaguar)	Acuífero	-	F	A	La construcción de grandes proyectos puede generar riesgos de contaminación del agua subterránea y modificación en los patrones de drenaje y recarga en el acuífero.

Fuente: Elaboración propia con información obtenida en los talleres de participación social.

9.2.3 ANÁLISIS DE CARGAS Y BENEFICIOS

Basado en el modelo conceptual del sistema socioambiental del municipio de Tulum, se ha realizado un análisis de cargas y beneficios considerando las interacciones y relaciones entre los sectores y los componentes clave del sistema. Este análisis busca entender cómo se distribuyen los impactos negativos y positivos en el territorio y entre los diferentes actores sociales, económicos y elementos ambientales.

Identificación de cargas

Las principales cargas del sistema socioambiental derivan de la expansión de los asentamientos humanos, el turismo, proyectos gubernamentales la minería (extracción de material pétreo). Estas actividades generan mayor presión sobre los recursos naturales y las comunidades locales.

Cargas ambientales

- Degradación o alteración del acuífero: La expansión de asentamientos humanos, el turismo, la minería (extracción de material pétreo) y los proyectos gubernamentales (Tren Maya, Aeropuerto, Parque del Jaguar) reducen la capacidad de recarga del acuífero, alteran los flujos superficiales y subterráneos del agua y aumentan su contaminación.
- Deforestación y pérdida de vegetación: El crecimiento urbano, el turismo, los proyectos gubernamentales y en menor medida la extracción de material pétreo, las actividades agrícolas y ganaderas contribuyen a la reducción de cobertura vegetal, la fragmentación de ecosistemas, la reducción de hábitats y pérdida de biodiversidad.
- Pérdida de suelo y erosión: La expansión de asentamientos humanos y desarrollos turísticos y la extracción de material pétreo provocan la alteración del paisaje natural y reducen la estabilidad del suelo.
- Contaminación de agua y suelo: Residuos sólidos y líquidos generados por la urbanización y actividades económicas impactan negativamente los ecosistemas.

Cargas Sociales

- Presión sobre la infraestructura y servicios: El crecimiento de asentamientos humanos y la llegada masiva de turistas generan demanda adicional de agua, energía, transporte y saneamiento.
- Transformación cultural: La actividad turística puede diluir las tradiciones y costumbres locales debido a la comercialización cultural.

- Conflictos por el acceso a recursos: La expansión del turismo y la urbanización pueden restringir el acceso de comunidades locales a recursos naturales clave (agua, áreas agrícolas, etc.).

Cargas Económicas

- Dependencia del turismo: La economía local está altamente vinculada al turismo, lo que la hace vulnerable a crisis económicas o cambios en la demanda.
- Desigualdad económica: Los beneficios del turismo y los proyectos de infraestructura suelen concentrarse en grandes inversionistas y empresas, con menor beneficio directo para comunidades locales.

Identificación de beneficios

Los beneficios identificados en el sistema socioambiental se relacionan con el desarrollo económico, la conservación de ecosistemas y la mejora de infraestructura.

Beneficios ambientales

- Conservación de ecosistemas: Las prácticas de conservación contribuyen al mantenimiento de la biodiversidad, hábitats y servicios ecosistémicos.
- La implementación de estrategias de conservación ayuda a mantener la biodiversidad, los hábitats y servicios ecosistémicos.
- Educación ambiental: El ecoturismo y la conservación promueven la conciencia ambiental y fomentan la realización de prácticas sostenibles.

Beneficios Sociales

- Generación de empleo: El turismo y los proyectos gubernamentales crean oportunidades laborales directas e indirectas.
- Diversificación cultural: La migración laboral y la interacción con turistas enriquecen la cultura local.
- Mejor infraestructura: El desarrollo de infraestructura mejora el acceso a servicios básicos, carreteras y equipamiento urbano.

Beneficios Económicos

- Aumento de inversión: Los proyectos turísticos y gubernamentales generan flujo de inversión y fortalecen la economía local.
- Impulso a la economía local: Sectores como la apicultura/meliponicultura y comercio artesanal se benefician de la demanda del turismo.

- Ecoturismo como alternativa sostenible: Potencial de desarrollo de actividades turísticas basadas en la naturaleza sin degradar el medio ambiente.

Distribución de cargas y beneficios

En la siguiente Tabla 3, se presenta la relación en la distribución de cargas y beneficios identificados para los actores/sectores dentro del sistema ambiental del municipio de Tulum.

Tabla 3. Distribución de cargas y beneficios.

Sector / Actor	Cargas	Beneficios
Comunidades locales	Desplazamiento, pérdida de acceso a recursos naturales, transformación cultural y pérdida de identidad, conflictos sociales	Generación de empleo, fortalecimiento de actividades tradicionales (apicultura, artesanía), acceso a infraestructura y servicios, valoración cultural, oportunidad de emprendimiento
Sector conservación	Degradación del acuífero, deforestación y fragmentación de ecosistemas, contaminación de suelo y agua, pérdida de biodiversidad, impactos derivados del cambio climático	Conservación de ecosistemas, educación ambiental, soporte a la economía local
Sector turismo	Dependencia económica, impacto ambiental significativo, sobrecarga de infraestructura, gentrificación y exclusión social	Generación de empleos, impulso a la economía local, desarrollo de infraestructura, diversificación cultural y promoción del patrimonio, inversión económica
Sector agrícola y pecuario	Pérdida de tierras por urbanización, degradación de suelos y recursos hídricos	Expansión de mercados locales y acceso a infraestructura
Inversionistas y grandes empresas	Impactos ambientales por construcción de infraestructura, desplazamiento de comunidades locales, presión sobre recursos naturales	Generación de inversiones significativas, desarrollo de infraestructura y servicios, creación de empleos directos e indirectos, impulso al turismo como motor económico
Gobierno local	Conflictos por la gestión de recursos naturales, presión por la expansión de la infraestructura, falta de capacidad técnica y financiera, aumento en la solicitud de servicios básicos y de saneamiento	Incremento en la recaudación fiscal, impulso al desarrollo económico regional, fortalecimiento de la infraestructura local

Conclusión

El modelo conceptual refleja la complejidad del sistema socioambiental de Tulum. Las actividades humanas, particularmente el turismo y los asentamientos humanos, generan impactos negativos significativos en el medio ambiente y las comunidades locales, mientras que los beneficios económicos y sociales están desigualmente distribuidos. De manera general se puede observar lo siguiente:

- Desigualdad en la distribución de impactos: Las comunidades locales y el medio ambiente absorben las mayores cargas, mientras que los beneficios económicos se concentran en grandes desarrolladores e inversionistas.
- Vulnerabilidad del sistema: La dependencia del turismo y la presión sobre los recursos naturales hacen que el sistema sea frágil ante crisis económicas, sociales o ambientales.
- Potencial de sinergias positivas: Las estrategias de conservación, educación ambiental y diversificación económica pueden equilibrar las cargas y beneficios.

En este contexto es preciso:

- Fortalecer la regulación ambiental: Implementar medidas estrictas para mitigar la deforestación, proteger el acuífero y manejar adecuadamente los residuos.
- Promover la equidad social: Establecer programas de apoyo para comunidades locales que garanticen acceso a recursos y oportunidades económicas.
- Fomentar la diversificación económica: Incentivar actividades como la apicultura, meliponicultura y el ecoturismo que generen beneficios económicos sin dañar el medio ambiente.
- Zonificación ecológica: Establecer límites claros para el crecimiento urbano y la expansión turística en función de la capacidad de los ecosistemas.
- Fondos de compensación ambiental: Generar los mecanismos para que la población pueda acceder a este tipo de incentivos económicos ambientales.

9.3 IMAGEN OBJETIVO

La imagen objetivo se define como la visión ideal y deseada del modelo territorial que se aspira a alcanzar. Considera las interrelaciones actuales entre los aspectos ambientales, sociales y económicos y las tendencias previstas a futuro. Y actúa como un marco de referencia y guía para la planificación y gestión del territorio⁷.

En este apartado se describe la imagen objetivo establecida para el Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial del Municipio de Tulum, la cual fue construida de manera participativa a través del Comité Técnico, quien identificó y priorizó los ejes estratégicos, objetivos y metas para transformar la visión ideal y deseada en una realidad tangible.

Esta imagen objetivo, se centra en lograr un equilibrio armónico entre la protección ambiental, bienestar social y crecimiento económico y establece un compromiso colectivo hacia un futuro donde Tulum sea un ejemplo de convivencia sostenible entre la naturaleza y la sociedad.

9.3.1 RESULTADOS

A continuación, se presenta la imagen objetivo considerada para el municipio de Tulum en el marco del Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial.

“En el horizonte, el municipio de Tulum se posiciona como un modelo de desarrollo equilibrado, donde la gestión eficiente de los recursos naturales y la planificación territorial son fundamentales para asegurar la viabilidad y el bienestar de la comunidad, así como revertir la degradación ambiental y asegurar la protección y preservación de los ecosistemas. Conscientes de la importancia de consolidar esta imagen objetivo, nos proponemos trazar un camino hacia un futuro sostenible, fundamentado en siete ejes estratégicos.

1. Gestión integral del recurso hídrico y conservación del sistema kárstico.
2. Gestión sostenible del recurso forestal.
3. Conservación y aprovechamiento sustentable de la biodiversidad.
4. Gestión ambiental integral de los residuos.
5. Desarrollo económico sostenible
6. Asentamientos humanos sostenibles y resilientes
7. Gobernanza.

⁷ Márquez, M. y Veloso, Eva. 2020. El Ordenamiento Territorial en Chile Estado del Arte. Revista Estado, Gobierno y Gestión Pública. No. 35.

En nuestra visión, la gestión integral del recurso hídrico ocupa un lugar central como componente esencial de nuestro patrimonio natural. Nos comprometemos a liderar una labor dedicada a salvaguardar la pureza y la abundancia de nuestras aguas subterráneas, reconociendo su importancia crítica para el sustento de la vida y el equilibrio de nuestros ecosistemas.

Este compromiso considera no solo asegurar la disponibilidad y la calidad del agua para el consumo humano, sino también para respaldar el desarrollo de las actividades económicas del municipio. Asimismo, conlleva la preservación de la integridad del acuífero y los ecosistemas asociados, reconociendo su papel en la conservación de la biodiversidad y la estabilidad de nuestro entorno natural. Esto se logrará mediante la adopción de prácticas de manejo eficiente y restauración de ecosistemas, asegurando así la salud y la resiliencia de nuestros sistemas naturales.

En el ámbito forestal, nos comprometemos a promover la conservación y el uso responsable de nuestras comunidades vegetales, reconociendo su valor como reservorios de biodiversidad, sumideros de carbono y proveedores de bienes y servicios indispensables para la vida. Buscamos fomentar prácticas de manejo forestal sustentable que aseguren la regeneración de nuestros recursos y la prosperidad de nuestras comunidades.

En términos de biodiversidad, buscamos asegurar la protección de nuestros ecosistemas y diversidad biológica mientras se fomenta un uso responsable de los recursos, reconociendo la interdependencia entre los seres vivos y la importancia de mantener la salud de nuestros ecosistemas, como garantía del bienestar humano y para mantener la viabilidad a largo plazo de nuestros recursos naturales.

En el ámbito de la gestión de residuos, apostamos por una visión integral que promueva la reducción, reutilización, reciclaje y disposición final adecuada de los desechos, minimizando su impacto ambiental y maximizando su valor económico y social. Nos comprometemos a impulsar la economía circular en los sectores productivos y asentamientos humanos y a involucrar activamente a la comunidad en el manejo integral de los residuos.

En términos de desarrollo económico, aspiramos a un modelo que sea sostenible, inclusivo y resiliente, donde la diversificación de la economía y la generación de empleo sean compatibles con la conservación de nuestros recursos naturales y la mejora del bienestar de nuestra población. Nos esforzamos por promover actividades económicas que agreguen valor a nuestros recursos naturales, como el ecoturismo, la meliponicultura y la artesanía local, y por fortalecer las cadenas de valor que beneficien a productores locales y comunidades rurales.

Finalmente, en términos de asentamientos humanos, la visión se centra en un desarrollo que se integra armónicamente con el entorno natural y en donde se consideran las interacciones entre los elementos naturales y humanos, siendo diseñados de manera integral e incorporando medidas de adaptación al cambio climático, para garantizar la resiliencia de las comunidades. Además, se destaca el compromiso con la conservación y protección de los espacios naturales, evitando el establecimiento de asentamientos en ecosistemas sensibles y áreas de riesgo y limitando el desarrollo de asentamientos humanos fuera de áreas urbanizables, garantizando que se lleven a cabo en estricto cumplimiento de la normativa vigente, priorizando la disponibilidad de servicios públicos básicos y alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Esta visión también abarca la promoción de la regulación de los asentamientos informales compactos que no involucren áreas con alto valor ambiental o promuevan la fragmentación de los ecosistemas, asegurando condiciones adecuadas de vivienda y servicios básicos para todos sus habitantes, minimizando con ello su impacto al medio ambiente.”

9.3.1.1 EJES ESTRATÉGICOS

Eje estratégico 1: Gestión integral del recurso hídrico y conservación del sistema kárstico.

Propósito

Promover la gestión integral y sostenible del recurso hídrico, integrando medidas de protección, conservación y manejo eficiente del acuífero y sistema kárstico, para garantizar la disponibilidad y calidad del agua, para consumo humano, así como el caudal ecológico para asegurar la funcionalidad ecosistémica.

Objetivos

Identificar y establecer esquemas de protección de las zonas de importancia para la recarga del acuífero y las áreas vulnerables del sistema kárstico.

Identificar, proteger y regular las formaciones kársticas (cuevas, cenotes, ríos subterráneos, cavernas).

Identificar y regular las actividades de riesgo que puedan comprometer la integridad y salud del acuífero y sistema kárstico.

Priorizar las concesiones del agua para consumo humano y caudal ecológico, frente al uso y aprovechamiento con fines industriales y/o comerciales.

Garantizar el aprovechamiento sustentable del agua a través de la implementación de tecnologías limpias y la implementación de buenas prácticas.

Garantizar y vigilar que las descargas de aguas residuales reciban un tratamiento terciario, previo a su reincorporación al acuífero o su reutilización.

Establecer sistemas de monitoreo, vigilancia y alerta temprana de la calidad del agua.

Implementar programas integrales de educación y cultura ambiental para garantizar la protección y uso responsable del agua.

Implementar medidas de mitigación y remediación para restaurar ecosistemas acuáticos continentales degradados y garantizar su salud y biodiversidad.

Integrar en la Bitácora Ambiental el registro de las concesiones del uso y aprovechamiento del agua.

Fomentar que la gestión integral del recurso hídrico y conservación del sistema kárstico incorpore medidas de adaptación al cambio climático, anticipando y mitigando los riesgos asociados.

El horizonte de tiempo para el cumplimiento de las metas se estableció de acuerdo a lo siguiente:

Corto plazo: Tres años.

Mediano plazo: Cinco años.

Largo plazo: Más de cinco años, hasta 10 años.

Metas

Para el 2030, aumentar en un 50% la superficie de las áreas de importancia para la recarga del acuífero.

Implementar tecnologías y prácticas de conservación, reutilización y reciclaje del agua en al menos el 50% de las actividades productivas y asentamientos humanos del municipio en el mediano plazo.

Implementar al menos tres proyectos de soluciones basadas en la naturaleza, a mediano plazo, para la gestión del agua, aguas grises y aguas residuales en el municipio, con el fin de promover prácticas sostenibles y resilientes.

Promover la participación activa de la comunidad en la conservación del sistema kárstico y la gestión del agua, mediante la capacitación y sensibilización de al menos el 50% de la población a mediano plazo.

A mediano plazo, generar los mecanismos para que los sectores productivos y asentamientos humanos pueda acceder a bonos climáticos.

A mediano plazo, generar los mecanismos para que los sectores productivos y asentamientos humanos, que implementen prácticas de reutilización y reciclaje de agua en sus procesos productivos y/u operativos puedan acceder a incentivos económicos y fiscales vinculados a la conservación.

A mediano plazo, generar los mecanismos que permitan a los propietarios de terrenos ubicados en zonas de conservación acceder a esquemas de pagos por servicios ambientales.

Eje estratégico 2: Gestión sostenible del recurso forestal.

Propósito

Garantizar la protección, restauración y el uso sostenible de la masa forestal, para asegurar la funcionalidad ecosistémica, provisión de servicios ambientales y sostenibilidad.

Objetivos

Establecer y fortalecer mecanismos de protección y vigilancia comunitaria para prevenir la deforestación, la tala ilegal, incendios forestales y otras actividades que amenacen la integridad de los bosques.

Implementar programas de restauración y reforestación en áreas degradadas, siniestradas o afectadas por actividades humanas o naturales, con el objetivo de incrementar la cobertura forestal y mejorar la conectividad de los ecosistemas.

Incentivar el desarrollo económico de la actividad forestal, bajo criterios de sostenibilidad, para contribuir al bienestar socioeconómico de las comunidades locales, sin comprometer la integridad de los recursos forestales, ni su capacidad para proporcionar servicios ecosistémicos.

Generar los mecanismos para implementar sistemas de certificación forestal y etiquetado para productos maderables, promoviendo la trazabilidad y la comercialización responsable de productos provenientes de un manejo forestal sostenible y consecuentemente la conservación del recurso.

Incentivar el desarrollo de programas de manejo forestal, para el municipio, involucrando a las comunidades locales.

Desarrollar programas de educación ambiental y capacitación dirigidos a la comunidad, con el fin de sensibilizar sobre la importancia del recurso forestal y promover prácticas de uso responsable de los recursos naturales.

Fomentar que la gestión sostenible de los recursos forestales incorpore medidas de adaptación al cambio climático, anticipando y mitigando los riesgos asociados.

Metas

Restaurar al menos el 50% de la superficie de las áreas forestales identificadas como degradadas o afectadas por actividades humanas o por causas naturales a mediano plazo.

Establecer y promover al menos cinco iniciativas de negocios forestales sostenibles en comunidades locales a mediano plazo.

Generar un sistema de certificación forestal en el municipio a corto plazo.

Establecer un programa de manejo forestal por cada iniciativa autorizada de negocio forestal sostenible a mediano plazo.

Capacitar a las comunidades locales del municipio en prácticas de manejo forestal sostenible a mediano plazo.

Promover la participación activa de la comunidad en la conservación del recurso forestal, mediante la capacitación y sensibilización de al menos el 50% de la población a mediano plazo.

Generar los mecanismos para que el sector forestal pueda acceder a bonos climáticos.

Eje estratégico 3: Conservación y aprovechamiento sustentable de la biodiversidad.

Propósito

Promover la conservación y el uso sustentable de la biodiversidad y recursos naturales, garantizando la protección de los ecosistemas naturales, sus servicios ambientales, así como el bienestar humano.

Objetivos

Identificar y restaurar hábitats/ecosistemas clave y críticos, incorporando el conocimiento tradicional de las comunidades y el enfoque de adaptación basado en ecosistemas, para la supervivencia de especies en categoría de riesgo, así como para mejorar y mantener la conectividad ecológica.

Evitar la ocupación y regular las actividades en los ecosistemas identificados como frágiles y únicos, así como en zonas de alto riesgo; ejemplo dunas costeras y zonas inundables y vegetación asociada, para su protección y reducción de la vulnerabilidad de éstos y del desarrollo esperado.

Incrementar la superficie protegida, incentivando el establecimiento de áreas destinadas voluntariamente a la conservación, así como la ampliación de las áreas naturales protegidas ya establecidas.

Promover la participación de los sectores productivos en el monitoreo de especies prioritarias y en la generación de información sobre su estado de conservación.

Incentivar el establecimiento de unidades de manejo para la conservación de vida silvestre (UMA) extensivas, para el aprovechamiento sostenible de la biodiversidad, para contribuir al bienestar socioeconómico de las comunidades locales y apoyar la recuperación de poblaciones de especies.

Promover la diversificación de actividades económicas dentro de las UMA extensivas, como el ecoturismo, la artesanía y la producción sostenible de alimentos, para generar ingresos adicionales para las comunidades locales.

Incentivar y apoyar la integración de soluciones basadas en la naturaleza, uso de ecotecnologías y prácticas sustentables de construcción, en los nuevos desarrollos de las áreas definidas como urbanizables, para reducir el impacto sobre ecosistemas y la biodiversidad.

Establecer los mecanismos para que los sectores productivos y asentamientos humanos pueda acceder a incentivos económicos vinculados a la conservación de la biodiversidad.

Gestionar los mecanismos para que las UMA extensivas y población interesada puedan acceder a pagos por servicios ambientales.

Fomentar el conocimiento y difusión de la relevancia de la biodiversidad municipal, como proveedora de servicios ecosistémicos, en la calidad de vida de la población y en la contribución para la mitigación al cambio climático.

Fomentar que la conservación y aprovechamiento sustentable de la biodiversidad incorpore medidas de adaptación al cambio climático, anticipando y mitigando los riesgos asociados.

Metas

Identificar y restaurar al menos el 50% de los hábitats y ecosistemas clave y críticos del municipio a mediano plazo.

Establecer criterios claros de ocupación y regulación de las actividades en ecosistemas frágiles y únicos, así como zonas de alto riesgo.

Aumentar la superficie protegida del municipio en un 20% a largo plazo, a través de esquemas de áreas destinadas voluntariamente a la conservación.

Facilitar el acceso a capacitación y recursos técnicos para que las comunidades locales puedan establecer y gestionar UMA extensivas de manera efectiva a mediano plazo.

El 50% de los nuevos asentamientos humanos localizados en las áreas urbanizables y reservas de crecimiento del municipio integran soluciones basadas en la naturaleza, ecotecnologías y prácticas sustentables de construcción a mediano plazo.

A corto plazo, implementar al menos un mecanismo para que los sectores productivos y asentamientos humanos puedan acceder a financiamiento o beneficios económicos por la conservación de la biodiversidad.

Sensibilizar a la población sobre la importancia de la biodiversidad municipal y servicios ecosistémicos, alcanzando al menos al 80% de la comunidad a mediano plazo.

Eje estratégico 4: Gestión ambiental integral de los residuos.

Propósito

Promover una gestión ambiental integral y sostenible de los residuos, con el fin de proteger el medio ambiente, preservar los recursos naturales y promover el bienestar humano.

Objetivos

Mejorar la infraestructura y capacidades técnicas para la gestión integral de residuos, incluyendo la construcción y operación de centros de transferencia de residuos, rellenos sanitarios y la implementación de sistemas de recolección selectiva y gestión de residuos de manejo especial y peligrosos.

Mejorar la infraestructura y capacidades técnicas para la gestión integral de aguas residuales, incluyendo la construcción y operación de plantas de tratamiento.

Establecer centros integrales de tratamiento y aprovechamiento de residuos, así como difundir entre la población local los centros ya establecidos, que operan acorde con la normatividad.

Promover en los sectores productivos y asentamientos humanos, la implementación de modelos de producción y consumo basados en la economía circular.

Fomentar la participación activa de la comunidad en la gestión de residuos a través de campañas de sensibilización, educación ambiental y programas de participación ciudadana, con el objetivo de generar conciencia sobre la importancia de reducir, reciclar y manejar adecuadamente los residuos.

Implementar, en colaboración con la comunidad local, un programa para el correcto manejo de los residuos sólidos aplicando las sanciones correspondientes.

Metas

Construir y operar un nuevo relleno sanitario, que cumpla con las regulaciones ambientales vigentes, incluyendo medidas de mitigación de impacto ambiental y controles de contaminación, para asegurar una disposición adecuada y segura de los residuos generados.

Valorar en el corto plazo la necesidad de construir nuevos rellenos sanitarios considerando las tendencias de crecimiento del municipio. Su localización geográfica deberá estar sustentada en un análisis de aptitud de suelo y estudios ambientales de soporte.

En áreas rurales, establecer tres centros de transferencia de residuos, para facilitar su manejo desde los puntos de generación, hasta las instalaciones de disposición final, a corto plazo.

A mediano plazo, establecer en el municipio, un centro acopio de residuos orgánicos, residuos de manejo especial y residuos peligrosos.

En el municipio, que todas las aguas residuales generadas sean sometidas a un riguroso tratamiento a través de sistemas de gestión adecuados, cumpliendo estrictamente con la normativa establecida. Una vez tratadas, estas aguas son reintegradas al acuífero mediante un proceso controlado de infiltración, asegurando así la protección y preservación de nuestros recursos hídricos.

A mediano plazo, establecer un programa de economía circular en el municipio, para un consumo responsable, reutilización y reciclaje de residuos, dirigido a la población del municipio, para fomentar una estrategia de cero residuos.

Contar con un programa de combate de depósito ilegal de residuos.

Sanear y rehabilitar los espacios que fueron destinados en el pasado como depósitos de los residuos generados en el municipio.

Mejorar a corto plazo la recolección de residuos en todo el municipio, separando los residuos desde que se depositan en el camión recolector, para lo cual se establecerá un programa de educación para la población en donde se enseñará a realizar la adecuada separación de los residuos.

Eje estratégico 5: Desarrollo económico sostenible.

Propósito

Regular el desarrollo económico de las actividades productivas, utilizando los recursos naturales de manera responsable y sostenible, evitando la sobreexplotación, el agotamiento y la contaminación, protegiendo la biodiversidad y los ecosistemas, promoviendo la inclusión social y mejorando la calidad de vida de la población.

Objetivos

Fomentar la diversificación de la base económica local, con la premisa de la creación de sectores económicos resilientes y sostenibles, que minimicen la dependencia de actividades extractivas o intensivas en recursos naturales.

Promover alternativas con valor agregado a la producción pecuaria local.

Garantizar que las actividades productivas, incorporen prácticas sustentables para la conservación de las especies, ecosistemas y servicios ambientales.

Garantizar un crecimiento económico que beneficie a todos los sectores de la sociedad, para fomentar equidad económica y social.

Usar, promover y potenciar las tecnologías limpias y eficientes, así como infraestructura sostenible que contribuya a la reducción de la huella ambiental de las actividades económicas, promoviendo la transición del municipio hacia una economía más responsable y circular y resiliente ante el cambio climático.

Promover que en los programas de incentivos y subsidios dirigidos a las actividades productivas del municipio se integren criterios para la conservación y uso sustentable de la biodiversidad.

Garantizar prácticas empresariales responsables que respeten los derechos humanos, priorizando del desarrollo sostenible del municipio sobre el sector privado.

Metas

Lograr que al menos el 80% de las actividades productivas del municipio, a mediano plazo, implementen prácticas sustentables para la conservación de las especies, ecosistemas y servicios ambientales.

Conseguir que el 90% del turismo que se desarrolla en el municipio, a corto, mediano y largo plazo, sea de mediano a bajo impacto, evitando el turismo masivo.

Fomentar la adopción de tecnologías limpias y eficientes en al menos el 70% de las actividades productivas del municipio a mediano plazo.

Incrementar en un 20% el acceso a servicios básicos y oportunidades económicas en comunidades marginadas del municipio a mediano plazo.

En la diversificación económica se prioriza el fomento de actividades como la apicultura y meliponicultura, que conllevan un beneficio significativo para la conservación de los recursos naturales.

Eje estratégico 6: Asentamientos humanos sostenibles y resilientes.

Propósito

Delimitar el desarrollo de asentamientos humanos y que estén diseñados, planificados y gestionados de manera que puedan resistir y adaptarse a los impactos adversos, al tiempo que promueven el bienestar de sus habitantes y la preservación del medio ambiente.

Objetivos

Propiciar que los asentamientos humanos estén planificados de manera integral, considerando las interacciones entre los diferentes elementos del entorno natural, utilizando de manera eficiente los recursos naturales, energéticos y materiales, manejando y minimizando la generación de residuos y la emisión de contaminantes y considerando el uso de tecnologías limpias e infraestructura de bajo impacto ambiental.

Fomentar que los asentamientos humanos incorporen medidas de adaptación al cambio climático en su diseño y planificación, anticipando y mitigando los riesgos asociados al aumento de las temperaturas, los fenómenos meteorológicos extremos y el aumento del nivel del mar.

Garantizar que el crecimiento de asentamientos humanos se limite a las áreas definidas como urbanizables, para conservar y proteger los espacios naturales.

Garantizar que el desarrollo de los asentamientos humanos se realice de acuerdo con la normativa vigente, considerando la disponibilidad de servicios públicos básicos, y alineado con los ODS, para promover comunidades seguras, inclusivas y sostenibles.

Prohibir el establecimiento de asentamientos humanos en ecosistemas sensibles, zonas de riesgo y áreas críticas de recarga del acuífero, con el fin de preservar la integridad ambiental, reducir la vulnerabilidad ante desastres naturales y garantizar el suministro sostenible de recursos hídricos para las comunidades.

Evitar el cambio de uso de suelo en zonas ecológicamente frágiles, con el fin de proteger la biodiversidad, preservar los ecosistemas naturales y promover el desarrollo de asentamientos humanos más sostenibles y resilientes.

Promover el desarrollo ordenado y sostenible de los asentamientos humanos existentes, incluyendo aquellos establecidos de manera informal, en armonía con los ecosistemas locales. Priorizar acciones que eviten la fragmentación de ecosistemas y la pérdida de biodiversidad, desalienten el desarrollo de esquemas segregados o unifuncionales y la suburbanización

extensiva, y fomenten condiciones de vida dignas y servicios básicos adecuados para todos los habitantes.

Metas

Establecer límites claros para el desarrollo de asentamientos humanos mediante la delimitación de áreas urbanizables y la aplicación efectiva de las regulaciones establecidas en este instrumento, para restringir la expansión humana hacia áreas ecológicamente sensibles o zonas de riesgo.

El 100% de los asentamientos humanos en el municipio, se desarrollan en apego a la normatividad, están planificados de manera integral, incorporan medidas de adaptación al cambio climático y consideran la disponibilidad de servicios públicos básicos.

Realizar un diagnóstico integral de los asentamientos humanos existentes, incluidos aquellos establecidos de manera informal, para identificar su relación con áreas ecológicamente sensibles y generar propuestas de manejo que promuevan la sostenibilidad, reduzcan la fragmentación de ecosistemas y fomenten condiciones de vida dignas.

Eje estratégico 7: Gobernanza.

Propósito

Fortalecer la coordinación institucional y la colaboración entre los tres órdenes de gobierno para mejorar el monitoreo, la evaluación y la actualización del instrumento de ordenamiento ecológico. Esto incluye la armonización con la política urbana y el fortalecimiento de la capacidad del personal técnico y operativo, asegurando una aplicación efectiva de la regulación establecida y una toma de decisiones informada y participativa.

Objetivos

Establecer mecanismos efectivos de coordinación y comunicación entre los diferentes niveles de gobierno y las instituciones involucradas en la gestión del ordenamiento ecológico.

Desarrollar e implementar un sistema integral de monitoreo y evaluación que permitan un seguimiento continuo del cumplimiento y la efectividad del instrumento de planeación.

Asegurar que el desarrollo urbano esté alineado y sea coherente con las estrategias, objetivos y acciones del ordenamiento ecológico, para garantizar una visión unificada del desarrollo territorial.

Mejorar las habilidades y competencias del personal técnico y operativo mediante programas de capacitación continua y acceso a recursos y herramientas actualizadas.

Metas

Crear a corto plazo un protocolo de comunicación y colaboración entre las instituciones involucradas, asegurando una respuesta rápida y coordinada a los desafíos ambientales.

Realizar evaluaciones periódicas del instrumento de planeación ecológica y publicar informes de progreso accesibles al público y a las partes interesadas.

Asegurar que el desarrollo urbano previsto para el municipio cumpla con los principios del ordenamiento ecológico.

Implementar programas de capacitación anuales para el personal técnico y operativo, enfocados en las mejores prácticas de gobernanza ambiental y la aplicación de la regulación establecida.

9.4 ESCENARIO TENDENCIAL

El escenario tendencial es una herramienta en la planificación ambiental y territorial que permite proyectar las condiciones futuras de una región, basándose en la continuidad de las tendencias actuales de desarrollo, uso de suelo, y gestión de los recursos naturales. Este análisis no considera cambios significativos en las políticas, normativas o intervenciones estratégicas, ofreciendo una visión de lo que podría suceder si las dinámicas actuales se mantienen sin alteraciones.

El propósito de delinear un escenario tendencial es proporcionar una referencia sobre el estado futuro probable del medio ambiente y el territorio, en ausencia de nuevas políticas o acciones correctivas. Esto permite entender las posibles consecuencias de la inacción y la necesidad de intervenciones estratégicas para guiar el desarrollo hacia un enfoque más sostenibles.

En el contexto del Programa de Ordenamiento Ecológico Local del Municipio de Tulum, el escenario tendencial abordará los siguientes temas:

1. Cambio de uso de suelo y vegetación.
2. Biodiversidad.
3. Disponibilidad de agua.
4. Crecimiento urbano, dinámica demográfica y desarrollo del sector turístico.
5. Otros sectores económicos
6. Cambio climático.

9.4.1 CAMBIO DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN

Para elaborar los mapas de cambio de cubierta y uso del suelo en el municipio Tulum” a escala 1:50,000, se partió de la información contenida en imágenes del satélite Sentinel 2A con 10m, de resolución espacial para los años (2017- 2018, 2020 - 2021, y 2023 - 2024). Se generó un compuesto con las bandas 8, 11, y 2 (ICr, SW1, Azul), respectivamente). La imagen fue sometida a un proceso de corrección radiométrica de tipo atmosférica con la herramienta Sen2Cor, implementada en el software SNAP (2016), una clasificación de tipo No Supervisada, con el algoritmo K-Means; así como una clasificación Supervisada con Random Forest. Finalmente se realizó la verificación de pertenecía de las clases informacionales de acuerdo con las siete clases definidas en la leyenda (Tabla 4), por lo que fue necesario un proceso de edición para ajustar bordes. Para lo cual se empleó el software ArcGIS V-10.8 con licencia educativa (ESRI, 2020).

Tabla 4. Leyenda del mapa de cambio de cubierta y uso del suelo del municipio Tulum.

Clase	Clave
Vegetación densa	Vd
Vegetación inundada	Vi
Pastos y cultivos	PC
Suelo desnudo	SD
Superficies abiertas	SA
Cuerpo Agua	CA
Superficie construida	SC

Fuente: Elaborado propia.

Clases de uso y cobertura del suelo

Para definir la leyenda de las clases informacionales partimos de la guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y vegetación (INEGI, 2012); consultamos además la guía de campo Identificación de los manglares en México (C. Agráz-Hernández, 2006); así como la Guía Vegetación de Playa en Tulum. Las clases quedaron agrupadas de la manera siguiente:

Vegetación densa

Cualquier agrupación significativa de vegetación densa alta (~15 m o más), típicamente con un dosel cerrado o densa, con árboles de entre 8, 12, y 15 metros de altura, alcanzando a veces hasta de 18 m de altura. Las especies presentes son chakah (*Bursera simaruba*), chukum (*Havardia albicans*), tsalam (*Lysiloma latisiliquum*) y jabín (*Piscidia piscipula*). Estas especies tienen tallos que pierden su corteza y desarrollan actividad fotosintética durante el periodo en que la planta ha tirado sus hojas. En algunos fragmentos del bosque donde ha ocurrido alguna perturbación, natural o antrópica, se presentan de forma dominante especies de menor talla, sumamente abundantes, como el ts'i'ts'ilché (*Gymnopodium floribundum*), sak its'a (*Neomillspauguia emarginata*), sak kaatsim (*Mimosa bahamensis*) y algunas especies de trepadoras leñosas como *Pisonia aculeata* (be'eb), *Bignonia potosina* (éek k'iix il) y *Fridericia floribunda* (sak aak'), entre otras. Puede encontrarse en diferentes estados de sucesión secundaria como consecuencia de la destrucción parcial o total de la vegetación primaria, como resultado de distintas prácticas agrícolas y ganaderas, que se han realizado desde varias décadas en el municipio, ocasionando daños a la vegetación original, de forma temporal. Este tipo de comunidades son transitorias y dan lugar a etapas sucesivas tendientes al restablecimiento de la vegetación original, a través del tiempo, al menos desde el punto de vista estructural, así como a la recuperación de la diversidad de la selva.

Se consideran también algunas pequeñas comunidades arbóreas bajas, con individuos de 4 a 6 m de altura dominadas ampliamente por algunas especies secundarias tardías como el waaxiim (*Leucaena leucocephala*), el ts'i'ts'ilché (*Gymnopodium floribundum*), el sak kaatsim (*Mimosa bahamensis*) y el sak its'a (*Neomillspauguia emarginata*), box kaatsim (*Senegalia gaumeri*), entre otras. Esta clase incluye a las comunidades arbustivas mucho más densas y bajas, cuyo proceso de recuperación tiene poco tiempo o ha sido muy lento debido al nivel de deterioro a que fue sometido el terreno, como producto de la actividad productiva. Entre las especies predominantes se encuentran *Diospyros cuneata* (uchul ché), *Diospyros anisandra* (kakal che'), *Acacia pennatula* (chimay), *Caesalpinia gaumeri* (kitam che'), *Caesalpinia yucatanensis* (taak'in che'), *Senegalia gaumeri* (box kaatsim), *Havardia albicans* (chukum), *Bunchosia swartziana* (siip che'), *Bourreria pulchra* (bakal che'), *Helicteres baruensis* (sutup), *Croton chichenensis* (eek' balam), *Croton humilis* (x'ik aban), *Diphyssa carthagenensis* (tsusuk), *Neomillspauguia emarginata* (sak its'a), *Parmentiera millspaughiana* (kat cu'uk), *Randia obcordata*, *Solanum tridynamum*, entre otras.

Vegetación inundada

Áreas de cualquier tipo de vegetación con evidente presencia de agua durante la mayor parte del año, incluye superficie inundada estacionalmente que es una combinación de pasto/ arbustos/ árboles/ suelo desnudo. Constituido por mangle blanco (*Laguncularia racemosa*), mangle negro (*Avicennia germinans*), mangle rojo (*Rhizophora mangle*), mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*), uva de mar (*Coccoloba uvifera*), nipa (*Distichlis spicata*), palma chit (*Thrinax radiata*), bromelia (*Bromelia alsodes*), (*Anthurium schlechtendalii*), chicozapote (*Manilkara zapota*), chaca o palo mulato, palo chaca (*Bursera simaruba*), palma nakás (*Coccothrinax readii*), chechem negro (*Metopium brownei*), alacrancillo (*Heliotropium gnaphalodes*).

Cultivos y pastos

Cultivos y pastos plantados, trazados por humanos; su dosel no llega a la altura de los árboles. Esta categoría la componen básicamente terrenos donde se cultivan diversas especies de árboles productores de frutos. Las especies de árboles frutales que mayormente han sido identificados se cultivan en la reserva son: el mango, papaya, mamey, aguacate, naranja y limón, además de la pitaya, que es una especie de cactus trepador para el cual se utilizan árboles o troncos que les den soporte.

Incluye la agricultura tradicional en donde el ciclo vegetativo de los cultivos que se siembran depende del agua de lluvia o no, por lo que su éxito depende de la precipitación y de la capacidad del suelo para retener el agua. Su clasificación es independiente del tiempo que dura el cultivo en el suelo, que puede llegar a más de diez años, en el caso de los frutales, o bien son por periodos dentro de un año como los cultivos de verano. Incluye los que reciben agua invernal como el garbanzo.

En el caso de los pastos está presente la comunidad dominada por gramíneas o graminoides se observa en medio de la vegetación secundaria de selva baja caducifolia, como consecuencia del desmonte del cultivo de Henequén. Se encuentra en zonas de pastoreo de ganado y la mayor parte del año la cubierta vegetal herbáceo no pasa de una altura media de 10 cm. Ocasionalmente es cortado para alimentar al ganado en el período poco lluvioso; en otros casos encontramos que son sometidos a fuegos frecuentes y la acción del pisoteo de animales, lo que parece ser uno de los principales factores de su existencia. El periodo de sequía hace que tengan un color amarillo pajizo durante más de 6 meses.

Suelo desnudo

Superficies de arenas, roca o suelo con muy escasa o nula vegetación durante todo el año. Con esta categoría también identificamos a las superficies de explotación donde se lleva a cabo la extracción de materiales pétreos fundamentalmente de distintos tamaños (canteras y gravas).

Superficies abiertas

Superficies abiertas, cubiertas homogéneas con poca o ninguna vegetación de baja altura; es una mezcla de pequeños grupos de plantas o plantas individuales dispersas en un paisaje. Está representada por comunidades de vegetación secundaria herbácea cuya altura no sobrepasa el metro y medio, y donde predominan especies de pastos, ciperáceas y herbáceas, también denominadas especies secundarias tempranas. Son frecuentes especies herbáceas como el tah (*Viguiera dentanta*), chichi'beel (*Melochia pyramidata*), sak xiw (*Walteria americana*), x'opché (*Cordia globosa*), put balam (*Solanum tridynamum*), chi'chi'bej (*Corchorus siliquosus*), x'ik aban (*Croton humilis*).

Cuerpos de agua

Se trata de superficies, donde el agua estuvo predominantemente presente durante todo el año.

Superficies construidas

Estructuras creadas por el hombre; principales redes de carreteras y ferrocarriles; grandes superficies impermeables homogéneas que incluyen estructuras de estacionamiento, edificios de oficinas y viviendas residenciales.

9.4.1.1 RESULTADOS

En términos generales los resultados del análisis de cambio en la cobertura y usos del suelo se presentan en la Tabla 5, donde se señalan puntualmente las superficies ocupadas por cada tipo de cubierta para las tres fechas analizadas, 2017-2018, 2020-2021 y 2023-24 (Mapa 1, Mapa 2 y Mapa 3).

Tabla 5. Superficies y porcentajes ocupados por tipo de cubierta en los años 2017-2018, 2020-2021 y 2023-24.

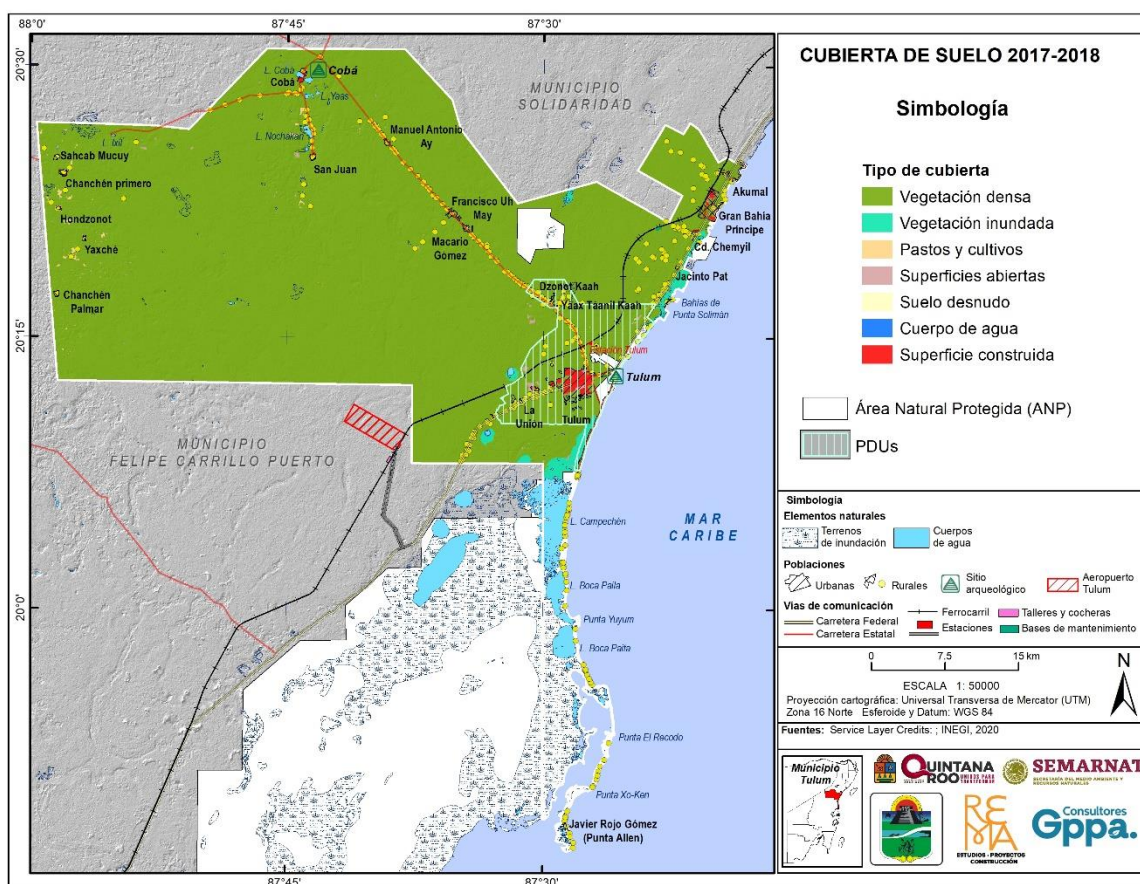
Tipo de Uso	Año 2017-2018		Año 2020-2021		Año 2023-2024	
	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%
Vegetación densa	185537.588	91.86	183134.13	90.67	183170.62	90.71
Vegetación inundada	8270.64046	4.09	8616.52	4.27	8151.57	4.02
Pastos y cultivos	496.68	0.25	1654.76	0.82	18.36	0.01
Suelo desnudo	264.29867	0.13	232.42	0.12	363.14	0.18
Superficies abiertas	2465.587	1.22	2838.73	1.41	3490.73	1.72
Cuerpo Agua	3388.50525	1.68	3307.45	1.63	3430.55	1.70
Superficie construida	1558.2809	0.77	2197.57	1.08	3356.62	1.66
Total	201981.58	100	201981.58	100	201981.59	100

Fuente: Elaborado propia.

En el periodo (2017-2018), se observa que la clase que tiene mayor ocupación en el territorio es la “vegetación densa” con (91.8 %), le siguen en orden de extensión de área ocupada con un porcentaje muy por debajo la “vegetación inundada” con el (4 %), cabe mencionar que la superficie construida representa menos del 1 % del área total.

La distribución espacial de las cubiertas en el municipio coincide con los porcentajes, por lo que la mayor extensión territorial es predominantemente de vegetación de tipo densa, no obstante, se aprecian pequeñas parcelas de pastos y cultivos con respecto al área total del municipio, cabe mencionar la presencia de vegetación en la barra de costa de tipo inundada.

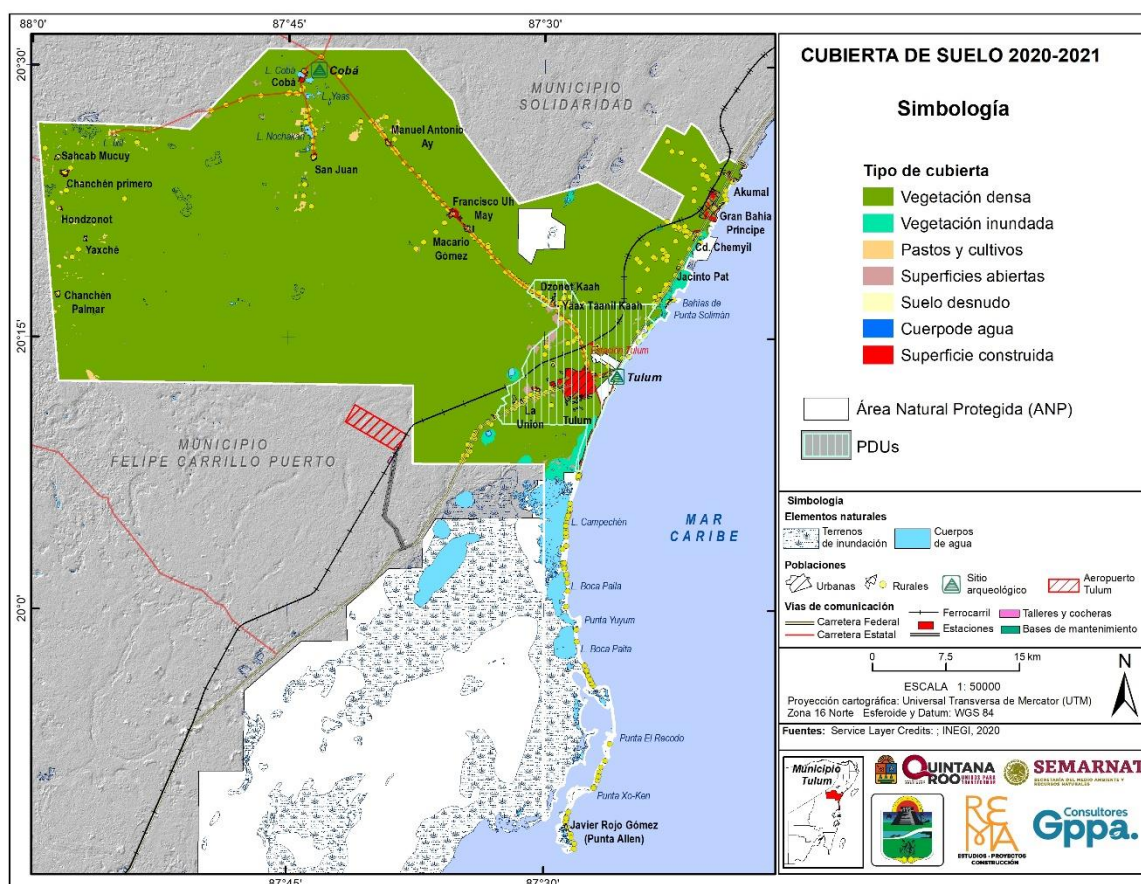
Mapa 1. Tipo de cubierta 2017-2018 en el municipio Tulum.



Fuente: Elaborado propia.

Se aprecia entre los años (2020-2021) que se mantiene la cubierta de vegetación densa con mayor presencia ocupando aproximadamente el 91 % del área total del municipio, le siguen con un bajo porcentaje del 4.2 % la vegetación inundada. Para este periodo la superficie construida aumenta al 1 % del área total por debajo y muy próximo al porcentaje que representan los cuerpos de agua y las superficies abiertas con el 1.6 y 1.4 % respectivamente. Es importante mencionar el incipiente aumento de la cobertura de pastos y cultivos a un 0.8 %.

Mapa 2. Tipo de cubierta 2020 - 2021 en el municipio Tulum.

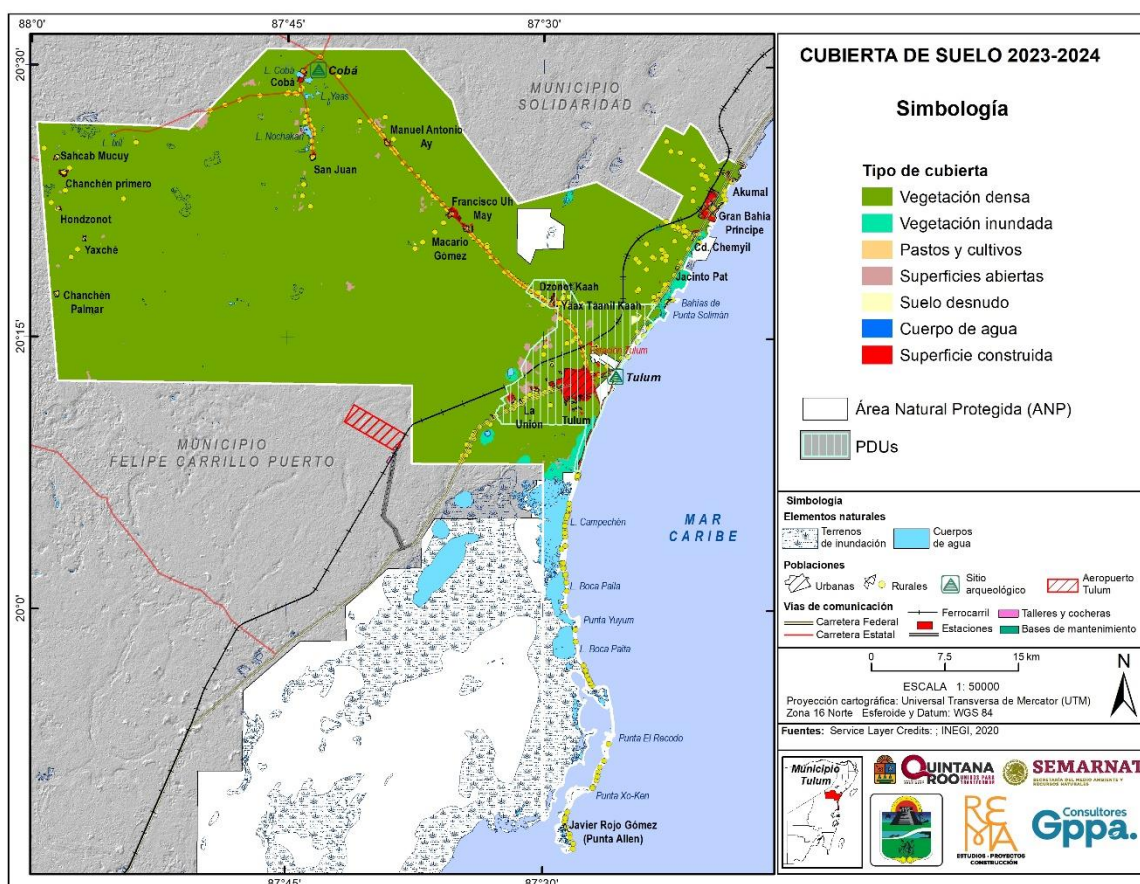


Fuente: Elaborado propia.

Haciendo referencia a los datos más recientes (2023-2024), se observa que la clase que concentra la mayor cantidad de área es “vegetación densa” con el 90 % del municipio; le continúan en orden de ocupación, pero con muy baja presencia la “vegetación inundada” con el 4 %.

El patrón de distribución espacial de las cubiertas para este periodo se observa el predominio de la “vegetación densa”, por su parte la vegetación inundada continúa presente en toda la franja costera del municipio, es importante mencionar que, aunque la extensión espacial de la superficie construida espacialmente no es tan apreciable, sin embargo, para este periodo representa casi el 2 % del área total.

Mapa 3. Tipo de cubierta 2023-2024 en el municipio Tulum.



Fuente: Elaborado propia.

Cambio en la cubierta y usos de suelo

En esta sección analizamos los cambios de uso del suelo y la vegetación a escala 1:50,000. Para determinar los procesos de cambio, considerando básicamente aquéllos ocasionados por las actividades antrópicas a causa de las transformaciones ocurridas durante los últimos siete años en el municipio, utilizamos la leyenda de cambio que se relaciona más abajo. En nuestro caso partimos de la superposición cartográfica de los mapas de cubierta y uso del suelo (2017- 2018, 2020 - 2021, y 2023 - 2024), generados previamente en el presente estudio. La superposición de las diferentes fechas se realizó con ayuda de la herramienta de Geoprocesamiento “Intersect” del software ArcGIS V-10.8 licencia educativa (ESRI, 2020).

La leyenda utilizada para identificar los cambios, en el presente estudio se relaciona con:

- **Conservada:** Mide la superficie de vegetación densa y vegetación inundada.
- **Revegetada:** Mide la cantidad de superficie donde anteriormente se llevaba alguna actividad agropecuaria (Pastos y cultivos), espacios abiertos, suelo desnudo y que actualmente se encuentra ocupada por vegetación densa, y/o vegetación inundada.
- **Deforestada:** Mide la cantidad de superficie que cambió su uso de suelo de vegetación densa y vegetación inundada a zonas de cultivos y pastos, o a otro uso como el urbano, así como las ocupadas por suelo desnudo.
- **Degradada:** Mide la cantidad de superficie que presentó cambio en el uso del suelo, pérdida de cobertura vegetal densa a espacios abiertos.
- **Por actividad productiva:** Mide la cantidad de superficie donde anteriormente se presentaba una cubierta suelo desnudo, superficies abiertas; pero actualmente ha cambiado de actividad productiva.
- **Abandono de la actividad productiva:** Mide la cantidad de superficie donde anteriormente se presentaba una cubierta de pastos y cultivos, pero actualmente ha cambiado a superficie abierta, suelo desnudo, o a superficie construida.
- **Ocupadas por agua:** Mide la cantidad de superficie donde anteriormente se presentaba una cubierta de vegetación densa, vegetación inundada, pastos y cultivos, suelo desnudo, superficies abiertas, pero actualmente ha cambiado a superficie de cuerpo de agua.
- **Sin cambio:** Mide la cantidad de superficie de las zonas donde el uso del suelo por actividades productivas, superficie abierta y superficie construida se ha mantenido.

Cambios apreciados

Como se observa en la Tabla 6, los cambios por actividades de superficie construida fueron incrementando en cada año con un total de 1,798.34 ha; a costa en lo fundamental de la disminución de la cubierta de vegetación densa por 2,366.97 ha, por su parte la vegetación inundada también se aprecia una reducción de un total de 119.07 ha. Cabe señalar las variaciones que impacto en la presencia de suelo desnudo, dada una pequeña reducción en el primer periodo analizado y posteriormente un incremento de un total aproximado de 98.84 ha, de igual manera la cubierta de pastos y cultivos presentó variaciones teniendo un incremento en el primer periodo analizado y posteriormente y hasta el presente una reducción considerable de -478.32 ha.

Tabla 6. Superficie de cambio de 2017-2018 a 2020-2021, 2020-2021 a 2023-2024 y de 2017-2018 a 2023-2024.

Tipo de Uso	Año 2017	Año 2020	Año 2023	2017a2020	2020a2023	2017a2023
	Superficie (ha)	Superficie (ha)	Superficie (ha)	Superficie (ha)	Superficie (ha)	Superficie (ha)
Vegetación densa	185537.588	183134.13	183170.62	2403.45788	36.49	-2366.97
Vegetación inundada	8270.64046	8616.52	8151.57	345.879538	-464.95	-119.07
Pastos y cultivos	496.68	1654.76	18.36	1158.08	-1636.40	-478.32
Suelo desnudo	264.29867	232.42	363.14	-31.87867	130.72	98.84
Superficies abiertas	2465.587	2838.73	3490.73	373.143001	652.00	1025.14
Cuerpo Agua	3388.50525	3307.45	3430.55	-81.055248	123.10	42.05
Superficie construida	1558.2809	2197.57	3356.62	639.289103	1159.05	1798.34

Fuente: Elaborado propia.

En cuanto a los procesos de cambio entre los periodos 2017 - 2018 y 2020 - 2021, los más importante que se aprecia es un proceso de cambio de tipo deforestada y degradada que representa aproximadamente el 1,6% del área total de vegetación densa e inundada. Es importante mencionar que se observa un proceso de cambio de tipo revegetada que representa el 15% de la superficie total entre pastos y cultivos, suelo desnudo, superficies abiertas y cuerpos de agua. Cabe mencionar que la cobertura con mayor ganancia es pastos y cultivos con un total de 1,459.1 ha, a su vez la cobertura que presenta mayor perdida es la vegetación densa con un total de 3,104.8 ha, se aprecia además una superficie de 16 ha, consideradas como abandonadas por la agricultura (Tabla 7).

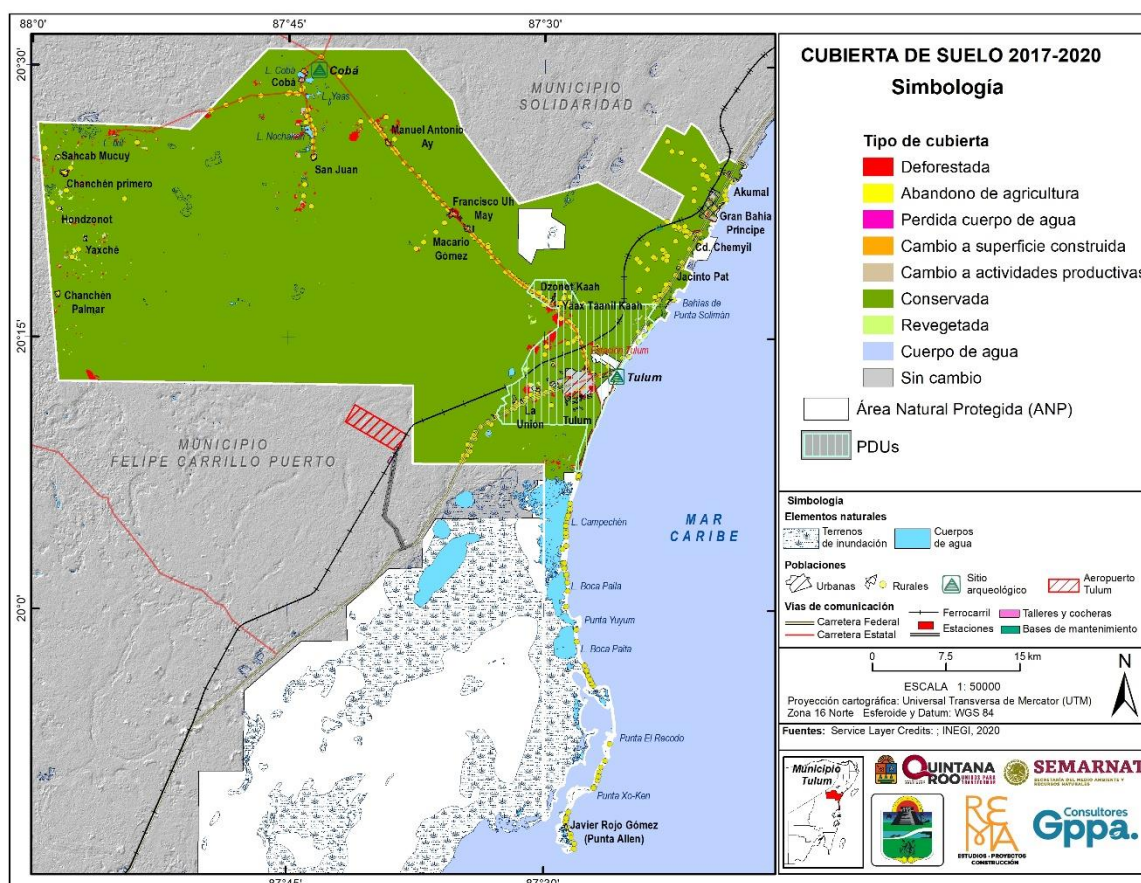
Tabla 7. Matriz de transición entre 2017-2018 (1) y 2020-2021 (2), así como su superficie en ha.

1 \ 2	A	B	C	D	E	F	G
A	182432.8	146.84	1182.87	10.36	1201.38	16.2	547.14
B	0	8206.4	55.5	8.74	0	0	0
C	229	0.17	251.15	0	16.02	0	0.34
D	6.52	10.49	0	218.71	15.27	4.47	8.84
E	465.8	141.11	220.74	2.24	1550.04	2.69	82.97
F	0	111.51	0	1.11	0.51	3275.36	0
G	0	0	0	0	0	0	1558.28

Leyenda: A- Vegetación densa, B- Vegetación inundada; C- Pastos y cultivos, D- Suelo desnudo, E- Superficies abiertas, F- Cuerpo Agua; G- Superficie construida.



Mapa 4. Cambio de tipo de cubierta entre 2017-2018 y 2020-2021 en el municipio Tulum.



Fuente: Elaborado propia.

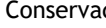
En el siguiente periodo entre 2020 - 2021 y 2023 - 2024, los procesos de cambio más importantes que se reflejan está el proceso de cambio de tipo deforestada y degradada en un porcentaje relativamente un poco más bajo que en el periodo anterior del 1,3% del área total de vegetación densa más la vegetación inundada. Por su parte la superficie considerada como proceso de revegetación representa el 29% de la superficie total entre pastos y cultivos, suelo desnudo, superficies abiertas y cuerpos de agua.

Por otro lado, la cobertura con mayor ganancia en este periodo es la vegetación densa con 2,267.7 ha y por su parte la cobertura con mayor pérdida es vegetación densa con 2,231.2 ha, considerando esas medias se puede apreciar que en este periodo el intercambio entre coberturas se dio principalmente en la vegetación densa, muy importante señalar que la superficie abandonada por la agricultura creció hasta un total de 423,2 ha (Tabla 8).

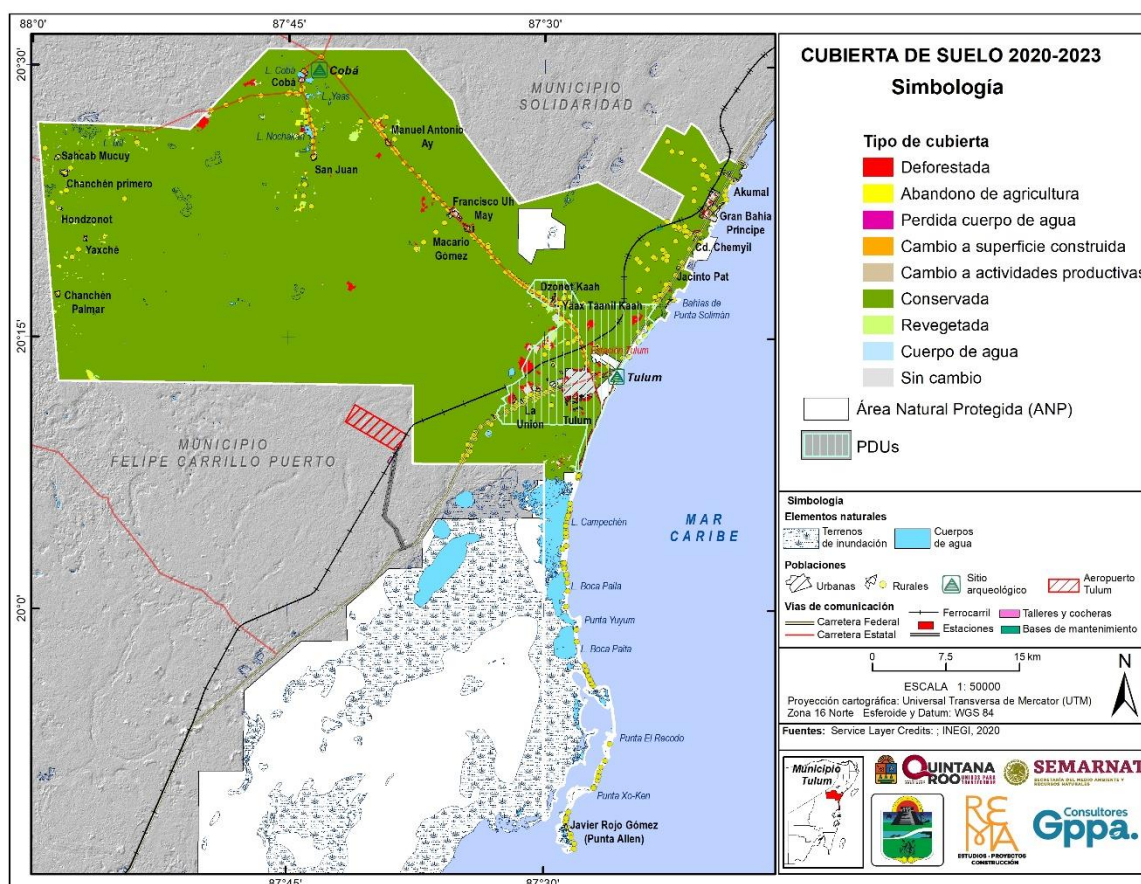
Tabla 8. Matriz de transición entre 2020-2021 (1) y 2023-2024 (2), así como su superficie en ha.

1 \ 2	A	B	C	D	E	F	G
A	180902.94	39.32	9.16	94.38	1026.85	10.2	1051.28
B	220.15	7791.65	0.43	25.52	265.98	309.94	2.86
C	1200.84	6.36	4.04	0	423.18	0.12	20.22
D	6.28	1.27	0	207.73	4.52	2.68	9.93
E	814.7	133.82	4.73	35.2	1768.44	12.58	69.27
F	25.72	179.14	0	0.28	1.77	3095.04	5.5
G	0	0	0	0	0	0	2197.56

Leyenda: A- Vegetación densa, B- Vegetación inundada; C- Pastos y cultivos, D- Suelo desnudo, E- Superficies abiertas, F- Cuerpo Agua; G- Superficie construida.

	Deforestada		Perdida cuerpo de agua
	Abandono de agricultura		Cambio a superficie construida
	Cambio a actividades productivas		Conservada
	Revegetada		Cuerpo de agua
	Sin cambio		

Mapa 5. Cambio de tipo de cubierta entre 2020-2021 y 2023-2024 en el municipio Tulum.



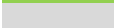
Fuente: Elaborado propia.

Finalmente, los procesos de cambios observados para el periodo 2017 - 2018 y 2023 -2024, se aprecian con un intercambio incipiente entre las coberturas de vegetación densa, vegetación inundada y pastos y cultivos que conllevan a procesos de tipo deforestación y degradada y una pequeña área de revegetación que pasó de pastos y cultivos a vegetación densa. En este periodo de 6 años de intervalo en total, el proceso de cambio de tipo deforestada representó el 2% de toda la superficie de vegetación densa e inundada, en contrapartida la superficie revegetada en todo el periodo fue del 20%. En total la cobertura con mayor ganancia fue la superficie abierta con un área de 1,940.4 ha y por su parte la cobertura con mayores ganancias se mantuvo la vegetación densa con 3,505.8 ha, las tierras abandonadas por la agricultura presentaron diferentes variaciones para un total 140.3 ha al 2024 (Tabla 9).

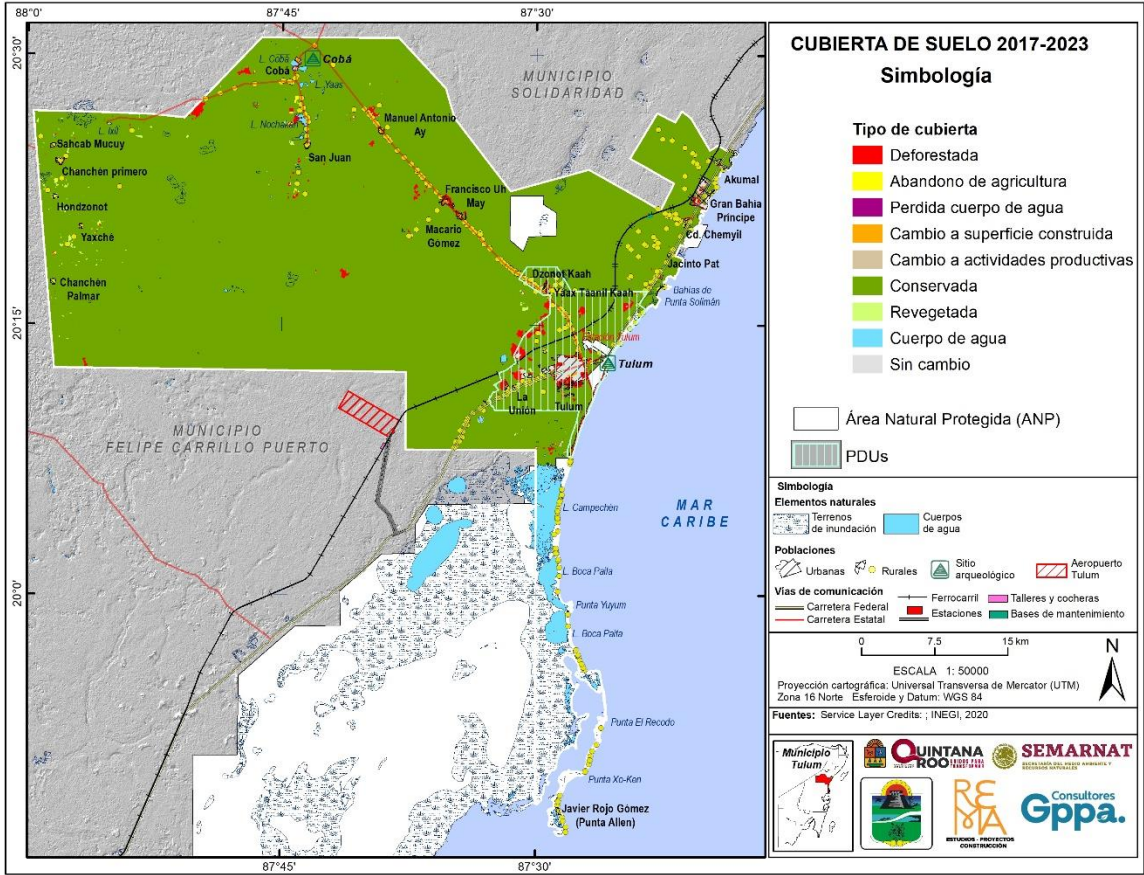
Tabla 9. Matriz de transición entre 2017-2018 (1) y 2023-2024 (2), así como su superficie en ha.

1 \ 2	A	B	C	D	E	F	G
A	182031.78	165.23	13.99	96.78	1574.34	15.21	1640.26
B	181.94	7629.2	0.19	21.51	218.56	216.73	2.51
C	350.29	4.39	1.18	0	140.26	0	0.56
D	10.38	9.25	0	213.24	6.13	5.33	19.98
E	577.12	160	3	31.4	1550.37	13.69	130
F	19.1	183.49	0	0.21	1.07	3179.6	5.03
G	0	0	0	0	0	0	1558.27

Leyenda: A- Vegetación densa, B- Vegetación inundada; C- Pastos y cultivos, D- Suelo desnudo, E- Superficies abiertas, F- Cuerpo Agua; G- Superficie construida.

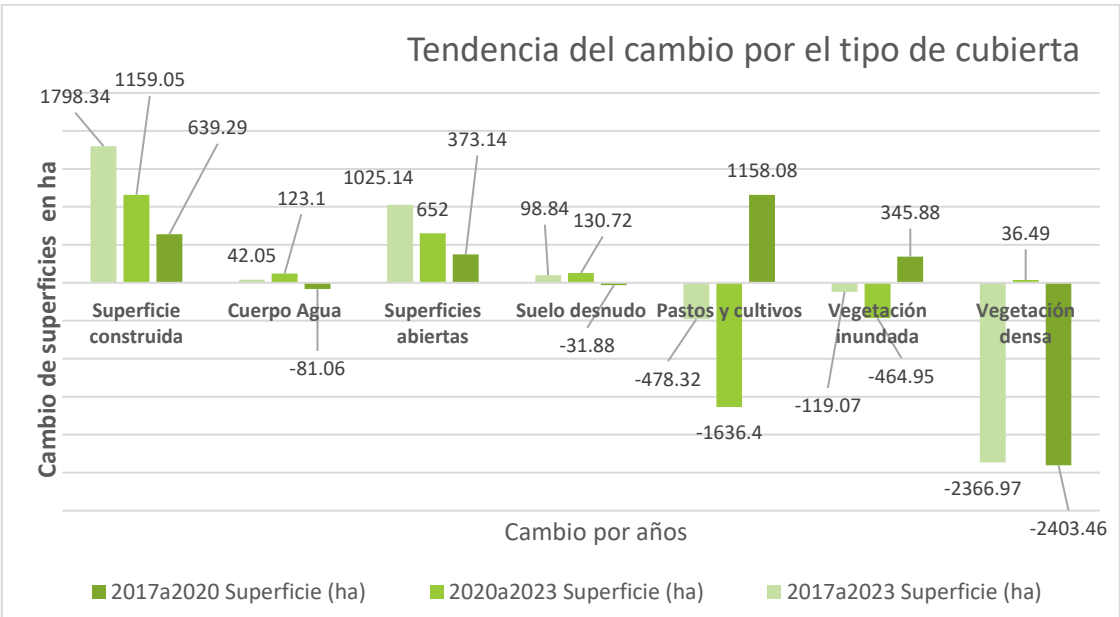
	Deforestada		Perdida cuerpo de agua
	Abandono de agricultura		Cambio a superficie construida
	Cambio a actividades productivas		Conservada
	Revegetada		Cuerpo de agua
	Sin cambio		

Mapa 6. Cambio de tipo de cubierta entre 2017-2018 y 2023-2024 en el municipio Tulum. Elaboración propia.



Fuente: Elaborado propia.

Gráfica 1. Tendencias de los cambios del uso del suelo.



A partir de la gráfica de tendencia anterior podemos observar las diferentes variaciones que han acontecido en las coberturas analizadas, es muy evidente como la superficie construida, ha tenido un incremento sostenido en cada periodo y en general seguido de las superficies abiertas los cuales de igual manera han tenido un incremento sostenido, aunque en han abarcado menor superficie en hectáreas. A estos escenarios se suman una considerable fluctuación entre los periodos analizados de la cobertura de pastos y cultivos, lo cual sugiere un abandono de la actividad agrícola, y finalmente la cobertura de Vegetación densa con un decrecimiento generalizado, aunque se observa una incipiente recuperación entre 2020 y 2023. Por su parte la Vegetación inundada presenta pequeñas variaciones con una tendencia a la disminución para el final del periodo analizado (2023 -2024).

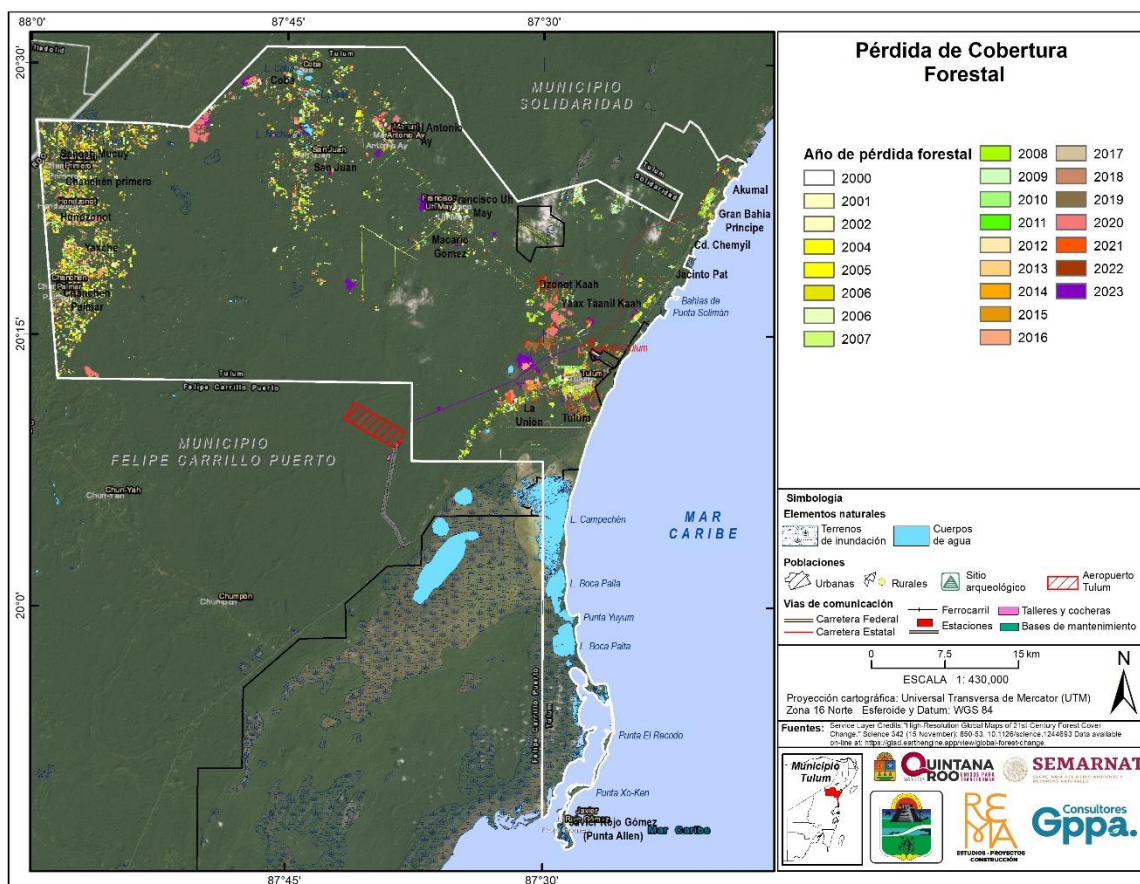
9.4.1.2 PÉRDIDA DE COBERTURA FORESTAL

El análisis de pérdida de cobertura forestal fue realizó a partir de la información disponible de *Global Landa Analysis and Discovery* (GLAD), consultada y procesada para el municipio de Tulum por medio de la plataforma Google Earth Engine.

Esta información es el resultado del análisis de imágenes temporales Landsat con resolución espacial de 30 x 30 m que caracterizan la extensión y el cambio de los bosques. La pérdida de cobertura forestal se define como una perturbación o reemplazo de rodales o un cambio de un estado forestal a un estado no forestal.

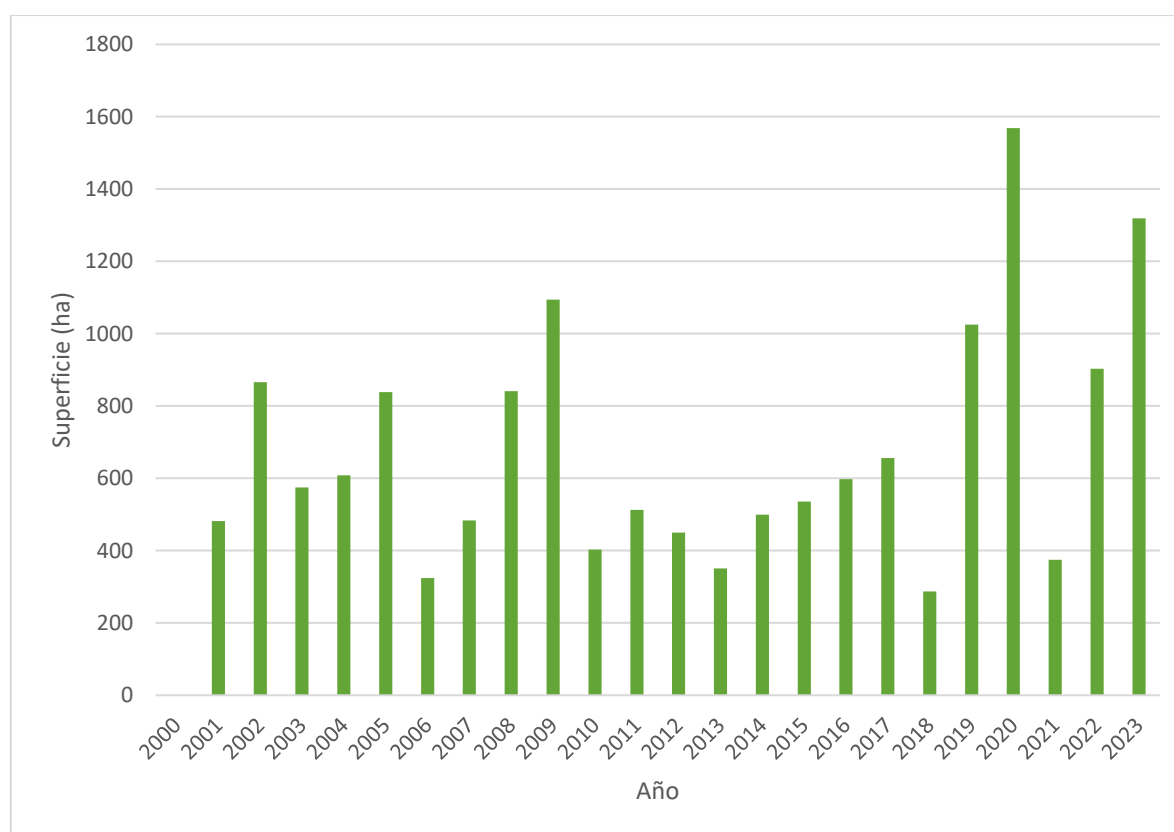
A continuación, se presenta la representación cartográfica y gráfica de la pérdida forestal registrada para el período comprendida de 2000 - 2023. Como se puede observar destacan los años 2020, 2023 y 2009, como los de mayor pérdida de cobertura forestal.

Mapa 7. Pérdida de cobertura forestal período comprendido del 2000 - 2023.



Fuente: Service Layer Credits: "High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change." Science 342 (15 noviembre): 850-53. 101126.1244693 Data available on-line at: <https://glad.earthengine.app/view/global-forest-change>.

Gráfica 2. Pérdida de cobertura forestal periodo comprendido del 2000 - 2023.



Fuente: Elaboración propia con información de *Service Layer Credits: "High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change."* *Science* 342 (15 noviembre): 850-53. 101126.1244693 Data available on-line at: <https://glad.earthengine.app/view/global-forest-change>.

Tasa anual de pérdida de cobertura forestal

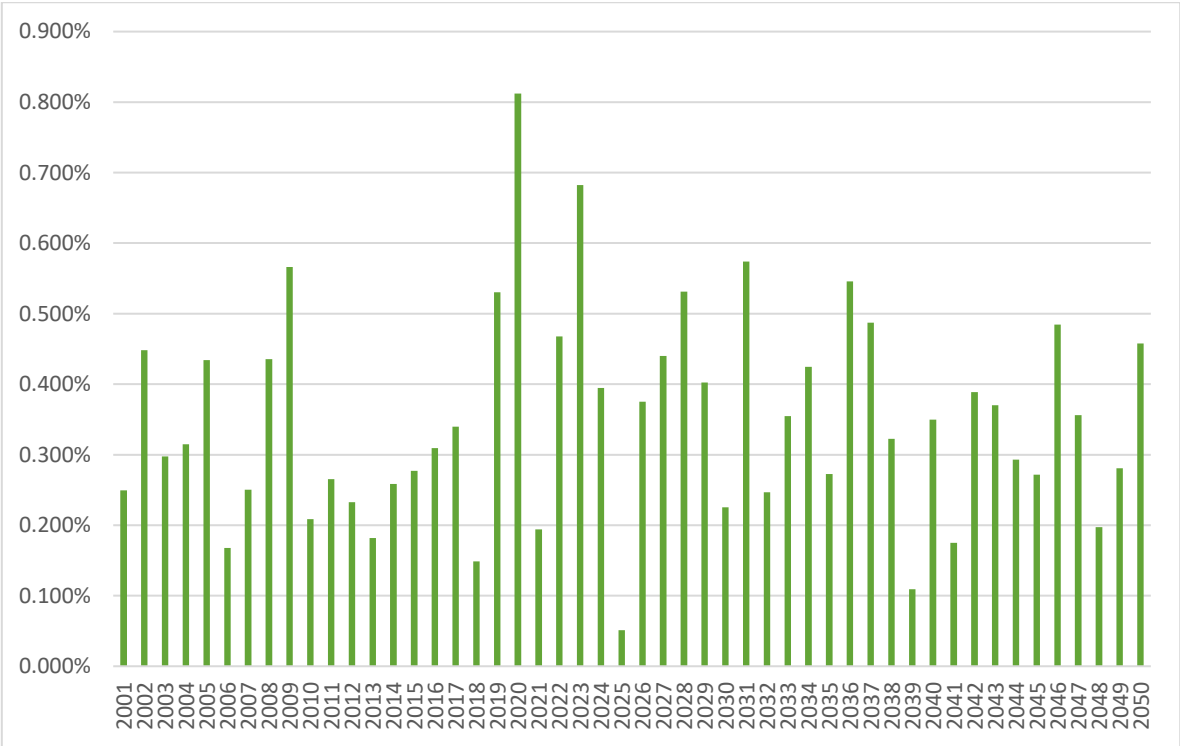
A partir de los datos históricos de GLAD sobre la pérdida de cobertura forestal, se estimó la tasa anual de pérdida para el periodo comprendido entre 2001 y 2023. Además, se proyectó la posible tendencia de esta tasa para el periodo de 2024 a 2050.

En el proceso de evaluación de la tendencia futura, inicialmente se estimó la posible superficie de cambio a partir de 2024, lo que se realizó mediante la función de determinación de la distribución acumulativa normal, herramienta estadística que te permite encontrar un valor correspondiente a una probabilidad determinada dentro de una distribución normal, utilizando como parámetros la media y desviación estándar de los datos históricos.

Para calcular la tasa anual de pérdida del período 2001-2023, se consideró como referencia la superficie de cobertura forestal registrada en el año 2000. De manera similar, para el período proyectado de 2024 a 2050, se utilizó como punto de partida la superficie de cobertura forestal estimada para el año 2020.

Los resultados indican una tasa de cambio promedio anual de 0.351% para los datos históricos en el periodo comprendido del 2021-2023 y de 0.385% para el periodo comprendido del 2024 - 2050. En la siguiente Gráfica 3 se puede observar las tasas estimadas para ambos periodos.

Gráfica 3. Tasa de deforestación periodo comprendido de 2021 a 2050.



Fuente: Elaboración propia.

9.4.1.3 TENDENCIA

La evolución y el aprovechamiento del territorio por parte de las diferentes actividades económicas y sectores, se manifiesta de manera tangible en los cambios de coberturas de uso de suelo y vegetación. En este sentido se realizó la proyección de dicha tendencia basada en la información histórica disponible.

Para este análisis se utilizaron los mapas de cobertura de GLAD (2000 - 2024), los cuales fueron reclasificados a cinco categorías que permitieran disminuir la presencia de transiciones de cambio espurias y maximizar el potencial predictivo del modelo utilizado. La reclasificación se hizo utilizando como referencia las coberturas de uso de suelo y vegetación definidas por la cartografía de INEGI para la Serie VI (INEGI, 2017) y su representación en los mapas de coberturas utilizados se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Clasificación de coberturas utilizada con base en las capas GLAD y la clasificación de INEGI.

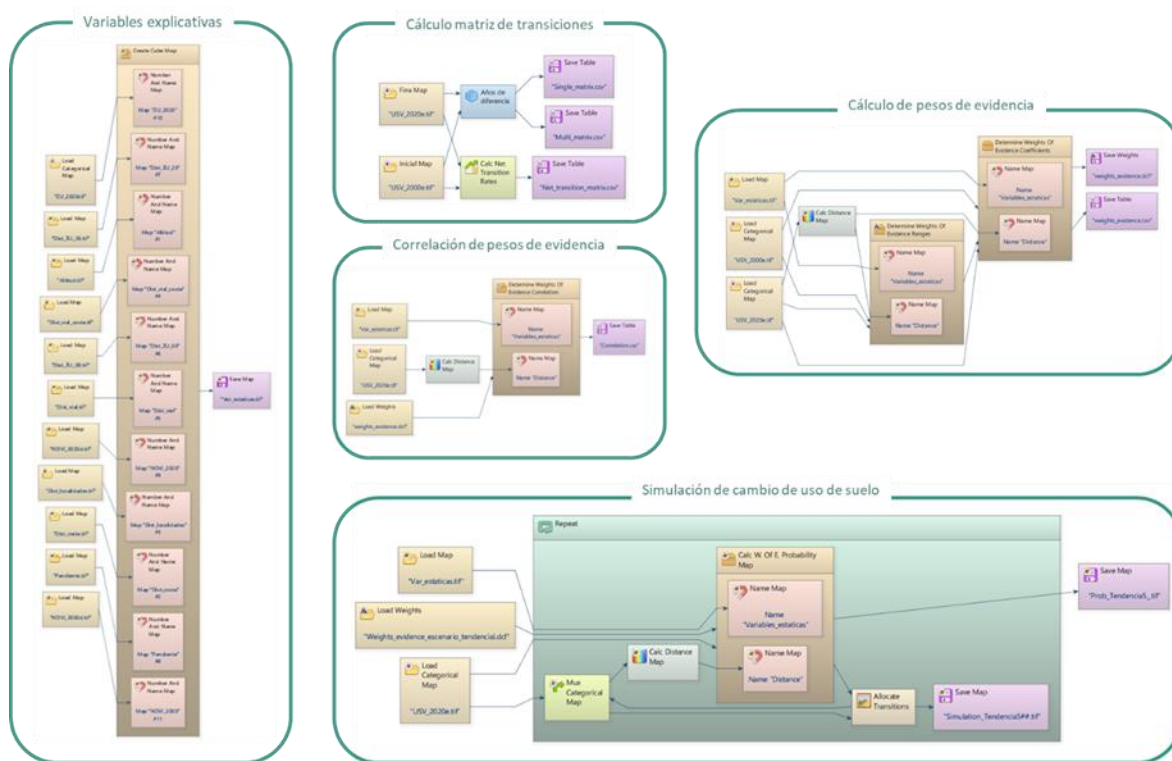
Usos de suelo y vegetación INEGI	Categoría utilizada
Selva mediana subperennifolia (SMQ)	Vegetación natural
Selva mediana subcaducifolia (SMS)	
Vegetación de manglar (VM)	
Vegetación secundaria arbórea derivada de SMQ	
Vegetación secundaria arbustiva derivada de SMQ	
Vegetación secundaria herbácea derivada de SMQ	
Vegetación de tular (VT)	Zona inundable
Agricultura (AG)	Agricultura
Cuerpo de agua (H2O)	Cuerpo de agua
Zona urbana (ZU)	Superficie construida
Asentamiento humano (AH)	
Desprovisto de vegetación (DV)	

Fuente: Elaboración propia.

Cabe señalar que los mapas de la fuente citada representan coberturas para los años 2000, 2005, 2010, 2015 y 2020, por lo tanto, el mapa de 2024 fue generado a partir imágenes de satélite de ese año. Además, el área de análisis inicial ocupó una superficie mayor a la limite municipal para poder identificar elementos aledaños que puedan incidir en la predicción de cambios.

El modelo de predicción de cambios de uso de suelo se llevó a cabo en el software DINAMICA EGO Versión 7, para lo cual fueron seleccionadas variables explicativas sometidas a una estimación de pesos de evidencia para posteriormente calcular las transiciones con base en las tasas de cambio 2000-2024 y las capas de probabilidad de cambio para cada transición. Una representación de los pasos y módulos utilizados en DINAMICA EGO se presentan en la Figura 5.

Figura 5. Proceso de simulación en los módulos de Dinámica EGO 7.



Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de probabilidades de transición entre categorías es necesario llevar cabo la selección de variables impulsoras o variables explicativas. Dichas variables pueden ser tanto de elementos naturales del paisaje como variables relacionadas con fenómenos o elementos socioeconómicos. Cabe señalar que la homogeneidad del paisaje presente en el municipio fue un factor que permitió establecer las siguientes variables explicativas: distancia a centros de población (año 2000), distancia a carreteras principales (año 2000), distancia a la costa, densidad de población, distancia a zonas arqueológicas, distancia a localidades turísticas y distancia al PDU (año 2008) y para cada una de estas fueron calculados rangos de evidencia y pesos de evidencia dando como resultado la factibilidad de su aplicación en el modelo de simulación.

El análisis de correlación entre variables explicativas señaló una alta correlación entre la densidad de población y la distancia a centros de población, razón por la cual para el modelo sólo se incluyó esta última.

9.4.1.3.1 RESULTADOS

La matriz de transición de coberturas resultante (Tabla 11) señala que la transición que involucró la mayor superficie fueron las áreas que registraron una transición de vegetación natural (2000) a superficie construida (2024).

Tabla 11. Matriz de transición de coberturas de uso de suelo y vegetación 2000-2024.

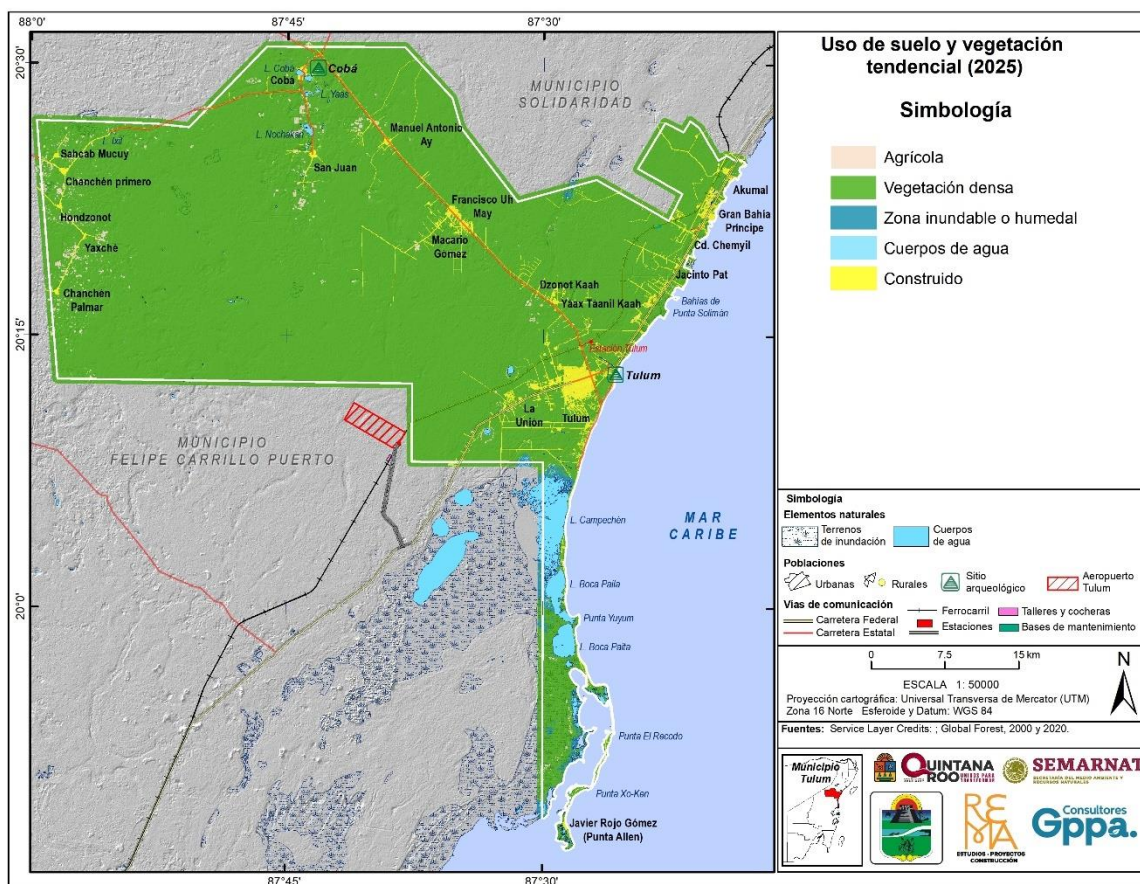
	Agricultura	Vegetación natural	Zona inundable	Cuerpo de agua	Superficie construida
Agricultura	--	2675.52	16.02	0.18	370.53
Vegetación natural	3485.79	--	4967.28	9.27	7905.33
Zona inundable	15.57	788.04	--	553.77	63.81
Cuerpo de agua	1.71	12.96	185.31	--!	19.8
Superficie construida	2.97	7.56	--	--	--

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, el mapa de uso de suelo y vegetación 2048 (Mapa 13) bajo un escenario tendencial muestra un fuerte desarrollo en la zona costera tendiente a la expansión de los desarrollos ya existentes y la expansión de centros de población rurales como Macario Gómez y Cobá.

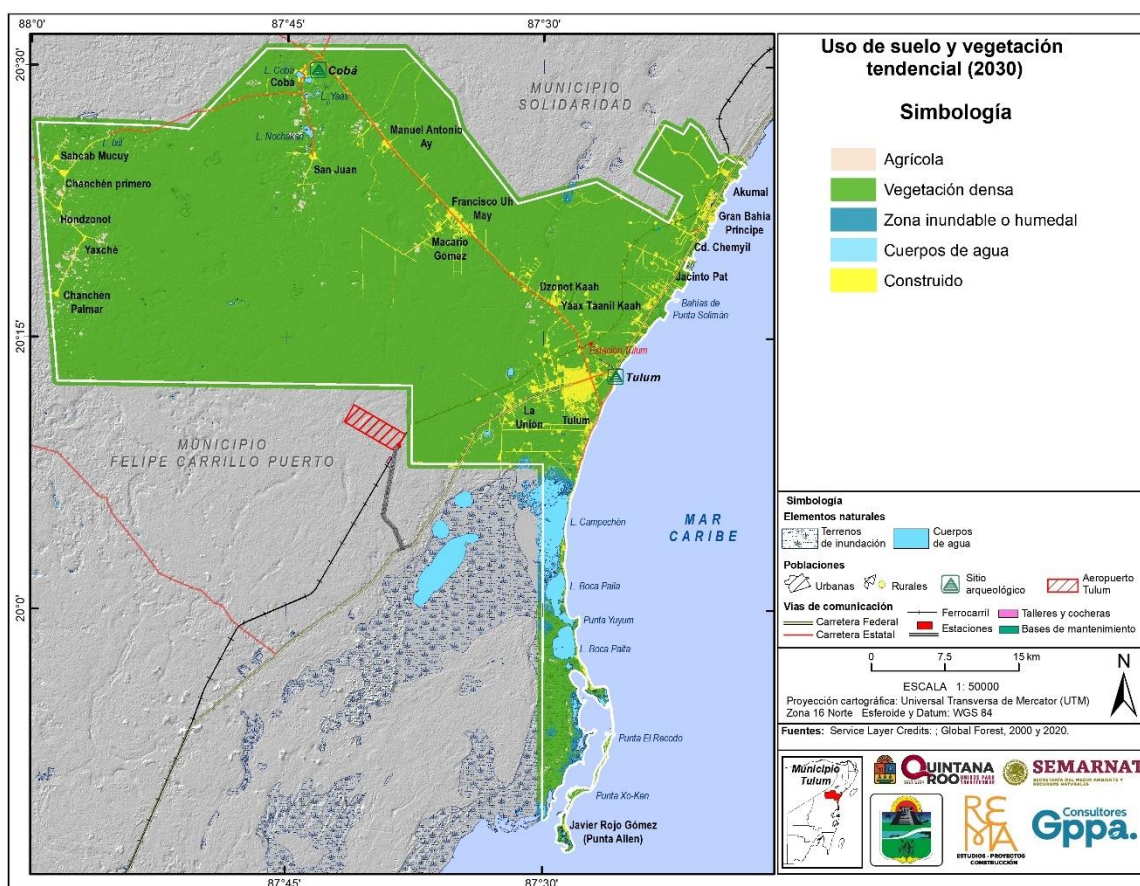
El crecimiento de la superficie construida en el municipio está altamente relacionado con la existencia previa de dicho uso, de tal forma bajo este modelo no es posible la predicción de nuevos desarrollos derivados de proyectos estratégicos futuros.

Mapa 8. Tendencia de cambio de cobertura, año 2025.



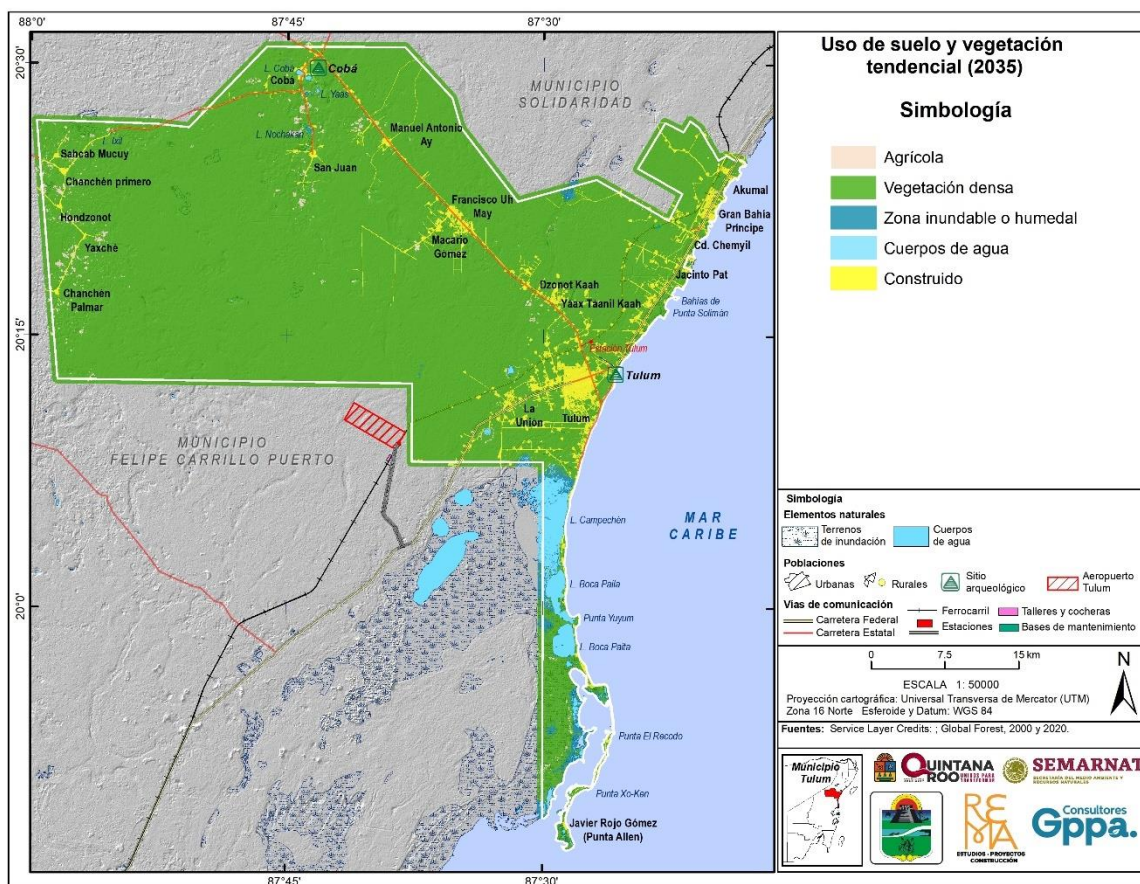
Fuente: Elaboración propia con datos de GLAD.

Mapa 9. Tendencia de cambio de cobertura, año 2030.



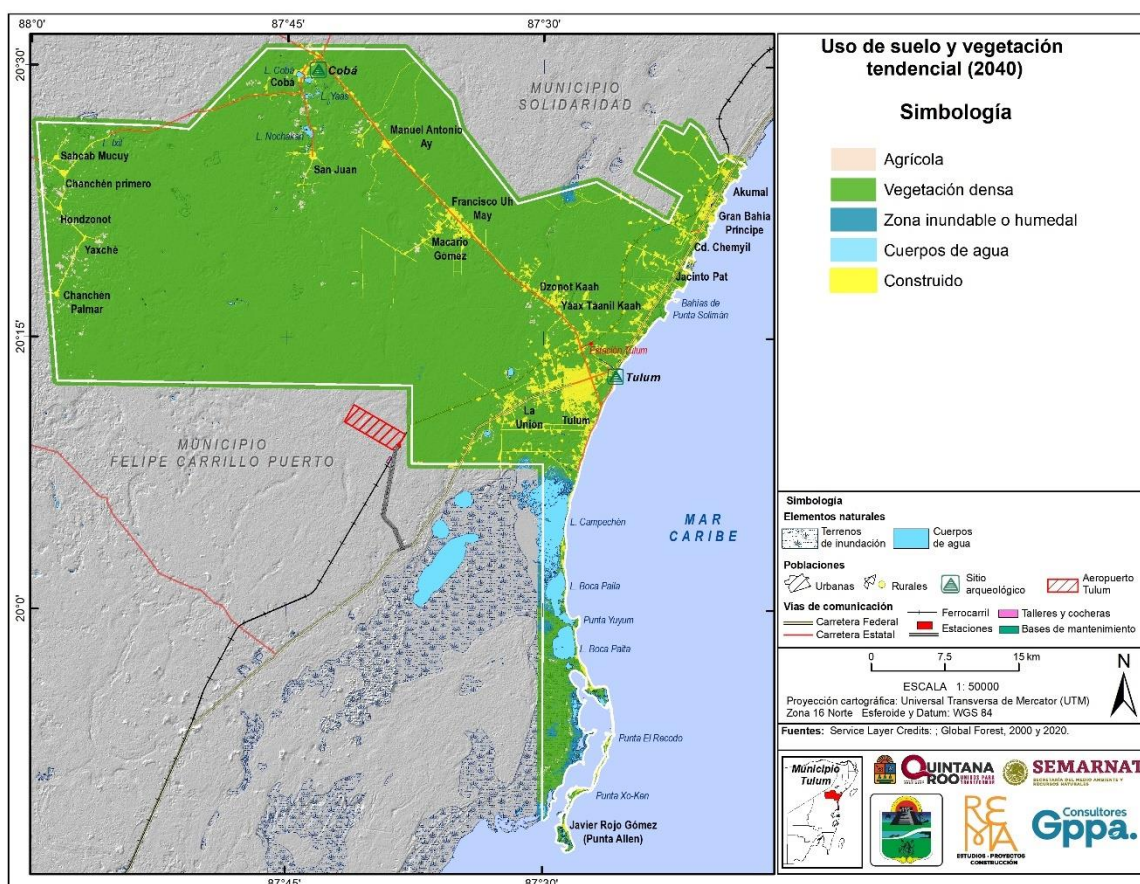
Fuente: Elaboración propia con datos de GLAD.

Mapa 10. Tendencia de cambio de cobertura, año 2035.



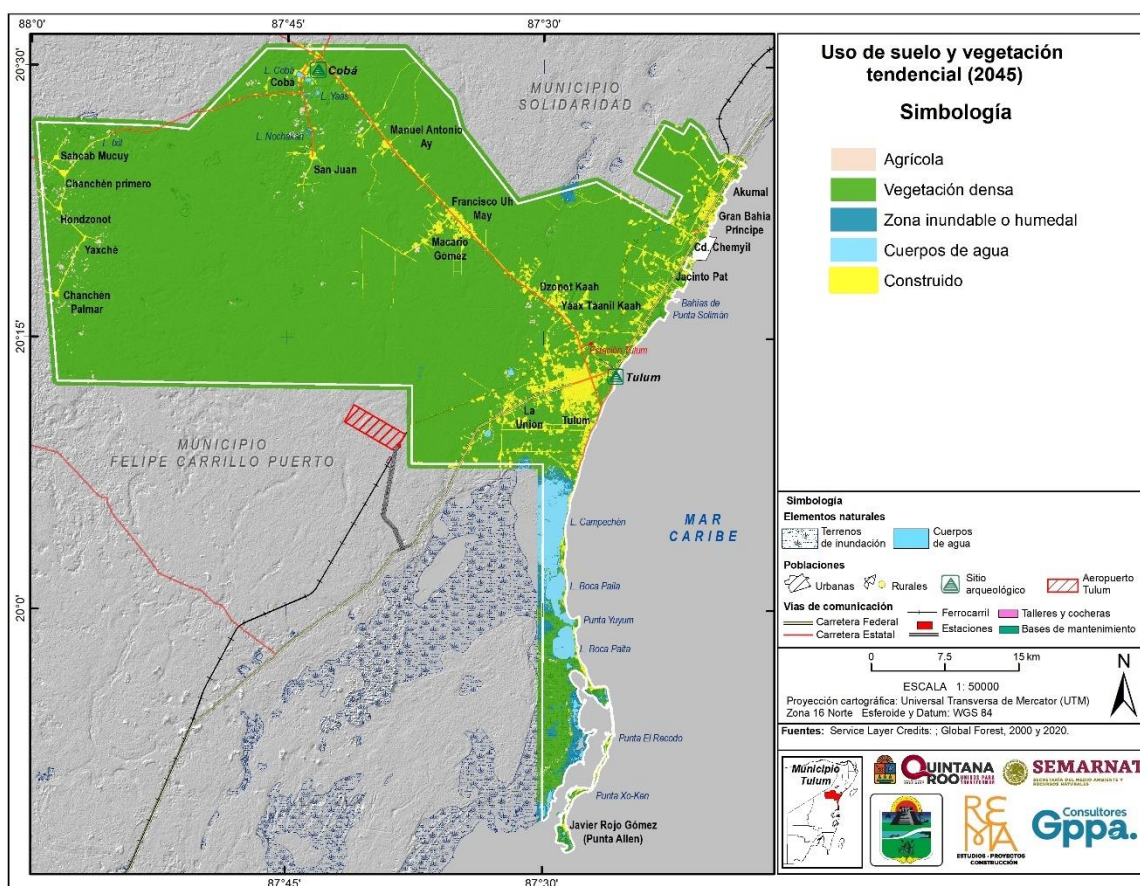
Fuente: Elaboración propia con datos de GLAD.

Mapa 11. Tendencia de cambio de cobertura, año 2040.



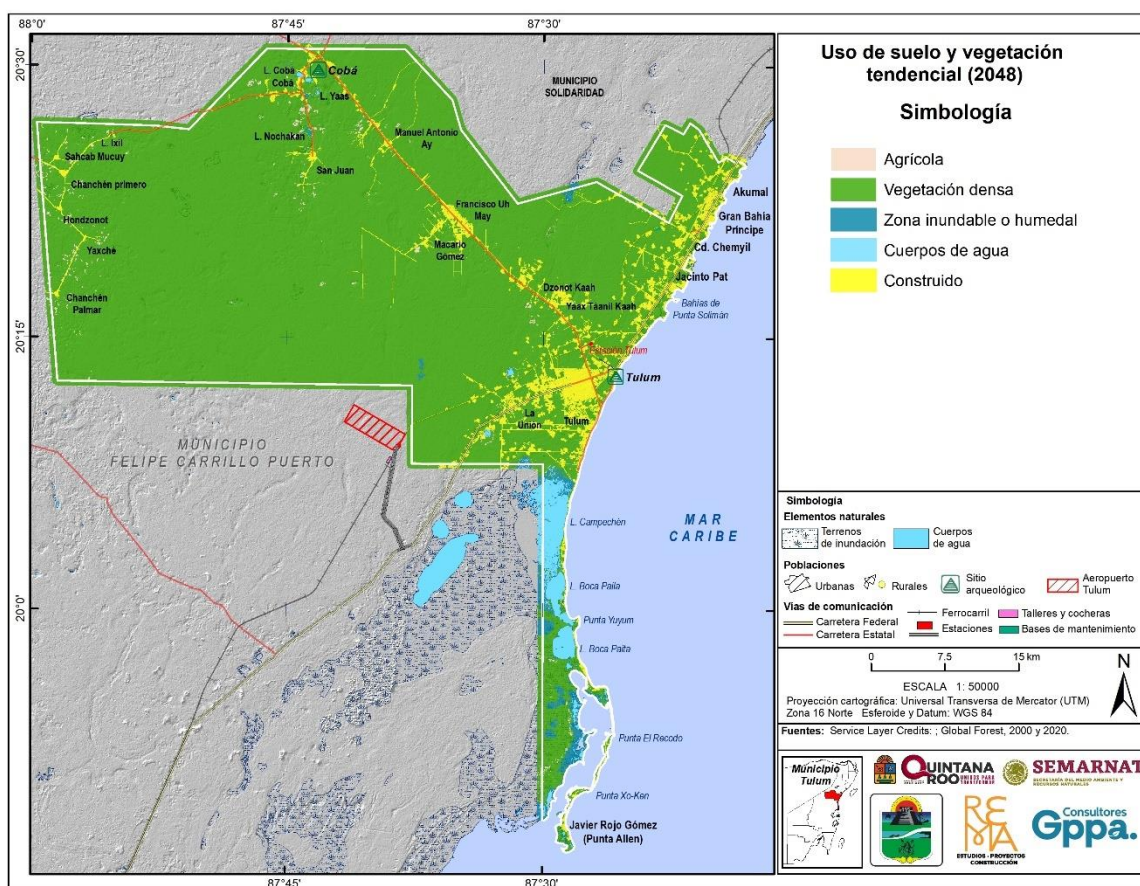
Fuente: Elaboración propia con datos de GLAD.

Mapa 12. Tendencia de cambio de cobertura, año 2045.



Fuente: Elaboración propia con datos de GLAD.

Mapa 13. Tendencia de cambio de cobertura, año 2048.



Fuente: Elaboración propia con datos de GLAD.

El análisis de la matriz de transición en el período 2024 - 2048 (Tabla 12) sugiere que podría existir una transformación significativa de los cultivos, con una alta probabilidad de que se conviertan en vegetación densa (57.6%) y, en menor medida, en zonas construidas (11.9%). Por otro lado, es posible que la vegetación densa, los cuerpos de agua y las áreas construidas se mantengan estables, dado que presentan probabilidades de permanencia superiores al 90%. Sin embargo, no se descarta una ligera presión de lo construido sobre la vegetación densa y los cultivos. Cabe indicar que este análisis se enfoca en las tendencias actuales y no incorpora los planes estratégicos del municipio. Esto significa que se basa en datos históricos, patrones observables y proyecciones que surgen de la dinámica actual, sin considerar intervenciones futuras, políticas públicas o cambios estratégicos que el municipio pueda implementar.

Tabla 12. Matriz de transición de coberturas de uso de suelo y vegetación 2024-2048.

2024	2048						
			Cultivo	Vegetación densa	Zona inundable o humedal	Cuerpos de agua	Construido
			1	2	3	4	5
	Cultivo	10	0.300	0.576	0.005	0.000	0.119
	Vegetación densa	20	0.003	0.959	0.005	0.000	0.033
	Zona inundable o humedal	30	0.001	0.058	0.871	0.060	0.011
	Cuerpos de agua	40	0.000	0.005	0.026	0.967	0.002
	Construido	50	0.002	0.070	0.002	0.000	0.926

La diagonal de la matriz representa la probabilidad de que un estado permanezca igual después de 24 años:

- Cultivo: 30.0%
- Vegetación densa: 95.9%
- Zona inundable o humedal: 87.1%
- Cuerpos de agua: 96.7%
- Construido: 92.6%

Las transiciones significativas de 2024 al 2048 de los usos de suelo para el municipio de Tulum, se presentan a continuación:

Cultivo (10):

- 57.6% podría convertirse en vegetación densa.
- 11.9% podría convertirse en construido.
- 30.0% podría permanecer como cultivo.

Es probable que los cultivos estén siendo abandonados o transformados principalmente en vegetación densa (posiblemente por reforestación o regeneración natural).

Vegetación densa (20):

- 95.9% podría permanecer como vegetación densa.
- 3.3% podría convertirse en construido.

Zona inundable o humedal (30):

- 87.1% podría permanecer como humedal.
- 6.0% podría convertirse en cuerpos de agua.

Cuerpos de agua (40):

- 96.7% podría permanecer como cuerpos de agua.
- 2.6% podría convertirse en zona inundable o humedal.

9.4.2 BIODIVERSIDAD

El municipio de Tulum se distingue por su riqueza biológica, que incluye ecosistemas únicos como manglares, selvas y humedales, los cuales albergan una amplia variedad de especies de flora y fauna. Muchas de estas especies están incluidas en categorías de protección conforme a la NOM-059-SEMARNAT-2010, lo que resalta su importancia en el contexto de la conservación ambiental.

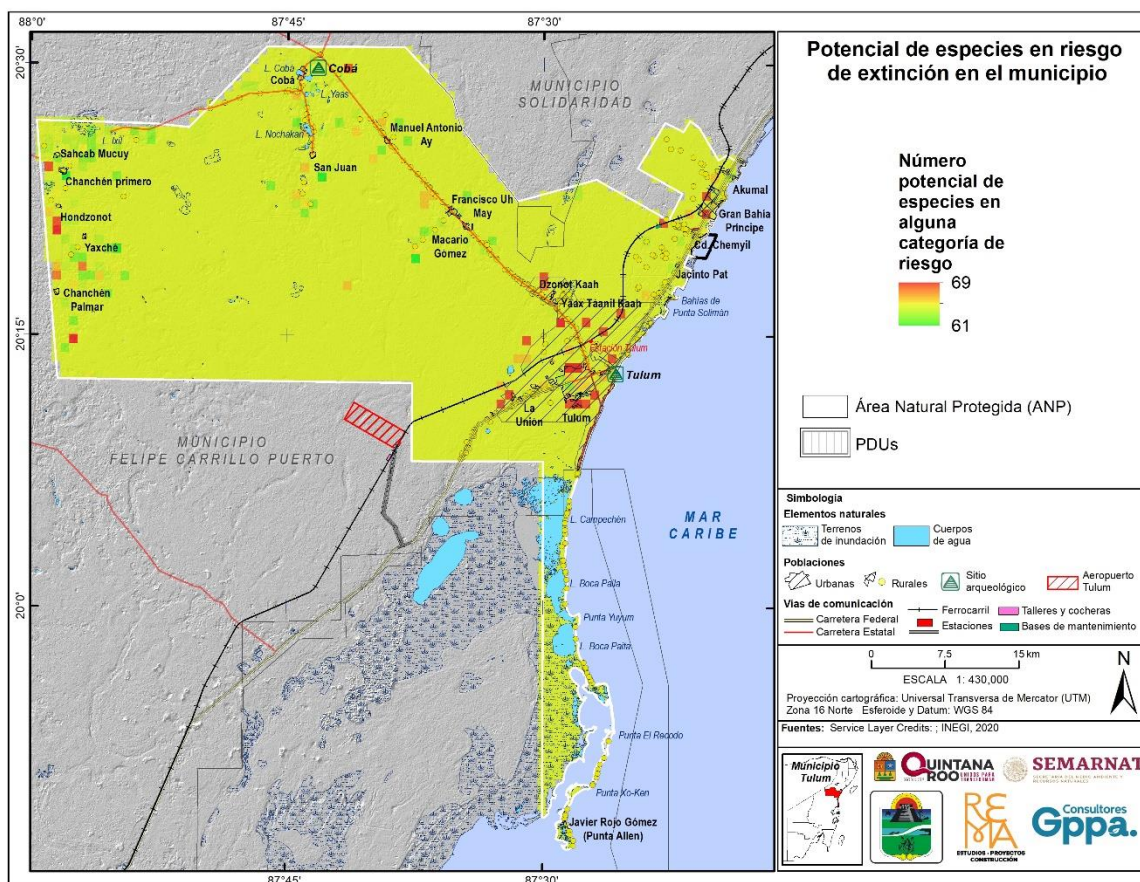
En el escenario tendencial, los patrones actuales de desarrollo urbano, las actividades turísticas y otros usos del territorio ejercen una presión creciente sobre los recursos naturales, planteando un desafío importante para mantener la integridad de los ecosistemas y la biodiversidad que sustentan.

En el apartado previo se presentó el diagnóstico sobre la pérdida de cobertura forestal que ha registrado el municipio. Bajo este contexto y dado que la biodiversidad está estrechamente vinculada a la presencia de vegetación bien conservada, que actúa como refugio para la mayor parte de las especies, su conservación depende directamente de la permanencia y calidad de los ecosistemas. Por tanto, cualquier afectación a la cobertura vegetal tendrá un impacto proporcional en la biodiversidad del municipio.

Para evaluar esta relación, se realizó un análisis utilizando el método de *Zonal Statistics*, relacionando la pérdida de cobertura forestal (2000 - 2023) con la distribución potencial de especies en peligro de extinción, conforme a los datos de la CONABIO (2021). Este proceso permite analizar y combinar información espacial proveniente de diferentes capas geográficas para identificar patrones y relaciones significativas entre variables.

Los resultados del análisis revelaron las áreas con mayor impacto, destacando el número de especies en riesgo comprometidas en dichas zonas (Mapa 14). Se identificó que las áreas cercanas al centro de población albergan una mayor proporción de especies en categoría de protección, mientras que las áreas agrícolas del municipio también representan puntos críticos de pérdida de cobertura forestal y riesgo para estas especies.

Mapa 14. Áreas críticas en donde convergen la pérdida de cobertura forestal y la presencia de especies protegidas.



9.4.3 CRECIMIENTO URBANO, DINÁMICA DEMOGRÁFICA Y DESARROLLO DEL SECTOR TURÍSTICO

Regularmente en los programas de ordenamiento ecológico la variable que rige, algunas veces de manera casi única, es la ecología.

No obstante, desde el punto de vista metodológico e incluso normativo, son cuatro las partes que componen un ordenamiento ecológico: caracterización, diagnóstico, pronóstico-prospectiva, y propuesta

Y en ellos se establece que se debe buscar un balance entre las actividades con expresión territorial y la protección de los recursos naturales, es decir, buscar un equilibrio entre las actividades productivas y la protección de los recursos naturales

En el municipio de Tulum la actividad fundamental, por mucho, es el turismo: más del 61% del producto interno bruto (PIB) municipal corresponde al sector turismo.

En consecuencia, es la actividad productiva que más se debe de cuidar. Sin olvidar, desde luego, que la componente ecológica es fundamental.

Si bien, estrictamente hablando, el desarrollo urbano es tan solo uno más de los ingredientes que conforman un Programa de Ordenamiento Ecológico Local, en lugares donde el crecimiento de las actividades económicas (en nuestro caso el turismo) se han venido desarrollando de manera casi explosiva, este componente ha jugado un papel determinante en el proceso de crecimiento de los centros turísticos; específicamente en la costa norte del estado de Quintana Roo.

Esto es, las variables de crecimiento de la población y el desarrollo urbano han sido quizá el factor más importante en el desenvolvimiento de los centros turísticos de esta parte de la geografía nacional, imprimiéndole un carácter específico a la conformación de estos polos de desarrollo. Este crecimiento descomunal de la población trajo aparejadas, las más de las veces, un deterioro de la imagen urbana de estos centros, y una baja en la calidad de los servicios urbanos y turísticos que ofrecían.

Estamos hablando, desde luego, del proceso que se vivió en Cancún, Playa del Carmen, y, en general, el corredor Cancún-Tulum. Desde los inicios de la introducción del turismo planificado, de la actividad turística en forma industrial en esta parte del país (finales de los años 60's, principios de los 70's del siglo pasado), casi siempre se le dio al proceso de urbanización un papel secundario en los análisis y planes maestros que se fueron construyendo en los distintos sitios de desarrollo. Esto es, se planeaba y se fomentaba el crecimiento de las variables estrictamente turísticas como: espacios de alojamiento, amenidades, servicios turísticos, transporte turístico, etc., pero se dejaba en un segundo término al desarrollo urbano que se gestaría en dichos sitios, tanto por un crecimiento natural, como por el propiciado por el incremento en las actividades económicas y turísticas en especial. Es decir, se plantearon de manera específica en los distintos planes de desarrollo de estos centros turísticos zonas de crecimiento y reservas de suelo turístico (zonas hoteleras o de alojamiento, zonas habitacionales turísticas, zonas de servicios turísticos como campos de golf, bares y restaurantes, etc.), donde se establecía con cierta precisión: superficie de las zonas, densidades, el número de unidades, metros cuadrados; pero, en la mayoría de los casos, la parte habitacional y urbana en general sólo se señalaba o indicaba de manera general.

Este aspecto se mejoró sustancialmente con el advenimiento del nuevo milenio. Todos los planes de Desarrollo Urbano que se generaron desde ese momento incorporaron las distintas variables que atañen a la población, como zonas habitacionales, se servicio y comercio, zonas de esparcimiento y áreas verdes, etc.

Sin embargo, todo lo referente a los espacios urbanos necesarios no se incorporaron de manera categórica en los Programas de Ordenamiento Ecológico de las distintas zonas de la costa quintanarroense; en donde sólo se establecen las unidades de gestión ambiental urbanas, sin cuantificar ni calificar de manera específica el desarrollo urbano que se gestaría en dichas zonas, dado el posible crecimiento de la actividad turística que se preveía sucedería en las mismas.

De esta manera, el desarrollo urbano se presenta como una variable que debe considerarse de manera categórica en los Programas de Ordenamiento Ecológico. Resulta notorio que en el proceso de crecimiento del turismo en el estado de Quintana Roo cuando se descuidó, se minimizó o incluso se ignoró el posible incremento de la población debido al auge económico del turismo, se tuvieron graves problemas urbanos y por ende ecológicos; que incidieron en la calidad de vida de los pobladores, así como de los turistas.

De esta manera, en los distintos polos de desarrollo turísticos de esta región, se dieron casi desde su gestación los asentamientos precarios o definitivamente irregulares.

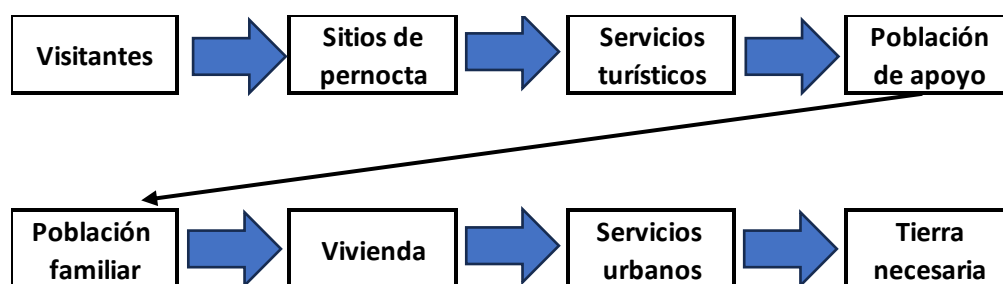
En este apartado vamos a comentar el proceso de desenvolvimiento que tuvieron Cancún y Playa del Carmen en los aspectos turísticos y poblacionales, y la problemática que se generó por un crecimiento en algunos momentos explosivo de la actividad turística y de la población.

Todo el fenómeno que se gestó con este crecimiento tan grande puede permear, sin duda en otros destinos del Estado, en especial en Tulum. Es decir, si las condiciones de crecimiento del mercado, tanto nacional, pero sobre todo el internacional, se dan como se han expandido después de la pandemia (fuerte crecimiento del mercado), habrá una sobredemanda de mercado que generará una fuerte presión en los puntos de mayor atractivo del país; en especial Tulum, dado su enorme atractivo.

En este sentido, es necesario comentar que Cancún tuvo un crecimiento explosivo durante algunos años mucho más grande que lo acotado por los Planes que se tenían. Este crecimiento, con un lapso de tiempo entre ambos, se transmitió hacia el sur de la costa del estado, generando también un crecimiento desmesurado en Playa del Carmen y en general en la denominada Riviera Maya. Podríamos decir que primero creció Cancún hasta que de alguna manera se saturó, después se “descubrieron” Playa del Carmen y la Riviera Maya, y crecieron también hasta saturarse. Lo mismo podría pasar en Tulum: una gran presión generada por un incremento exponencial de visitantes que quieren venir a esta zona generará, sin duda, una demanda de todos los servicios indispensables para su satisfacción. Lo cual generará, a su vez, un fuerte crecimiento poblacional que demandará servicios y suelo urbano.

Claro que todo esto se precipitó no por un movimiento migratorio espontáneo, sino porque había un crecimiento económico de grandes dimensiones en la zona, debido al gran crecimiento de la demanda turística.

Esto es, el fenómeno turístico y todas sus derivaciones forman una cadena que empieza por la demanda turística, tal como se muestra de manera gráfica en la siguiente imagen:



Fuente: Elaboración propia.

Los visitantes en potencia demandarán sitios de pernocta en todas sus vertientes desde hoteles, hostales, posadas, campamentos, etc., así como los servicios complementarios como restaurantes, bares, discotecas, transporte, etc., todo lo cual requerirá de población de apoyo para manejar todos estos servicios, desde la construcción de los espacios, hasta la operación y administración cotidiana de los mismos, esta población de apoyo, a su vez, se acompañará de su familia en algún momento, por su parte todo este incremento de la población requerirá de una vivienda (casas, apartamentos, lotes, etc.), además de todos los servicios urbanos (infraestructura como calles, agua, luz, drenaje, basura, etc.) y administrativos (escuelas, hospitales, oficinas, etc.) y, por último, para todo lo anterior se requerirá de la tierra necesaria.

En resumen, a Tulum le podría pasar lo que le sucedió a Cancún y Playa del Carmen: empezaron a tener una fuerte presión urbana cuando el número de turistas se comenzó a expandir de manera muy fuerte debido al crecimiento de la demanda, sobre todo la internacional. De esta manera, se vino un crecimiento desmesurado en la construcción de la oferta de hospedaje necesaria (Cancún pasó de tener 7,000 cuartos en 1987 a 14,000 cuartos en 1989 -dos años-), y por otra parte comenzaron a redensificarse las construcciones por arriba de la norma para los establecimientos turísticos y en general todos los servicios turísticos; esto atrajo, a su vez, grandes corrientes de trabajadores de la construcción y sus familias, que demandaron un lugar para vivir, generando una demanda de suelo urbano en muy corto plazo, que generó incluso asentamientos irregulares, y zonas que se habitaron sin contar con los servicios urbanos adecuados.

Los factores que más inciden en el desarrollo urbano son:

- Crecimiento de la actividad económica (turismo)
- Creación de grandes infraestructuras regionales
- Desarrollo de vivienda turística, o 2ª casa, vivienda trabajadores “nómadas”

El desarrollo urbano en Cancún (midiéndolo en habitantes) creció en poco más de 25 años quince veces; mientras el número de cuartos de hotel, en el mismo período, se elevó en 10 veces. Playa del Carmen tuvo también un crecimiento desmesurado en 25 años. Tulum en menos de 20 años ha tenido también un desarrollo espectacular en su mancha urbana.

La correlación entre el crecimiento de cuartos de hotel en Quintana Roo y número de turistas es muy grande; pero es más estrecha esta correlación entre cuartos y población-viviendas. Entre más crezcan los cuartos u otros espacios de pernocta o alquiler a corto plazo, crecerán los habitantes y sus viviendas.

¿Por qué Tulum está forzado a crecer desde el punto de vista urbano?

Premisa Fundamental:

Tulum es el punto de la costa de Quintana Roo más atractivo desde el punto de vista turístico puesto que es el único sitio que enlaza los cuatro atractivos más importantes para los visitantes, nacionales y extranjeros:

- El mar turquesa y las playas de arena blanca.
- Una zona arqueológica de las más importantes del país, e incluso del mundo.
- La colindancia a una zona natural protegida de inmensa riqueza ecológica.
- Y, una zona turística frente al mar con un carácter “típico” muy especial.

9.4.3.1 CRECIMIENTO URBANO, DINÁMICA DEMOGRÁFICA Y DESARROLLO DEL SECTOR TURÍSTICO DE LA COSTA DE QUINTANA ROO.

Antecedentes

Cancún

El primer Centro Integralmente Planeado por el Fondo Nacional de Fomento al Turismo (FONATUR), Cancún, que se inició en 1970, planteó que sería una ciudad turística que llegaría a contar con 7,000 cuartos de hotel, y una población de alrededor de 20,000 habitantes.

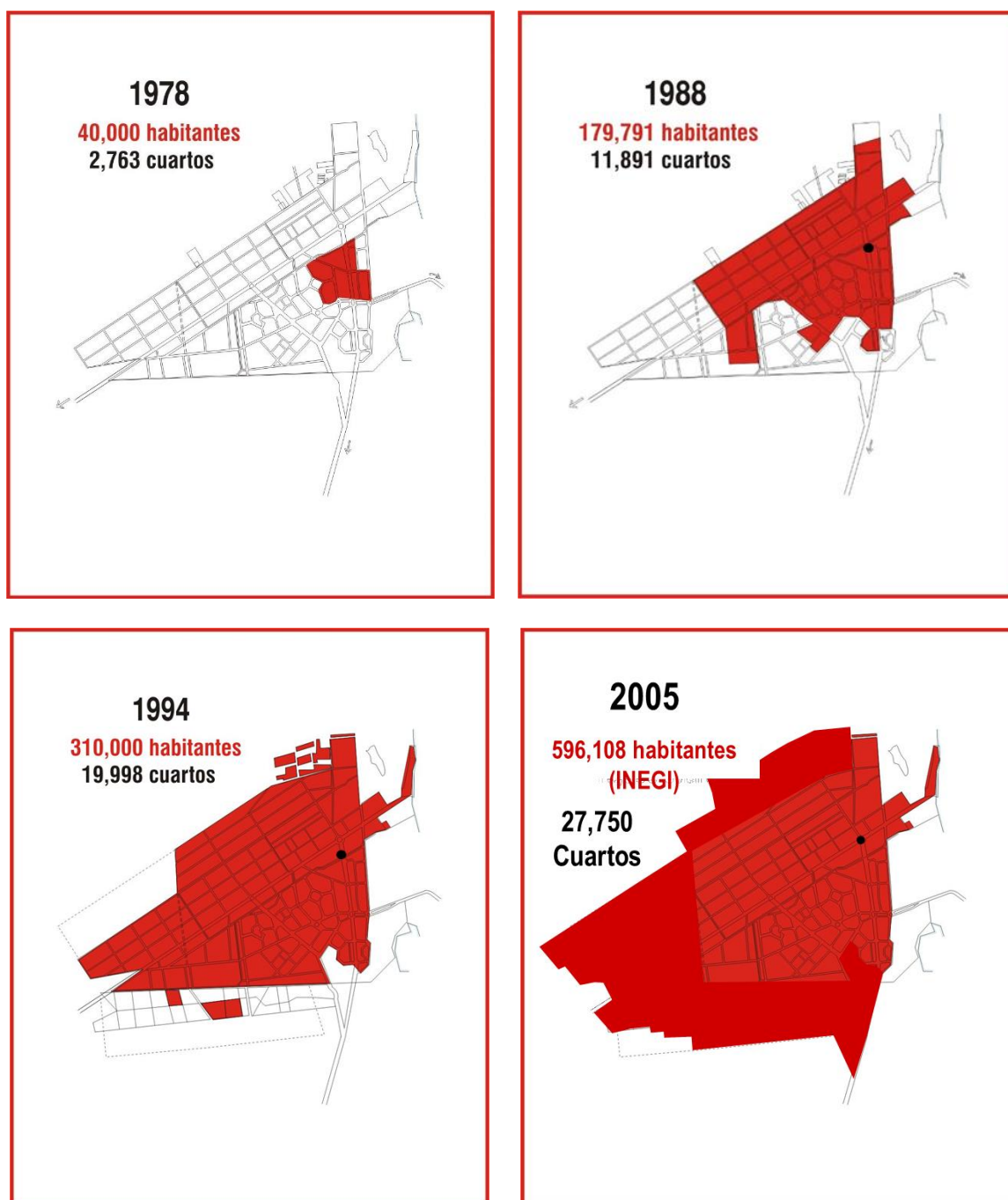
Para el año 1978 este destino había alcanzado casi 2,800 cuartos y contaba para ese momento con una población de alrededor de 40,000 habitantes (14 habitantes por cuarto).

Alrededor del año 1987, este desarrollo ya había alcanzado los 7,000 cuartos de hotel planteados al inicio del desarrollo. Y dos años después, 1989, ya había duplicado ese número de cuartos.

Este crecimiento explosivo se siguió dando en los años posteriores hasta alcanzar las cifras actuales que son por demás enormes.

Cabe aclarar que en muchos momentos se trató de acotar el crecimiento de la ciudad; pero las condiciones del desarrollo del turismo en el mundo y en el país establecieron el devenir de Cancún.

Imagen 1. Crecimiento experimentado en Cancún.



Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI e imágenes satelitales históricas.

Playa del Carmen

El crecimiento de las actividades turísticas y sobre todo del desarrollo urbano de Playa del Carmen fue quizá más explosivo que el desenvolvimiento de Cancún.

Imagen 2. Crecimiento experimentado en Playa del Carmen.



Fuente: Imagen satelital proporcionada por el municipio de Solidaridad 2010.



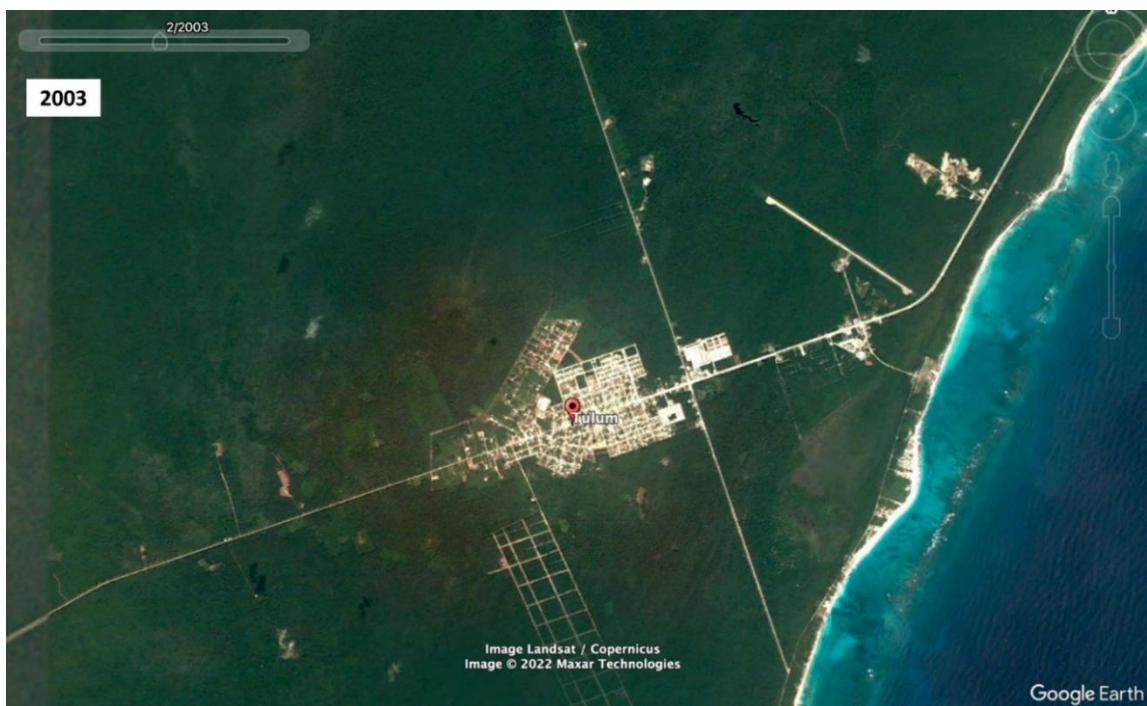
Fuente: Google Maps.

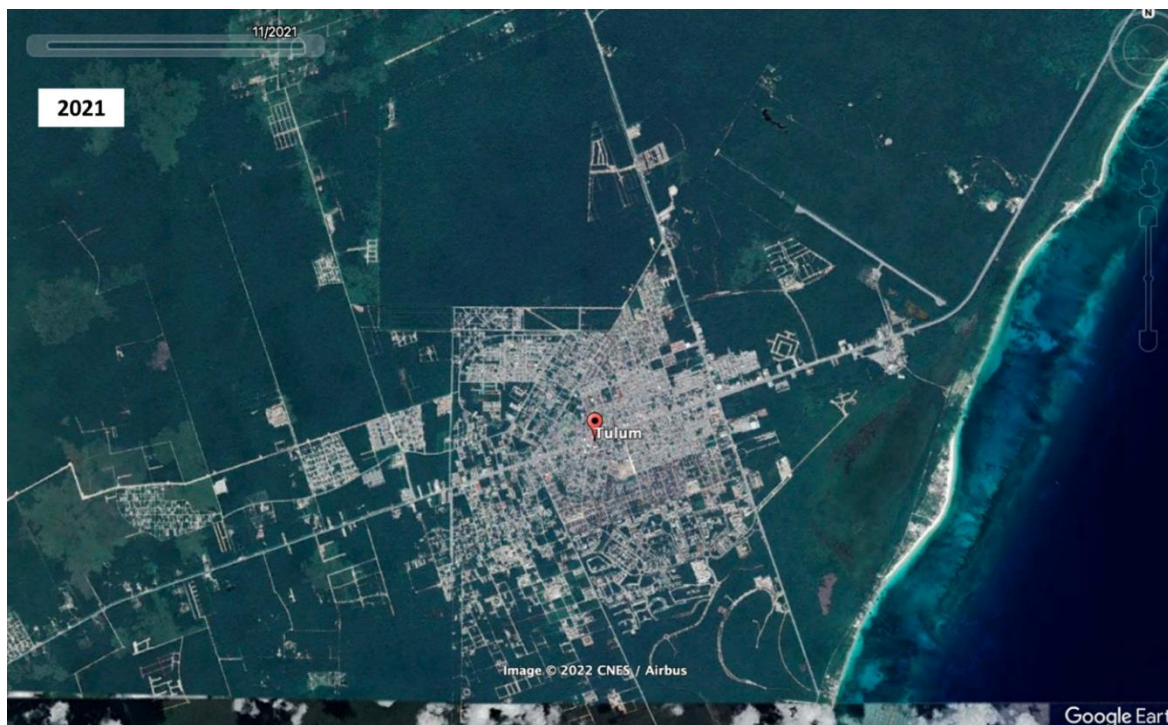
Como se observa en los dos casos anteriores, el crecimiento de las actividades turísticas y económicas en general de estos dos polos de desarrollo se dieron de una manera no prevista del todo, Lo que trajo como consecuencia que los planes de desarrollo urbano de la zona fueran rebasados fundamentalmente por el alto crecimiento de infraestructura y superestructura turística, así como los requerimientos asociados de servicios urbanos, suelo e infraestructura urbana,

Tulum

En el caso de Tulum, en las siguientes imágenes se puede observar el crecimiento que ha experimentado la localidad en 12 años.

Imagen 3. Crecimiento experimentado en Tulum.

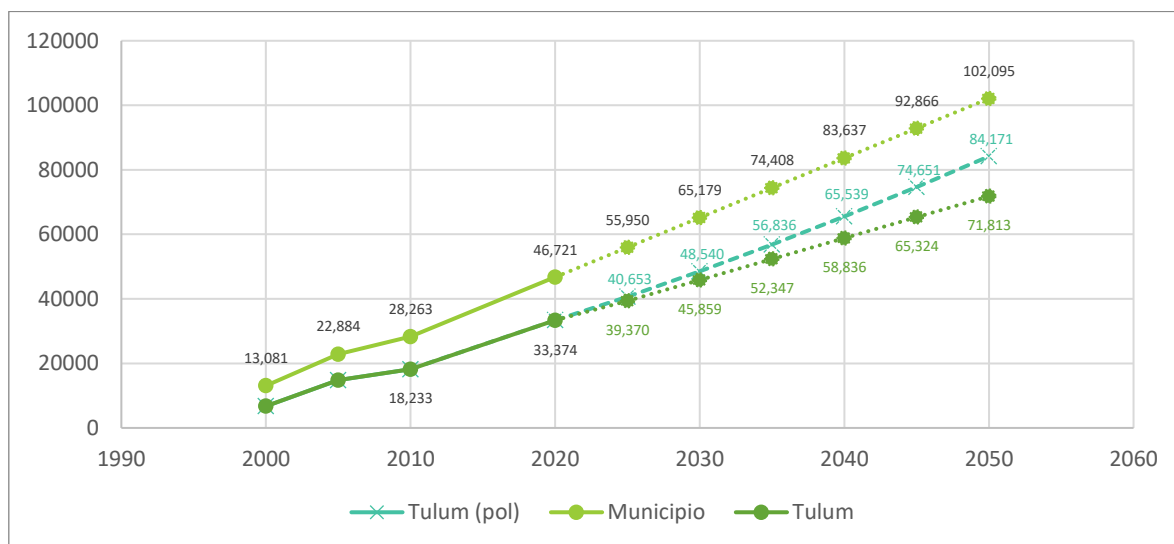




Fuente: Google Earth.

Debido a las diversas variables que pueden afectar el crecimiento poblacional, se realizaron diversos modelos (modelo lineal y modelo polinómico) para el cálculo del crecimiento que se podría esperar para el municipio de Tulum, para ello se utilizaron los datos históricos disponibles. Los resultados se pueden observar en la Gráfica 4.

Gráfica 4. Proyecciones demográficas para el municipio de Tulum.



Fuente: Elaboración propia con datos del ITER 2000, ITER 2005, ITER 2010 e ITER 2020 del INEGI.

Los valores más conservadores para la ciudad de Tulum son de 71,813 personas, en caso de que el crecimiento poblacional continúe según la tendencia actual hasta el 2050. Sin embargo, hay que tomar en cuenta los nuevos factores que sin duda tendrán un impacto en el crecimiento dándonos los valores de 84,171 personas. Debido a la falta de datos del municipio dada su reciente creación solamente se hizo el cálculo del modelo polinómico para la ciudad de Tulum.

El modelo realizado dentro de Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tulum nos indica que el desarrollo urbano en Tulum estará influido por proyectos como el Tren Maya y el nuevo Aeropuerto de Tulum. Aunque el crecimiento poblacional del centro de población disminuirá gradualmente de 5.5% anual (2020-2025) a 0.5% (2045-2050), las áreas colindantes tendrán un crecimiento acelerado, pasando del 18% al 5% en el mismo periodo.

En dicho modelo se proyecta una población para el 2050 de 73,192 personas, con demanda de 7,230 hectáreas para vivienda nueva y una expansión urbana total de 19,074 hectáreas hacia 2050, con un modelo de crecimiento predominantemente horizontal. La densidad urbana seguirá disminuyendo, alcanzando 1.9 viviendas por hectárea.

Adicionalmente, una población flotante de 38.6 millones de personas entre 2045 y 2050, vinculada al turismo y la infraestructura, generará presiones significativas en servicios como agua potable, con una demanda estimada de 720.6 litros por segundo para consumo turístico.

Por otro lado, dentro del mismo instrumento, en el modelo ideal se proyecta una expansión urbana más controlada y eficiente, con una mancha urbana total de 2,072 hectáreas para 2050, requiriendo 195 hectáreas adicionales entre 2045 y 2050 para una población de 93,292 personas. Este crecimiento estará basado en un modelo mixto, combinando desarrollos horizontales y verticales, con una densidad media urbana de hasta 12 viviendas por hectárea.

9.4.3.2 FACTORES QUE INCIDEN EN EL DESARROLLO URBANO

De manera general podemos decir que el desarrollo urbano de una región o zona geográfica está determinado por una gran suma de variables, es decir, es multifactorial. En consecuencia, cualquier cambio importante que suceda en alguno de los factores que inciden en este ámbito tendrá una repercusión temprana o tardía en el desenvolvimiento urbano de esa zona.

De manera general podemos citar algunos de los factores fundamentales que inciden en el desarrollo urbano:

I.- Crecimiento natural y cambios en la composición de la población.

Esta variable está asociada a cómo cambian los estadios de las familias en una comunidad: crece la familia por el nacimiento de nuevos miembros, los hijos crecen y demandan nuevos requerimientos, o se casan y crean nuevas familias, etc. Todos estos cambios en la dinámica de las familias establecen nuevos requerimientos que, a la postre, establecen nuevas demandas de suelo urbano.

II.- Crecimiento de la actividad económica.

En especial en esta parte del territorio nacional la actividad económica preponderante es el turismo. De esta manera, los cambios bruscos en los principales componentes del sector turismo vendrán a precipitar cambios necesarios en el terreno del desarrollo urbano.

Entre los principales componentes turísticos que hay que estudiar se encuentran:

- Crecimiento de espacios de pernocta (cuartos de hotel, condominios hoteleros, Airbnb, hostales, etc).
- Crecimiento de asientos de avión y otras ofertas de transporte.
- Crecimiento de los visitantes y turistas (como un resultado del desenvolvimiento de las dos variables anteriores).
- Desarrollo de nuevos atractivos (parques turísticos, marinas, campos de golf, nuevos sitios arqueológicos, reservas ecológicas, etc). Así como resolución de problemas en los atractivos actuales, como el derivado del Sargazo.
- El crecimiento económico mismo en las zonas generadoras de turistas a esta región del Caribe mexicano.

III.- Creación de Infraestructuras Regionales en la Zona

Este es un factor de fundamental importancia en el ámbito del Desarrollo Urbano en la región; puesto que estos nuevos proyectos están llamados a cambiar los espacios territoriales públicos y privados, a través de nuevas corrientes de trabajadores orientados a la instrumentación de estas nuevas infraestructuras, en primera instancia, y a la posterior llegada de visitantes.

Entre estas infraestructuras podemos citar:

- Carreteras.
- Ferrocarriles.
- Aeropuertos.
- Nuevas ciudades.

- Reservas ecológicas.

De manera puntual para la zona podemos destacar:

- Nuevo aeropuerto de Tulum.
- El Tren Maya, en especial la estación Tulum.
- El Parque del Jaguar.
- Los nuevos libramientos y mejoras en la carretera Chetumal - Cancún.

IV.- El amplio desarrollo de vivienda Turística o “2ª casa vivienda para “trabajadores nómadas”

El mercado de una vivienda para disfrute temporal en un lugar turístico, o una segunda casa para el ocio y el descanso es un fenómeno que ha ido creciendo de manera importante en los últimos tiempos en el país, y en especial en los desarrollos turísticos de Quintana Roo.

Este mercado se ha vuelto más importante con la incorporación de un mercado de nuestros tiempos. El de los denominados “trabajadores nómadas”, empleados (principalmente jóvenes) de corporaciones nacionales o internacionales que trabajan “en línea”, es decir desde sus casas. Sitios en donde viven pero que pueden estar a cientos de kilómetros de las sedes de las corporaciones, y donde sólo necesitas un buen sistema de internet

V.- Movimientos poblacionales. Migración

Los movimientos migratorios en Quintana Roo, sobre todo en la zona norte del estado han sido por demás significativos. Estas corrientes de pobladores se gestaron desde el momento mismo del inicio del primer centro turístico integralmente planeado (CIP) del país: Cancún.

Se inician con la llegada de trabajadores de la construcción (en todos los niveles, desde ingenieros hasta albañiles) para desarrollar inicialmente las grandes obras de infraestructura, para posteriormente seguir con obras de superestructura: hoteles, campos de golf, viviendas, centros comerciales y otras obras.

Estos trabajadores que llegan a construir todas estas obras más temprano que tarde traen a sus familiares, y así se inicia el ciclo de poblamiento de las distintas zonas de las ciudades. Estos trabajadores de la construcción cambian de trabajo buscando las mejores condiciones económicas que ofrecen los empleos turísticos, y sus espacios de trabajo son llenados por nuevos pobladores iniciando con esto un nuevo ciclo.

Otro aspecto fundamental que atrae a nuevos trabajadores es el crecimiento económico de una región, es decir, la proliferación de la oferta de trabajo que trae aparejado el crecimiento de las actividades productivas. Y este fenómeno de oportunidades de trabajo atrae tanto a población regional, como a trabajadores de las distintas zonas del país, como a nivel internacional.

Esto es: si hay crecimiento económico necesariamente habrá movimientos poblacionales de trabajadores que llegan a la región buscando un puesto de trabajo. Para después traer a sus familiares, generando un movimiento migratorio importante.

Por demás está decir que todos estos movimientos de población generan demanda de servicios urbanos y sobre todo de viviendas; lo que genera a su vez una fuerte demanda de suelo urbano.

VI.-Adquisición de bienes inmuebles por otras vías

Por último, debemos mencionar un fenómeno que se ha dado a lo largo y ancho del país, pero que ha tenido una fuerte concentración en los desarrollos turísticos del estado de Quintana Roo. El hecho de adquirir bienes inmuebles a través de pagos parciales o totales con dinero en efectivo (pesos, dólares u otras monedas), o con intercambios de bienes. Este fenómeno ha hecho que muchos desarrollos de vivienda turística se hayan instrumentado casi de manera instantánea, aunque no estén habitados de manera constante.

Todo este fenómeno también ha demandado grandes cantidades de suelo orientadas a satisfacer esta demanda.

9.4.3.3 IMPACTOS EN EL DESARROLLO URBANO DE TULUM.

Además del crecimiento tendencial del turismo en la zona, esta actividad económica está destinada a tener impactos por demás importantes debido al impulso extraordinario que le está otorgando el Gobierno Federal a este rubro del desarrollo del país; lo cual se pone de manifiesto de manera por demás significativa con la construcción de nuevas infraestructuras en la zona. Pensadas, precisamente para detonar esta actividad económica

A continuación, se presenta un resumen de las principales características de estas obras y el impacto que generarán en Tulum. Asimismo, se establece cómo se vislumbra el futuro del turismo en el mundo, en México; y en especial en la costa de Quintana Roo.

9.4.3.4 ESTADO ACTUAL DEL TURISMO EN EL MUNDO Y PERSPECTIVAS DE CRECIMIENTO

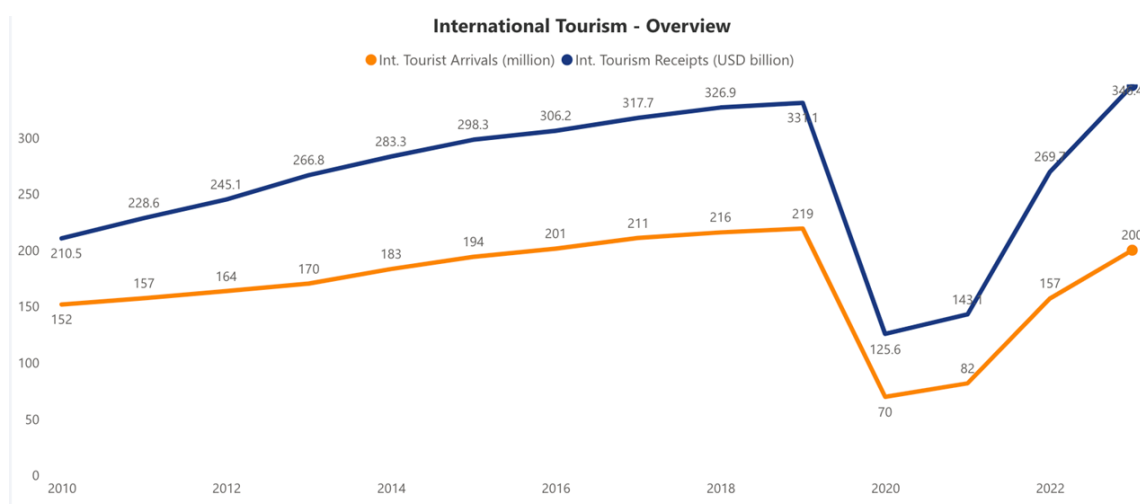
Desempeño del turismo en el mundo

El turismo, tanto a nivel mundial como en el país, había tenido un desempeño muy afortunado hasta el año de 2019. A lo largo de una década tuvo un buen crecimiento tanto en el número de visitantes, como en los ingresos obtenidos.

De acuerdo con las estadísticas de la Organización Mundial del Turismo (OMT) durante el año 2019 se alcanzaron en el mundo un total de 1,460 millones de llegadas, y se tuvieron ingresos turísticos 1,481 miles de millones de dólares.

Para la región de Américas, en el 2023 hubieron 200.06 millones de visitantes internacionales con ingresos de \$346.6 mil millones de dólares lo que representa un gasto promedio de \$1,732 dólares por visitante, valores que ya superan aquellos logrados en 2019.

Gráfica 5. Visitantes internacionales región Américas 2010 -2023.

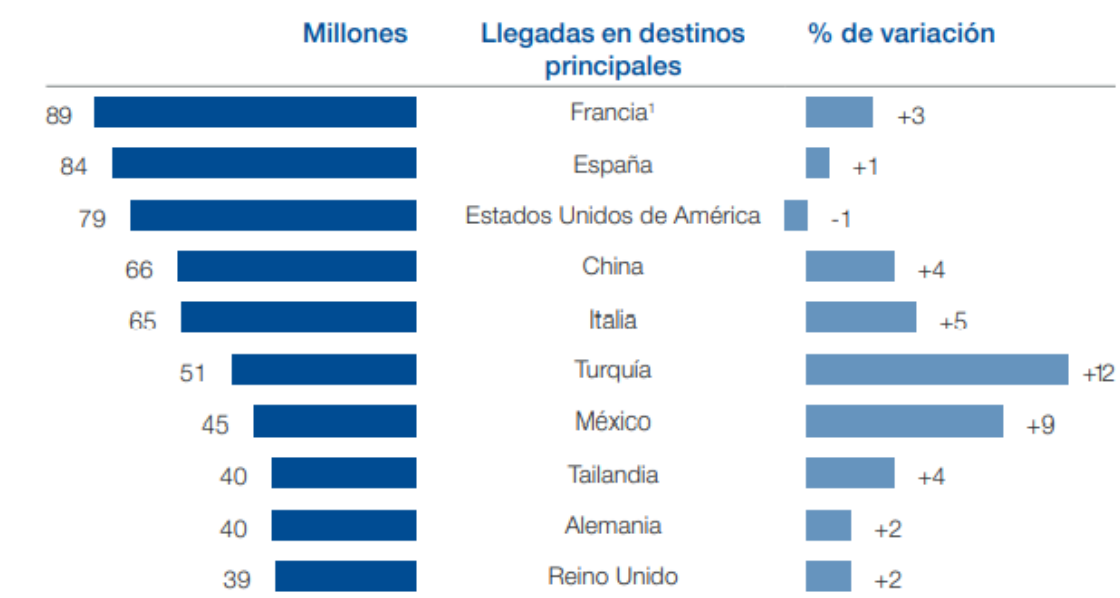


Fuente: OMT Turismo internacional - Américas

Durante 2019 México se colocó en el séptimo lugar en la captación de turistas internacionales con alrededor de 45 millones de visitantes; que correspondió a un incremento de 9% respecto al año anterior.

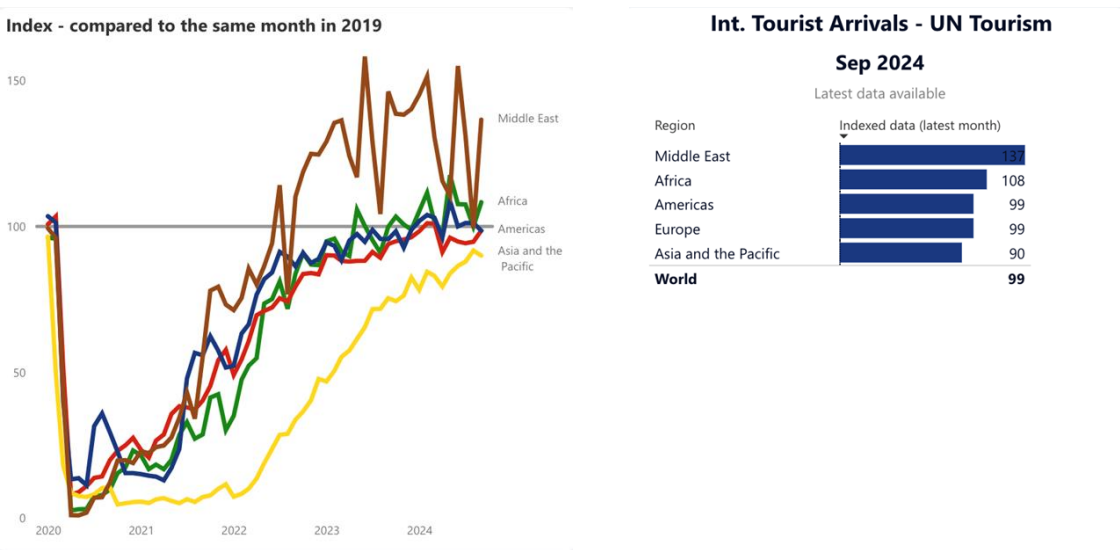
Durante 2019 México se colocó en el séptimo lugar en la captación de turistas internacionales con alrededor de 45 millones de visitantes; que correspondió a un incremento de 9 % respecto al año anterior.

Gráfica 6. Los diez destinos principales por llegadas de turistas internacionales, 2019.



Después de la crisis del Covid19, el turismo en el mundo se está recuperando.

Gráfica 7. Arribo de turistas internacionales.



Fuente: Arribos internacionales por zonas comparados con el mismo mes del 2019. *Tourism Dashesboard OMT*.

México es de los países con mejor desempeño en la recuperación del turismo.

Gráfica 8. Top 10 receptores internacionales de turismo comparado con valores del mismo mes del 2019.

Country	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	YTD
Türkiye	33	38	20	10	25	7	8	5	8	13
Spain	14	14	12	10	17	5	10	8	8	10
United Kingdom	19	4	-7	5	14	-6				4
France	6	10	16	-12	17	-2	1	3	-15	1
China										
Mexico	4	2	-2	-3	-2	-5	-4	-4	9	-1
Germany	-14	-10	-10	-13	-7	7	-1	-3	-5	-5
Italy	-6	3	-10	-6	-7	-3	-13	-16		-9
United States	-8	-7	-6	-16	-9	-11	-10	-7		-10
Thailand	-18	-7	-14	-14	-4	-10	-7	-15	-13	-12
World	-4	0	-2	-8	1	-1	-1	-1	-1	-2

Fuente: Tourism Dabsboard OTM.

9.4.3.4.1 RECUPERACIÓN DEL TURISMO EN QUINTANA ROO

La recuperación turística en Quintana Roo tomó aproximadamente 18 meses. A continuación, se presenta información sobre la ocupación turística en el estado.

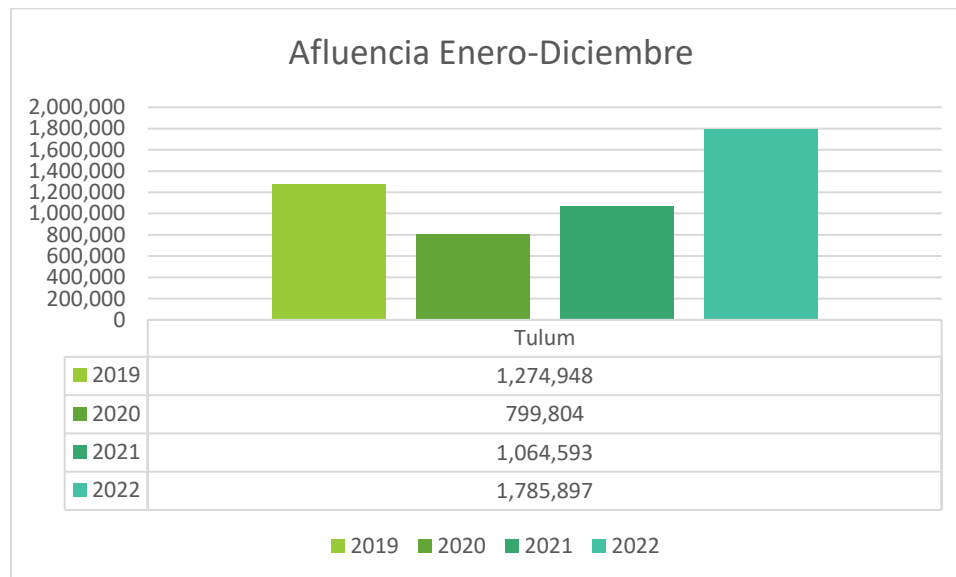
Tabla 13. Turismo en Quintana Roo.

DESTINO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	ANUAL
Cancún y Puerto Morelos	64.3 %	68.9 %	79.0 %	81.0 %	77.4 %	81.2 %	84.0 %	76.54 %
Cozumel	63.7 %	70.8 %	80.8 %	66.8 %	64.1 %	70.2 %	78.5 %	70.7 %
Isla Mujeres	69.6 %	70.8 %	73.2 %	79.5 %	72.4 %	74.4 %	79.4 %	74.19 %
Chetumal	26.8 %	26.0 %	31.7 %	56.1 %	44.3 %	39.1 %	46.9 %	38.7 %
Riviera Maya	65.9 %	72.6 %	80.1 %	80.8 %	77.8 %	77.6 %	80.8 %	76.51 %

Comparativo del acumulado del mes al día 31 de Agosto			
Destino \ Año	2022	2021	Variación
Cancún	76.7	57.7	19 %
Cozumel	71.3	51.1	20.2 %
Isla Mujeres	75.2	71.4	3.8 %
Chetumal	0.0	28.5	-28.5 %
Riviera Maya	76.7	58.4	18.3 %

En el caso específico de Tulum, la afluencia de turistas refleja esta recuperación de manera notable. El número de visitantes pasó de 799,804 en 2020 a 1,785,897 en 2022, superando incluso las cifras de 2019, como se observa en la siguiente Gráfica 9.

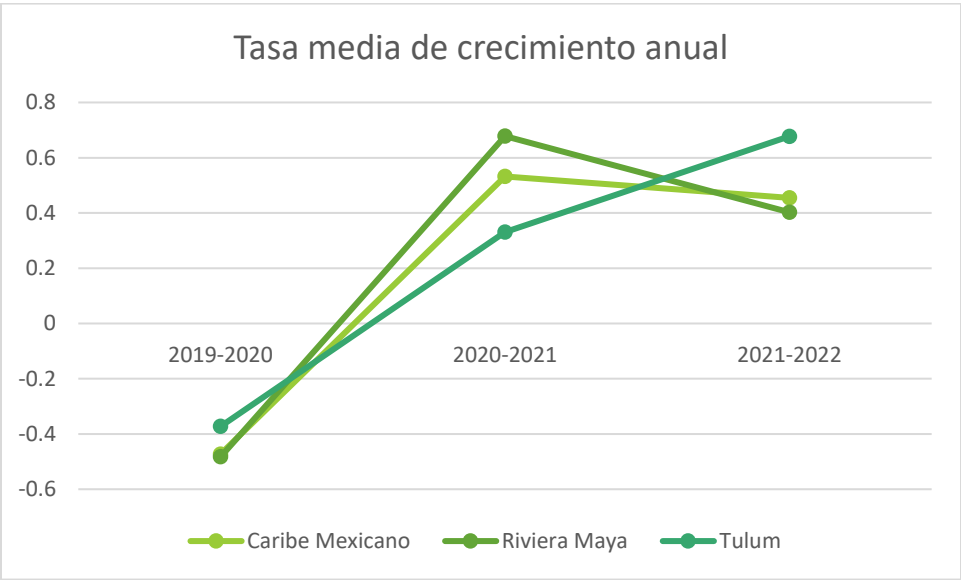
Gráfica 9. Afluencia de turistas en Quintana Roo y Tulum.



Fuente: Elaboración propia con datos de ¿Como Vamos en Turismo? Quintana Roo de SEDETURQROO (2023).

Este crecimiento no solo evidencia una recuperación en toda la región, impulsando el desarrollo turístico general, sino también destaca el crecimiento específico de Tulum como destino. De hecho, Tulum ha superado en ritmo de desarrollo a la Riviera Maya y al Caribe Mexicano.

Gráfica 10. Tasa Media de Crecimiento Anual del Desarrollo Turístico (2019-2020, 2020-2021, 2021-2022) para Tulum, Riviera Maya y Caribe Mexicano.

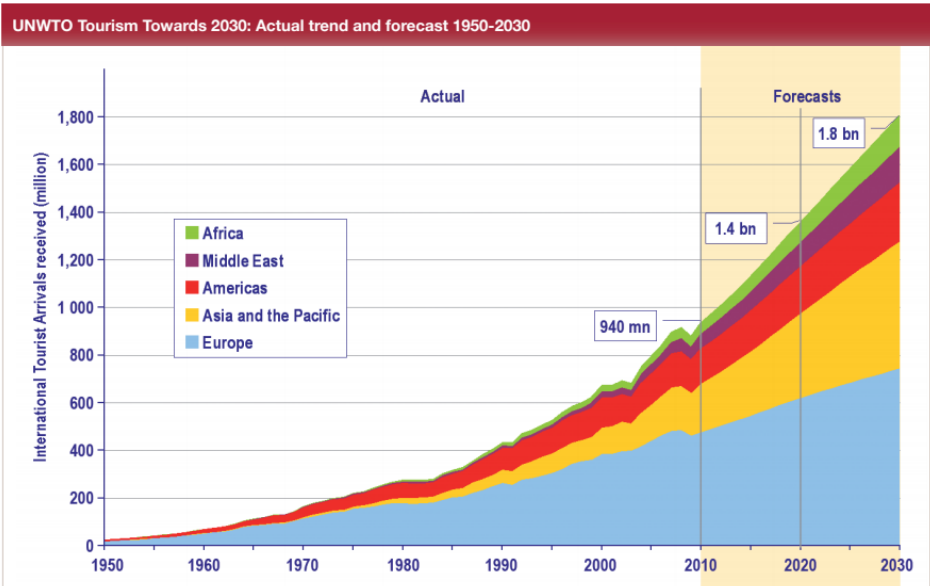


Fuente: Elaboración propia con datos de "¿Cómo Vamos en Turismo? Quintana Roo" de SEDETURQROO (2023).

9.4.3.4.2 PERSPECTIVAS DE CRECIMIENTO DEL TURISMO

De acuerdo a la OMT el crecimiento que se espera para la región de las Américas será importante. Pasará de 150 millones de llegadas en el 2010 a 248 millones en el 2030.

Gráfica 11. Crecimiento esperado del turismo en Las Américas.



La pandemia de COVID-19 dejó grandes lecciones para el turismo. Las recomendaciones y buenas prácticas internacionales actuales que sería importante tomar en consideración para el destino de Tulum son las siguientes:

- Diversificación y desconcentración del turismo: Fomentar la diversificación de actividades turísticas hacia experiencias al aire libre, como ecoturismo, senderismo y actividades culturales en comunidades rurales. Esto ayuda a desconcentrar el turismo masivo y distribuye los beneficios económicos.
- Protocolos sanitarios y de seguridad: Desarrollar estándares de higiene, saneamiento y salud en servicios turísticos, asegurando que estos protocolos sean permanentes para prevenir futuras crisis sanitarias.
- Turismo de baja densidad y gestión de visitantes: Establecer límites de carga para sitios turísticos y fomentar actividades que reduzcan la densidad de visitantes en espacios naturales y culturales.
- Promoción de energías renovables y prácticas sostenibles: Incorporar el uso de energías limpias (solar, eólica) en instalaciones turísticas, reducir los residuos sólidos y fomentar el reciclaje como parte de las operaciones del sector.
- Participación comunitaria y beneficio local: Involucrar a las comunidades locales en el diseño y gestión de actividades turísticas, asegurando que los beneficios económicos se distribuyan equitativamente.
- Conservación de la biodiversidad y restauración ecológica: Integrar medidas de conservación y restauración en la planificación turística, como la protección de hábitats clave, programas de reforestación y monitoreo de especies.

9.4.3.4.3 RESUMEN DEL MERCADO TURÍSTICO EN MÉXICO Y EL MUNDO

- Después de una década de crecimiento sostenido el turismo, al igual que el resto de los sectores productivos en el mundo, tuvo un serio descalabro a partir de marzo del 2020, debido a la Pandemia del COVID-19.
- Durante 2019 nuestro país alcanzó niveles muy satisfactorios tanto en la captación de visitantes internacionales, como en el significado que tuvo el sector turístico en la economía nacional: México alcanzó el 7º lugar mundial en la llegada de visitantes internacionales, y el PIB turístico conformó casi el 10 % del PIB nacional.
- Respecto a la crisis por el COVID-19 y su impacto en el turismo:
 - Nos enfrentamos a una emergencia sanitaria, social y económica sin precedentes. El turismo se encuentra entre los sectores más afectados de la economía

- Es con mucho el peor resultado de la serie histórica de turismo internacional desde 1950 y puso un final abrupto a diez años de crecimiento sostenido desde la crisis financiera de 2009.
- Los países de todo el mundo (y México no es la excepción) están implementando numerosas medidas para mitigar el impacto negativo del brote de COVID-19, y para estimular la recuperación del sector turístico.
- No obstante, lo anterior, en diversas partes del mundo ya se comienza a sentir una recuperación de este sector. El impacto que sufrió nuestro país por la pandemia fue menos agudo que el resto de los países de América; y, aparentemente, se está recuperando de buena forma.
- Una prueba de lo anterior se ejemplifica con: el factor de ocupación hotelera para la Riviera Maya en agosto de 2022 se ubicó cercano al 78 %, que comparado con los resultados de 2020 en ese mismo destino nos da una diferencia de 61 puntos por encima de ese año.
- Las previsiones de la OMT para el año 2030 muestran que las llegadas de turistas internacionales aumentarán en unos 43 millones al año en todo el mundo.
- El crecimiento que se espera para la región de Las Américas pasará de 150 millones de llegadas en el 2010 a 248 millones en el 2030

Todo lo anterior indica que, una vez recuperado el sector turístico nacional de la nociva pandemia del COVID-19, retornaran los crecimientos importantes que se habían tenido en los últimos años en la captación de turistas y divisas.

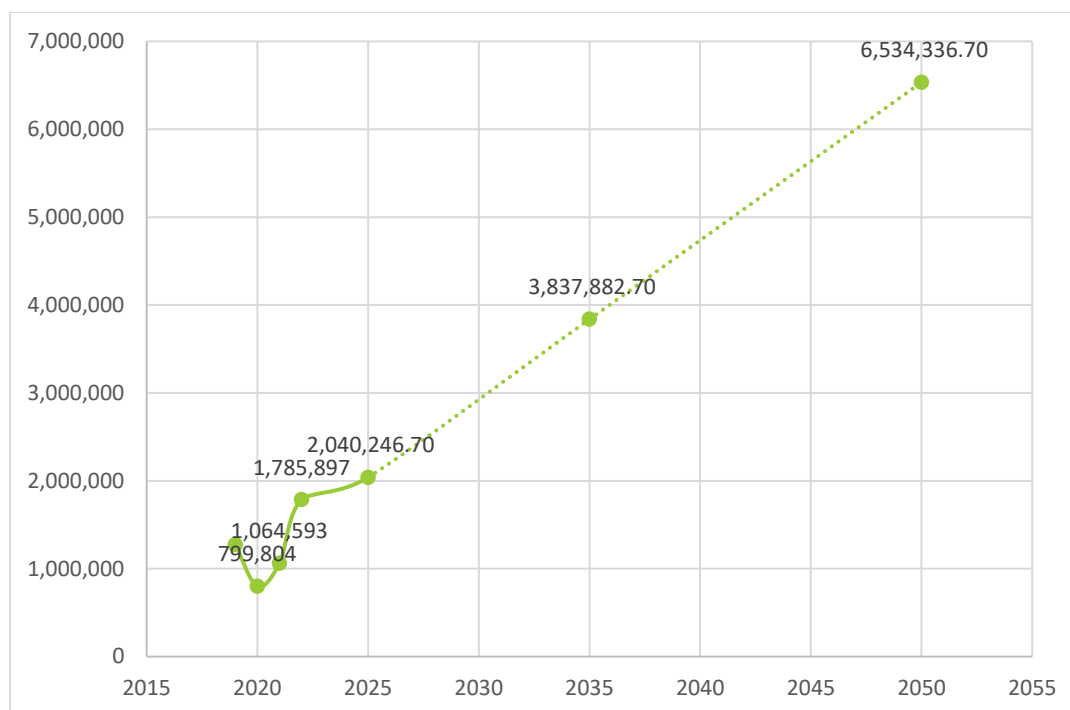
9.4.3.4.4 SECTOR TURÍSTICO EN TULUM

La principal concentración económica para el municipio es sin duda el turismo. La afluencia turística en la región ha tenido un crecimiento acelerado en los últimos años y sin duda este fenómeno se verá acrecentado por los nuevos proyectos en la región, posicionándose como uno de los destinos turísticos más importantes a nivel internacional.

En la siguiente Gráfica 12, se muestra la proyección de afluencia turística esperada. Es importante considerar que los visitantes en los años 2019 y 2020 estuvieron seriamente afectados por las restricciones de viaje nacionales e internacionales por la pandemia del COVID-19 sin embargo ya ha habido una recuperación importante del turismo.

Se tomaron los datos históricos de la Secretaría de Turismo de Quintana Roo.

Gráfica 12. Proyección de visitantes turísticos Tulum.



Fuente: Elaboración propia con datos de SEDETURQROO.

9.4.3.5 PROYECTOS FEDERALES DE INFRAESTRUCTURA

El Gobierno Federal está llevando a cabo una serie de proyectos de infraestructura de gran envergadura que seguramente van a impactar el desarrollo de toda la región del denominado sureste de México, en especial de la península de Yucatán; y Quintana Roo.

Los proyectos del Tren Maya y el Corredor Interoceánico estarán llamados a ser dos ejes fundamentales del desarrollo del sureste mexicano. Así como la instalación del nuevo aeropuerto de Tulum, y el Parque del Jaguar.

Tren Maya

- Fortalecerá el ordenamiento territorial de la región y potenciará la industria turística de la misma. Generará derrama económica e incrementará la conectividad en la península de Yucatán, permitiendo mover carga y pasajeros.
- El Centro de Población de Tulum estará ligado en dos tramos del proyecto:
 - Tramo 5 Sur: Playa del Carmen - Tulum (49.8 km aprox.)
 - Tramo 6: Tulum - Bacalar (254 km aprox.)

- De manera específica el objetivo fundamental del Tren Maya resulta ser: “se pretende incrementar el número de visitantes y la estadía promedio en la región en aquellos destinos que cuenten con potencial para un pleno aprovechamiento de sus atractivos turísticos, de una forma sustentable”.

Efecto multiplicador

- En un proyecto de la envergadura del Tren Maya se generará un efecto multiplicador, tanto en el rubro que se refiere a inversiones, como en el del empleo.
- La derrama económica estimada por FONATUR se eleva a 31,700 millones para 2020, y de 113,800 millones de pesos del 2021 al 2023.
- Por lo que se refiere al empleo, de acuerdo también con FONATUR, en base a análisis realizados por la Universidad de Townson en Estados Unidos, el efecto multiplicador de empleos en la industria ferrocarrilera es de 3.22 para empleos indirectos, y 3.38 para empleos inducidos; es decir, por cada empleo directos que se genera en los ferrocarriles, se generan 3.22 empleos indirectos y 3.38 empleos adicionales inducidos

Estación Tulum

- Puede decirse que dentro del proyecto Tren Maya los tramos que se construirán en el Estado de Quintana Roo constituyen una columna vertebral del sistema mismo, sobre todo desde el punto de vista turístico (más de la tercera parte de las estaciones estarán en Quintana Roo). Y Tulum como centro gravitacional del tramo que cubre la entidad, que va de Cancún a Chetumal.
- Es de esperarse que, en consecuencia, Tulum actúe como eje distribuidor del flujo turístico que moverá el Tren Maya en la zona. De esta manera se considera que la demanda de pasajeros estimada será alta, y de carácter fundamentalmente turístico. Por consiguiente, en esta estación se considera un esquema de 5 vías y dos andenes.

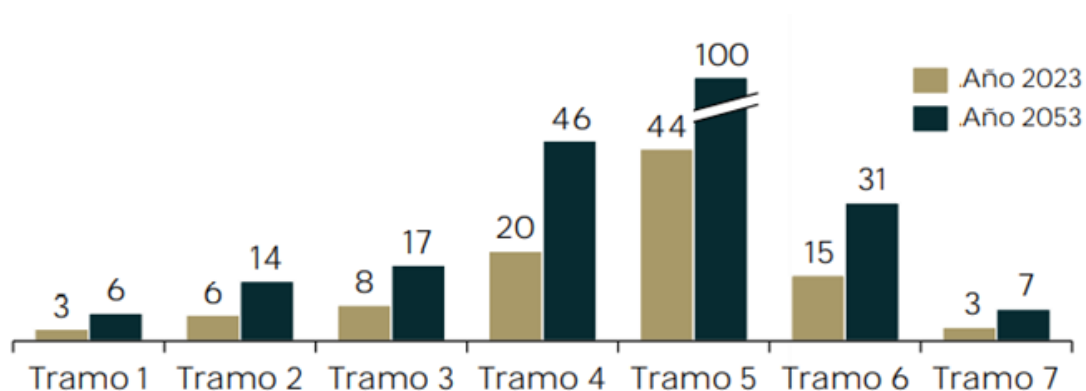
Imagen 4. Imagen de referencia de estación Tulum.



Tren Maya Indicadores económicos

- Para el caso del transporte de pasajeros, en el año 2023 se espera contar con la capacidad para atender a 43,680 pasajeros al día, por sentido, en el tramo de mayor demanda (Tramo 5 Cancún-Chetumal); mientras que al final del horizonte de evaluación, es decir en el año 2053, se espera contar con la capacidad para atender a 100,100 pasajeros al día, por sentido, en el tramo de mayor demanda.

Gráfica 13. Capacidad máxima ofertada por sentido (pax(000)/día).



En el caso del turismo, el nuevo servicio del Tren aumentará la estancia de los turistas en la región, generando 8% más noches turista en la zona en su primer año y 17.5% para 2030.

Tabla 14. Evolución de las noches turista durante el periodo de evaluación del proyecto [millones de noche turista/año].

		2019	2033	2052
Turista Nacional	Chiapas	0.5	1.6	2.6
	Tabasco	0.1	0.2	0.4
	Campeche	0.6	1.5	2.5
	Yucatán	2.5	6.5	10.6
	Q. Roo	7.3	16.7	27.1
Turista Internacional	Chiapas	0.1	0.3	0.5
	Tabasco	0.0	0.0	0.0
	Campeche	0.1	0.3	0.5
	Yucatán	0.6	1.4	2.5
	Q. Roo	49.6	96.7	171.5

Aeropuerto de Tulum

- El Nuevo Aeropuerto Internacional de Tulum ‘Felipe Carillo Puerto’ tendrá la capacidad de atender, en una primera etapa, a 5 millones de pasajeros al año
- Contará con una Base aérea militar polivalente que va a fortalecer la seguridad del espacio aéreo nacional, auxiliar a la población civil en caso de desastres y atenderá incendios forestales.
- Se construirá un corredor comercial y de servicios de 10.5 kilómetros que conectará la carretera federal 307 con el Aeropuerto (información dada por la Presidencia en la mañana del 20 de febrero de 2023).
- “Se desarrollará una ciudad aeroportuaria que inclusive sirva para reordenar el crecimiento urbano hacia ese corredor”
- Contará con ‘la pista más grande y de mejor calidad’ del sureste mexicano, con una extensión de tres mil 700 metros de longitud
- Se plantea, además que el aeropuerto de Tulum podría convertirse en un centro logístico de carga.

Imagen 5. Imagen de referencia del aeropuerto de Tulum.



9.4.3.5.1 DEMANDA DE INFRAESTRUCTURA GENERADA POR LOS PROYECTOS FEDERALES

Aeropuerto de Tulum

Para estimar los crecimientos de la demanda en la zona de Tulum derivada de la puesta en marcha del nuevo aeropuerto, se partió del análisis del comportamiento que se ha tenido en otros aeropuertos turísticos del país la afluencia de pasajeros y cuántos de estos se constituyen en visitantes hospedados en el sitio (turistas alojados), en especial el de Cancún.

Las cifras son las siguientes:

Tabla 15. Llegadas de pasajeros y afluencia turística en Cancún.

Llegada de pasajeros a Cancún (2019)	12,665,948 pasajeros
Afluencia de turistas a Cancún (2019)	6,006,822 turistas
Porcentaje participación	47.4%

Fuente: Agencia Federal de Aviación Civil. Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transporte.

Como se observa, el porcentaje de pasajeros arribados al aeropuerto de Cancún que recurren a los servicios turísticos en el mismo sitio (alojamiento y otros servicios) alcanza casi al 50%. Es decir, de cada dos pasajeros que aterrizan en este aeropuerto, uno hace turismo en Cancún.

Para la estimación en el nuevo aeropuerto de Tulum, se considera que hasta un 60% de los pasajeros que llegarán a este aeropuerto serán turistas en la zona; considerando que tanto la ciudad de Tulum, como Akumal y Chemuyil se ubican dentro del municipio.

Suponemos que para Tulum se alcanzará un: Considerando: Tulum, Akumal, Chemuyil y otros sitios dentro del Municipio	60%
---	-----

- Estimación de pasajeros al Aeropuerto de Tulum

Durante 2023, se transportaron alrededor de 40 mil pasajeros mensuales.

39,768	Pasajeros transportados en 2023
Es decir, casi 40,000 pax en un mes	Que equivaldría a casi medio millón en un año

Sin embargo, se estima que en el mediano plazo este aeropuerto recibirá, cuando menos 4 millones de pasajeros (Cancún tiene una afluencia de alrededor de 13 millones de pasajeros).

Visitantes a Tulum en el mediano plazo Cuando menos:	4,000,000 de pasajeros
---	------------------------

Si tomamos en cuenta que de estos pasajeros alrededor de 60% harán turismo en la zona de Tulum, significa que se tendrían alrededor de 2.4 millones de pasajeros adicionales al año.

Turistas adicionales a Tulum:		Participación
Pasajeros x partic. de turistas Tulum	1,896,999	47.4%
Pasajeros x partic. de turistas Akumal, Chemuyil	503,001	12.6%
Total de nuevos turistas	2,400,000	60.0%

Tren Maya

Las estimaciones que estableció FONATUR para la estación de Tulum del Tren Maya indicaron que ésta tendrá un flujo de casi 50 mil pasajeros al día. Lo cual significará un flujo anual de casi 16 millones de pasajeros que transitarán por esta estación en un año.

Para la estimación de este pronóstico se consideró que al menos el 30 % de este flujo podría descender en esta estación y hacer turismo en la zona. Esto significará que se tendía un flujo adicional de turistas a esta zona de 4.8 millones de turistas anuales.

Estación Tulum del Tren Maya	
Tren Maya Pax /día	43,680 pasajeros
Pax al año	15,943,200
% se queda en Tulum	30.0%
	4,782,960 Turistas

El total de turistas adicionales estimados a la zona de Tulum derivadas de la puesta en marcha de los proyectos del Tren Maya y del aeropuerto Carrillo Puerto sumarían un poco más de 7 millones anuales. Lo que significaría un crecimiento de más de 10 veces el tamaño actual de turistas.

Suma Aeropuerto + Tren	7,182,960 turistas
Incremento respecto actual	10.26 veces 926.14%

Dotación de equipamiento

A partir de estos cálculos de turistas adicionales, se estimaron: el número de cuartos adicionales para alojamiento que se requerirían, la población inducida por este crecimiento de cuartos, el total de viviendas adicionales para esta población; así como las superficies de terreno que sería necesarias tanto para las viviendas adicionales, como para las instalaciones turísticas.

Para la estimación de cuartos adicionales se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Turistas} \times \text{Estadía} \div \text{Densidad} \div \text{Factor Ocupación} \div 365 \text{ días} = \text{Cuartos totales}$$

Los factores utilizados para este cálculo son:

Factores para cálculo	
Estadía	2.5 días
Densidad	1.8 ocupación por cuarto
Factor Ocupa.	70%

Cuartos adicionales requeridos:

Cuartos adicionales requeridos		39,046
Cuartos de Hotel	80.0%	31,237
Airb&b	20.0%	7,809

Estimación de la población adicional por el incremento de número de cuartos:

No. de cuartos adicionales	39,046	
Empleos directos:		
Factor	1.1	Empleos x cuarto
Población total inducida:		
Factor	5.6	Pobladores x cuarto
Composición		
	1.1	Empleos directos
	2	Miembros adicionales x familia
	2.5	Población adicional x servicios x cuarto
	5.6	Suma
Población adicional	218,659	

Estimación de viviendas adicionales en Tulum por Nuevo Aeropuerto y Tren Maya:

Población adicional	218,659	
Pobladores x vivienda	3.5	
Viviendas adicionales requeridas	62,474	Viviendas
Densidad	40	Viviendas x hectárea
Hectáreas requeridas x viviendas	1,562	Hectáreas
Viviendas requeridas adicionales:	62,474	viviendas
Hectáreas requeridas x viviendas:	1,562	hectáreas

Estimación de superficie de tierra para usos turísticos:

No. de turistas a mediano plazo		Turistas totales en un año			
		Densidad			
Cuartos de hotel adicionales	39,046	Cuartos			Hectáreas necesarias
Hotel	31,237	Cuartos	25	Cuartos x hectárea	1,249
Airbnb	7,809	Unidades	40	Unidades x hectárea	195
				Suma	1,445
		Densidad			
Residencias turísticas					
Habitacional turístico	% de los turistas	Número de unidades	Unidades/ hectárea	Hectáreas	
Residencias	0.75%	53,872	50	1,077	
Departamentos	1.25%	89,787	75	1,197	
			Suma	2,275	

Superficie necesaria para el desarrollo urbano:

Uso habitacional		Hectáreas
+ Habitacional		1,562
+ Vialidades		
+ Infraestructura		
+ Servicios urbanos		
+ Parques y jardines		
+ Otros usos habitacional		
Suma Habitacional		1,562
Uso Turístico		
+ Hotelero		1,249
+ Airbnb		195
+ Residencias turísticas		1,077
+ Departamentos turísticos		1,197
Subtotal		3,719
Vialidades turísticas		
Infraestructura turística		
Servicios turísticos		
Otros usos turísticos		
Subtotal		0
Suma usos turísticos		3,719
Total de superficie		5,281

Dotación de infraestructura

Desde el punto de vista urbano, un incremento en la población de para los siguientes escenarios nos darían las siguientes necesidades adicionales de infraestructura.

2030

REQUERIMIENTOS					
DOSIFICACION DE LA DEMANDA DE EQUIPAMIENTO URBANO					
CIUDAD:	MUNICIPIO DE TULUM 2030		CRECIMIENTO POBLACIONAL		65,179
SUBSISTEMA	ELEMENTO	Unidad Basica de Servicio	Hab/UBS Totales	m² de T/UBS	m² C/UBS
Educacion					
	Jardin de niños	aulas	49	16,123.23	4,900.68
	Escuelas Primarias	aulas	155	43,918.23	17,846.63
	Escuelas Secundarias	aulas	37	33,996.77	10,887.86
	CBETA	aulas	12	19,344.00	4,260.00
	Instituto Tecnologico Agropecuario	aulas	26	40,378.00	7,774.00
	Total		279	153,760	45,669
Asistencia social					
	Centro de Asistencia de desarrollo infantil	aulas	57	15,756.31	6,574.58
	Centro de desarrollo comunitario	aulas	47	22,347.09	7,914.59
	Centro Integral Juvenil	m²	326	977.69	325.90
	Total			39,081.09	14,489.17
Administración Publica					
	Oficinas de Gobierno Federal	m²	1,304	2,216.09	1,303.58

REQUERIMIENTOS					
	Oficinas de Gobierno estatal	m ²	652	1,108.04	651.79
	Total			3,324.13	1,955.37
Cultura y Culto					
	Bibliotecas	sillas	65	733.26	273.75
	Auditorio	butacas	466	2,793.39	791.46
	Teatro	butacas	136	2,580.00	930.16
	Centro Social Popular	m ²	2,037	10,591.59	2,036.84
	Escuela integral de artes	aulas	7	1,440.46	1,016.79
	Casa de la Cultura	m ²	639	2,236.53	990.47
	Museos	m ²	652	1,955.37	2,998.23
	Total			22,330.60	9,037.71
Recreacion					
	Plazas Civicas	m ²	10,429	14,078.66	312.86
	Juegos Infantiles	m ²	16,295	16,294.75	162.95
	Jardines vecinales	m ²	65,179	65,179.00	2,607.16
	Parque de barrio	m ²	65,179	71,696.90	651.79
	Cine	butacas	652	3,128.59	782.15
	Area de ferias y exposiciones	m ²	6,518	6,517.90	1,955.37
	Total			176,895.81	6,472.27
Deporte					
	Modulo deportivo	m ²	4,345	4,910.15	117.32
	Unidad deportiva	m ²	8,691	12,514.37	686.55
	Centro Deportivo	m ²	300	2,411.92	1,533.36
	Total			19,836.44	2,337.23
Salud					
	Centro de salud urbano	consultorios	5	2,085.73	568.36
	Unidad de medicina familiar	consultorios	14	17,109.49	8,147.38
	Clinica Hospital	camas	45	8,934.75	4,467.37
	Total			28,129.97	13,183.11
Comercio					
	Plaza para tianguis	puesto	539	48,496.41	26,744.94
	Mercado Publico	puesto	539	16,160.08	9,696.05
	Tienda o centro comercial	m ²	498	2,415.03	1,043.29
	Total			67,071.52	37,484.28
Abasto					
	Unidad básica de abasto	m ²	1,105	30,468.42	6,926.65
	Total			30,468.42	6,926.65
Comunicaciones					
	Centro integral de servicios	ventanilla de attn	4	124.22	55.98
	Administracion de correos	ventanilla de attn	7	555.47	32.08
	Oficina comercial Telmex	ventanilla de attn	2	285.87	92.85
	Total			965.57	180.91
Transporte					
	Central de autobuses de pasajeros	anden	8	4,073.69	765.85
	Central de servicios de carga	cajon	26	7,821.48	2,007.51
	Total			11,895.17	2,773.37
Servicios Urbanos					
	Comandancia de Policia	m2	395	987.56	395.02
	Estacion de gasolina	bomba	87	4,374.43	1,399.82
	Central de bomberos	autobomba	1	293.31	97.77
	Estación de Transferencia	m2 año	7,242	7,242.11	0.00
	Cementerio	fosa	326	2,036.84	65.18
	Total			14,934.25	1,957.79

REQUERIMIENTOS					
DOSIFICACION DE LA DEMANDA DE EQUIPAMIENTO URBANO					
CIUDAD:	MUNICIPIO DE TULUM 2040		CRECIMIENTO POBLACIONAL		83,637
SUBSISTEMA	ELEMENTO	Unidad Basica de Servicio	Hab/UBS Totales	m² de T/UBS	m² C/UBS
Educacion					
	Jardin de niños	aulas	63	20,689.15	6,288.50
	Escuelas Primarias	aulas	199	56,355.41	22,900.61
	Escuelas Secundarias	aulas	48	43,624.30	13,971.18
	CBETA	aulas	12	19,344.00	4,260.00
	Instituto Tecnologico Agropecuario	aulas	26	40,378.00	7,774.00
	Total		348	180,391	55,194
Asistencia social					
	Centro de Asistencia de desarrollo infantil	aulas	73	20,218.34	8,436.43
	Centro de desarrollo comunitario	aulas	60	28,675.54	10,155.92
	Centro Integral Juvenil	m²	418	1,254.56	418.19
	Total			50,148.43	18,592.35
Administración Publica					
	Oficinas de Gobierno Federal	m²	1,673	2,843.66	1,672.74
	Oficinas de Gobierno estatal	m²	836	1,421.83	836.37
	Total			4,265.49	2,509.11
Cultura y Culto					
	Bibliotecas	sillas	84	940.92	351.28
	Auditorio	butacas	597	3,584.44	1,015.59
	Teatro	butacas	174	3,310.63	1,193.57
	Centro Social Popular	m²	2,614	13,591.01	2,613.66
	Escuela integral de artes	aulas	8	1,848.38	1,304.74
	Casa de la Cultura	m²	820	2,869.90	1,270.95
	Museos	m²	836	2,509.11	3,847.30
	Total			28,654.39	11,597.09
Recreacion					
	Plazas Civicas	m²	13,382	18,065.59	401.46
	Juegos Infantiles	m²	20,909	20,909.25	209.09
	Jardines vecinales	m²	83,637	83,637.00	3,345.48
	Parque de barrio	m²	83,637	92,000.70	836.37
	Cine	butacas	836	4,014.58	1,003.64
	Area de ferias y exposiciones	m²	8,364	8,363.70	2,509.11
	Total			226,990.82	8,305.15
Deporte					
	Modulo deportivo	m²	5,576	6,300.65	150.55
	Unidad deportiva	m²	11,152	16,058.30	880.98
	Centro Deportivo	m²	385	3,094.95	1,967.59
	Total			25,453.91	2,999.11
Salud					
	Centro de salud urbano	consultorios	7	2,676.38	729.31
	Unidad de medicina familiar	consultorios	17	21,954.71	10,454.63
	Clinica Hospital	camas	57	11,464.98	5,732.49
	Total			36,096.07	16,916.43
Comercio					
	Plaza para tianguis	puesto	691	62,230.08	34,318.82
	Mercado Publico	puesto	691	20,736.45	12,441.87
	Tienda o centro comercial	m²	639	3,098.94	1,338.74
	Total			86,065.47	48,099.43
Abasto					
	Unidad básica de abasto	m²	1,418	39,096.75	8,888.20
	Total			39,096.75	8,888.20
Comunicaciones					
	Centro integral de servicios	ventanilla de attn	5	159.40	71.83

REQUERIMIENTOS					
	Administracion de correos	ventanilla de attn	9	712.77	41.17
	Oficina comercial Telmex	ventanilla de attn	3	366.83	119.15
	Total			1,239.00	232.14
Transporte					
	Central de autobuses de pasajeros	anden	10	5,227.31	982.73
	Central de servicios de carga	cajon	33	10,036.44	2,576.02
	Total			15,263.75	3,558.75
Servicios Urbanos					
	Comandancia de Policia	m²	507	1,267.23	506.89
	Estacion de gasolina	bomba	112	5,613.22	1,796.23
	Central de bomberos	autobomba	1	376.37	125.46
	Estación de Transferencia	m² año	9,293	9,293.00	0.00
	Cementerio	fosa	418	2,613.66	83.64
	Total			19,163.47	2,512.21

2050

REQUERIMIENTOS					
DOSIFICACION DE LA DEMANDA DE EQUIPAMIENTO URBANO					
CIUDAD:	MUNICIPIO DE TULUM 2050		CRECIMIENTO POBLACIONAL		102,095
SUBSISTEMA	ELEMENTO	Unidad Basica de Servicio	Hab/UBS Totales	m² de T/UBS	m² C/UBS
Educacion					
	Jardin de niños	aulas	77	25,255.08	7,676.32
	Escuelas Primarias	aulas	243	68,792.58	27,954.58
	Escuelas Secundarias	aulas	58	53,251.82	17,054.51
	CBETA	aulas	12	19,344.00	4,260.00
	Instituto Tecnologico Agropecuario	aulas	26	40,378.00	7,774.00
	Total		416	207,021	64,719
Asistencia social					
	Centro de Asistencia de desarrollo infantil	aulas	89	24,680.36	10,298.28
	Centro de desarrollo comunitario	aulas	73	35,004.00	12,397.25
	Centro Integral Juvenil	m²	510	1,531.43	510.48
	Total			61,215.78	22,695.53
Administración Publica					
	Oficinas de Gobierno Federal	m²	2,042	3,471.23	2,041.90
	Oficinas de Gobierno estatal	m²	1,021	1,735.62	1,020.95
	Total			5,206.85	3,062.85
Cultura y Culto					
	Bibliotecas	sillas	102	1,148.57	428.80
	Auditorio	butacas	729	4,375.50	1,239.73
	Teatro	butacas	213	4,041.26	1,456.98
	Centro Social Popular	m²	3,190	16,590.44	3,190.47
	Escuela integral de artes	aulas	10	2,256.30	1,592.68
	Casa de la Cultura	m²	1,001	3,503.26	1,551.44
	Museos	m²	1,021	3,062.85	4,696.37
	Total			34,978.18	14,156.47
Recreacion					
	Plazas Civicas	m²	16,335	22,052.52	490.06
	Juegos Infantiles	m²	25,524	25,523.75	255.24
	Jardines vecinales	m²	102,095	102,095.00	4,083.80
	Parque de barrio	m²	102,095	112,304.50	1,020.95
	Cine	butacas	1,021	4,900.56	1,225.14
	Area de ferias y exposiciones	m²	10,210	10,209.50	3,062.85
	Total			277,085.83	10,138.03
Deporte					
	Modulo deportivo	m²	6,806	7,691.16	183.77
	Unidad deportiva	m²	13,613	19,602.24	1,075.40
	Centro Deportivo	m²	470	3,777.99	2,401.82

REQUERIMIENTOS					
	Total			31,071.38	3,660.99
Salud					
	Centro de salud urbano	consultorios	8	3,267.04	890.27
	Unidad de medicina familiar	consultorios	21	26,799.94	12,761.88
	Clinica Hospital	camas	70	13,995.20	6,997.60
	Total			44,062.18	20,649.74
Comercio					
	Plaza para tianguis	puesto	844	75,963.74	41,892.70
	Mercado Publico	puesto	844	25,312.81	15,187.69
	Tienda o centro comercial	m ²	780	3,782.86	1,634.19
	Total			105,059.41	58,714.58
Abasto					
	Unidad básica de abasto	m ²	1,730	47,725.09	10,849.76
	Total			47,725.09	10,849.76
Comunicaciones					
	Centro integral de servicios	ventanilla de attn	6	194.58	87.68
	Administracion de correos	ventanilla de attn	11	870.08	50.25
	Oficina comercial Telmex	ventanilla de attn	4	447.79	145.44
	Total			1,512.44	283.38
Transporte					
	Central de autobuses de pasajeros	anden	13	6,380.94	1,199.62
	Central de servicios de carga	cajon	41	12,251.40	3,144.53
	Total			18,632.34	4,344.14
Servicios Urbanos					
	Comandancia de Policia	m ²	619	1,546.89	618.76
	Estacion de gasolina	bomba	137	6,852.01	2,192.64
	Central de bomberos	autobomba	1	459.43	153.14
	Estación de Transferencia	m ² año	11,344	11,343.89	0.00
	Cementerio	fosa	510	3,190.47	102.10
	Total			23,392.69	3,066.64

9.4.3.6 RESUMEN Y CONCLUSIONES

Tulum posee un enorme atractivo para los visitantes, condensa los mejores atributos turísticos: el azul turquesa del mar y playas maravillosas, un entorno ecológico increíble, uno de los sitios arqueológicos de la cultura maya más extraordinarios, y 8 kilómetros de costa de un poblado turístico único y con un “sabor especial”.

Tulum se ha desarrollado de una manera importante en los últimos años, y es de esperarse que tenga un crecimiento por demás significativo en los próximos.

No obstante, se vislumbran eventos adicionales que cambiarán, seguramente, el crecimiento de la actividad turística, y por ende el desarrollo de variables asociadas, como el desarrollo urbano.

Las ciudades turísticas en Quintana Roo han tenido un despegue increíble desde las últimas décadas del siglo pasado y lo que va del presente milenio. Sin embargo, algunas cuestiones asociadas a este desarrollo o consecuencia derivada del mismo, no han tenido el mejor desempeño que se esperaría.

Este es el caso del Desarrollo Urbano. Podría decirse que la planeación y administración del Desarrollo Urbano en Quintana Roo no se ha desenvuelto con la agilidad y antelación que se necesitaba, dado el desmesurado crecimiento de la actividad turística.

Los primeros Planes Maestros que concreto FONATUR para Cancún desde 1970, y en especial el de 1984-1985, forzaba a que este desarrollo limitara su crecimiento, tanto en su parte estrictamente turística, como en el entorno de la propia ciudad. Es decir, se tenía la visión de que Cancún no debía exceder un determinado tamaño (número de hoteles, cuartos, población, extensión territorial, número de viviendas, etc.). Tamaño que, puede decirse, fue determinado casi por decreto.

Muy rápidamente esas cotas impuestas para Cancún fueron rebasadas en forma por demás cuantiosa. Se rebasaron todos los límites que se habían establecido para la oferta turística (cuartos de hotel-visitantes) así como las demandas urbanas que se generaban por ese desarrollo turístico tan acelerado (suelo, vivienda, servicios, infraestructura, etc.).

Un patrón similar se concretó en Playa del Carmen. El crecimiento desmesurado de la oferta turística (y por ende los visitantes) conformó un desorden urbano que tuvo que ser paliado con tratar de arreglar los ordenamientos que estaban vigentes. A todo ello se agregó un crecimiento urbano complicado que implicó el surgimiento de algunos asentamientos irregulares que detonaron problemas serios en la administración del Desarrollo Urbano.

De los seis factores que inciden en el desarrollo urbano, descritos anteriormente, el que consideramos que impactará más a Tulum será la puesta en marcha de los proyectos federales: en especial El Tren Maya y el nuevo aeropuerto de Tulum.

Los organismos encargados del fenómeno turístico tanto a nivel nacional (SECTUR, FONATUR), como internacional (Organización Mundial del Turismo OMT) indican que el turismo en esta parte del mundo va a crecer de manera considerable en los próximos años; igual que lo ha hecho en los años recientes.

De acuerdo con la OMT el crecimiento que se espera para la región de las Américas será importante. Pasará de 150 millones de llegadas en el 2010 a 248 millones en el 2030. Esto es, habrá un mercado considerable para los nuevos emprendimientos que encabeza el Gobierno Federal en materia turística.

Respecto al emprendimiento del Tren Maya, que se inaugura a finales del año, se plantea para el primer año de operación contar con la capacidad para atender a 43,680 pasajeros al día, por sentido, en el tramo de mayor demanda (Tramo 5 Cancún-Chetumal); mientras que al final del horizonte de evaluación, es decir en el año 2053, se espera contar con la capacidad para atender a 100,100 pasajeros al día, por sentido, en el tramo de mayor demanda.

Las estimaciones que se tienen es que el nuevo servicio del Tren aumentará la estancia de los turistas en la región, generando 8% más noches turista en la zona en su primer año y 17.5% para 2030.

Por lo que respecta a el nuevo aeropuerto internacional de Tulum ‘Felipe Carillo Puerto’ tendrá la capacidad de atender, en una primera etapa, a 4 millones de pasajeros al año.

En todo el mundo se observa que, con la llegada de los visitantes a un aeropuerto de arribo, muchos de ellos pernoctan por lo menos una noche en ese sitio no obstante que su destino final sea otro. Mucho más cuando son visitantes internacionales.

Esto es un patrón internacional que se observa en todos los destinos del mundo. Es decir, un viajero que decide visitar Capadocia en Turquía y arriba al aeropuerto de Estambul, destacadamente dedicará algunos días de su viaje para hacer turismo en la ciudad de Estambul; o las persona que tienen la necesidad de visitar Quebec y arriban como puerta de entrada a la ciudad de Montreal, seguramente pasarán alguna noche en esa ciudad de arribo. En este tenor se puede observar que un alto porcentaje de las personas que arriban al aeropuerto de Cancún cumplen con esa premisa.

De acuerdo a los datos de 2019 (antes de la pandemia) el aeropuerto de Cancún recibió alrededor de 12.7 millones de pasajeros en el año.

Por su parte, en ese mismo año, Cancún tuvo una afluencia de alrededor de 6 millones de turistas.

Esto significa que casi la mitad de los visitantes que arribaron al aeropuerto de Cancún “hicieron” turismo en este centro turístico, (entre 46% y 47%).

Se estima que el aeropuerto de Tulum puede alcanzar una utilización del 50 % de la capacidad instalada en muy pocos años. Esto es, alcanzar los 2 millones de pasajeros.

Si consideramos el mismo patrón observado en el aeropuerto de Cancún, encontramos que de los 2 millones de pasajeros que llegarán al aeropuerto de Tulum, casi un millón realizarán pernoctas en Tulum y utilizarán instalaciones y servicios del lugar.

En cuanto al Tren Maya, FONATUR estima que la estación Tulum tendrá una afluencia de casi 44 mil pasajeros al día. Esto significa, a su vez, alrededor de 16 millones de pasajeros anuales. Si consideramos que sólo un 10 % de los pasajeros (que se considera bajo) que transitarán la estación de Tulum realizan pernoctas y estancias en Tulum, significaría que Tulum tendría un incremento de turistas, por esta vía, de casi 1.6 millones de visitantes.

Los dos proyectos en conjunto otorgarían a Tulum un incremento de más de 2.5 millones de visitantes anuales.

Si consideramos que actualmente Tulum tiene poco más de 8 mil cuartos de hotel y una afluencia turística de 700 mil visitantes en el año, encontramos que la cantidad de visitantes adicionales que tendrá Tulum tan solo por estos dos proyectos federales será de casi cuatro veces más de visitantes.

Lo que traerá aparejado que se requieran casi 4 veces más de servicios turísticos en general y, por consiguiente, casi cuatro veces más de: tierra para ese desarrollo, servicios, y en general la infraestructura necesaria.

Estos proyectos son ya una realidad, por lo que deberíamos considerar muy seriamente que Tulum puede experimentar una presión muy fuerte de crecimiento de TODA la actividad turística, con sus implicaciones en el desarrollo urbano y los servicios inherentes a este desarrollo. Por último, debiéramos mencionar que parece un poco extraño o hasta paradójico que el Gobierno Federal este impulsando el crecimiento turístico en la zona a través de proyectos como los mencionados, por un lado, y que por el otro lado se trate de constreñir el crecimiento de Tulum en todos los órdenes.

9.4.4 OTROS SECTORES ECONÓMICOS

Sin duda, el sector turístico constituye la principal actividad económica del municipio, siendo el motor de desarrollo más significativo. Aunque existen otros sectores económicos, su contribución conjunta representa menos del 6% del valor total de la producción municipal.

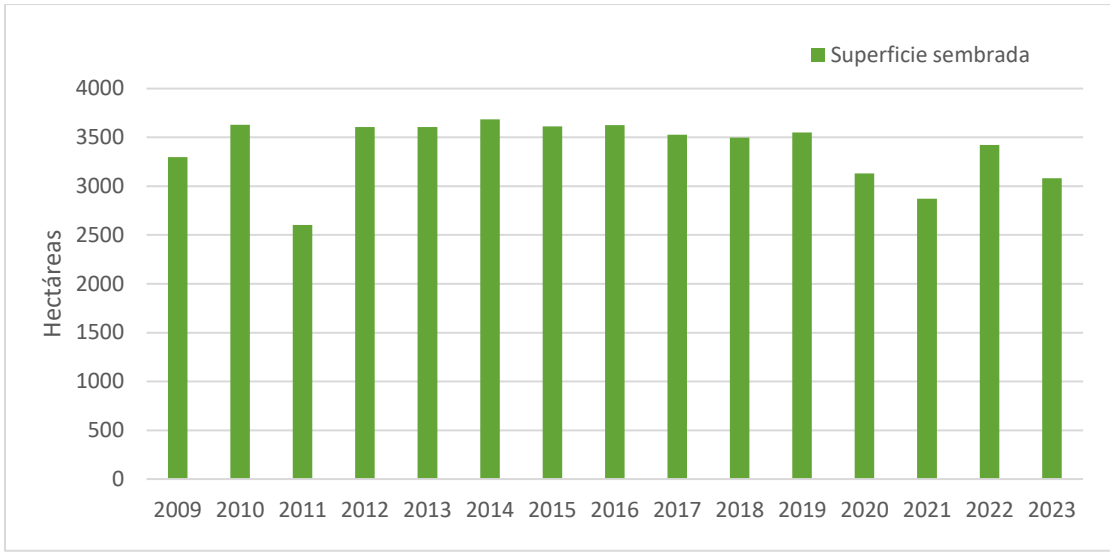
En el presente análisis, se consideran las tendencias de estos sectores complementarios. No obstante, la evaluación enfrenta limitaciones debido a la carencia de datos históricos consistentes y confiables, atribuible en parte a la reciente creación del municipio y a la ausencia de una consolidación estadística específica para esta región. Esta situación dificulta la representación precisa de las dinámicas económicas de ciertos sectores, por lo que los análisis estarán condicionados a la disponibilidad y calidad de la información existente.

Sector Agrícola

El municipio de Tulum, al igual que gran parte de la Península de Yucatán, se caracteriza por tener en la mayor parte de su extensión municipal presencia de Leptosoles, suelos que en términos agrícolas presentan serias limitantes para el desarrollo de cultivos con rendimientos comercialmente viables. Esta condición natural, limita considerablemente el desarrollo del sector, además de que la gran mayoría de la superficie agrícola presente en el municipio es agricultura de subsistencia donde el principal cultivo sembrado sigue siendo el maíz.

De acuerdo con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) la superficie total sembrada en el municipio de Tulum ha sido altamente variante sin mostrar una tendencia clara (Gráfica 14), aunque visto desde una perspectiva de crecimiento, no se ha manifestado desarrollo desde la creación del municipio (2008). Además, si se toma como indicador el rendimiento medio anual de la superficie cosechada de maíz, la cual representa en promedio el 86% de la superficie agrícola total sembrada anualmente en el municipio, tenemos que es un rendimiento de 0.35 ton/ha, muy por debajo del rendimiento medio a nivel nacional de 3.2 ton/ha (SIAP, 2024).

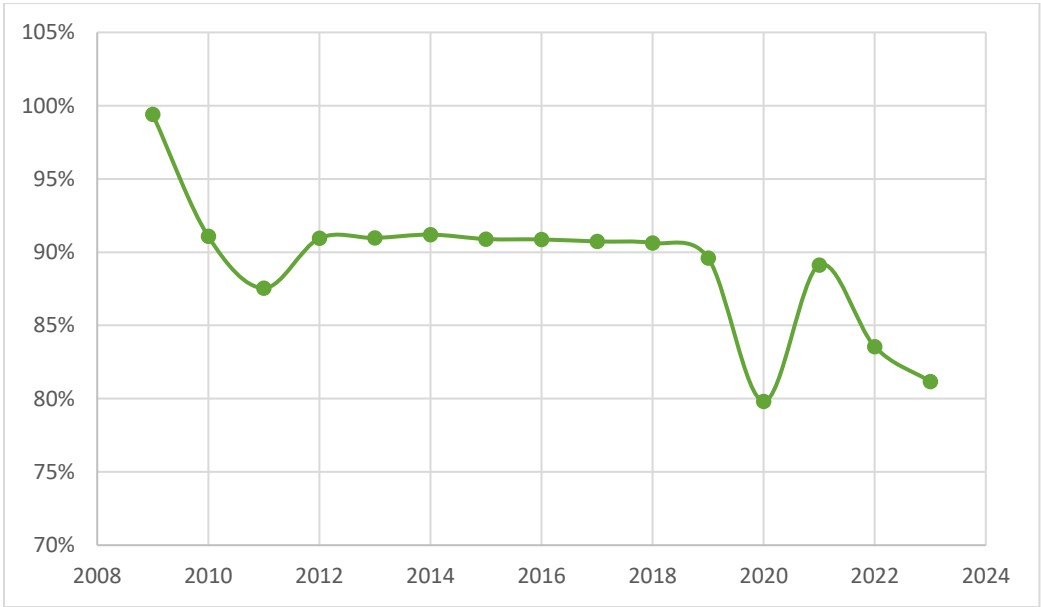
Gráfica 14. Superficie total agrícola sembrada en el municipio de Tulum 2009-2023.



Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP.

A diferencia de la superficie total agrícola sembrada en el periodo 2009-2023, que muestra una variación altamente fluctuante, la superficie sembrada de maíz con respecto a la superficie total agrícola si ha manifestado una ligera tendencia al decremento (Gráfica 15), lo cual puede ser consecuencia de los escasos rendimientos en la producción, una mayor frecuencia de siniestros climáticos o la reconversión productiva hacia otros cultivos más rentables.

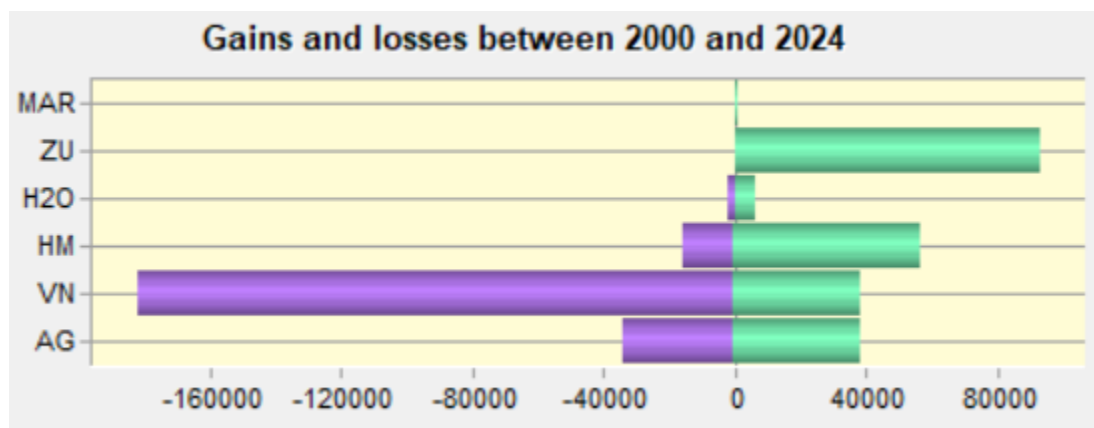
Gráfica 15. Tendencia del porcentaje de superficie sembrada de maíz con respecto a la superficie total sembrada en el municipio 2009-2023.



Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP.

Por otra parte, si considerando el análisis de coberturas de uso de suelo y vegetación a partir de imágenes de satélite, y la comparación de pérdidas y ganancias observadas para el periodo 2000-2024, se puede observar que la superficie agrícola del municipio de Tulum ha presentado el menor incremento proporcional con respecto al resto de coberturas de uso de suelo y vegetación analizadas (Gráfica 16).

Gráfica 16. Balance de pérdida de coberturas de uso de suelo y vegetación para el municipio de Tulum 2000-2024.



Fuente: Elaboración propia.

Si bien con los datos disponibles no es factible desarrollar un pronóstico estadístico para determinar el estado final del sector agrícola en el municipio de Tulum, la falta de tendencia clara en la superficie total anual sembrada, la ligera disminución en la superficie sembrada del cultivo más representativo (maíz) y los bajos rendimientos, así como los balances de cambio de coberturas permiten valorar que el sector agrícola en el municipio no posee gran peso en la dinámica socioeconómica y territorial, por lo cual, de seguir esta situación se espera sea desplazado por el desarrollo de otras actividades o sectores en la región, tal como marca la tendencia estimada a partir del método KSIM.

Sector Apícola

Tulum tiene una tradición en la apicultura, destacándose la miel de abeja melipona, una especie nativa con alto valor cultural y económico.

La miel de melipona tiene gran demanda tanto local como internacional debido a sus propiedades medicinales. Sin embargo, la deforestación y el uso de agroquímicos son amenazas importantes.

Su tendencia es potencial de crecimiento en la producción y comercialización de miel, especialmente en mercados especializados y turísticos.

En la siguiente Gráfica 17 se puede observar el comportamiento histórico que el sector apícola/meliponicultura registró en el periodo de 2009 a 2023 para la producción de miel.

Gráfica 17. Comportamiento histórico del sector apícola/meliponicultura, periodo comprendido de 2009 a 2023.



Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP. Recuperado de: https://nube.siap.gob.mx/cierre_pecuario/.

Sector Pecuario

En la zona predomina la ganadería bovina y porcina a pequeña escala, destinada principalmente al consumo local.

El crecimiento poblacional y turístico ha aumentado la demanda de carne y lácteos, impulsando la producción local. Sin embargo, los altos costos de insumos y la falta de tecnificación limitan el crecimiento.

Su tendencia es de crecimiento moderado, aunque enfrenta desafíos relacionados con la sostenibilidad y la competencia con productores externos.

En la siguiente Gráfica 18 se puede observar el comportamiento histórico que el sector pecuario registró en el periodo de 2009 a 2023 para la producción de ganado en pie (bovino, porcino, ovino, ave y guajolote).

Gráfica 18. Comportamiento histórico del sector pecuario, periodo comprendido de 2009 a 2023.



Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP. Recuperado de: https://nube.siap.gob.mx/cierre_pecuario/.

Sector Forestal

El sector forestal en Tulum se caracteriza por actividades de extracción principalmente enfocadas en productos no maderables, con menor incidencia en el aprovechamiento maderable debido a restricciones legales y la falta de infraestructura para su desarrollo. Estas actividades son realizadas mayormente por ejidos y comunidades locales, aunque en muchas ocasiones carecen de planificación técnica y certificación, lo que limita su sostenibilidad y rentabilidad.

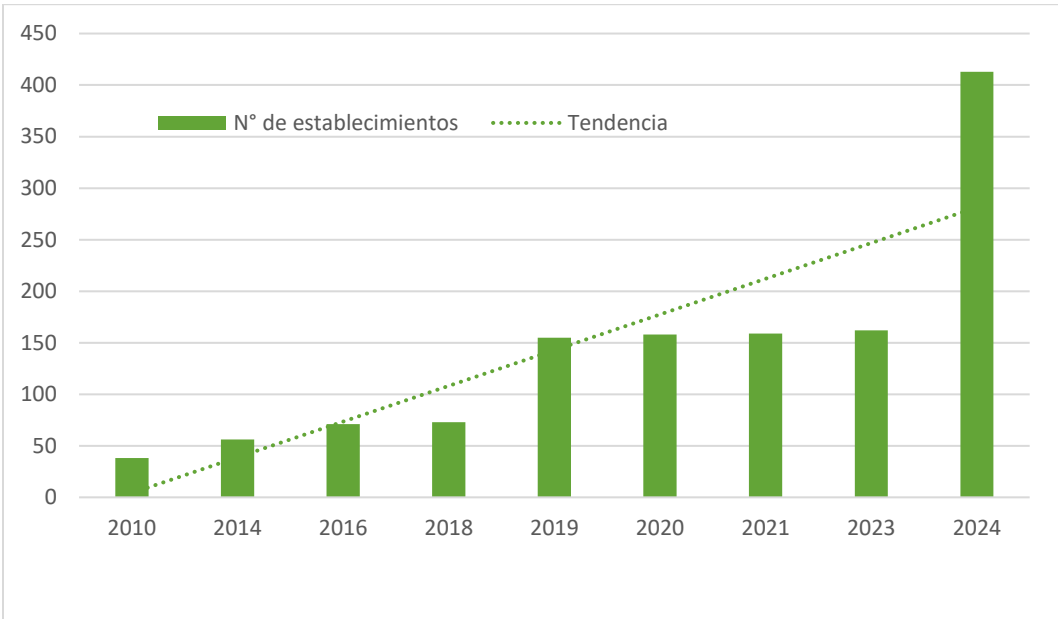
A nivel municipal se registran cuatro autorizaciones de programas de manejo forestal maderable y no maderable apoyados por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y una certificación forestal. Todos corresponden con propiedad ejidal y no cuenta con datos históricos de producción a nivel municipal.

Las proyecciones indican que, sin intervenciones efectivas, el aprovechamiento forestal se verá cada vez más limitado, por lo tanto, es importante promover estrategias que prioricen incentivos económicos, fortalecimiento de capacidades técnicas, y el desarrollo de cadenas de valor que permitan un aprovechamiento sostenible de los recursos forestales.

Sector Artesanal

El sector artesanal se encuentra integrado principalmente por actividades relacionadas con la producción y venta de artesanías. Por lo tanto, su desarrollo y crecimiento está estrechamente ligado con la demanda por parte de los visitantes nacionales y extranjeros al municipio. Uno de los indicadores más claros de esta relación, es el número de establecimientos de venta y producción de artesanías registrados en el municipio de Tulum (Gráfica 19) cuyos registros actualizados de acuerdo al Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE, 2024) manifiestan un estancamiento en el registro de nuevos establecimientos durante el periodo de la crisis sanitaria por COVID-19 (2020-2023).

Gráfica 19. Registro histórico de unidades económicas relacionadas con la venta y producción de artesanías en el municipio de Tulum.



Fuente: Elaboración propia con datos de DENUE, 2024.

En razón de lo anterior podemos considerar que el sector artesanal es periférico al sector turístico y como tal se espera que en los siguientes años su crecimiento sea directamente proporcional al incremento en el número de visitantes por año. En este sentido esta tendencia refuerza los resultados obtenidos a través del método KSIM, en los cuales se prevé un incremento del sector para los próximos 25 años.

Sector Minero (extracción de material pétreo)

El sector minero, específicamente la extracción de material pétreo, juega un papel importante **pero complejo** en el municipio. Por un lado, suministra materiales esenciales para la construcción y el desarrollo de la infraestructura, impulsando la economía local. Por otro lado, plantea desafíos significativos en términos de impacto ambiental y social.

Este sector mantiene una tendencia de crecimiento sostenido, dado su estrecho vínculo con la infraestructura turística y urbana del municipio. La demanda de material pétreo seguirá en aumento, impulsando la apertura de nuevas áreas de extracción. En los últimos años, su expansión ha sido reforzada por la construcción del Tren Maya, lo que ha incrementado la explotación de bancos de materiales en la región.

Actualmente, el número exacto de bancos de materiales aprobados en Tulum varía según las concesiones vigentes y existen bancos clandestinos. Los tipos de bancos de materiales que existen son de sustrato o tierra fértil, sascab (piedra caliza), piedra y arena. En el estado hasta agosto del 2024 existían 57 bancos de materiales particulares autorizados o en evaluación, y 26 bancos de materiales propiedad de Secretaría de la Defensa Nacional. Además, se estima que pueda existir un 30% más de bancos clandestinos.

Sector Industrial

Presencia Actual: La actividad industrial en Tulum es incipiente y está relacionada principalmente con la producción de alimentos y bebidas para el sector turístico.

La creciente demanda turística podría estimular la creación de pequeñas industrias locales, como destilerías, panaderías y fábricas de productos artesanales.

Su tendencia es de lento desarrollo con potencial de diversificación hacia industrias relacionadas con el turismo y la sostenibilidad.

9.4.5 CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático tiene repercusiones en los ecosistemas y su prestación de servicios, en actividades productivas, en infraestructuras y en la población en general. La forma en que incide en el territorio puede conllevar a que actores públicos, privados y sociales incurran en gastos no previstos al verse afectados por eventos causados por aumentos en la temperatura o por cambios en la precipitación.

Por otro lado, las manifestaciones del cambio climático pueden representar una oportunidad para el crecimiento económico, el desarrollo social y el manejo responsable y sostenible de los ecosistemas.

Las emisiones antropógenas de gases de efecto invernadero (GEI) han aumentado desde la era preindustrial, en gran medida como resultado del crecimiento económico y demográfico y, actualmente, son mayores que nunca. Como consecuencia, se han alcanzado unas concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso sin comparación en por lo menos los últimos 800,000 años.

Los efectos de las emisiones, así como de otros factores antropógenos, se han detectado en todo el sistema climático global y es sumamente probable que hayan sido la causa dominante del calentamiento observado a partir de la segunda mitad del siglo XX (Allen et al., 2014)⁸.

En los últimos decenios, los cambios del clima han causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y océanos. Estos impactos ponen de manifiesto la sensibilidad de los sistemas naturales y humanos al cambio del clima.

Desde aproximadamente 1950 se han observado cambios en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos. Algunos de estos cambios han sido asociados con influencias humanas, como por ejemplo la disminución de las temperaturas frías extremas, el aumento de las temperaturas cálidas extremas, la elevación de los niveles máximos del mar y el mayor número de precipitaciones y sequías intensas en diversas regiones (Allen et al., 2014).

Muchas afectaciones del cambio climático y sus impactos asociados continuarán durante siglos, incluso si se detienen las emisiones antropógenas de gases de efecto invernadero. Los riesgos de cambios abruptos o irreversibles en los ecosistemas y el ambiente aumentan, a medida que aumenta la magnitud del calentamiento.

⁸ Allen, S. K., Plattner, G.-K., Nauels, A., Xia, Y., & Stocker, T. F. 2014. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. An overview of the Working Group 1 contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). EGU General Assembly Conference Abstracts, 3544.

En este apartado se presentan los modelos de cambio climático, usando como base los datos de WorldClim 2.1 (Fick & Hijmans, 2017)⁹ para el presente (1991-2020) con una resolución espacial de 30 arcos de segundo (≈ 904 m). Cabe resaltar que corresponden a la última normal (Arguez & Vose, 2011¹⁰; WMO, 1983¹¹).

También, este trabajo se basa en la clasificación climática de Köppen modificado por García (2004), con el fin de agrupar climas similares para identificar zonas climáticas que sirvan de base para reducir riesgos por efecto del cambio climático; también se presenta la proyección del futuro cercano y medio de las variables climatológicas y el balance hídrico.

9.4.5.1 MÉTODO

Datos utilizados y su calidad

Se utilizaron los datos de las estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), organismo encargado de proporcionar información sobre el estado del tiempo a escala nacional y local en México. Las estaciones utilizadas están enumeradas abajo (Tabla 16) (se muestra su ubicación en el mapa de la Figura 6) y las variables utilizadas fueron precipitación, evapotranspiración potencial, temperatura máxima y temperatura mínima. La determinación de los tipos de clima en la Figura 6 fue elaborada a partir de los datos de Wordlclim 2.1 (Fick y Hijmans, 2017) usando la clasificación de Koeppen modificada por García.

Tabla 16. Estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (Fuente: SMN).

Clave	Longitud °	Latitud °	Altitud (m)	Nombre	Año de inicio	Año de final de datos	% de datos
23012	-87.7375	20.488611	5	Coba	1971	2019	67.2
23025	-87.458056	20.225556	10	Tulum	1964	2019	77.2

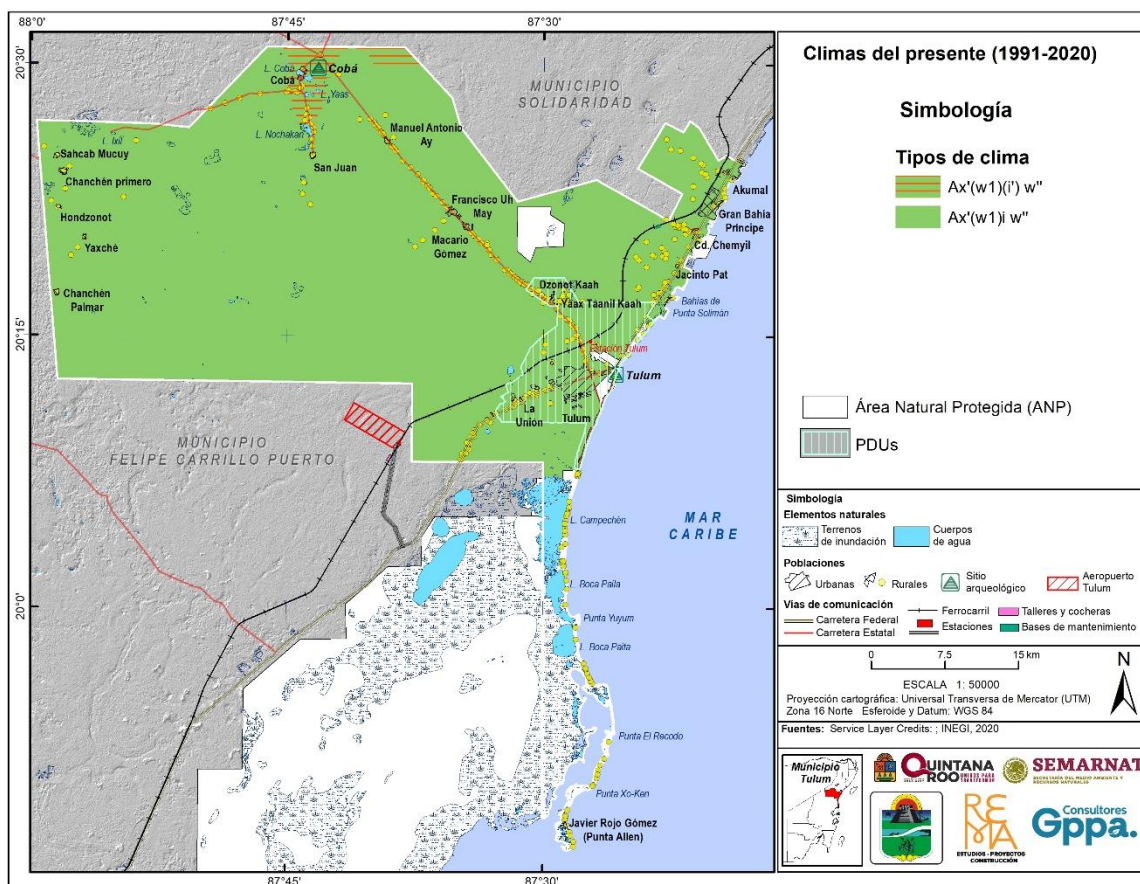
Para cada estación se calculó en porcentaje de datos existentes para los valores mensuales de precipitaciones, temperaturas mínimas, temperaturas máximas, temperaturas medias y evapotranspiración. considerando un mínimo de 75%, se retiene la estación de Tulum.

⁹ Fick, S. E., & Hijmans, R. J. 2017. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 37(12), 4302-4315.

¹⁰ Arguez, A., & Vose, R. S. 2011. The definition of the standard WMO climate normal. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(6), 699-704. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS2955.1>

¹¹ WMO. (1983). *Guide to climatological practices*, second edition. (3rd ed.). Secretariat of the World Meteorological Organization Geneva.

Figura 6. Tipos de climas del presente en la el municipio de Tulum y ubicación de las estaciones meteorológicas (cuadros rojos).



La falta de homogeneidad de las series climáticas dificulta la detección y caracterización del cambio climático a diferentes escalas espaciales, por lo que previamente a su utilización con esta finalidad, deben ser sometidas a un proceso riguroso de control de calidad y de homogeneización (Aguilar et al., 1999)¹². Esta ausencia puede obedecer a causas diversas, entre otras, hay que destacar las que introducen discontinuidades abruptas en las series, como las asociadas a las relocalizaciones de los observatorios, cambios en las prácticas observacionales y en el cálculo de las medias, etc. o bien graduales, generalmente relacionadas con cambios en el entorno (efecto urbano, cambios de uso del suelo, deforestación o reforestación, etc.) (Aguilar et al., 1999).

¹² Aguilar, E., López, J. M., Brunet, M., Saladié, Ó., Sigró, J., & López, D. 1999. Control de calidad y proceso de homogeneización de series térmicas catalanas.

A los datos de las estaciones meteorológicas se les realizaron las pruebas de Homogeneidad Normal Estándar (SNHT, por sus siglas en inglés) (Alexandersson, 1986¹³; Khaliq & Ouarda, 2007¹⁴; Verstraeten et al., 2006¹⁵) y la prueba de Pettitt (Belz et al., 2007; Pettitt, 1979; Verstraeten et al., 2006), estas se describen brevemente a continuación junto con sus estadísticos de prueba (Guajardo-Panes et al., 2017)¹⁶:

- Homogeneidad normal estándar (SNHT), un valor $T(d)$ compara el promedio de los primeros d años registrados con los últimos $(n - d)$ este valor se obtiene con la expresión $T_{(d)} = d\bar{z}_1^{-2} + (n - d)\bar{z}_2^{-2}$ para $d=1,2,...,n$, donde $\bar{z}_1 = 1/d \sum_{i=1}^d (y_i - \bar{y})/s$ y $\bar{z}_2 = 1/(n - d) \sum_{i=d+1}^n (y_i - \bar{y})/s$. Un valor alto de T en un año d indica una variación “brusca”. El estadístico T_0 se define como $T_0 = \max_{1 \leq d \leq n} T(d)$.
- La prueba de Pettitt no paramétrica se basa en rangos y hace caso omiso de la normalidad de la serie, se basa en el orden de rangos de los valores y_i . El estadístico que se emplea se define como $T_0 = \max_{1 \leq d \leq n} T(d)$ para $d=1,2,...,n$, donde la variación es detectada cuando el valor del año m cumple $X_m = \max_{1 \leq d \leq n} |X_d|$.

El juego de hipótesis planteadas en las dos pruebas son las siguientes: H_0 (Los datos son homogéneos) *versus* H_a (existe una fecha en la que hay un cambio en los datos).

El nivel de significancia planteado es valores-p (pv) <0.1 , en decir, la probabilidad de rechazar la H_0 cuando esta es verdadera (error de tipo I) es del 10% (Ramírez Guzman & López, 1993)¹⁷.

¹³ Alexandersson, H. 1986. A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of climatology*, 6(6), 661-675.

¹⁴ Khaliq, M. N., & Ouarda, T. B. M. J. 2007. On the critical values of the standard normal homogeneity test (SNHT). *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(5), 681-687.

¹⁵ Verstraeten, G., Poesen, J., Demarée, G., & Salles, C. 2006. Long-term (105 years) variability in rain erosivity as derived from 10-min rainfall depth data for Ukkel (Brussels, Belgium): Implications for assessing soil erosion rates. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D22).

¹⁶ Guajardo-Panes, R. A., Granados-Ramírez, G. R., Sánchez-Cohen, I., Díaz-Padilla, G., & Barbosa-Moreno, F. 2017. Validación espacial de datos climatológicos y pruebas de homogeneidad: Caso Veracruz, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(5), 157-177. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-05-11>.

¹⁷ Ramírez Guzmán, M. E., & López, Q. 1993. Métodos estadísticos no paramétricos.

Las pruebas se realizaron a las variables de precipitación, temperatura mínima, media y máxima de la estación de Tulum usando lenguaje de programación R (R Core Team, 2020)¹⁸ y la paquetería R “Trend” (Pohlert, 2020)¹⁹; gracias a esta misma se obtuvieron los valores-p correspondientes y se rechazaron los años en los que se presentó un cambio en los datos. Posteriormente, se realizó un concentrado de resultados, que permitió realizar la clasificación de estaciones en tres clases (Schönwiese & Rapp, 1997²⁰; Wijngaard et al., 2003)²¹. Cuando en una estación la prueba de hipótesis nula se rechaza a lo máximo una sola vez, la información se puede considerar como *confiable (C)*, cuando en una estación la prueba de hipótesis nula se rechaza a lo máximo dos veces, la información se puede considerar como medianamente *confiable (MC)* y, cuando en una estación la prueba de hipótesis nula se rechaza tres veces, la información se considera como *no confiable (NC)*.

El SMN no cuenta con metadatos que registren eventos que influyan en la calidad de los datos como los que se enumeran anteriormente, por lo que debemos tener en cuenta este aspecto a la hora de analizar las variables cuyas pruebas de homogeneidad dieron como resultado MC (medianamente confiable) y NC (no confiable).

Definiciones y fórmulas utilizadas

Para el cálculo de balance hídrico, es necesario calcular previamente la evapotranspiración real, la cual necesita de la evapotranspiración potencial.

Evapotranspiración Potencial

De acuerdo con la OMM y UNESCO (1992), la evapotranspiración potencial (ETP) es la cantidad máxima de agua capaz de ser evaporada de un clima dado, por una cubierta vegetal continua y bien alimentada de agua. Por lo tanto, incluye la evaporación del suelo y la transpiración vegetal en una región específica y en un intervalo de tiempo dado. Se expresa en altura de agua.

¹⁸ R Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing.

¹⁹ Pohlert, T. 2020. trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection.

²⁰ Schönwiese, C.-D., & Rapp, J. 1997. Climate trend atlas of Europe based on observations 1891—1990. Springer Science & Business Media.

²¹ Wijngaard, J. B., Klein Tank, A. M. G., & Können, G. P. 2003. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 23(6), 679-692.

Para calcular la evapotranspiración potencial, se utilizó la fórmula de Hargreaves (Hargreaves et al, 1985) mediante la expresión:

$$ETP = 0.0023 * (Tm + 17.8) * (Tx - Tn)^{0.5} * Ra$$

Donde:

Tm es la temperatura media (°C)

Tx, la temperatura máxima (°C)

Tn, la temperatura mínima (°C)

Ra, la radiación extraterrestre (mm por día)

$$\delta r = 1 + 0.33 * \cos \left(\frac{2\pi}{365} * dj \right)$$

$$\delta s = 0.4093 * \sin \left(\left(\frac{2\pi}{365} * dj \right) - 1.405 \right)$$

$$\omega = \arccos \left(1 - \tan \left(\frac{lat * \pi}{180} \right) * \tan (\delta r) \right)$$

$$Ra = 15.392 * \delta r * \left(\omega * \sin \left(\frac{lat * \pi}{180} \right) * \sin(\delta s) + \cos \left(\frac{lat * \pi}{180} \right) * \cos(\delta s) * \sin(\omega) \right)$$

Donde:

dj: el día juliano del año

lat: la latitud en el lugar (°)

δs: la variación de la insolación

δr: la variación de la radiación

ω: el Angulo de incidencia

Evapotranspiración real (ETR)

Las condiciones establecidas por la evapotranspiración potencial no siempre se dan en la realidad, y aquella evapotranspiración que ocurre en la situación real, difiere de los límites máximos o potenciales establecidos. La evapotranspiración real (ETR) se refiere a la cantidad de agua que realmente es evapotranspirada.

La ETR es más difícil de calcular que la ETP, ya que además de las condiciones atmosféricas que influyen en ella, interviene la magnitud de las reservas de humedad del suelo y los requerimientos de los cultivos.

Para su cálculo se utilizó la relación adimensional de Budyko (1974)²²:

$$ETR = P * \left(1 - \exp \frac{\left(\frac{-ETP}{P} \right) * ETP}{P} * \tanh \left(\frac{P}{ETP} \right) \right)^{1/2}$$

Donde:

P: Acumulado de precipitaciones mensuales

ETP: Evapotranspiración potencial

Balance Hídrico

El modelo de climatología física utilizado, representa el balance hídrico multianual mediante la ecuación de balance dada por:

$$S=P - ETR$$

Donde:

S es la lámina de escurrimiento anual (mm)

P, total anual de precipitaciones (mm)

ETR, la evapotranspiración real anual (mm)

Gran parte del basamento teórico de tales metodologías descansa sobre los trabajos pioneros de Mijaíl Budyko y Sellers (Guo et al., 2019)²³. La solución de esta ecuación de balance hídrico requiere de la estimación de toda una serie de variables físicas intermedias. En este caso solo se tendrá en cuenta los ingresos de agua por precipitación y salida por evapotranspiración.

²² Budyko, M. I. 1974. Climate and life. Academic press.

²³ Guo, A., Chang, J., Wang, Y., Huang, Q., Guo, Z., & Li, Y. 2019. Uncertainty analysis of water availability assessment through the Budyko framework. Journal of Hydrology, 576, 396-407. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.033>.

Tendencia de las series de datos

La tendencia de los datos las variables meteorológicas, fue calculada mediante el estadígrafo Mann-Kendall tal como establece la Nota Técnica No. 143 de la OMM (Sneyers, 1990), utilizando la paquetería R “Kendall” (Hipel & McLeod, 1994²⁴; Libiseller & Grimvall, 2002)²⁵.

El Mann-Kendall Test es una prueba sencilla para la calcular la tendencia, la cual es no paramétrica y, como tal, no es dependiente de la magnitud de los datos, de su distribución, de los datos faltantes o espaciados irregularmente.

Mann-Kendall evalúa si un conjunto de datos de tiempo ordenado exhibe una tendencia creciente o decreciente, lo cual indica en el valor tau, correspondiente a la pendiente de la relación entre la serie temporal de valores analizados y el tiempo, dentro de un nivel predeterminado de significación estadística, de la misma manera que para las otras pruebas, se utilizó un valor- p de 0.1 para determinar la validez de la tendencia.

9.4.5.2 MODELOS Y ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Los escenarios de cambio climático son una representación global y simplificada del clima futuro, basada en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas, que se construyen para ser utilizados de forma explícita en la investigación de las consecuencias potenciales del cambio climático antropogénico, y que sirven a menudo de insumo para evaluar el efecto de sus impactos (Fernández et al., 2015)²⁶. Debe recalcar que estos escenarios no son pronósticos climáticos, ya que cada escenario es una alternativa de cómo se puede comportar el clima en el futuro.

²⁴ Hipel, K. W., & McLeod, A. I. 1994. Time series modelling of water resources and environmental systems. Elsevier.

²⁵ Libiseller, C., & Grimvall, A. 2002. Performance of partial Mann–Kendall tests for trend detection in the presence of covariates. *Environmetrics: The official journal of the International Environmetrics Society*, 13(1), 71-84.

²⁶ Fernández, A., Zavala, J., Romero, R., Conde, A. C., & Trejo, R. I. 2015. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica. *Centro de Ciencias de la Atmósfera*, 1-22.

La evaluación de las condiciones futuras en función del modo de desarrollo económico global y de la cantidad de población humana en la tierra, liberando a la atmósfera gases de efecto invernadero se realiza gracias a escenarios de cambio climático correspondientes a trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP por sus siglas en inglés) (Cuaresma, 2017²⁷; KC & Lutz, 2017²⁸; Leimbach et al., 2017²⁹; Riahi et al., 2017³⁰). Se consideran SSP1 (Sostenibilidad), SSP2 (Mitad del camino), SSP3 (Rivalidad regional), SSP4 (Desigualdad) y SSP5 (Desarrollo impulsado por combustibles fósiles) (Van Vuuren et al., 2017)³¹. Cada uno de estos se relaciona con un forzamiento radiativo por la acción humana, los valores de este forzamiento a horizonte 2100 van de 1.9 a 8.5 W·m². A partir de esto, se utilizan modelos de circulación general (MCG) los cuales simulan las condiciones ambientales con los diferentes escenarios (Rivera, 2023).

Las proyecciones climáticas denominadas MGC del proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados 6 (CMIP6) (Tebaldi et al., 2021)³² sirven como materia prima para la construcción de escenarios climáticos, pero estos requieren información adicional, por ejemplo, acerca del clima observado en un momento determinado o sobre las condiciones económicas que permiten el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, etc. Un 'escenario de cambio climático' es la diferencia entre un escenario y un período climáticos de referencia (Fernández et al., 2015).

²⁷ Cuaresma, J. C. 2017. Income projections for climate change research: A framework based on human capital dynamics. *Global Environmental Change*, 42, 226-236. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.02.012>.

²⁸ KC, S., & Lutz, W. 2017. The human core of the shared socioeconomic pathways: Population scenarios by age, sex and level of education for all countries to 2100. *Global Environmental Change*, 42, 181-192. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.06.004>.

²⁹ Leimbach, M., Kriegler, E., Roming, N., & Schwanitz, J. 2017. Future growth patterns of world regions – A GDP scenario approach. *Global Environmental Change*, 42, 215-225. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.02.005>.

³⁰ Riahi, K., Vuuren, D. P. van, Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.

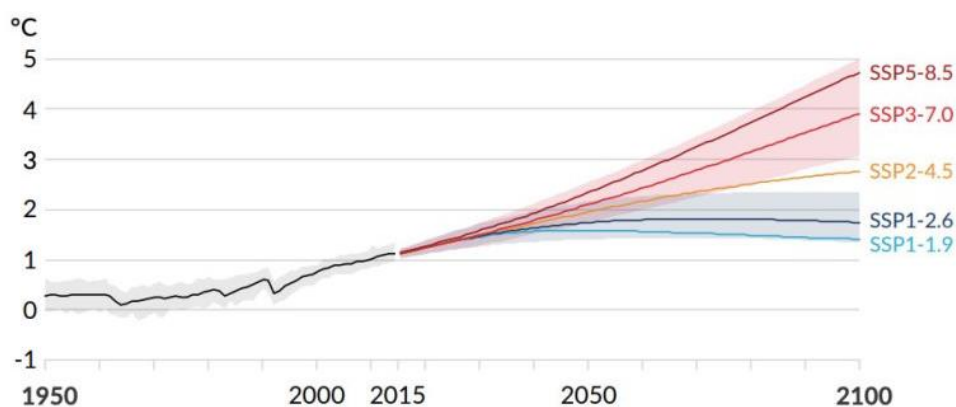
³¹ Van Vuuren, D. P., Riahi, K., Calvin, K., Dellink, R., Emmerling, J., Fujimori, S., ... & O'Neill, B. 2017. The Shared Socio-economic Pathways: Trajectories for human development and global environmental change. *Global Environmental Change*, 42, 148-152.

³² Tebaldi, C., Debeire, K., Eyring, V., Fischer, E., Fyfe, J., Friedlingstein, P., Knutti, R., Lowe, J., O'Neill, B., Sanderson, B., Van Vuuren, D., Riahi, K., Meinshausen, M., Nicholls, Z., Tokarska, K. B., Hurtt, G., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Meehl, G., ... Ziehn, T. 2021. Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth System Dynamics*, 12(1), 253–293. <https://doi.org/10.5194/esd-12-253-2021>.

Muchos aspectos del cambio climático y los impactos asociados continuarán durante siglos, incluso si se detienen las emisiones antropógenas de gases de efecto invernadero. Los riesgos de cambios abruptos o irreversibles aumentan a medida que aumenta la magnitud del calentamiento (Stocker et al., 2014)³³. Por esta razón los escenarios utilizados son los SSP que indican que el patrón de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) hacia 2100 se traducirían en un forzamiento radiativo de 4.5 (SSP2-4.5, el cual consideramos el escenario más favorable, debido a que es poco probable que ocurran los SSP1-1.9 y SSP1-2.6), 7.0 (SSP7-6.0) el escenario mediano o 8.5 (SSP5-8.5) Watts por metro cuadrado en la superficie terrestre (Figura 7) (Zhu et al., 2021)³⁴. El forzamiento radiativo es la cantidad de energía expresada en Watts por metro cuadrado que llega a la superficie terrestre por el efecto de los gases de efecto invernadero incrementados antrópicamente.

La Figura 7 representa la evolución temporal de las anomalías de temperatura global para el futuro, existen 5 escenarios que corresponden a medianas de intervalos de emisiones. Por las condiciones de emisiones actuales en el mundo, los escenarios SSP1-1.9 y SSP1-2.6 son poco realista ya que consideran disminuciones en el consumo de energía fósiles desde tiempo ya pasados. Cabe señalar que los escenarios de cambio climático consideran emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global y no local por lo que políticas locales no pueden determinar el SSP sino el conjunto de las políticas públicas y económicas en el mundo.

Figura 7. Escenarios futuros de anomalías de temperatura global por emisiones antropógenas con respecto a 1850-1900. (Allan et al., 2021).



³³ Stocker, T., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. 2014. Summary for policymakers.

³⁴ Zhu, X., Lee, S. Y., Wen, X., Ji, Z., Lin, L., Wei, Z., ... & Dong, W. 2021. Extreme climate changes over three major river basins in China as seen in CMIP5 and CMIP6. *Climate Dynamics*, 57, 1187-1205.

Debido a la incertidumbre, se recomienda usar siempre más de un MGC, más de un horizonte, más de un forzamiento. De esta forma se seleccionaron los 3 escenarios, con 6 modelos y 3 horizontes.

Para este estudio se emplearon los datos disponibles en la página de WorldClim <https://worldclim.org/data/cmip6/cmip6climate.html>. Los datos disponibles son proyecciones climáticas futuras reducidas del CMIP6. La reducción de escala y la calibración (corrección de sesgo) se realizaron con WorldClim v2.1 (Fick y Hijmans, 2017) como clima de referencia. Los autores de WorldClim procesaron valores mensuales de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación para 23 modelos climáticos globales (GCM), y para cuatro SSP: 126, 245, 370 y 585. Los valores mensuales fueron promedios de períodos de 20 años (2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100). Están disponibles las siguientes resoluciones espaciales (expresadas como minutos de un grado de longitud y latitud): 10 minutos, 5 minutos, 2,5 minutos y 30 segundos.

Los modelos utilizados en este estudio son el Modelo ACCESS-CM2 (Australian Community Climate and Earth System Simulator), el CMCC_ESM2 (*Euro-Mediterranean Centre on Climate Change*), el MPI-ESM1-2-HR (*Max Planck Institute*), el EC-Earth3 (*A European community Earth System Model*), IPSL-CM6A-LR (*Institut Pierre Simon Laplace*) y UKESM1-0-LL (*The UK Earth System Modelling project*), todos con una resolución espacial de 30" de longitud por 30" de latitud.

Se calculó el valor promedio de las variables par cada píxel del territorio municipal a partir de los valores obtenidos de todos los modelos para la creación de un ensamble para cada periodo (2021-2040, 2041-2060 y 2081-2100). La representación cartográfica se realizó entonces solamente con el ensamble de modelos a que se considera con son los datos más robustos. De igual manera, solo se tomó de los periodos 2041-2060 y 2081-2100, también se realizó un reescalado para mejorar la resolución espacial y cartografiar a escala municipal.

9.4.5.2.1 ANÁLISIS DE LA TENDENCIA DE LAS VARIABLES CLIMATOLÓGICAS MENSUALES Y ANUALES

Las tendencias de temperatura y precipitaciones se calcularon gracias al Análisis de Mann-Kendall para cada mes y a nivel anual para el periodo 1960-2019 de los datos recolectados en la estación de Tulum, no obstante, probablemente por la falta de datos, todos los análisis dieron resultados no significativos estadísticamente.

A escala del municipio, es posible calcular la anomalía de las variables climáticas entre el periodo considerado como presente para este estudio y los estudios de cambio climático (1961-1990), el cual también es la base para la cartografía climática del país, y los valores extraídos a partir de los datos anuales de WorldClim 2.1 (Fick & Hijmans, 2017) con resolución espacial de 30' de grado. Dentro de los cambios históricos recientes (Tabla 17), se nota un aumento de las temperaturas mínimas, máximas y promedias para todos los meses. Esta variación en las temperaturas mínimas lleva a una disminución de la oscilación térmica anual, y la de temperaturas medias conlleva un aumento de la evapotranspiración potencial.

El cambio en el régimen de lluvias es más caótico con 5 meses de anomalía negativa y 7 de anomalía positiva (Tabla 17). Se encuentran particularmente disminuciones en verano (-13 mm en julio y -14.9 en septiembre) y aumentos en otros (+35.7 mm en octubre). A escala anual, la anomalía de lluvia es de +34 mm, lo cual se debe a los datos altos de octubre. La ocurrencia de meses con anomalía negativa en todo el invierno y durante julio y su canícula permite entender la percepción de disminución de las lluvias por parte de las poblaciones. Como consecuencia de este comportamiento de las lluvias y temperaturas, la evapotranspiración real tiene tendencia a aumentar. La variación de ETR es siempre inferior a la de las precipitaciones por lo cual el balance hídrico responde directamente al comportamiento de las lluvias.

Tabla 17. Anomalías de las variables climáticas entre el periodo normal 1961-1990 y 1991-2020.

Mes	P (mm)	Tx (°C)	Tn (°C)	Tp (°C)	ETP (mm)	ETR (mm)	BH (mm)	OT (°C)
1	-1.559	0.593	0.657	0.625	2.105	-0.588	-0.971	-0.064
2	-5.728	1.047	0.684	0.866	3.009	-3.851	-1.877	0.363
3	-3.748	0.751	0.333	0.542	2.371	-3.201	-0.547	0.418
4	7.337	0.529	0.77	0.65	3.019	6.568	0.769	-0.241
5	10.82	0.288	0.642	0.465	2.321	6.35	4.47	-0.354
6	9.922	0.415	0.585	0.5	2.432	4.262	5.66	-0.171
7	-13.034	0.522	0.619	0.57	2.85	-6.905	-6.129	-0.097
8	0.492	0.542	0.536	0.539	2.625	0.956	-0.464	0.006
9	-14.884	0.502	0.615	0.558	2.454	-2.039	-12.845	-0.113
10	35.698	0.572	0.795	0.684	2.756	7.617	28.081	-0.223
11	13.896	0.481	0.566	0.524	1.773	7.044	6.851	-0.085
12	-4.748	0.65	0.852	0.751	2.428	-2.488	-2.26	-0.202
Anual	34.466	0.574	0.638	0.606	30.143	13.727	20.739	-0.064

(Tn: temperatura mínima, Tx: temperatura máxima, Tp: temperatura media, OT.: oscilación térmica, P: precipitaciones, ETP: Evapotranspiración potencial, ETR: Evapotranspiración real, BH: balance hídrico).

Cambios proyectados para el clima futuro

El clima y el ciclo hidrológico están estrechamente relacionados, de tal manera que los incrementos en la temperatura y la variación en la precipitación esperados en los escenarios más probables de cambio climático tendrá un impacto importante en la disponibilidad de los recursos hídricos de todos los rincones del mundo y, de mayor interés para nosotros, en las zonas rurales vulnerables de México (Martínez-Austria et al, 2012).

En el municipio de Tulum, consistentemente con las proyecciones realizadas en la Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional, en el futuro cercano (2041-2060) como el más lejano (2081-2100), todos los modelos analizados en los 3 escenarios proyectan un incremento de las temperaturas, unas disminuciones de las precipitaciones y en consecuencia del balance hídrico (Tabla 18) llevando a cambios en los tipos de climas.

Tabla 18. Valores promedios de los principales elementos climáticos en el municipio de Tulum para el presente y las estimaciones.

	Periodo	P (mm)	T prom (°C)	ETP (mm)	ETR (mm)	BH (mm)	OTD (°C)	OT (°C)
	1991-2020	1208.17	26.04	1583.43	879.22	328.95	11.87	4.73
ssp2-4.5	2021-2040	1167.95	26.79	1621.95	872.77	295.18	11.88	4.69
ssp2-4.5	2041-2060	1165.26	27.45	1655.33	875.30	289.96	11.89	4.69
ssp2-4.5	2081-2100	1165.75	28.30	1698.44	878.23	287.52	11.90	4.70
ssp3-7.0	2021-2040	1183.30	26.78	1621.05	877.55	305.75	11.86	4.68
ssp3-7.0	2041-2060	1155.97	27.60	1662.77	870.83	285.15	11.89	4.69
ssp3-7.0	2081-2100	1065.82	29.39	1754.00	832.04	233.78	11.93	4.94
ssp5-8.5	2021-2040	1169.16	26.87	1625.75	871.68	297.48	11.86	4.63
ssp5-8.5	2041-2060	1121.94	27.80	1673.15	857.11	264.83	11.92	4.81
ssp5-8.5	2081-2100	1002.79	30.24	1796.96	804.41	198.38	12.04	5.19

(T. prom: temperatura media, P: precipitaciones, ETP: Evapotranspiración potencial, ETR: Evapotranspiración real, BH: Balance hídrico, OTD (Oscilación térmica diaria), OT (oscilación térmica anual)).

Tipos de climas

En función de los escenarios y periodos considerados con el ensamble de modelos, se pueden identificar cambios en los tipos de climas. Particularmente, se presenta el clima Ax'(w0) con temperatura media anual mayor de 22°C, subhúmedo con régimen de lluvias intermedio, y porcentaje de lluvia invernal menor a 18%, una humedad baja con coeficiente P/T menos a 43.2. También, en totalidad la zona conoce un periodo de canícula, sequía intra-estival (w'').

Con el aumento del forzamiento radiativo y el tiempo, el clima $Ax'(w1)$ se ve progresivamente remplazado por $Ax'(w0)$, el más seco de los climas cálidos subhúmedos de lluvias intermedias (Figura 8 a Figura 13). Esto denota un aumento de condiciones secas por aumento de la radiación. De hecho, $Ax'(w1)$ es remplazado en totalidad para 2081-2100 con SSP3-7.0 y 5-8.5 (Figura 11 a Figura 13). También, para estos escenarios, la zona isothermal se reduce indicando un aumento en la amplitud térmica anual, ósea un aumento de las temperaturas de meses cálidos mayor al de los meses fríos, esto puede ser un identificador de olas de calor.

Figura 8. Tipos de climas para 2041-2060, con SSP2-4.5.

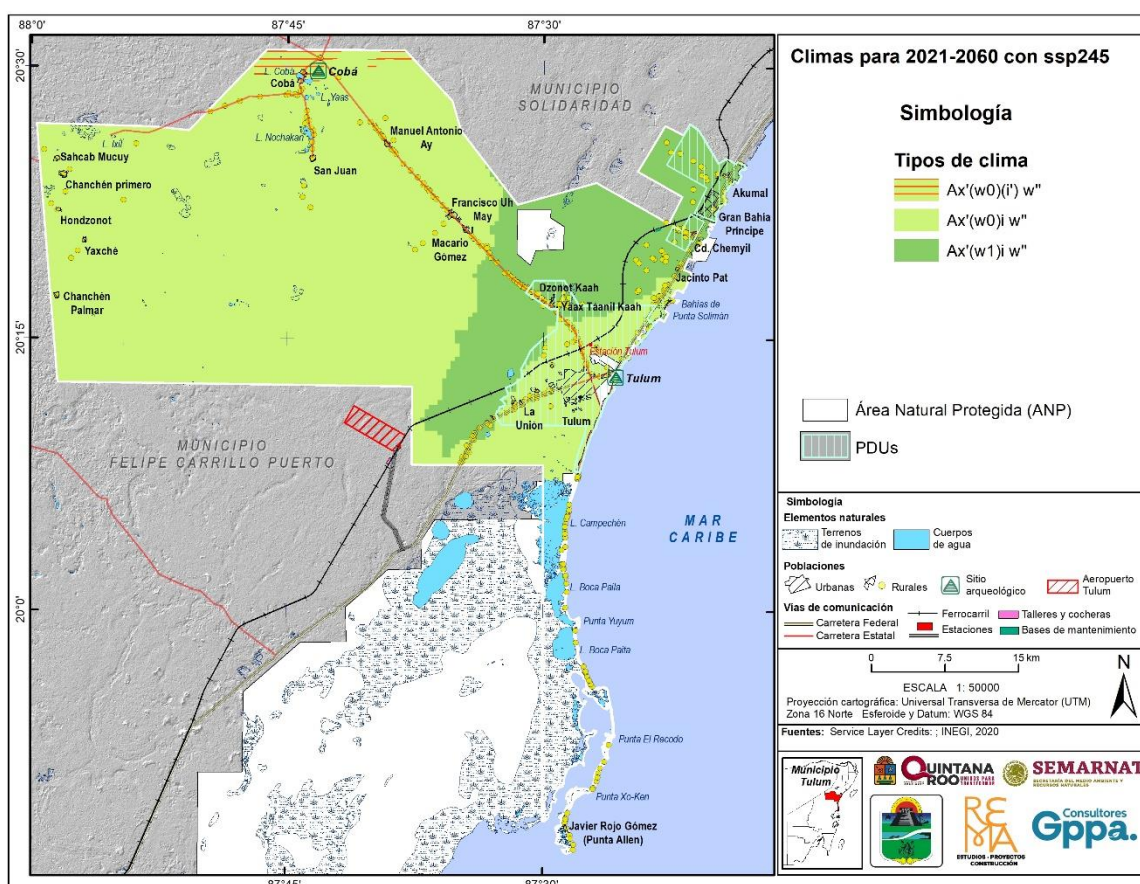


Figura 9 Tipos de climas para 2081-2100, con SSP2-4.5.

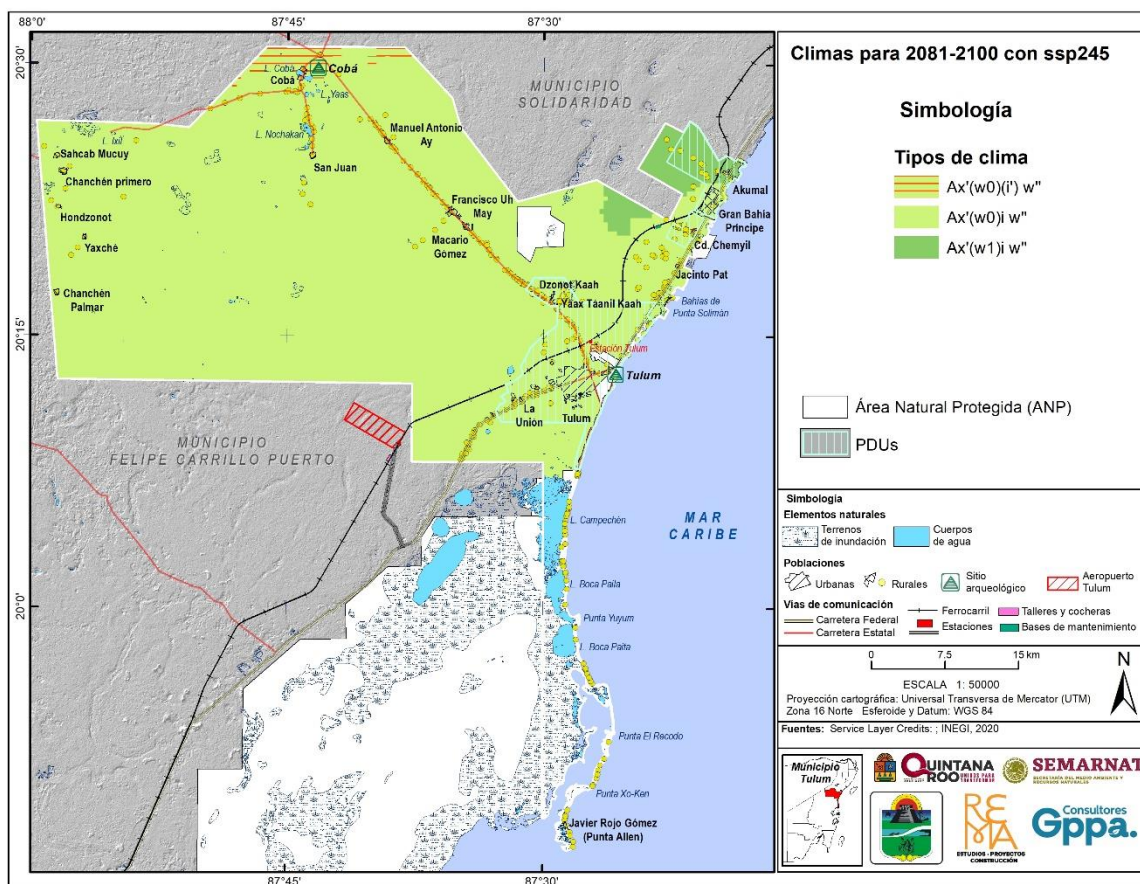


Figura 10. Tipos de climas para 2041-2060, con SSP3-7.0.

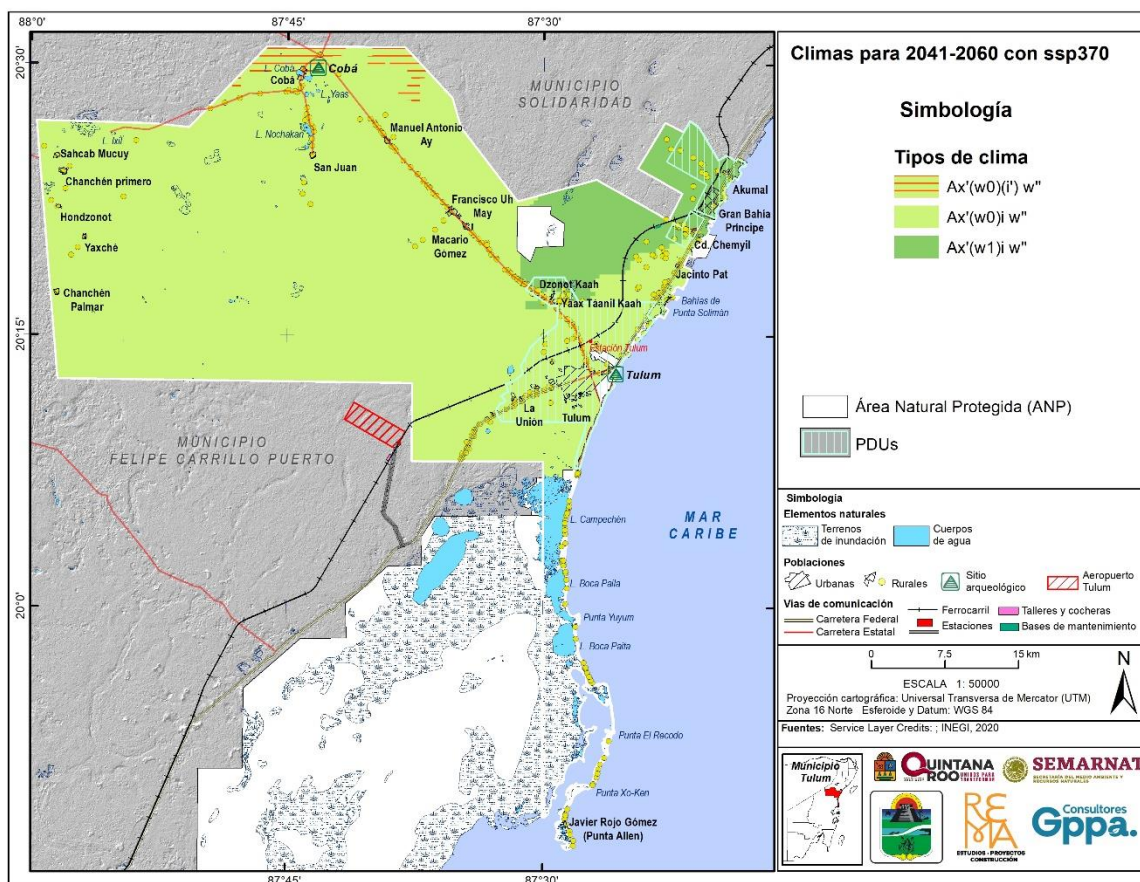


Figura 11. Tipos de climas para 2081-2100, con SSP3-7.0.

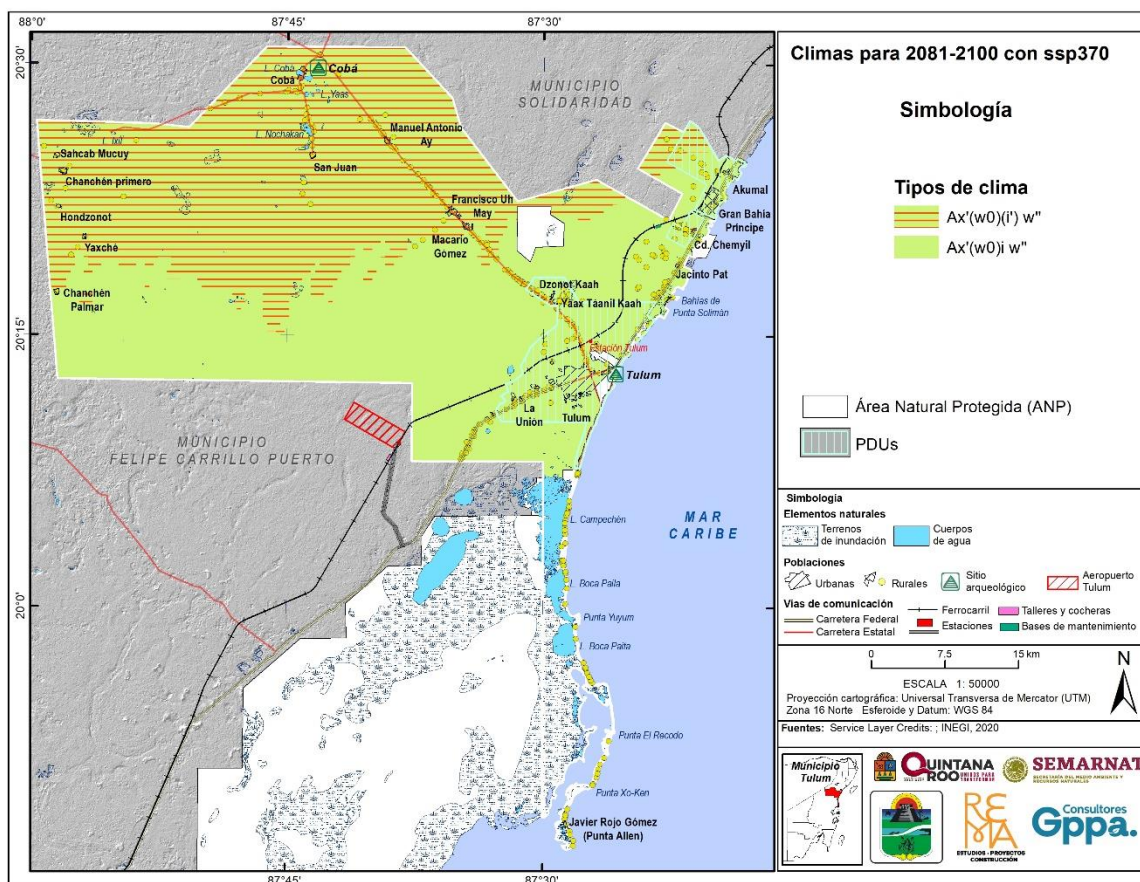


Figura 12. Tipos de climas para 2041-2060, con SSP5-8.5.

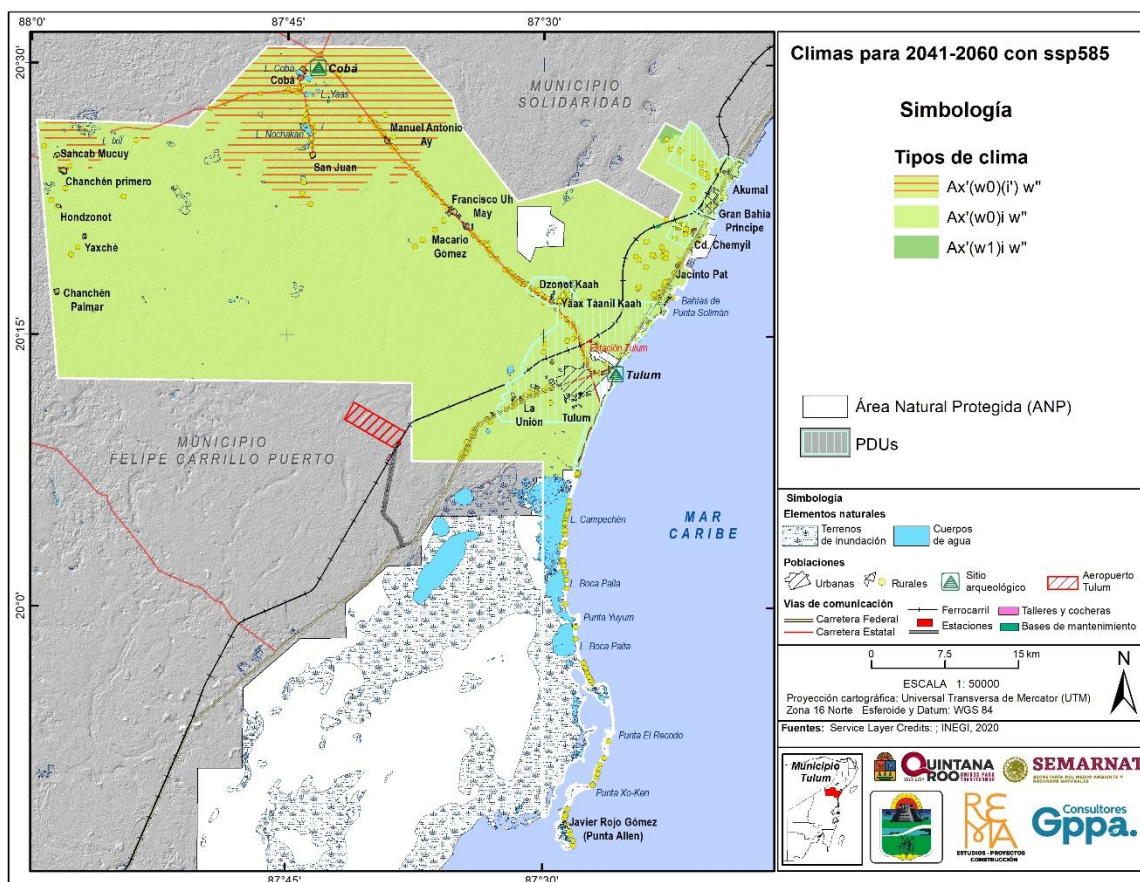
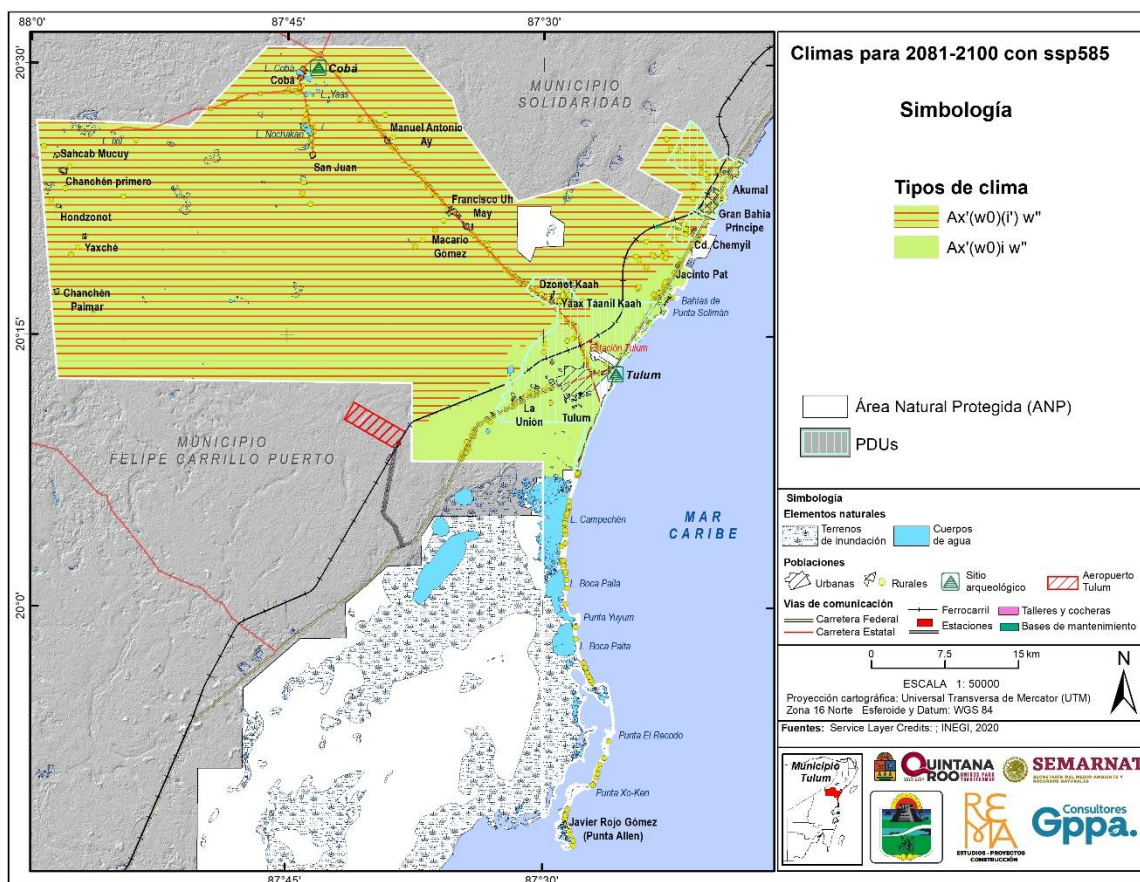


Figura 13. Tipos de climas para 2081-2100, con SSP5-8.5.



Temperaturas

Todos los modelos probados prevén aumentos de temperaturas mínimas como máximas para todos los meses, sea para 2021-2040, para 2041-2060 como para 2081-2100 con de +0.5 a +1.1°C para el primer periodo, de +1.2 a +1.9°C para el segundo periodo, y de +2 a 4.5°C para el tercer periodo en lo que concierne a las temperaturas medias, marcando un incremento regular de +0.5 a +1°C por 20 años dependiendo del forzamiento radiativo (Tabla 19).

Comparando los valores de la Tabla 19 con la Tabla 20 es notable que los valores de anomalías tienden a ser inferiores en la segunda por 0.1°C. En consecuencia, al contrario, los valores de temperaturas máximas son los que compensan esto (Tabla 21) dando valor de hasta +4.9°C en agosto para SSP5-8.5 al final del siglo.

Tabla 19. Anomalías de temperaturas medias en el municipio con respecto a 1991-2020.

°C	2021-2040			2051-2060			2081-2100		
Mes	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
1	0.8	0.8	0.9	1.5	1.7	1.8	2.3	3.4	4.1
2	0.5	0.5	0.6	1.2	1.3	1.5	2.0	3.0	3.8
3	0.8	0.8	0.8	1.5	1.6	1.8	2.3	3.4	4.2
4	0.7	0.6	0.7	1.3	1.4	1.6	2.2	3.2	3.9
5	0.9	0.9	1.0	1.5	1.6	1.8	2.3	3.3	4.1
6	0.8	0.7	0.8	1.4	1.6	1.8	2.3	3.4	4.2
7	0.7	0.7	0.9	1.4	1.6	1.9	2.3	3.6	4.5
8	0.8	0.8	0.8	1.4	1.6	1.9	2.3	3.6	4.5
9	0.8	0.8	0.9	1.4	1.6	1.8	2.3	3.5	4.4
10	0.7	0.7	0.8	1.3	1.5	1.7	2.2	3.3	4.3
11	0.9	1.0	1.1	1.7	1.7	1.9	2.5	3.5	4.4
12	0.7	0.7	0.7	1.3	1.5	1.6	2.2	3.2	3.9
Año	0.8	0.7	0.8	1.4	1.6	1.8	2.3	3.4	4.2

Tabla 20. Anomalías de temperaturas mínimas en el municipio con respecto a 1991-2020.

°C	2021-2040			2051-2060			2081-2100		
Mes	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
1	0.7	0.7	0.9	1.4	1.6	1.7	2.2	3.3	3.9
2	0.6	0.5	0.7	1.2	1.3	1.5	2.0	3.0	3.8
3	0.9	0.9	1.0	1.6	1.7	1.9	2.4	3.5	4.3
4	0.6	0.6	0.7	1.3	1.4	1.6	2.2	3.2	3.9
5	0.8	0.8	0.9	1.4	1.5	1.7	2.2	3.3	4.0
6	0.8	0.8	0.9	1.4	1.5	1.8	2.2	3.3	4.1
7	0.6	0.6	0.7	1.3	1.5	1.7	2.2	3.3	4.1
8	0.7	0.7	0.8	1.4	1.5	1.8	2.3	3.4	4.3
9	0.7	0.8	0.8	1.4	1.5	1.7	2.2	3.3	4.2
10	0.6	0.7	0.7	1.3	1.5	1.7	2.1	3.3	4.2
11	1.0	1.1	1.2	1.8	1.9	2.1	2.7	3.7	4.6
12	0.8	0.8	0.8	1.4	1.6	1.7	2.3	3.3	4.0
Año	0.8	0.7	0.8	1.4	1.6	1.7	2.3	3.3	4.1

Para todos los periodos y escenarios, el incremento de temperaturas máximas es mayor para los meses más cálidos que para el promedio del año (Tabla 21). Este hecho es el responsable del aumento de la oscilación térmica en el territorio, confirmando la ocurrencia de eventos muy calurosos en el futuro.

En los mapas (Figura 14 a Figura 19) se puede ver que las temperaturas del futuro respetaran los mismos patrones espaciales que las temperaturas del presente.

Tabla 21. Anomalías de temperaturas máximas en el municipio con respecto a 1991-2020.

°C	2021-2040			2051-2060			2081-2100		
Mes	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
1	0.9	0.9	1.0	1.6	1.8	1.9	2.4	3.5	4.2
2	0.5	0.4	0.5	1.2	1.2	1.5	2.0	2.9	3.8
3	0.7	0.6	0.7	1.4	1.5	1.7	2.2	3.3	4.1
4	0.7	0.6	0.7	1.4	1.4	1.7	2.2	3.2	3.9
5	1.0	0.9	1.1	1.6	1.6	1.9	2.4	3.4	4.2
6	0.8	0.7	0.8	1.4	1.6	1.9	2.3	3.5	4.4
7	0.8	0.8	1.0	1.6	1.8	2.0	2.5	3.9	4.9
8	0.8	0.8	0.9	1.4	1.7	1.9	2.4	3.7	4.7
9	0.8	0.9	0.9	1.5	1.7	1.9	2.4	3.6	4.7
10	0.7	0.7	0.8	1.4	1.6	1.8	2.2	3.4	4.4
11	0.8	0.8	0.9	1.5	1.6	1.8	2.3	3.3	4.2
12	0.6	0.6	0.6	1.2	1.4	1.5	2.1	3.1	3.9
Año	0.8	0.7	0.8	1.4	1.6	1.8	2.3	3.4	4.3

Figura 14. Temperatura promedio para 2041-2060, con SSP2-4.5.

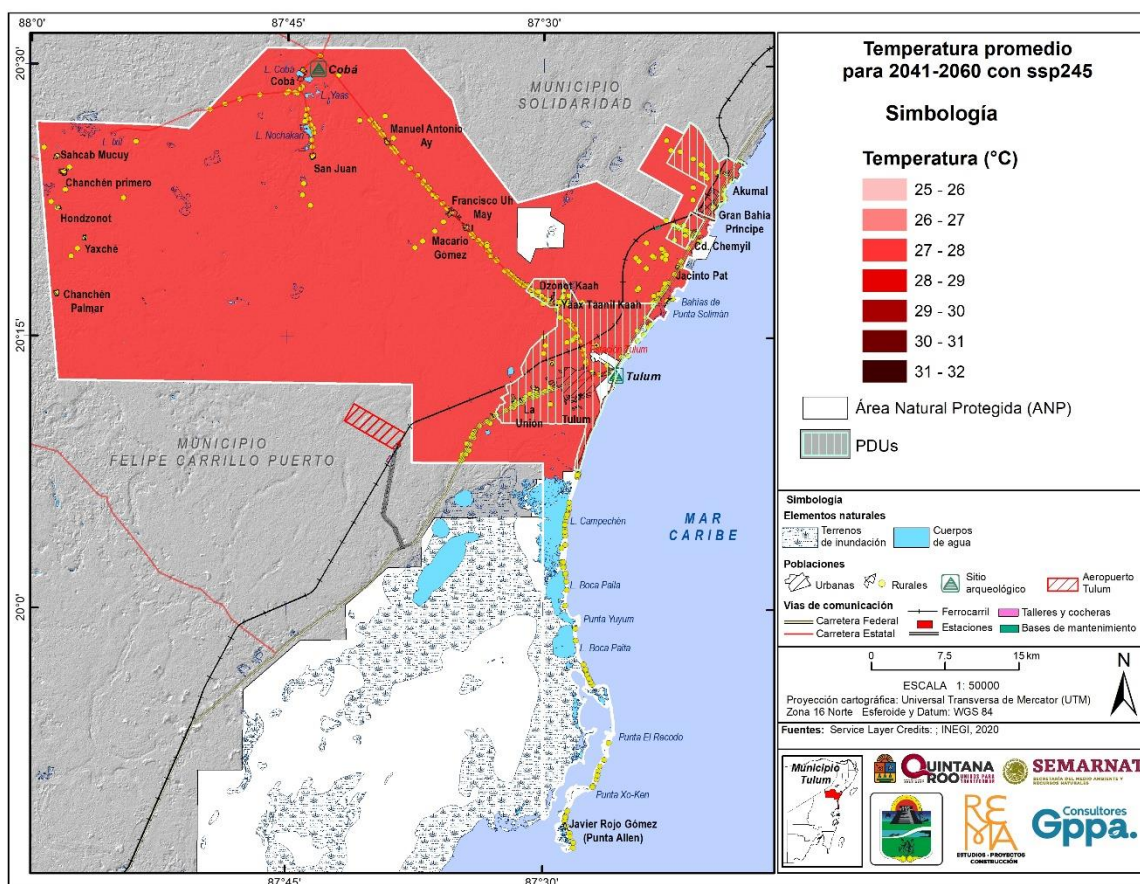


Figura 15. Temperatura promedio para 2081-2100, con SSP2-4.5.

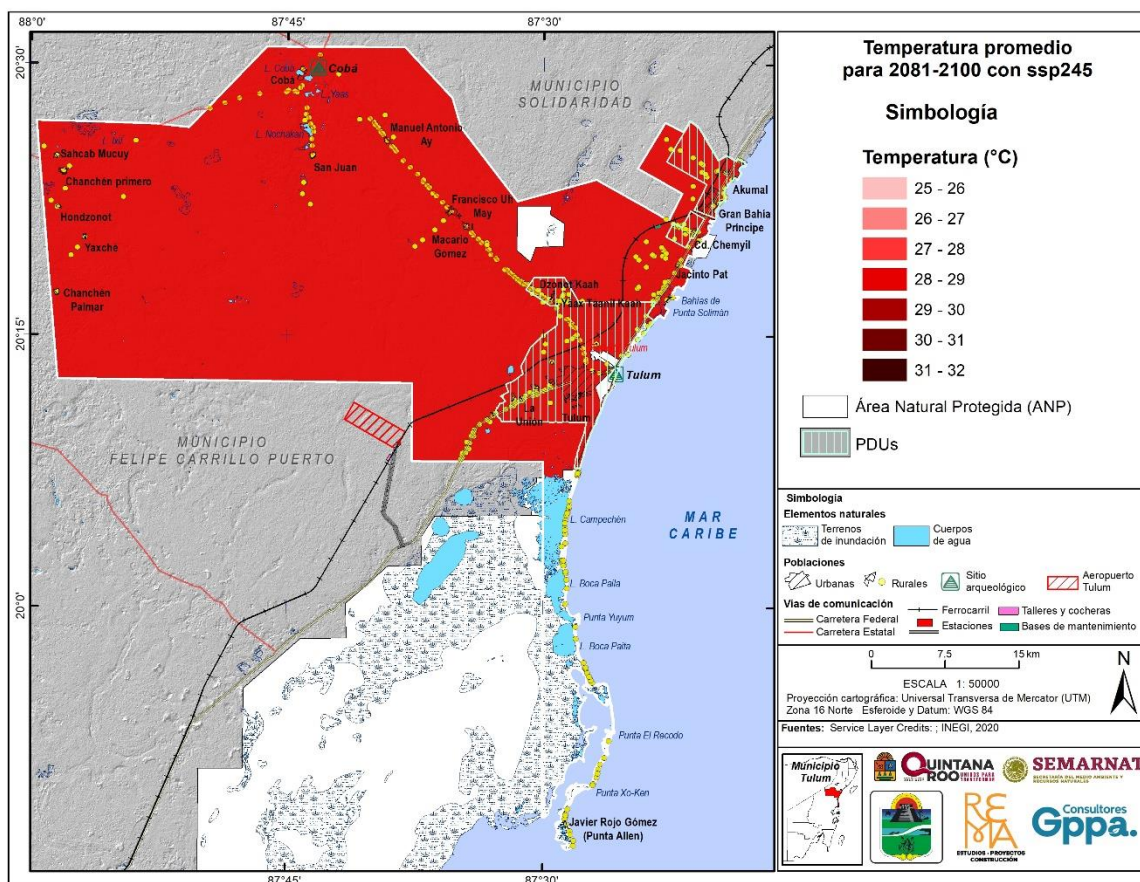


Figura 16. Temperatura promedio para 2041-2060, con SSP3-7.0.

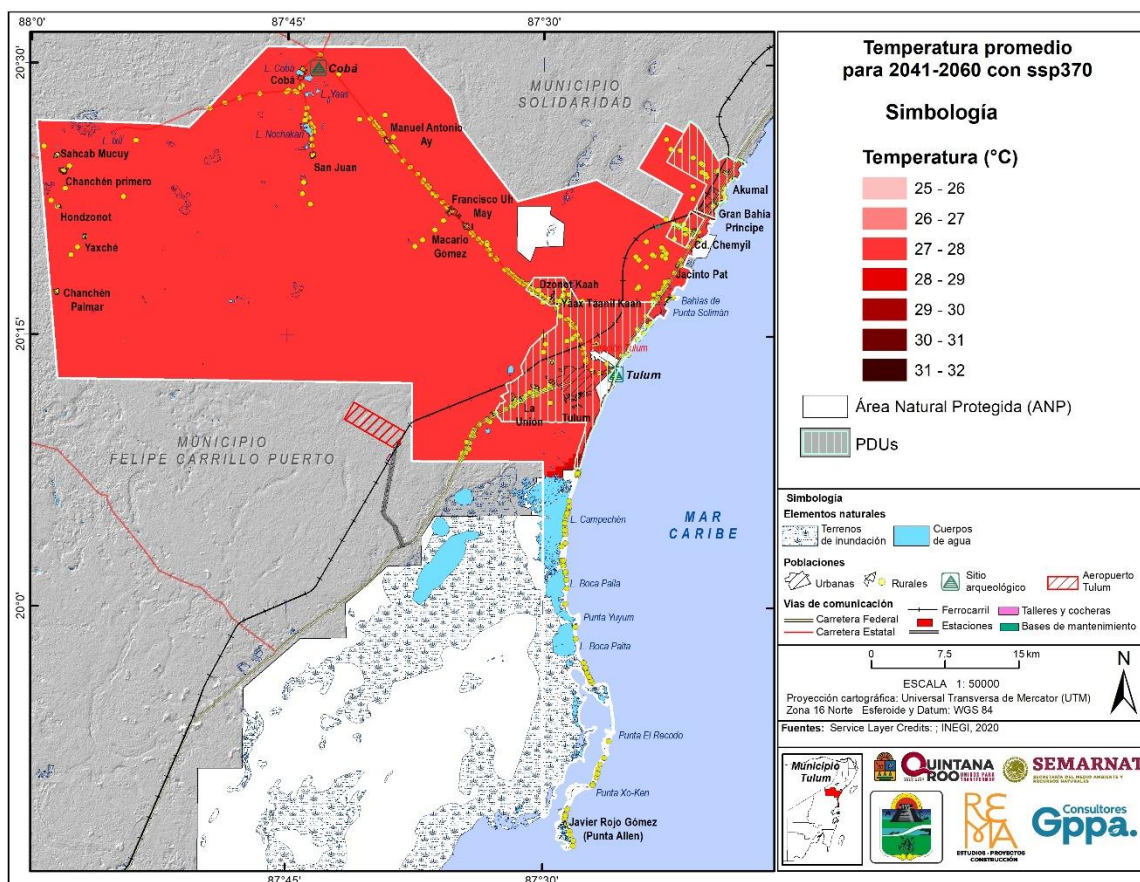


Figura 17. Temperatura promedio para 2081-2100, con SSP3-7.0.

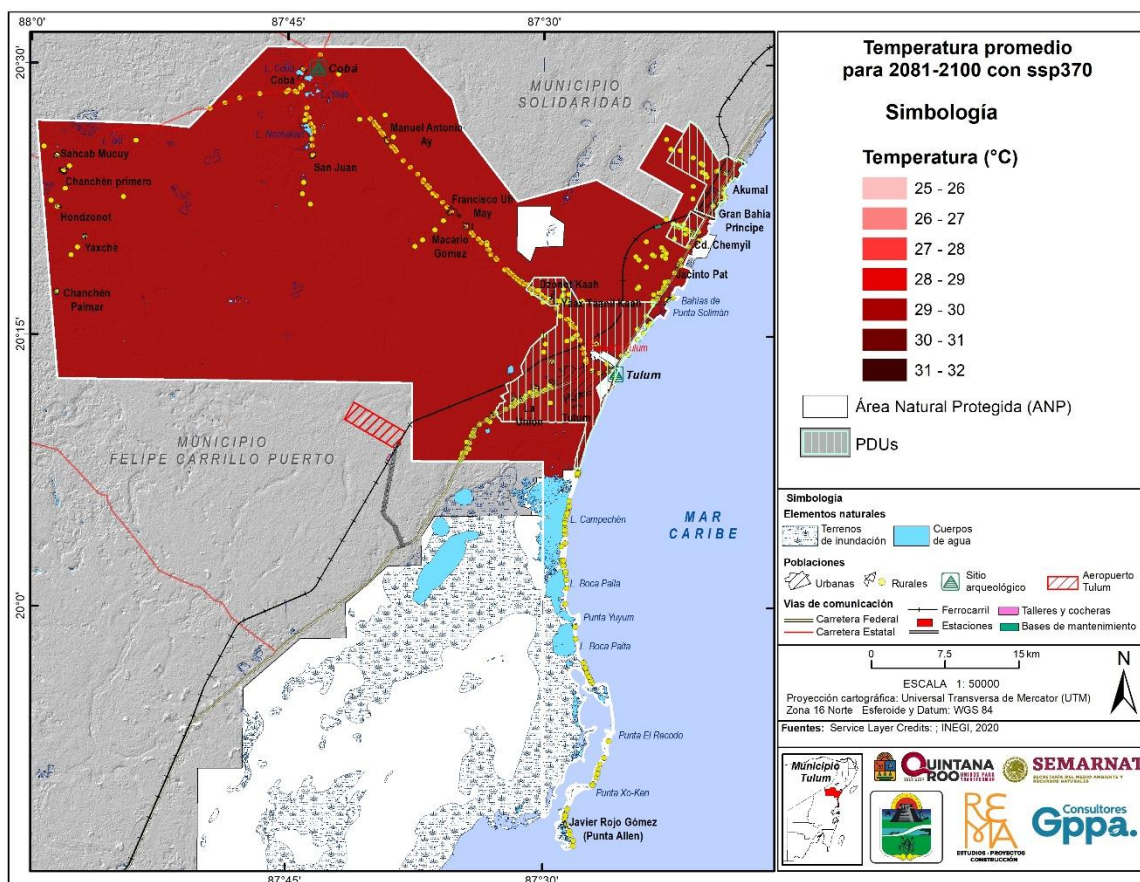


Figura 18. Temperatura promedio para 2041-2060, con SSP5-8.5.

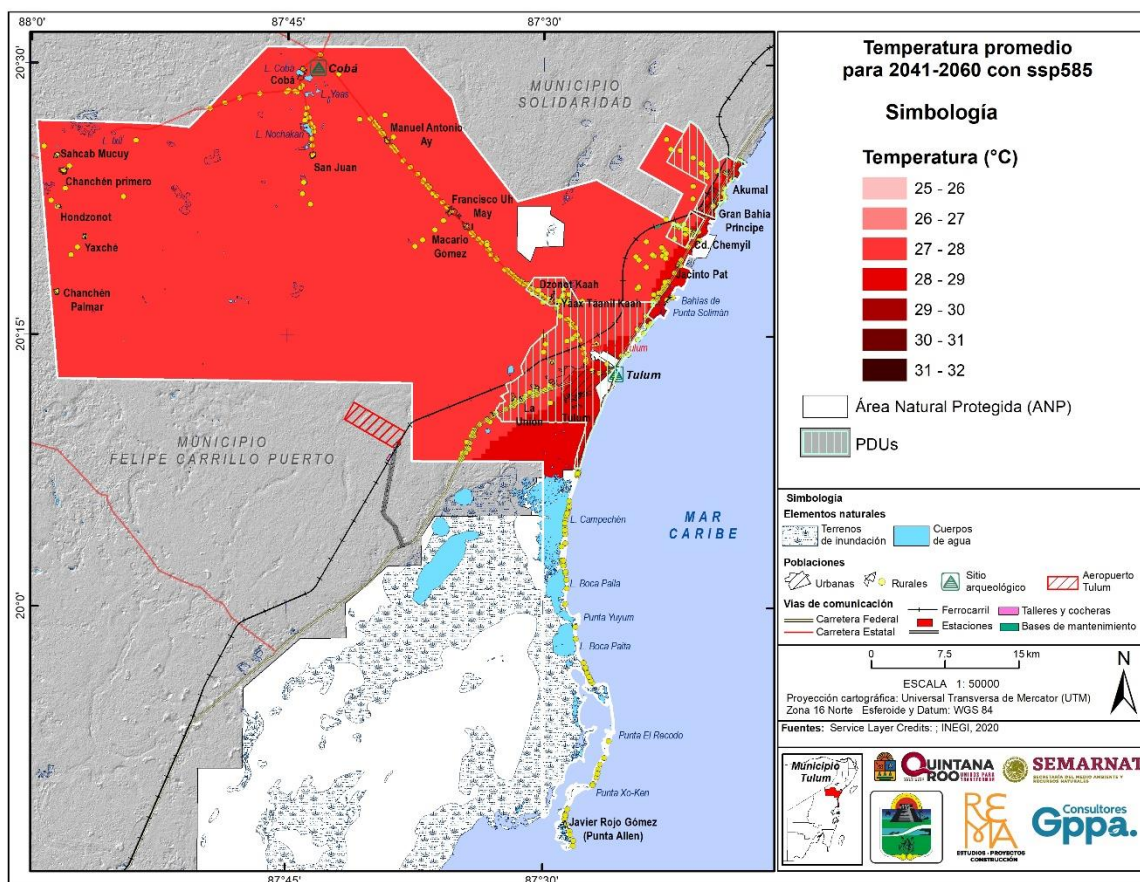
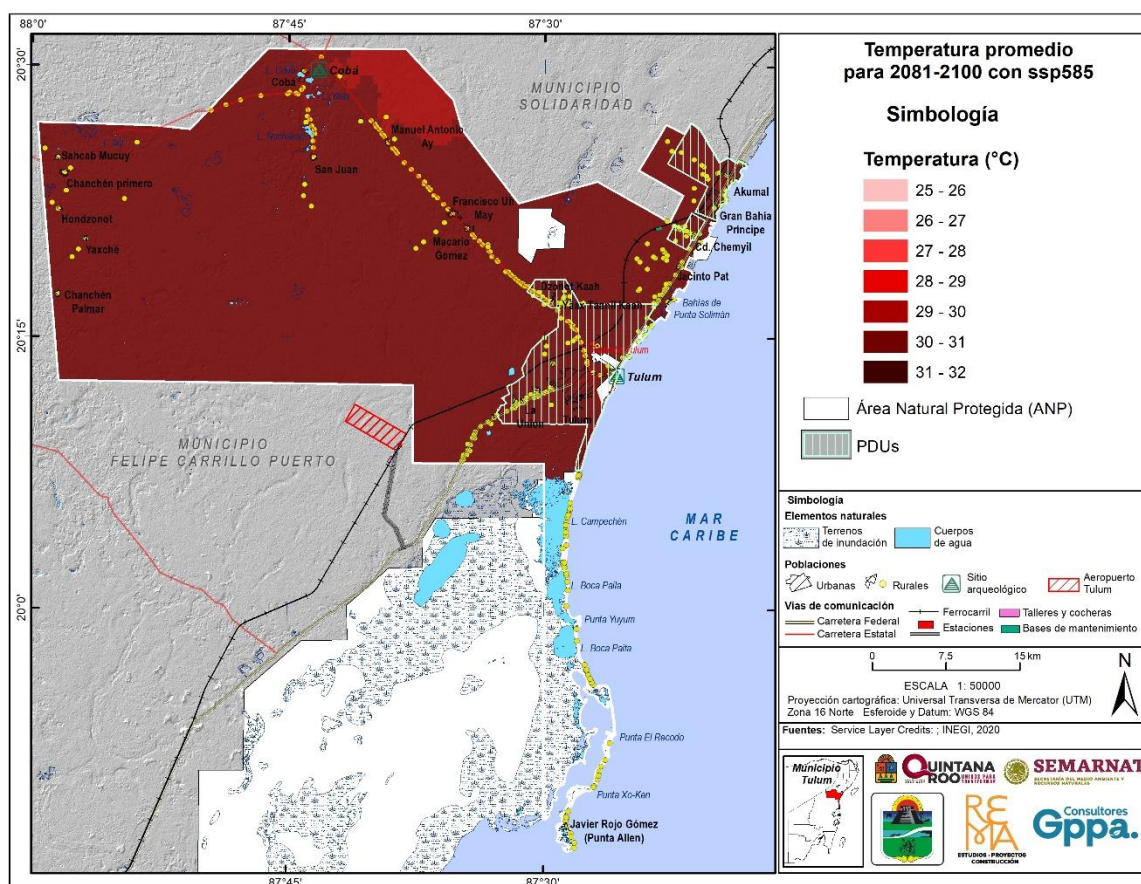


Figura 19. Temperatura promedio para 2081-2100, con SSP5-8.5.



Precipitaciones

Los cambios estimados al régimen de lluvias son muy variables dependiendo de los modelos. La mayoría de las predicciones prevén disminuciones de las lluvias en primavera y verano y aumento fin de año. Las disminuciones más abundantes se consideran para el verano, principalmente junio (hasta -57.5 mm) y agosto (hasta -40.6) (Tabla 22), pero es el periodo que tiene mayor cantidad de precipitaciones, por lo que las disminuciones de primavera son más preocupantes ya que, asociadas con los aumentos de temperatura pueden provocar condiciones de sequía grave, las cuales son problemáticas para la vegetación, las actividades agropecuarias y pueden favorecer la expansión de fuegos forestales. También, cabe resaltar que las disminuciones previstas para octubre, el mas más lluviosos son débiles con valores de -16.4 mm a +3 mm.

Tabla 22. Anomalías de precipitaciones en el municipio con respecto a 1991-2020.

(mm)	2021-2040			2051-2060			2081-2100		
Mes	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
1	1.0	0.0	1.0	0.3	0.7	-2.3	1.3	-1.3	-4.0
2	1.8	1.2	3.1	1.9	1.8	0.1	1.4	-2.1	-3.5
3	1.6	2.0	1.6	0.1	0.2	0.1	-0.2	-3.3	-3.5
4	-4.3	-3.4	-4.1	-3.7	-4.5	-5.7	-6.2	-6.8	-7.0
5	-15.0	-8.3	-16.2	-11.2	-12.4	-16.1	-16.6	-24.4	-26.7
6	-15.7	-4.4	-8.7	-19.5	-19.6	-24.7	-18.7	-43.6	-57.5
7	4.6	2.5	-1.4	-0.7	-5.4	-6.7	-1.8	-23.7	-29.7
8	-11.0	-12.4	-12.4	-11.3	-17.3	-21.0	-14.0	-31.4	-40.6
9	6.6	4.9	3.4	1.8	0.9	-3.6	-3.2	-21.4	-37.1
10	-16.4	-11.9	-13.2	-8.9	-7.1	-13.5	3.0	-1.2	-11.1
11	-0.9	-0.7	2.2	1.7	3.1	1.3	4.9	10.8	8.5
12	7.5	5.6	5.6	6.5	7.3	6.0	7.7	6.0	6.7
Año	-40.2	-24.9	-39.0	-42.9	-52.2	-86.2	-42.4	-142.4	-205.4

Los mapas de precipitaciones (Figura 20 a Figura 25) para el futuro permiten ver que no hay cambios de patrones espaciales, sino que las disminuciones lluvias afectaran todo el territorio, siendo entonces más problemáticas en las zonas que en el presente reciben menos agua.

Figura 20. Precipitaciones totales anuales para 2041-2060, con SSP2-4.5.

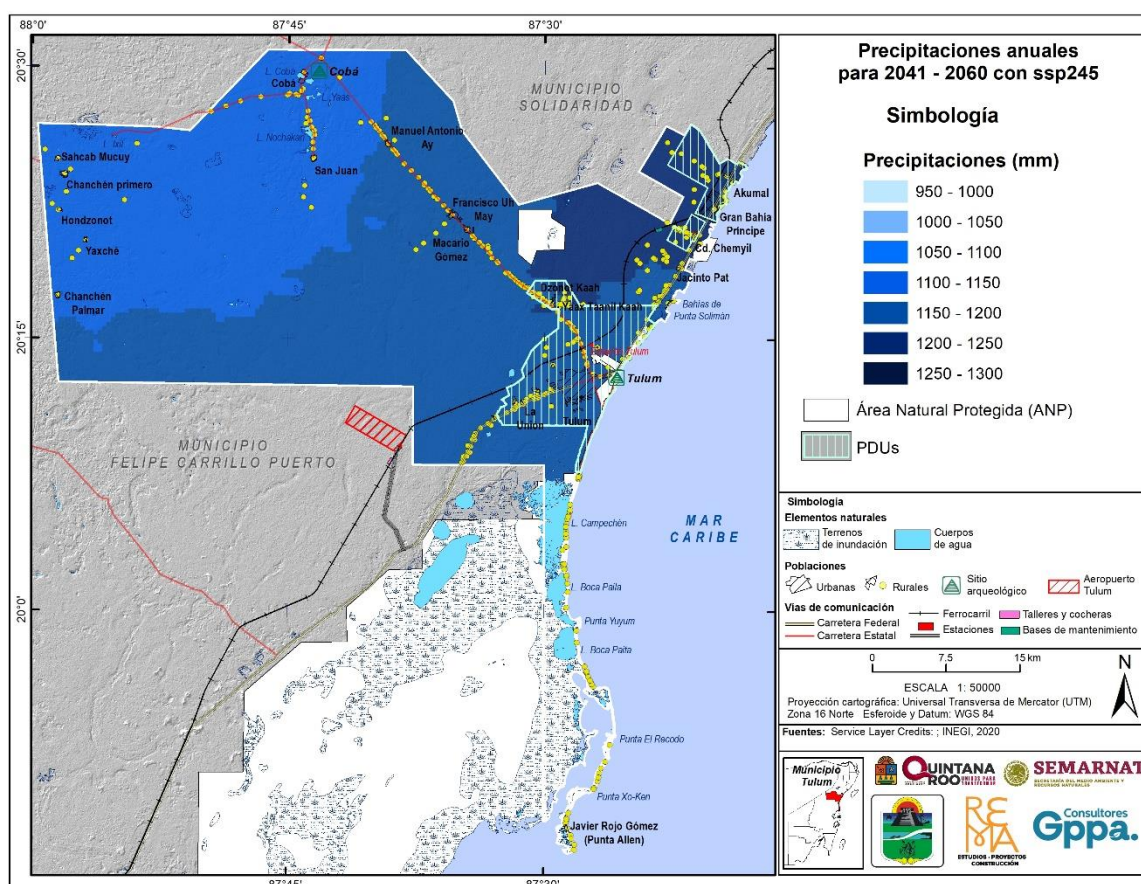


Figura 21. Precipitaciones totales anuales para 2081-2100, con SSP2-4.5.

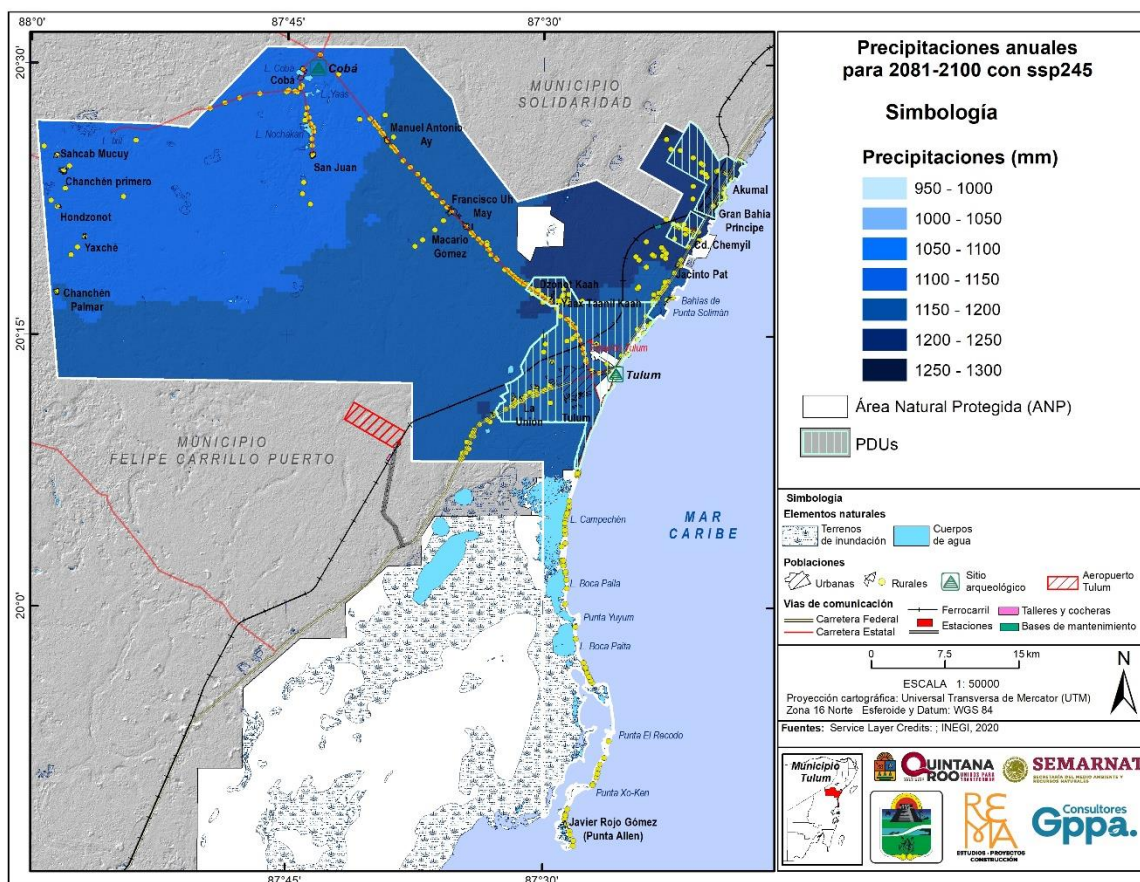


Figura 22. Precipitaciones totales anuales para 2041-2060, con SSP3-7.0.

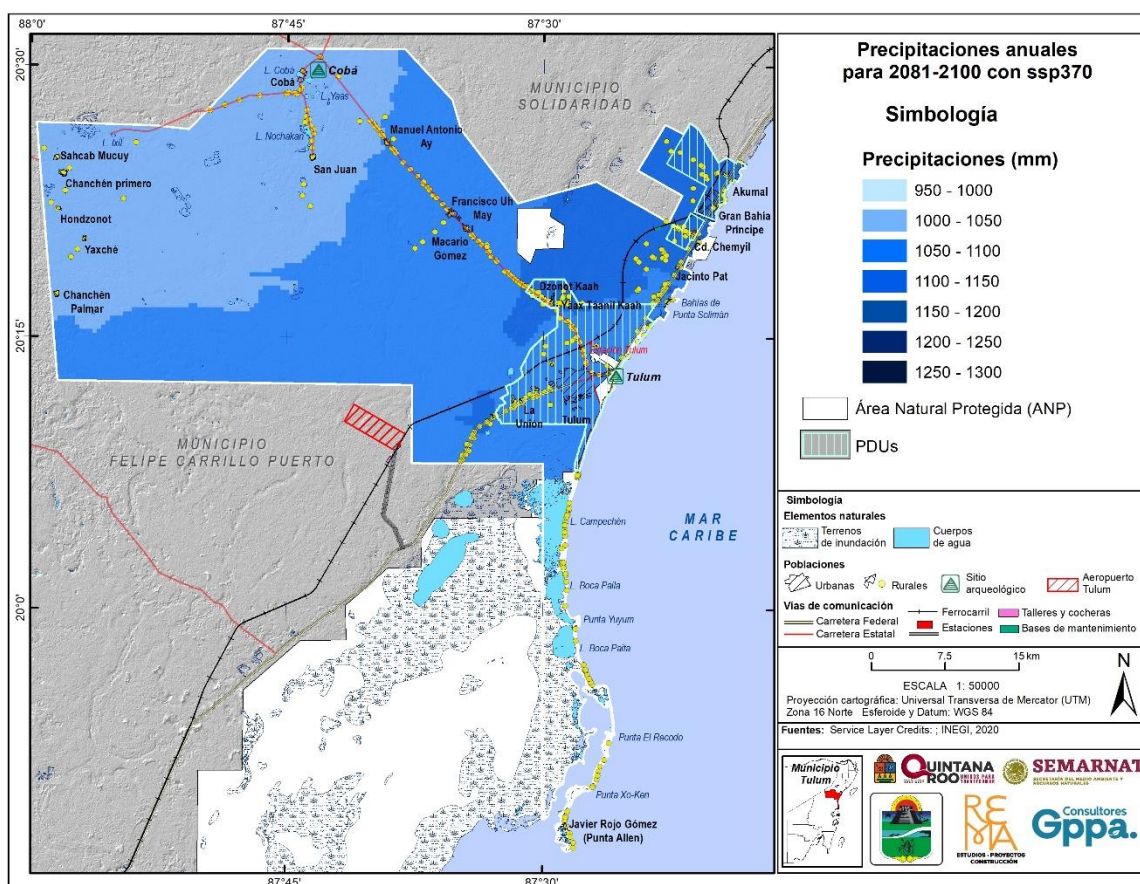


Figura 23. Precipitaciones totales anuales para 2081-2100, con SSP3-7.0.

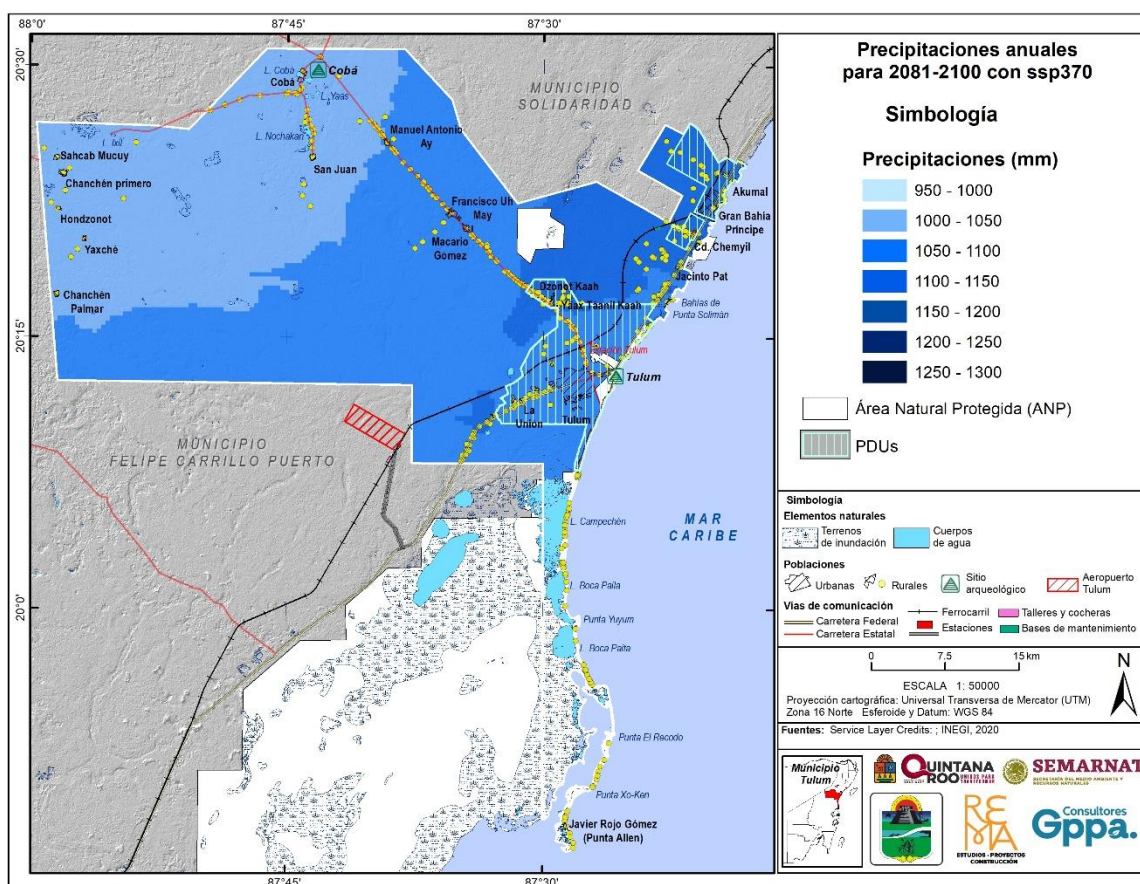


Figura 24. Precipitaciones totales anuales para 2041-2060, con SSP5-8.5.

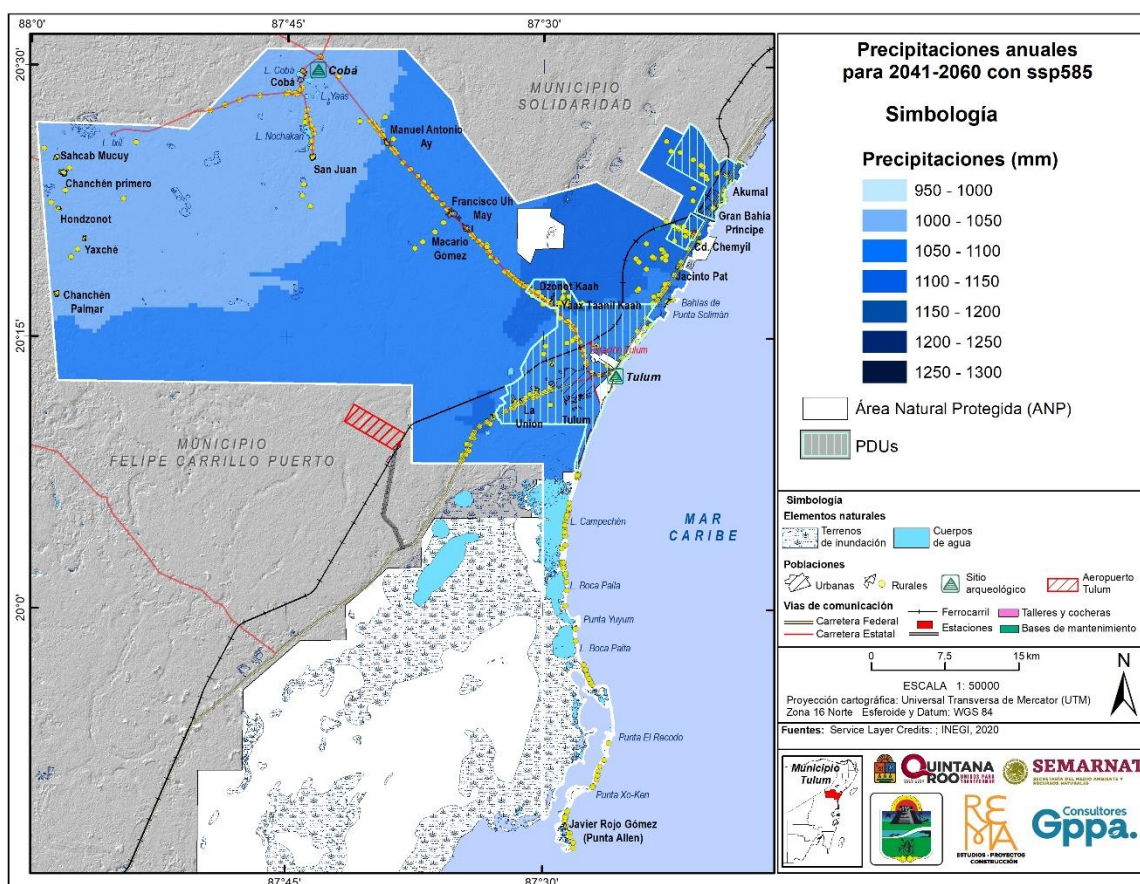
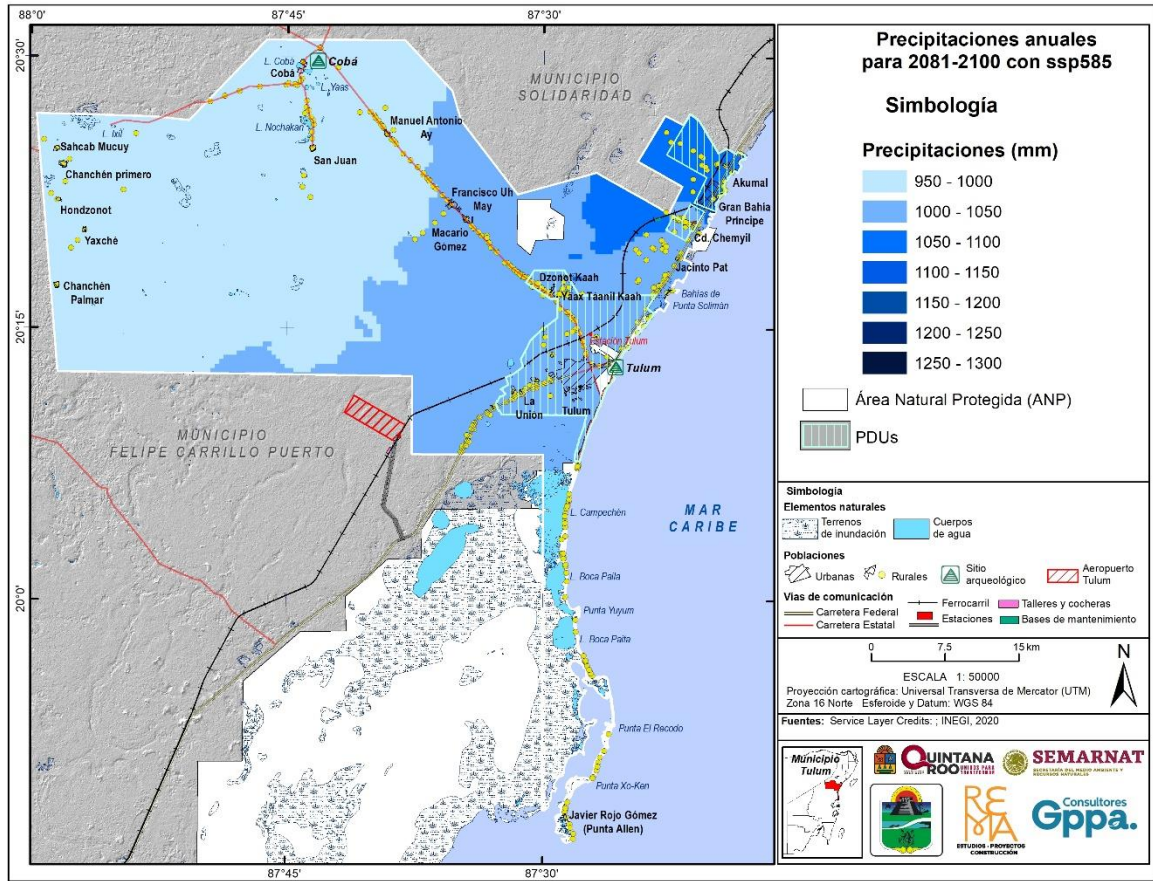


Figura 25. Precipitaciones totales anuales para 2081-2100, con SSP5-8.5.



Evapotranspiración

Los pronósticos de evapotranspiración potencial corresponden obviamente a los de las temperaturas con aumento para todas las fechas y todos los escenarios (Tabla 23).

Tabla 23. Anomalías de evapotranspiración potencial en el municipio con respecto a 1991-2020.

(mm)	2021-2040			2051-2060			2081-2100		
Mes	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
1	2.8	2.7	3.2	4.9	5.6	6.0	7.9	11.4	13.7
2	1.8	1.7	2.1	4.2	4.5	5.2	7.0	10.4	13.2
3	3.4	3.4	3.7	6.5	7.0	8.0	10.1	14.7	18.3
4	3.1	2.9	3.2	6.2	6.5	7.6	10.1	14.8	18.2
5	4.5	4.3	4.9	7.4	7.9	9.0	11.7	16.5	20.3
6	3.9	3.5	4.1	6.8	7.7	8.8	10.9	16.5	20.6
7	3.7	3.6	4.3	7.2	8.2	9.3	11.6	17.9	22.5
8	3.8	3.7	4.1	6.9	7.9	9.1	11.2	17.4	22.0
9	3.4	3.5	3.8	6.2	7.1	8.1	10.1	15.2	19.5
10	2.8	2.8	3.2	5.5	6.2	6.9	8.8	13.5	17.4
11	3.1	3.3	3.6	5.7	5.9	6.5	8.5	11.9	15.0
12	2.2	2.3	2.3	4.3	5.0	5.2	7.1	10.3	12.8
Año	38.5	37.6	42.3	71.9	79.3	89.7	115.0	170.6	213.5

En cuanto a la evapotranspiración real (Tabla 24) aumenta de octubre a diciembre, cuando las precipitaciones son elevadas o tienden a aumentar significativamente, pero disminuye de abril a agosto, estas disminuciones, provienen de las disminuciones de las precipitaciones. Se reduce la ETR porque hay menos agua disponible para evaporar.

Tabla 24. Anomalías de evapotranspiración real en el municipio con respecto a 1991-2020.

(mm)	2021-2040			2051-2060			2081-2100		
Mes	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
1	1.0	0.3	1.1	0.9	1.2	-0.8	1.8	0.6	-1.0
2	1.4	1.0	2.4	1.7	1.6	0.4	1.5	-1.0	-2.1
3	1.5	1.9	1.5	0.2	0.3	0.3	0.0	-2.7	-2.9
4	-3.7	-2.9	-3.5	-3.1	-3.8	-4.9	-5.3	-5.8	-6.0
5	-7.8	-4.2	-8.6	-5.4	-5.9	-8.0	-8.1	-12.7	-14.0
6	-4.5	-1.0	-2.2	-5.7	-5.6	-7.6	-5.2	-16.2	-24.2
7	3.1	1.9	-0.5	0.4	-2.6	-3.2	0.1	-15.0	-19.7
8	-4.0	-4.8	-4.5	-3.4	-6.3	-7.7	-3.6	-12.4	-18.1
9	2.7	2.3	2.0	2.6	2.4	1.8	2.6	-1.1	-5.5
10	-1.1	-0.3	-0.6	1.4	2.3	1.4	5.4	6.6	5.9
11	0.1	0.4	1.8	1.9	2.8	1.9	4.1	7.6	7.1
12	4.8	3.7	3.6	4.5	5.1	4.4	5.6	5.0	5.7
Año	-6.5	-1.7	-7.5	-3.9	-8.4	-22.1	-1.0	-47.2	-74.8

Balance hídrico

El excedente de agua que se ve reflejado en los valores de balance hídrico tiende a disminuir (Tabla 25) por la reducción de las precipitaciones y el aumento de la evapotranspiración. Estas disminuciones, expresadas en mm son bajas para la primavera y el invierno, alta para el verano. Cabe resaltar que solamente diciembre conoce un aumento para todos los periodos y escenarios. También, las variaciones se ven importantes y graduales en los mapas realizados con datos anuales (Figura 26 a Figura 31), respetando el patrón espacial de las lluvias y disminuyendo de manera homogéneas los totales de excedente hídricos.

Tabla 25. Anomalías de balance hídrico en el municipio con respecto a 1991-2020.

(mm)	2021-2040			2051-2060			2081-2100		
Mes	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
1	0.0	-0.3	0.0	-0.6	-0.5	-1.6	-0.6	-2.0	-3.1
2	0.3	0.2	0.6	0.2	0.2	-0.3	-0.1	-1.0	-1.4
3	0.1	0.2	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.5	-0.6
4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.6	-0.8	-0.9	-1.0	-1.0
5	-7.1	-4.2	-7.6	-5.9	-6.5	-8.2	-8.5	-11.7	-12.7
6	-11.2	-3.5	-6.5	-13.8	-14.1	-17.1	-13.5	-27.5	-33.3
7	1.4	0.6	-0.9	-1.1	-2.7	-3.5	-2.0	-8.7	-9.9
8	-7.0	-7.5	-7.9	-7.9	-11.0	-13.2	-10.4	-18.9	-22.5
9	3.8	2.6	1.4	-0.8	-1.6	-5.5	-5.8	-20.3	-31.5
10	-15.3	-11.6	-12.6	-10.3	-9.4	-14.9	-2.4	-7.8	-17.0
11	-1.1	-1.2	0.4	-0.2	0.3	-0.6	0.8	3.2	1.5
12	2.7	1.9	1.9	2.0	2.2	1.7	2.1	1.0	1.0
Año	-33.8	-23.2	-31.5	-39.0	-43.8	-64.1	-41.4	-95.2	-130.6

Figura 26. Balance hídrico anual para el periodo 2041-2080 con SSP2-4.5.

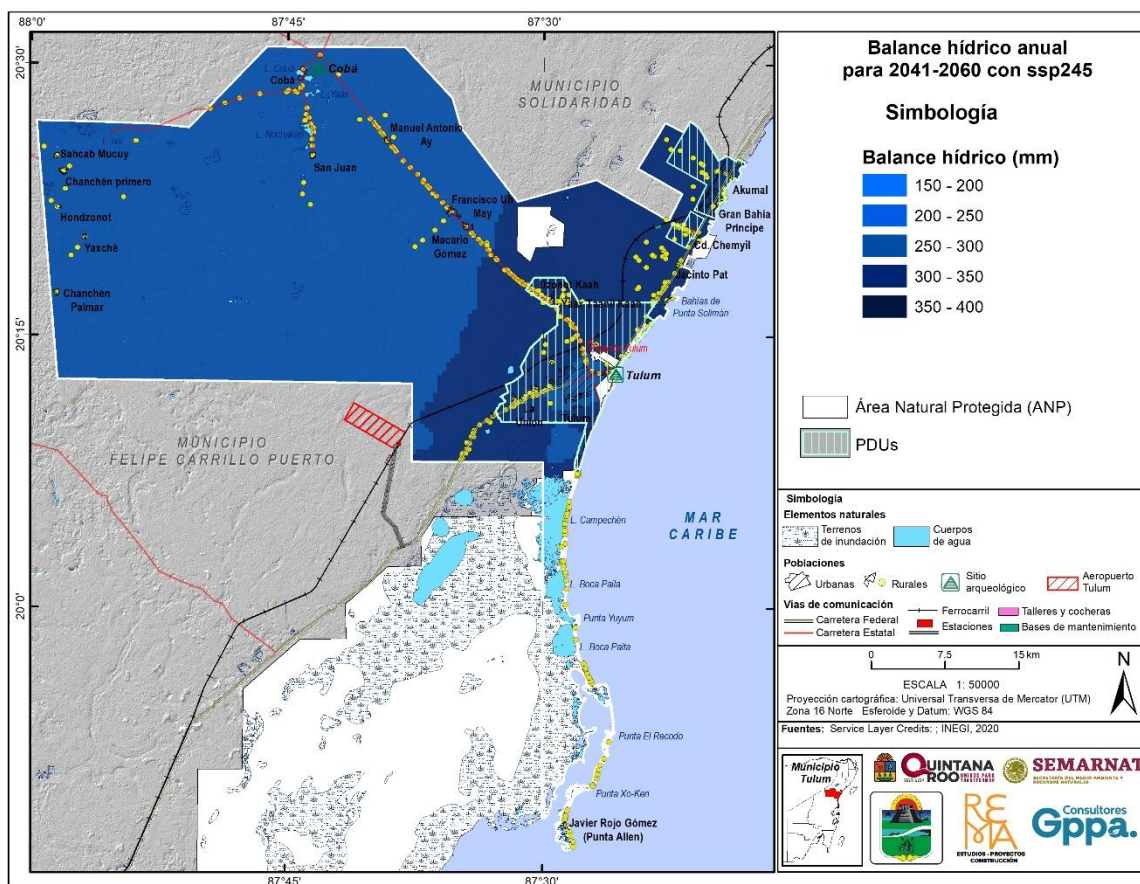


Figura 27. Balance hídrico anual para el periodo 2081-2100 con SSP2-4.5.

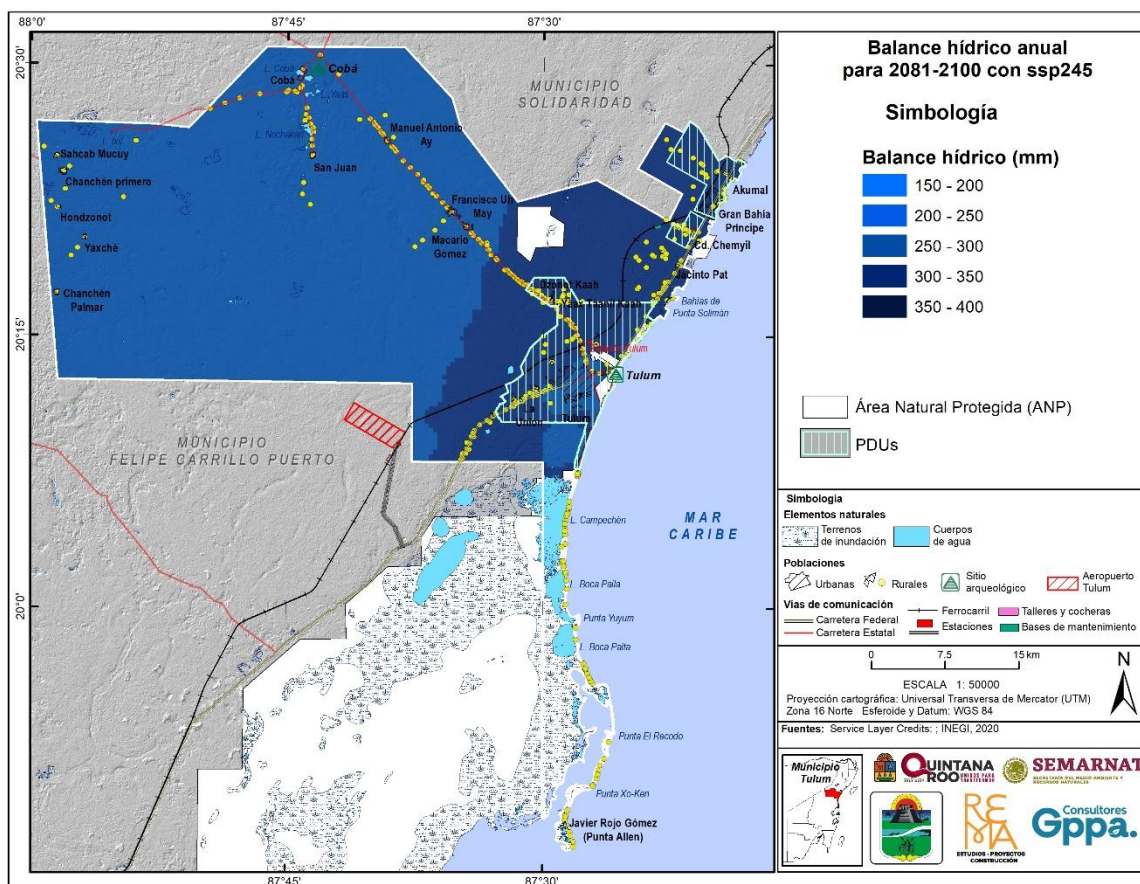


Figura 28. Balance hídrico anual para el periodo 2041-2060 con SSP3-7.0.

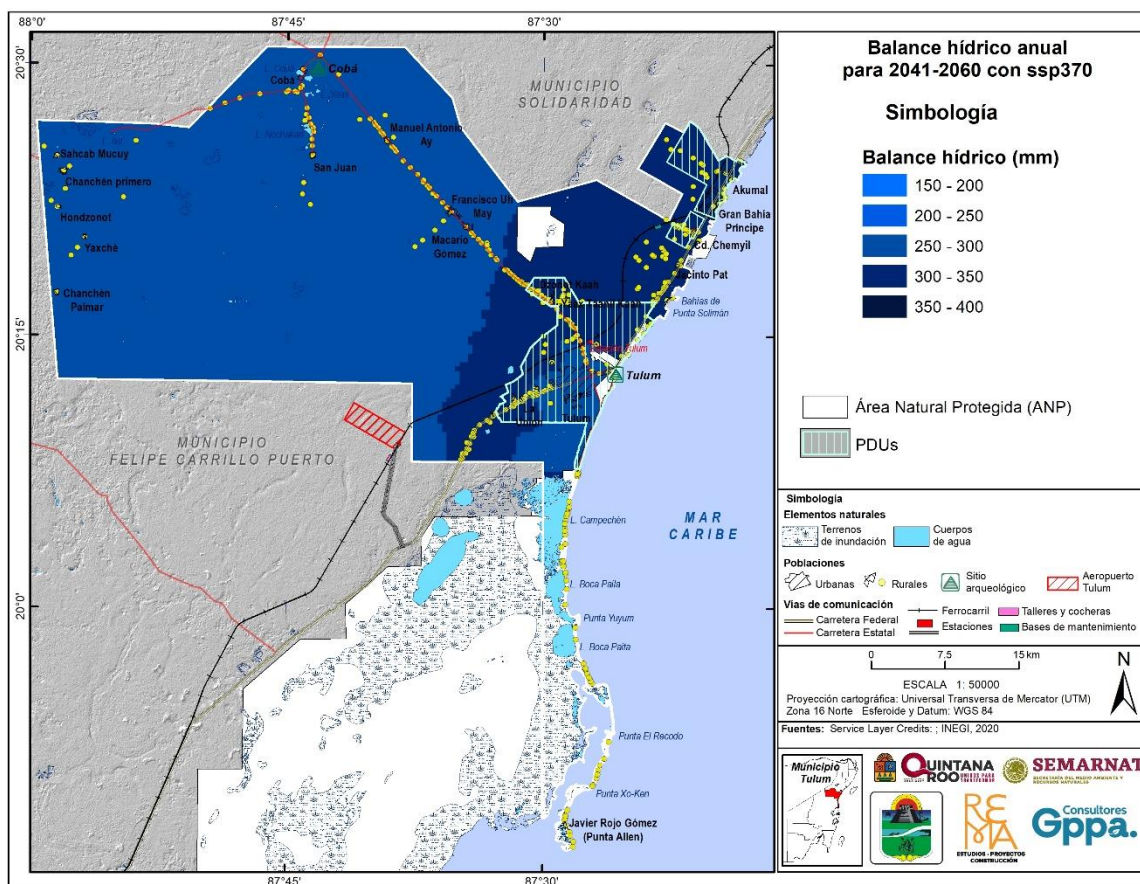


Figura 29. Balance hídrico anual para el periodo 2081-2100 con SSP3-7.0.

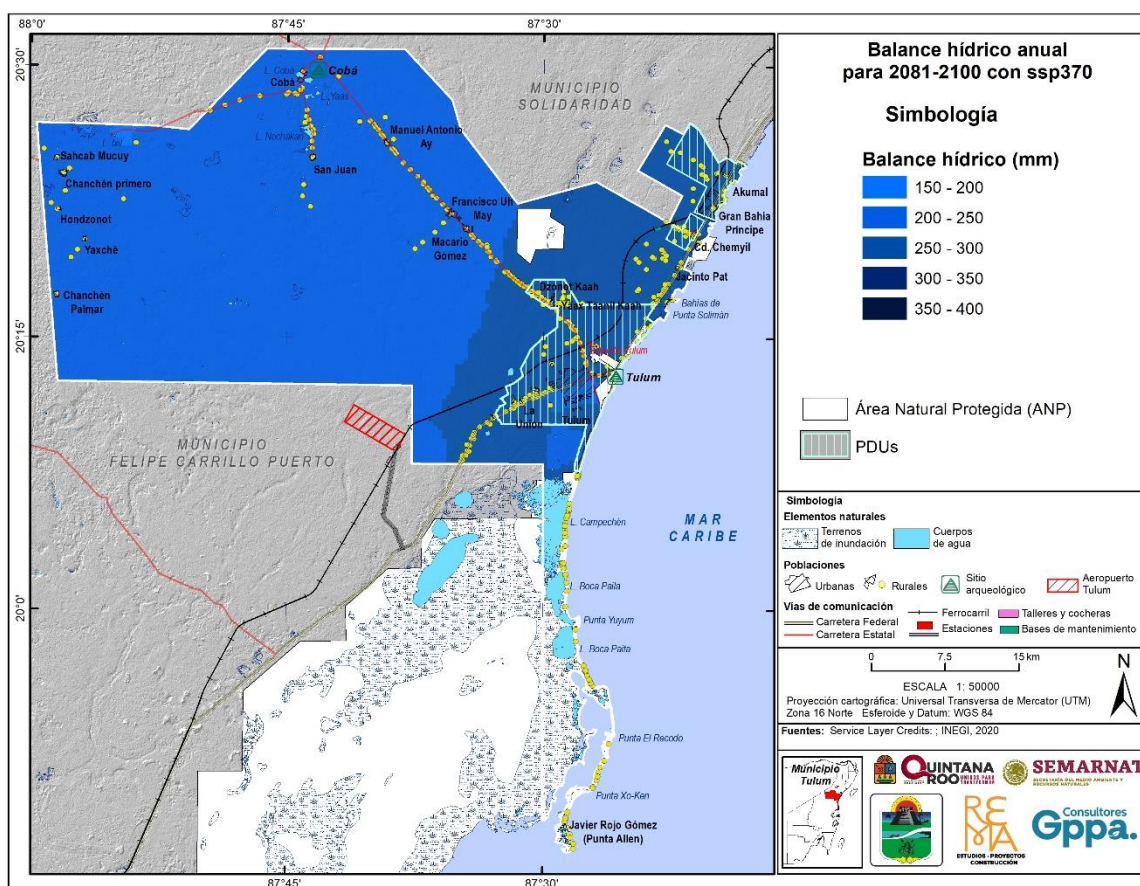


Figura 30. Balance hídrico anual para el periodo 2041-2060 con SSP5-8.5.

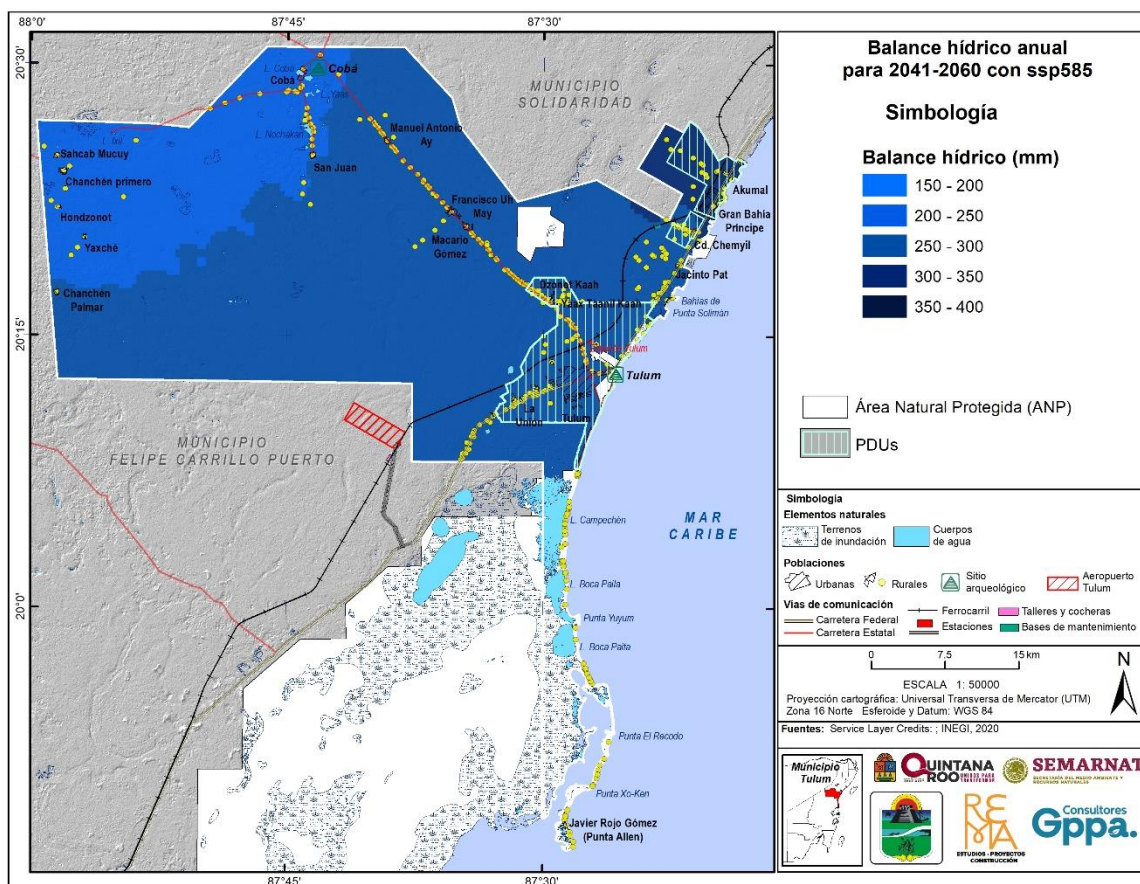
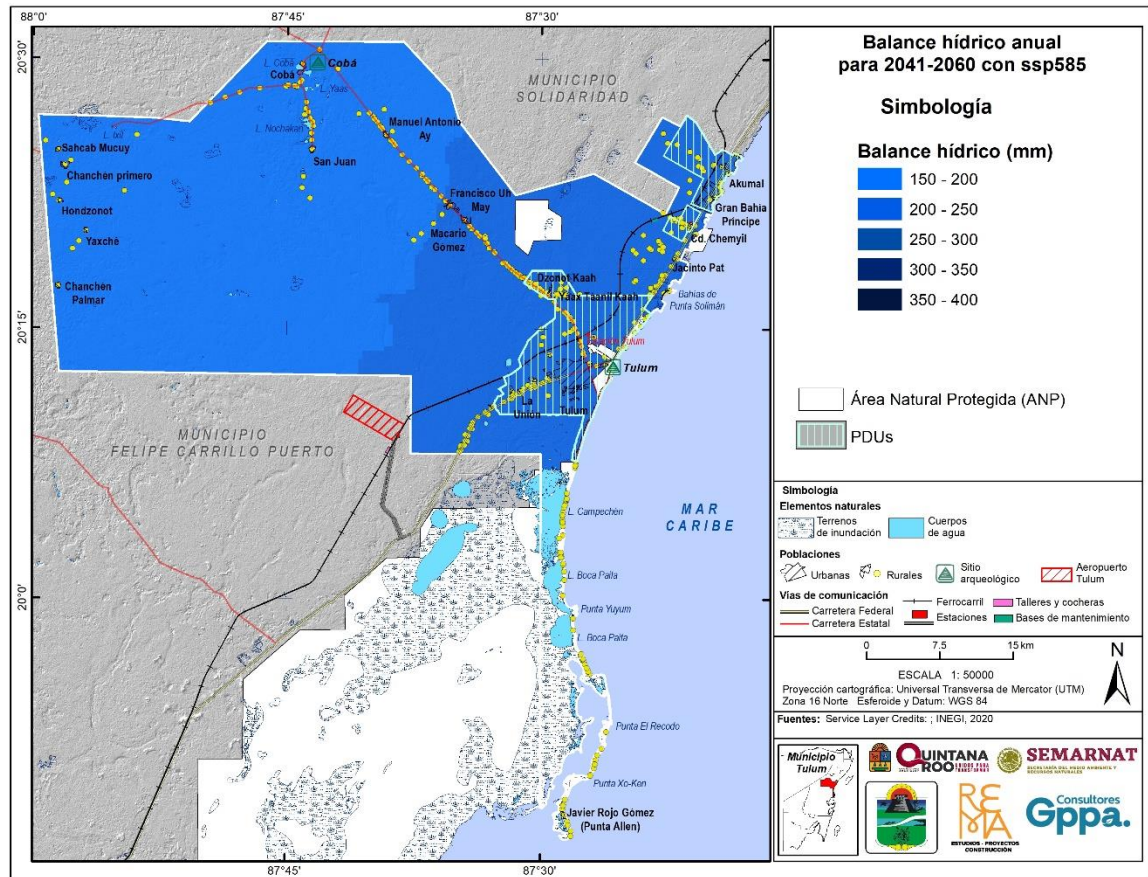


Figura 31. Balance hídrico anual para el periodo 2081-2100 con SSP5-8.5.



La Tabla 26 resume los datos anteriores relativizándolos con los valores de balance hídrico del presente. Así, en términos porcentuales, es notable que las disminuciones de primavera y verano son problemáticas ya que pueden disminuir la disponibilidad de agua de más de la mitad, en cambio, los altos valores de cambios en fin de año son positivos o ligeramente negativos.

Tabla 26. Variación porcentual de balance hídrico en el municipio con respecto a 1991-2020.

(%)	2021-2040			2051-2060			2081-2100		
Mes	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
1	0.1	-3.5	-0.2	-6.9	-6.2	-17.7	-6.5	-22.2	-34.8
2	9.5	6.6	18.7	5.7	4.9	-8.4	-3.8	-29.5	-41.8
3	12.5	13.7	8.9	-10.7	-9.8	-13.2	-19.4	-47.0	-51.2
4	-31.0	-27.9	-32.6	-33.8	-36.2	-46.6	-50.6	-55.5	-58.4
5	-33.8	-19.8	-35.9	-27.8	-30.9	-38.9	-40.3	-55.8	-60.2
6	-22.4	-6.9	-12.9	-27.5	-28.1	-34.1	-27.0	-54.8	-66.5
7	10.3	4.1	-6.4	-7.8	-19.5	-24.7	-13.9	-61.5	-70.5
8	-19.3	-20.9	-21.8	-21.8	-30.3	-36.7	-28.7	-52.5	-62.2
9	5.7	3.9	2.1	-1.2	-2.3	-8.1	-8.6	-30.2	-46.9
10	-15.6	-11.8	-12.8	-10.5	-9.6	-15.2	-2.5	-7.9	-17.3
11	-5.3	-5.8	2.1	-0.9	1.7	-3.1	3.8	16.0	7.2
12	38.2	26.7	27.0	27.6	31.5	23.6	29.3	13.4	13.5
Año	-10.3	-7.1	-9.6	-11.9	-13.3	-19.5	-12.6	-28.9	-39.7

En conclusión, es claro con todos los modelos que el cambio climático es susceptible de reducir la disponibilidad de agua en el municipio por un aumento de las temperaturas y una disminución casi generalizada de las precipitaciones, excepto en noviembre y diciembre. Estos cambios se harán con relativa uniformidad en el territorio, afectando las zonas que ahora son menos lluviosas. Un balance hídrico menor a 200 mm en promedio (Figura 31) puede resultar en la ocurrencia de años particularmente secos conllevando a problemáticos incendios forestales.

9.4.5.2.2 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS CICLONES TROPICALES

Los ciclones tropicales que arriban a tierra con un alto grado de peligro por su intensidad de vientos tienen un fuerte impacto con costos humanos y económicos, dejando a su paso una devastadora estela de destrucción al afectar áreas costeras densamente pobladas (AMIS, 2021; Hallegatte, 2008³⁵). El costo humano es evidente al ocasionar pérdida de vidas, desplazamientos de la población y traumas emocionales (Schoenbaum et al., 2009)³⁶. Desde el punto de vista económico, los huracanes pueden generar gastos colosales derivados de la reconstrucción de infraestructuras, interrupción de la industria y tensiones en los recursos públicos destinados a la respuesta y recuperación de emergencias (AMIS, 2021), además de impactar sobre las pequeñas empresas y las cadenas de suministro globales, exacerbando el impacto económico (Wachtendorf et al., 2013)³⁷. El desafío actual radica en fortalecer las comunidades del municipio contra estas convulsiones socioeconómicas, al tiempo que se aborda el potencial aumento en la frecuencia e intensidad de los huracanes en un clima cambiante.

³⁵ Hallegatte, S. 2008. An Adaptive Regional Input-Output Model and its Application to the Assessment of the Economic Cost of Katrina. *Risk Analysis*, 28(3), 779–799. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01046.x>.

³⁶ Schoenbaum, M., Butler, B., Kataoka, S., Norquist, G., Springgate, B., Sullivan, G., Duan, N., Kessler, R. C., & Wells, K. 2009. Promoting Mental Health Recovery After Hurricanes Katrina and Rita: What Can Be Done at What Cost. *Archives of General Psychiatry*, 66(8), 906. <https://doi.org/10.1001/archgenpsychiatry.2009.77>.

³⁷ Wachtendorf, T., Brown, B., & Holguin-Veras, J. 2013. Catastrophe Characteristics and their Impact on Critical Supply Chains: Problematising Material Convergence and Management Following Hurricane Katrina. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 10(2). <https://doi.org/10.1515/jhsem-2012-0069>

En el contexto del cambio climático y el calentamiento global en curso, la comunidad se enfrenta a la perspectiva de un aumento en la frecuencia e intensidad de los ciclones tropicales más extremos (Knutson et al., 2020). El aumento de las temperaturas de la superficie del mar, una característica del cambio climático sirve como una fuente de energía potente para estas tormentas, lo que podría llevar a una mayor y más intensa actividad ciclónica.

La evaluación de las condiciones futuras en función del modo de desarrollo económico global y de la cantidad de población humana en la tierra, liberando a la atmósfera gases de efecto invernadero se realiza gracias a escenarios de cambio climático correspondientes a trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP por sus siglas en inglés). Se consideran SSP1 (sostenibilidad), SSP2 (mitad del camino), SSP3 (rivalidad regional), SSP4 (desigualdad) y SSP5 (desarrollo impulsado por combustibles fósiles) (Van Vuuren et al., 2017)³⁸. Cada uno de estos se relaciona con un forzamiento radiativo por la acción humana, los valores de este forzamiento a horizonte 2100 van de 1.9 a 8.5 W·m². A partir de esto, se utilizan modelos de circulación general (MCG) los cuales simulan las condiciones ambientales con los diferentes escenarios (Rivera, 2023).

Método

Los datos históricos de ciclones tropicales fueron obtenidos de la base de datos histórica del Pacífico Oriental del proyecto de Archivo Internacional de Mejor Trayectoria (Best Track) para la Gestión Climática (IBTrACS), versión 4 (Knapp et al., 2010, 2018)³⁹. El archivo contiene información sobre los ciclones tropicales registrados entre 1851 y 2023 en el área del Pacífico Oriental. Los datos relevantes para el municipio de Tulum incluyen la agencia responsable de los datos, la posición geográfica (en grados, con dos decimales), el número del sistema, el número de código, la fecha y hora reportada en tiempo universal coordinado (UTC), la velocidad máxima sostenida del viento (en nudos), la posición del ojo del huracán y la distancia a la tierra. Datos adicionales, como la presión atmosférica, no están disponibles para todos los registros.

³⁸ Van Vuuren, D. P., Riahi, K., Calvin, K., Dellink, R., Emmerling, J., Fujimori, S., ... & O'Neill, B. 2017. The Shared Socio-economic Pathways: Trajectories for human development and global environmental change. *Global Environmental Change*, 42, 148-152.

³⁹ Knapp, K. R., Diamond, H. J., Kossin, J. P., Kruk, M. C., & Schreck, G. J. 2018. International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) Project, Version 4. En NOAA National Centers for Environmental Information. <https://www.ncei.noaa.gov/data/international-best-track-archive-for-climate-stewardship-ibtracs/v04r00/access/>.

Knapp, K. R., Kruk, M. C., Levinson, D. H., Diamond, H. J., & Neumann, C. J. 2010. The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying Tropical Cyclone Data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(3), Article 3. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2755.1>.

Para el municipio de Tulum, se utilizaron datos de la Organización Meteorológica Mundial, registrados en intervalos de seis horas, con velocidades del viento generalmente reportadas en múltiplos de cinco. También se utilizaron datos del Centro Nacional de Huracanes (NHC) correspondientes a puntos de intervalo de tres horas (a las 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 y 24 h UTC), incluyendo los datos provisionales para 2023. Se seleccionó el período de datos a partir de 1950 como referencia histórica dado que las mediciones confiables para los ciclones tropicales en la región comenzaron después de los 1940s con las observaciones de aviones caza huracanes (Vecchi & Knutson, 2011)⁴⁰.

Se obtuvieron conjuntos de datos de ciclones tropicales sintéticos (CTS) generados con el método desarrollado por Emanuel et al. (2006, 2008) y modificado para la generación de modelos del proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados 6 (CMIP6) (Tebaldi et al., 2021) por Emanuel (2021a, 2021b). Se obtuvieron ciclones tropicales sintéticos derivados de seis modelos de circulación general (MCG) (Tabla 27). Para cada modelo, obtuvimos dos conjuntos de datos de ciclones tropicales sintéticos, uno para el periodo histórico (1950-2014) y otro para el clima futuro (2015-2100) bajo los escenarios SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 (Zhu et al., 2021) para el océano Atlántico Norte.

Tabla 27. Modelos de circulación general utilizados para la generación de eventos sintéticos.

Institución	Modelo	Resolución atmosférica	Referencia
<i>National Centre for Atmospheric Research</i>	CESM2	1.25° × 0.93°	Danabasoglu et al. (2020)
<i>Geophysical Fluid Dynamics Laboratory</i>	GFDL-ESM 4.1	100 km × 100 km	Dunne et al. (2020)
<i>Met Office Hadley Centre</i>	HadGEM3-GC-GC31-LL	1.25° × 1.88°	Sellar et al. (2020)
<i>Institut Pierre Simon Laplace</i>	IPSL-CM6A-LR	1.25° × 2.5°	Boucher et al. (2020)
<i>Center for Climate System Research; University of Tokyo; Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology; National Institute for Environmental Studies</i>	MIROC6	1.4° × 1.4°	Tatebe et al. (2019)
<i>Max Planck Institute</i>	MPI-ESM1.2-HR	0.94° × 0.94°	Müller et al. (2018)

Utilizando las condiciones ambientales de cada modelo de circulación general, se obtuvieron las trayectorias sintéticas de ciclones tropicales con valores de posición y velocidad sostenida del viento 1 minuto expresados en m·s⁻¹ cada 2 horas. Se generaron 3055 eventos sintéticos para cada uno de los MCG para condiciones de clima presente como 4042 para el futuro.

⁴⁰ Vecchi, G. A., & Knutson, T. R. 2011. Estimating Annual Numbers of Atlantic Hurricanes Missing from the HURDAT Database (1878–1965) Using Ship Track Density. *Journal of Climate*, 24(6), 1736-1746. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3810.1>.

El uso de MCG permite la generación de ciclones tropicales para diferentes periodos de tiempo permitiendo ver las consecuencias probables de las condiciones atmosféricas y oceánicas del futuro. No obstante, por su naturaleza, cada MCG representa las condiciones climáticas bajo condiciones de clima actual y futuro, pero puede contener sesgos espaciales y, por lo tanto, la climatología de ciclones tropicales resultante de cada base de datos puede contener errores que reflejan dichos sesgos (Romero et al., 2024)⁴¹. Para contrarrestar los sesgos entre modelos y tener una mejor aproximación de la climatología de los ciclones tropicales del futuro, se realizó un ensamble de los seis MCG, método que permite mejorar el ajuste a los valores medidos (Camargo, 2013)⁴² y, se implementó una calibración de las condiciones del clima futuro.

A partir del número real (16) de ciclones tropicales cuya trayectoria pasó en la zona de interés (87°08'38" W a 88°10'31" W y 19°42'51.5" N a 20°42'44.3" N) durante el periodo 1950-2014, calibramos las frecuencias de las bases de datos de CTS para el pasado, los datos calibrados del pasado permitieron corregir los datos de frecuencia de los CTS del futuro. A partir de los números de ocurrencias, calculamos el número promedio anual y calculamos la probabilidad anual según la formula recomendada (Elsner & Bossak, 2004)⁴³.

$$P = 1 - e^{-nm}$$

donde nm es el número promedio de observaciones al año.

Resultados

La frecuencia de los ciclones tropicales en la zona es elevada, los 16 eventos en el periodo 1950-2014 dan una probabilidad de 0.21, ósea ocurre en promedio por lo menos 1 ciclón tropical en un periodo de 5 años.

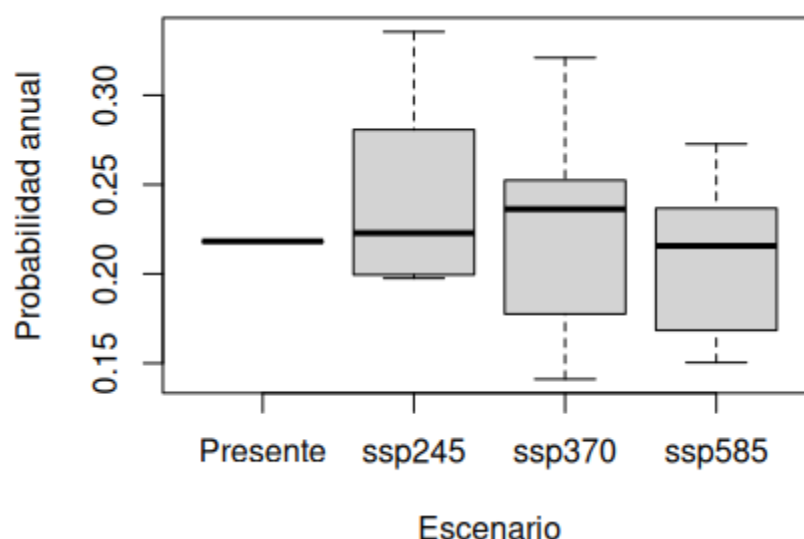
⁴¹ Romero, D., Appendini, C. M., & Ruiz-Salcines, P. 2024. Evaluación de ciclones tropicales sintéticos derivados de los modelos globales de circulación para México, en Mendoza M. & Frausto O. (coord.) Resiliencia y acciones por el clima ante desastres. Diez años de la REDESCLIM. CIGA UNAM.

⁴² Camargo, S. J. 2013. Global and regional aspects of tropical cyclone activity in the CMIP5 models. *Journal of Climate*, 26(24), 9880-9902. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00549.1>.

⁴³ Elsner, J. B., & Bossak, B. H. 2004. Hurricane landfall probability and climate. En R. Murnane & K. Liu (Eds.), *Hurricanes and Typhoons: Past, Present, and Future* (pp. 333-353). Columbia University Press New York, NY.

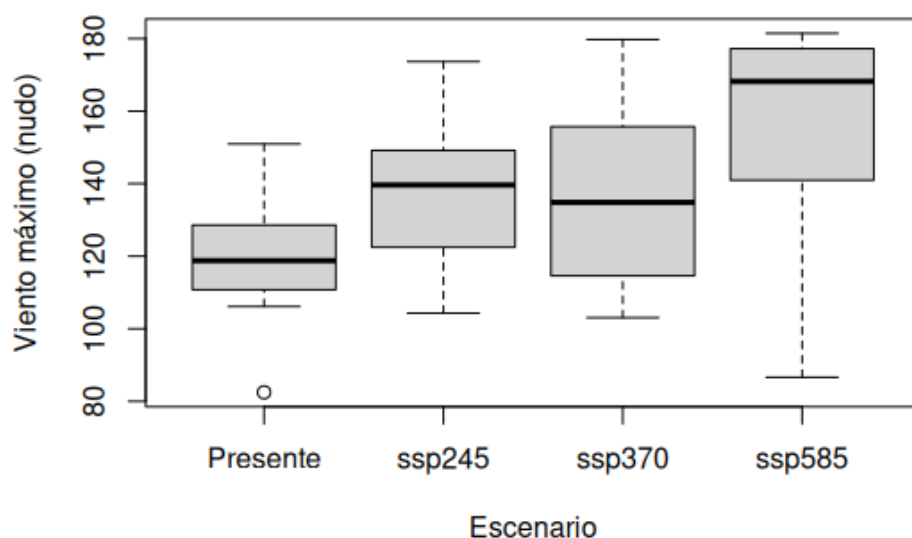
La Gráfica 20 permite ver una relativa estabilidad de las frecuencias de ciclones tropicales en el futuro en la zona. La barra negra que indica la mediana de los modelos es ligeramente más elevada para el futuro con forzamientos radiativos de 4.5 y 6 y es ligeramente menor para 8.5. No obstante, es posible ver una gran variabilidad, algún modelo da un fuerte incremento, alrededor ($> +0.1$) para SSP2-4.5 y en menor medida para SSP3-7.0, por otro lado, disminuciones de las frecuencias se dan para varios modelos con SSP3-7.0 y SSP5-8.5 con -0.1 . Se puede concluir que es poco probable un fuerte aumento en la frecuencia de los ciclones tropicales en la zona de estudio.

Gráfica 20. Probabilidades anuales de ocurrencia de ciclón tropical en la zona de estudio para el presente (1950-2014) y el futuro (2015-2100) para 3 SSPs.



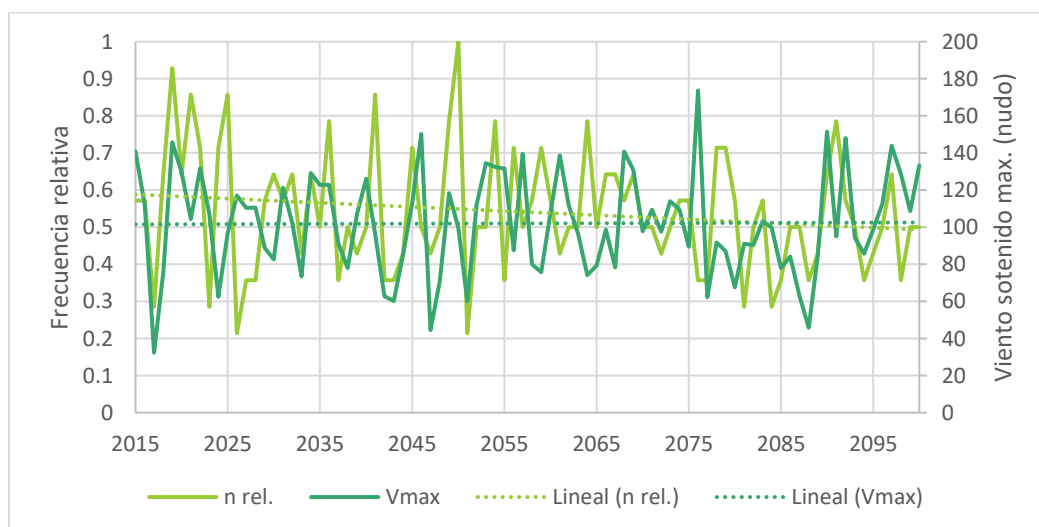
En la Gráfica 21 se nota un aumento de las velocidades máximas de los ciclones tropicales en función del forzamiento radiativo. El valor máximo real fue de 117 nudos con el Huracán Emily en 2005, cercano a la mediana de 119 que aparece en la gráfica -cabe también notar que el valor máximo registrado, aunque poco confiable fue 122 nudos en 1933. Para el futuro, todos los escenarios dan valores más altos para casi todos los modelos, así la mediana pasa a 141 nudos para SSP2-4.5 y más de 170 nudos para SSP5-8.5. Los 117 nudos corresponden a huracán de categoría 4 de la escala de Saffir Simpson, estando cerca del límite con categoría 3 mientras todas las medianas de los escenarios dan velocidades de categoría 5.

Gráfica 21. Velocidades de viento sostenido máximas en la zona de estudio para el presente (1950-2014) y el futuro (2015-2100) para 3 SSPs.

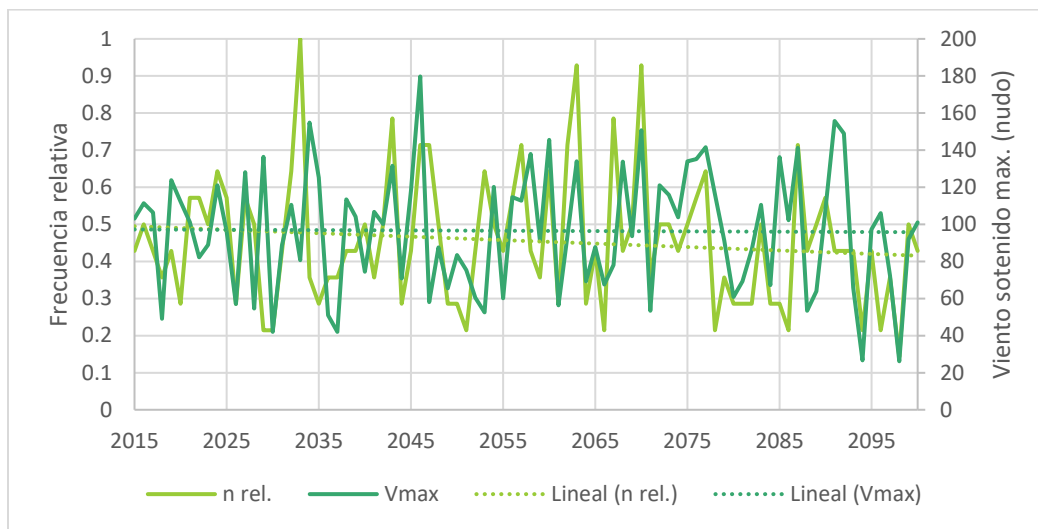


Las series temporales de frecuencia relativa para el futuro muestran todas tendencias negativas con valores máximos de frecuencia antes de 2045 (Gráfica 22 a Gráfica 24), de hecho, SSP2-4.5 y SSP5-8.5 tienen también valores particularmente altos cerca de 2020, contundente con la actividad ciclónica en la zona durante aquel año. También es notable que el número de ciclones disminuye de manera más pronunciada con forzamientos radiativos más altos. Al contrario, las tendencias de las velocidades de viento sostenido máximo son bastante estables por lo que es más difícil encontrar periodos de mayor peligro con respecto a esta variable. Cabe resaltar que valores de al menos 150 nudos se encuentran en 2046, 2034 y 2030 con respectivamente SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5.

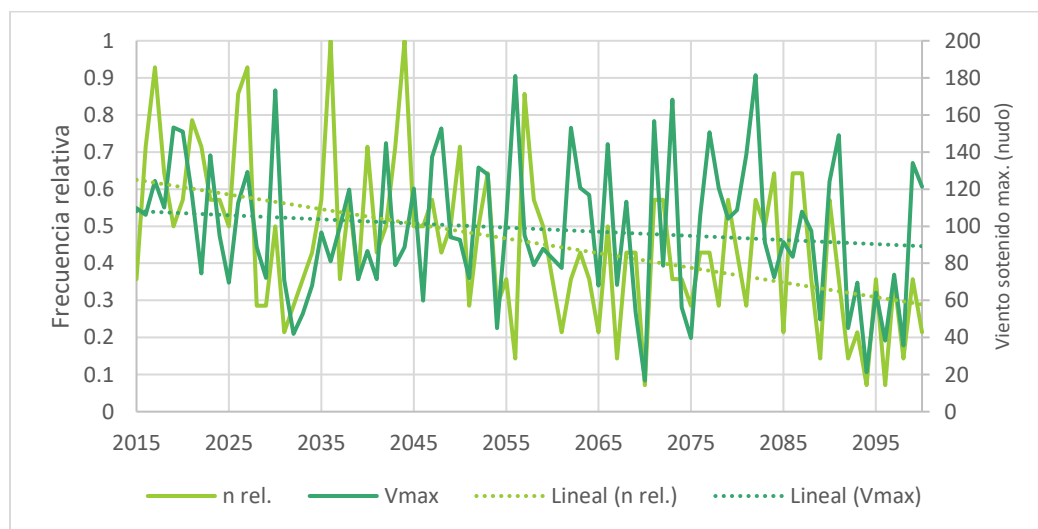
Gráfica 22. Series temporales de frecuencia relativa y velocidad de viento máxima de 2015 a 2100 con ensamble de modelos y SSP2-4.5.



Gráfica 23. Series temporales de frecuencia relativa y velocidad de viento máxima de 2015 a 2100 con ensamble de modelos y SSP3-7.0.



Gráfica 24. Series temporales de frecuencia relativa y velocidad de viento máxima de 2015 a 2100 con ensamble de modelos y SSP5-8.5.



En conclusión, el estudio de los ciclones tropicales y su impacto futuro bajo diferentes escenarios climáticos revela un panorama preocupante para las comunidades costeras. La evidencia sugiere que, con el aumento proyectado en las temperaturas de la superficie del mar debido al cambio climático, los ciclones tropicales podrían intensificarse en frecuencia, y particularmente en intensidad.

Esto representa un desafío significativo para la resiliencia de las poblaciones locales y la sostenibilidad económica, ya que estos eventos extremos no solo amenazan vidas y propiedades, sino que también implican costos considerables en términos de reconstrucción y recuperación.

El análisis de los ciclones tropicales bajo diferentes escenarios climáticos subraya particularmente la amenaza creciente de intensidades más extremas debido al cambio climático. Esta evolución plantea un riesgo significativo para las zonas costeras del municipio, especialmente para el sector turístico, vital para la economía local.

En función del escenario de cambio climático, es posible ver que la amenaza extrema puede ocurrir durante la próxima década. La vulnerabilidad de infraestructuras turísticas y la seguridad de los visitantes se ven comprometidas por la posible intensificación de estos fenómenos meteorológicos. Es esencial implementar estrategias robustas de preparación y adaptación para proteger esta industria crucial, asegurando la sostenibilidad económica y la seguridad de las comunidades locales que dependen del turismo.

9.4.6 DISPONIBILIDAD DE AGUA

Para fines de la administración del agua, la NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, define a la disponibilidad de agua como “volumen medio anual de agua subterránea que puede ser extraído de un acuífero para diversos usos, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro el equilibrio de los ecosistemas”.

Evaluar la disponibilidad de agua subterránea es crucial por múltiples razones entre las ellas el garantizar un suministro continuo y seguro de agua para consumo humano, lo cual es fundamental para la salud pública y el desarrollo social. Asimismo, la disponibilidad de agua resulta de especial relevancia en la sostenibilidad ambiental, la salud de diversos ecosistemas y el mantenimiento de su biodiversidad, dependen del equilibrio de los niveles de las aguas subterráneas.

Conocer la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo también es esencial para la toma de decisiones informadas sobre el manejo del agua. Esta información permite orientar el desarrollo de estrategias que promuevan una gestión del agua efectiva y sostenible, asegurando un uso equilibrado que satisfaga las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades.

Balance hídrico

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en su actualización de la disponibilidad media anual de agua para el acuífero Península de Yucatán (3105) del 2024, acuífero al que pertenece el municipio de Tulum, éste cuenta con una recarga total media anual de 14931.80 hm³/año, una descarga natural comprometida de 7686.80 hm³/año, un volumen de extracción de aguas subterráneas de 5185.37 m³/año y una disponibilidad media anual de 2059.63 hm³/año (Tabla 28).

Tabla 28. Disponibilidad de agua en el acuífero Península de Yucatán.

Acuífero	Recarga media anual	Descarga natural comprometida	Volumen de extracción de aguas subterráneas	Disponibilidad media anual de agua subterránea
	hm ³ /año			
Península de Yucatán	14931.80	7686.80	5185.37	2059.63

Fuente: Sistema Nacional de Información del agua. Recuperado de: <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/>.

Considerando la relación entre la recarga del acuífero y su explotación, se puede inferir que el grado de presión es bajo, estimado en aproximadamente 34%. De acuerdo a lo anterior la disponibilidad de agua subterránea a nivel acuífero aún es suficiente.

Sin embargo, al examinar el registro histórico de la disponibilidad de agua, de acuerdo con los datos de CONAGUA, para el acuífero Península de Yucatán en el 2003, era de 5759.22 hm³/año. Comparado con lo reportado en el informe de 2024, esto representa una disminución del 64% en 21 años.

En cuanto al volumen de extracción de aguas subterráneas, el registró histórico indica que entre 2015 y 2018 existió un aumento considerable, pasando de 1209.2 hm³/año a 4428.48 hm³/año en tan solo 3 años.

Realizando el cálculo de presión sobre la disponibilidad total actual a nivel acuífero, considerando los 2059.63 hm³/año de disponibilidad media anual de agua subterránea y los 5185.37 hm³/año volúmenes de extracción de aguas subterráneas, implica una presión del 71.57%.

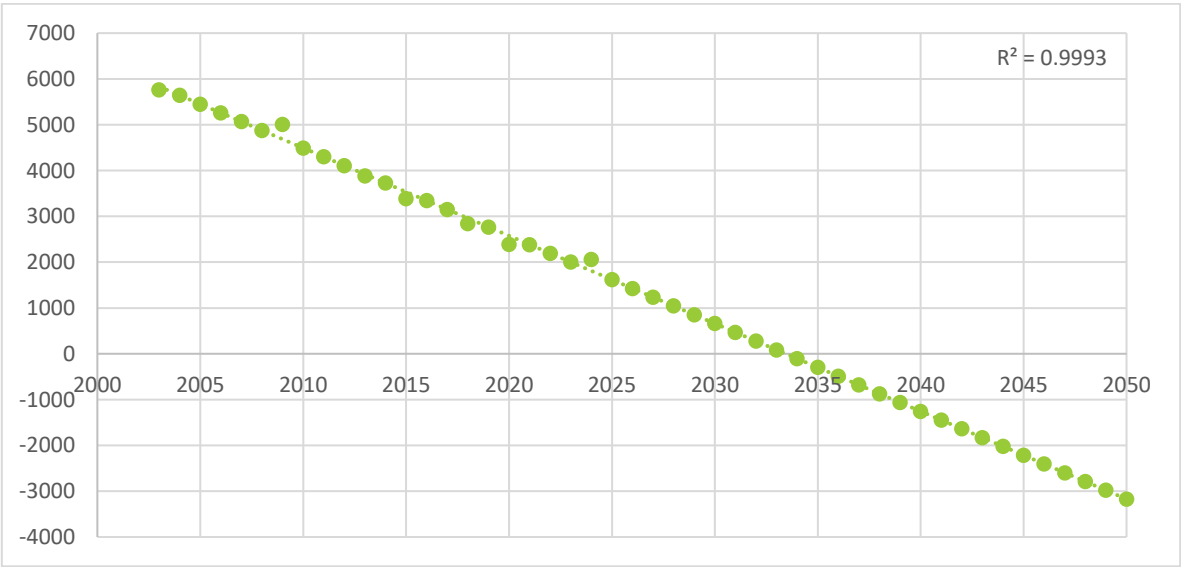
Tabla 29. Datos históricos del acuífero Península de Yucatán.

Año	Recarga media anual	Descarga natural comprometida	Volumen de extracción de aguas subterráneas	Disponibilidad media anual de agua subterránea
	hm³/año			
2024	14931.80	7686.80	5185.37	2059.63
2020	21813.40	14542.20	4884.27	2386.93
2018	21813.40	14542.20	4428.48	2842.72
2015	21813.40	14542.20	1209.2	3388.86
2013	21813.40	14542.20	1209.2	3882.82
2009	21813.40	14542.20	1313.3	5005.60
2003	21813.40	14542.20	1313.3	5759.22

Fuente: Sistema Nacional de Información del agua. Recuperado de: <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/>.

A partir de los datos de disponibilidad de agua proporcionados por la CONAGUA, se realizó un análisis para proyectar la tendencia futura de este parámetro. Para ello, se aplicó el método de mínimos cuadrados, asumiendo una relación lineal entre las variables año y disponibilidad, basada en los datos históricos disponibles. En la Gráfica 25, se presenta el posible comportamiento proyectado de la tendencia en la disponibilidad media anual de agua subterránea para el acuífero de la Península de Yucatán.

Gráfica 25. Tendencia en la disponibilidad media anual de agua subterránea para el acuífero Península de Yucatán.



Fuente: Elaboración propia con datos históricos de CONAGUA.

Uso del agua

Los principales usos del agua a nivel acuífero Península de Yucatán refieren al uso agrícola, público urbano y servicios, quienes conjuntan el 64.5%.

Tabla 30. Usos de agua en el acuífero Península de Yucatán.

Actividad	Volumen utilizado	
	hm ³ /año	%
Agrícola	1911.6	38.4
Agroindustrial	0.2	---
Doméstico	0.4	---
Acuacultura	18.4	0.4
Servicios	652.5	13.1
Industrial	90.7	1.8
Pecuario	34.6	0.7
Urbano	650.3	13
Diferentes usos	1622.3	32.6
Generación de energía eléctrica	1.8	---

Fuente: Sistema Nacional de Información del agua. Recuperado de: <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/>.

Para el municipio de Tulum, de acuerdo al Registro Público de Derechos del Agua (REPDA, 2023)⁴⁴, se cuenta con un registro de 98 concesiones para el aprovechamiento subterráneo, con volumen de 37.31 hm³/año, lo que representa el 0.71% del volumen de extracción de aguas subterráneas a nivel acuífero Península de Yucatán.

Tabla 31. Concesiones para el aprovechamiento subterráneo para el municipio de Tulum.

Año	Número de concesiones	Volumen concesionado (hm ³ /año)
2023	98	37.31
2022	93	37.22
2021	89	46.26
2020	85	46.20

Fuente: Sistema Nacional de Información del agua. Recuperado de: <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/>.

El uso de acuerdo a datos del REPDA, en el aprovechamiento del agua subterránea, está distribuido de la siguiente manera:

⁴⁴ Comisión Nacional del Agua. 2023. Registro Público de Derechos del Agua. Recuperado de: <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/?opcion=repda>.

Tabla 32. Uso agrupado para aprovechamiento subterráneo para el municipio de Tulum.

Año	Agrícola	Abastecimiento público	Industrial integrado	Total
	hm³/año			
2023	1.360	7.138	28.81	37.31
2022	1.360	7.138	28.72	37.22
2021	1.360	5.896	39.00	46.26
2020	1.360	5.842	38.99	46.20

Fuente: Sistema Nacional de Información del agua. Recuperado de: <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/>.

Retorno de descargas de aguas residuales

El marco jurídico establece para todo aquel usuario de aguas nacionales la obligación de contar con el "Permiso de descarga de aguas residuales" y se señala como casos de excepción para contar con dicho permiso a aquellas descargas que no formen parte de un sistema municipal de alcantarillado y que provengan, ya sea de uso doméstico o bien aquellas que, siendo suministradas por el sistema de agua potable, así como no contengan metales pesados, cianuros o tóxicos y que su volumen no exceda a 300 metros cúbicos mensuales. Se establece que aquellas descargas que correspondan a estos casos de excepción podrán llevarse a cabo con sujeción a las Normas Oficiales Mexicanas que al efecto se expidan y mediante un aviso por escrito a la "autoridad del agua" (PHR PY, 2021-2024)⁴⁵.

A continuación, se hará referencia a los retornos de aguas residuales al acuífero en el sentido de los permisos de descargas de aguas residuales otorgados por la CONAGUA.

De acuerdo con el REPDA, para 2023, en el acuífero Península de Yucatán, se tiene 4189 permisos de descarga de aguas residuales emitidos por CONAGUA, con un volumen total de descarga de 1010.30 hm³/año.

Para el municipio de Tulum, de acuerdo al REPDA (2023), se cuenta con un total de 53 permisos de descarga de aguas residuales emitidos por CONAGUA, con un volumen total de descarga de 33.54 hm³/año.

Considerando el volumen total de descarga de 33.54 hm³/año y el aprovechamiento de 37.31 hm³/año registrado para Tulum, el 89.89% del agua extraída se retorna al acuífero.

⁴⁵ Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Comisión Nacional del Agua. s.f. Programa Hídrico Regional 2021 – 2024. Región Hidrológico – Administrativa XII Península de Yucatán. Recuperado de: https://files.conagua.gob.mx/conagua/generico/PNH/PHR_2021-2024_RHA_XII_Pen%C3%ADnsula_de_Yucat%C3%A1n.pdf.

Tabla 33. Volúmenes concesionados de descarga de aguas residuales para el municipio de Tulum.

Año	Agrícola	Abastecimiento público	Industrial integrado	Total
	hm³/año			
2023	---	4.739	28.80	33.54
2022	---	4.739	27.97	32.71
2021	---	4.739	34.43	39.17
2020	---	4.739	34.33	39.07

Fuente: Sistema Nacional de Información del agua. Recuperado de: <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/>.

9.4.6.1 DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL MUNICIPIO DE TULUM

El balance hídrico del acuífero Península de Yucatán muestra tendencias inquietantes que apuntan a una disminución progresiva en la disponibilidad de agua subterránea, lo cual es crítico tanto para el desarrollo humano como para la sostenibilidad de los ecosistemas. Está marcada tendencia de disminución refleja una creciente presión sobre los recursos hídricos subterráneos, probablemente debida a un aumento significativo en la demanda de agua y a cambios en las tasas de recarga y extracción del acuífero.

El volumen de extracción de aguas subterráneas ha mostrado un aumento sustancial en los últimos años. Entre 2015 y 2018, la extracción incrementó un 266%, lo que constituye un crecimiento notable en un corto período. Para 2024, la extracción se sitúa un 6.16% por encima del registro de 2020, evidenciando una continua y creciente demanda de agua subterránea. Sin embargo, dichas tendencias no se distribuyen de manera uniforme en todo el territorio, ya que varían en función de la demanda local y la distribución de recarga natural y artificial, por lo cual para conocer la situación particular del municipio y su tendencia es necesario llevar a cabo la estimación de la disponibilidad actual de manera particular y la proyección de la demanda, lo cual se realizó utilizando el método llevado a cabo por la CONAGUA en la actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Península de Yucatán 3105 (CONAGUA, 2024), cuyos parámetros necesarios son definidos por la siguiente expresión:

$$\mathbf{DMA = R - DNC - VEAS}$$

Donde:

DMA = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero (intrusión salina). La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

La recarga total media anual es un parámetro cuya dificultad de medición propicia su estimación de forma indirecta a través de otros parámetros. Su cálculo se integra de la suma de las entradas de flujo subterráneo horizontal (Eh), la recarga vertical (Rv), y recarga incidental (Ri), siendo este último un factor prescindible en el municipio de Tulum ya que la agricultura en su gran mayoría es de temporal. A su vez la recarga vertical se puede estimar a través de los parámetros presentados en la siguiente expresión:

$$Rv = B + ETR + Sh + Dm + Dfb \pm \Delta V(S) - Eh - Ri$$

Donde:

- Rv** = Recarga vertical
- Eh** = Entradas por flujo subterráneo horizontal
- Ri** = Recarga incidental
- B** = Bombeo
- ETR** = Evapotranspiración
- Sh** = Salidas por flujo subterráneo horizontal
- Dm** = Descarga a través de manantiales
- Dfb** = Descarga a través de flujo base
- $\Delta V(S)$** = Cambio de almacenamiento

Para el caso del municipio de Tulum la Recarga incidental (Ri), la descarga a través de manantiales (Dm) y la descarga a través de flujo base (Dfb) son parámetros no aplicables debido a la carencia de distritos de riego, de corrientes superficiales o ríos y la falta de manantiales de salida claramente definidos, por lo cual no se tomaron en cuenta en la estimación de la recarga vertical. En la Tabla 34 se

presentan los volúmenes correspondientes a los parámetros necesarios para la estimación de la recarga vertical en el municipio de Tulum.

Tabla 34. Valores de los parámetros para la estimación de Recarga vertical (Rv) en el municipio de Tulum.

Parámetro	Descripción	Volumen (hm ³ /año)
B	Volumen de bombeo	37.31
ETR	Evapotranspiración real	1,710.14
Sh	Salidas de flujo subterráneo horizontal	23
Eh	Entradas de flujo subterráneo horizontal	2
AV(S)	Cambio de almacenamiento del acuífero	-14.47

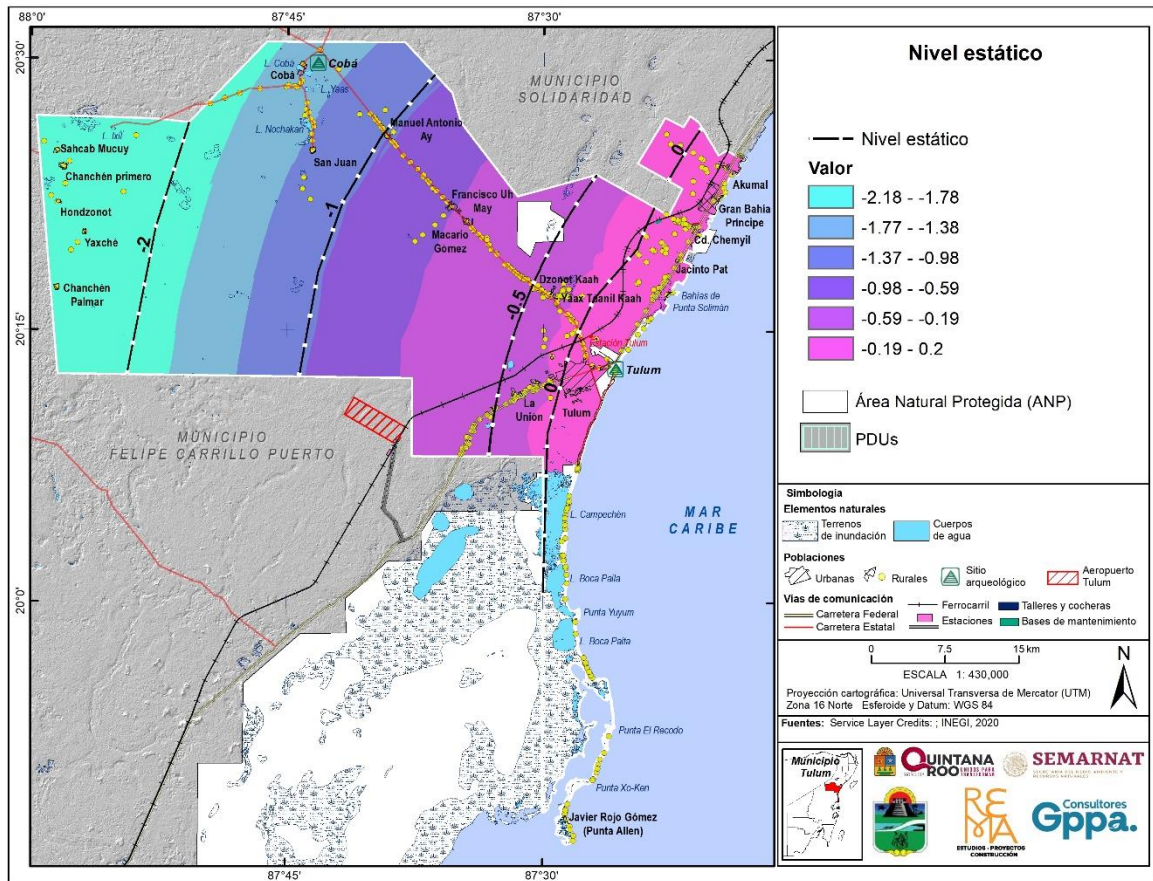
Cabe señalar que Eh y Sh fueron obtenidas de los valores señalados en el estudio de actualización del acuífero Península de Yucatán (CONAGUA, 2024) y corresponden a las celdas E9 y S10 respectivamente. Dichas celdas son las concurrentes en el territorio municipal de acuerdo con la elevación del nivel estativo en 2019 (Figura 32).

Figura 32. Elevación del nivel estático en msnm para el acuífero Península de Yucatán en 2019.



Asimismo, el cambio de almacenamiento del acuífero AV(S) fue una estimación derivada de las cotas de cambio del nivel estático en el periodo 2013-2019 las cuales se muestran para el municipio de Tulum en la Figura 33 y los cálculos de estimación en la Tabla 35.

Figura 33. Evolución del nivel estático en metros para el municipio de Tulum



Fuente: Elaboración propia a partir de CONAGUA (2024).

Tabla 35. Cálculo del cambio de almacenamiento con base en parámetros 2013-2019.

Evolución	Evolución media	Área (km ²)	SY	AV(s)
0	0.020393	298.938133	0.16	0.97539926
-0.5	-0.28531	213.956915	0.16	-9.7670476
-1	-0.7001	593.524598	0.04	-16.621063
-2	-1.497799	627.403871	0.04	-37.588996
-2	-2.083404	286.497779	0.04	-23.875625
TOTAL				-86.877332
Cambio de almacenamiento medio anual				-14.479555

La recarga total media anual (R) se obtiene sumando la recarga vertical (RV) y las entradas del flujo subterráneo horizontal (Eh):

$$R=RV+Eh$$

Sustituyendo los valores:

$$R = 1,814.98 \text{ hm}^3/\text{año} + 2 \text{ hm}^3/\text{año}$$

3. Cálculo de la Disponibilidad Media Anual (DMA)

La disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) se calcula restando a la recarga total media anual (R) la descarga natural comprometida (DNC) y el volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS):

$$\text{DMA} = R - \text{DNC} - \text{VEAS}$$

Donde:

- DNC: Descarga natural comprometida ($1,164.52 \text{ hm}^3/\text{año}$).
- VEAS: Volumen de extracción de aguas subterráneas ($37.31 \text{ hm}^3/\text{año}$).

Sustituyendo los valores:

$$\text{DMA} = 1,814.98 \text{ hm}^3/\text{año} - 1,164.52 \text{ hm}^3/\text{año} - 37.31 \text{ hm}^3/\text{año}$$

El cálculo de la disponibilidad media anual de agua subterránea en el municipio de Tulum arroja un valor de **$613.14 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

9.4.6.2 DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL PROYECTADA

Considerando la población estimada de Tulum al año 2025 (55,950 habitantes) más la población flotante de las localidades de Tulum y Akumal y el número de turistas noche de los datos de DATATUR para 2023 se tiene un estimado de consumo per cápita de agua de $3.57 \text{ m}^3/\text{persona/año}$, equivalentes a 3,570 litros por persona por año, cantidad que se consideró referencia para las proyecciones, al suponer que este consumo per cápita se mantiene constante, es decir, el abasto y suministro de agua en un futuro al menos cubre la cantidad de agua suministrada por persona actualmente.

Tabla 36. Estimación de la población flotante actual para estimación de consumo per cápita.

Parámetro	Tulum	Akumal	Total municipal
Población	-	-	55,950
Visitantes	1,465,606	394,929	1,860,535
Noches estancia media	6.2	3.3	-
Población flotante	Visitantes * 6.2	Visitantes * 3.3	10,392,043

Para la estimación de la disponibilidad de agua media anual futura se llevó a cabo la proyección de la población flotante con base en los datos históricos de número de visitantes en el municipio de Tulum. Se utilizaron para ello los datos de DATATUR actualizados al año 2023 para la localidad de Akumal y destino Riviera Maya, así como los datos de SEDUTUR Quintana Roo para el periodo 2022-2023 para la localidad de Tulum con el fin de definir la proporción de visitantes de la Riviera Maya que corresponden a la localidad de Tulum. En la Tabla 37

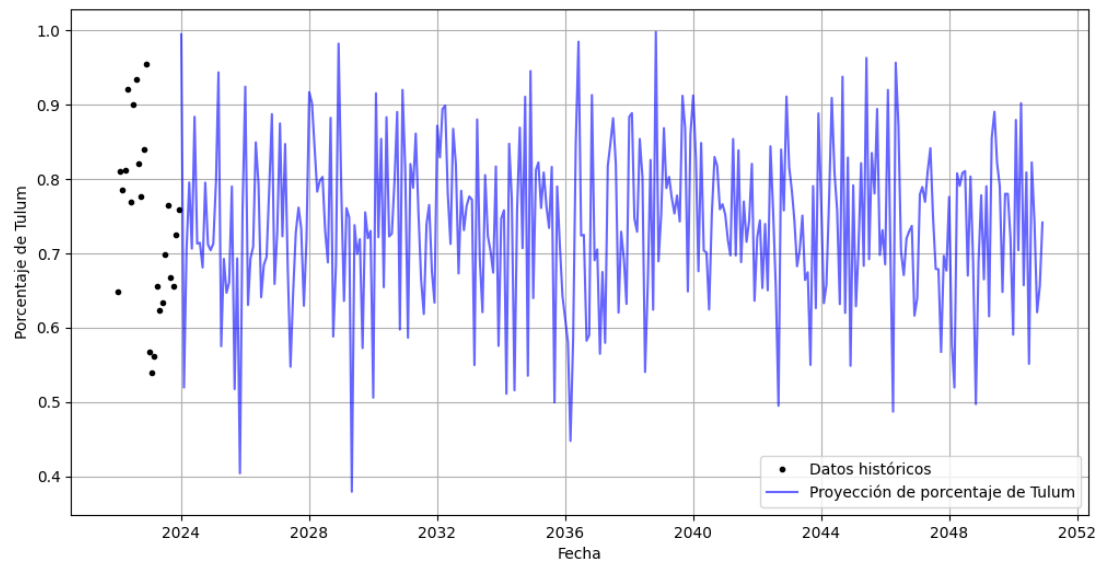
Tabla 37. Visitantes por destino y localidades de Tulum en 2022-2023.

Año	Mes	Akumal	Otros Riviera Maya	Tulum
2022	Enero	23,675	139,383	90,458
2022	Febrero	24,441	145,262	117,724
2022	Marzo	33,902	169,801	133,391
2022	Abril	38,739	202,233	164,294
2022	Mayo	38,324	179,057	164,838
2022	Junio	35,747	190,795	146,790
2022	Julio	41,787	195,566	176,180
2022	Agosto	42,466	181,382	169,592
2022	Septiembre	32,733	154,050	126,485
2022	Octubre	42,019	191,580	148,778
2022	Noviembre	36,246	199,944	167,828
2022	Diciembre	39,684	187,921	179,539
2023	Enero	38,579	230,555	130,943
2023	Febrero	37,313	220,881	119,081
2023	Marzo	39,087	231,386	129,822
2023	Abril	39,899	226,061	148,263
2023	Mayo	37,887	241,509	150,606
2023	Junio	34,258	232,886	147,742
2023	Julio	41,410	245,773	171,772
2023	Agosto	38,522	214,651	164,302
2023	Septiembre	28,867	194,576	129,820
2023	Octubre	29,382	230,036	150,836
2023	Noviembre	29,771	240,269	174,347
2023	Diciembre	38,108	247,634	187,807

Fuente: DATATUR 2023 y SEDETUR Qroo 2024.

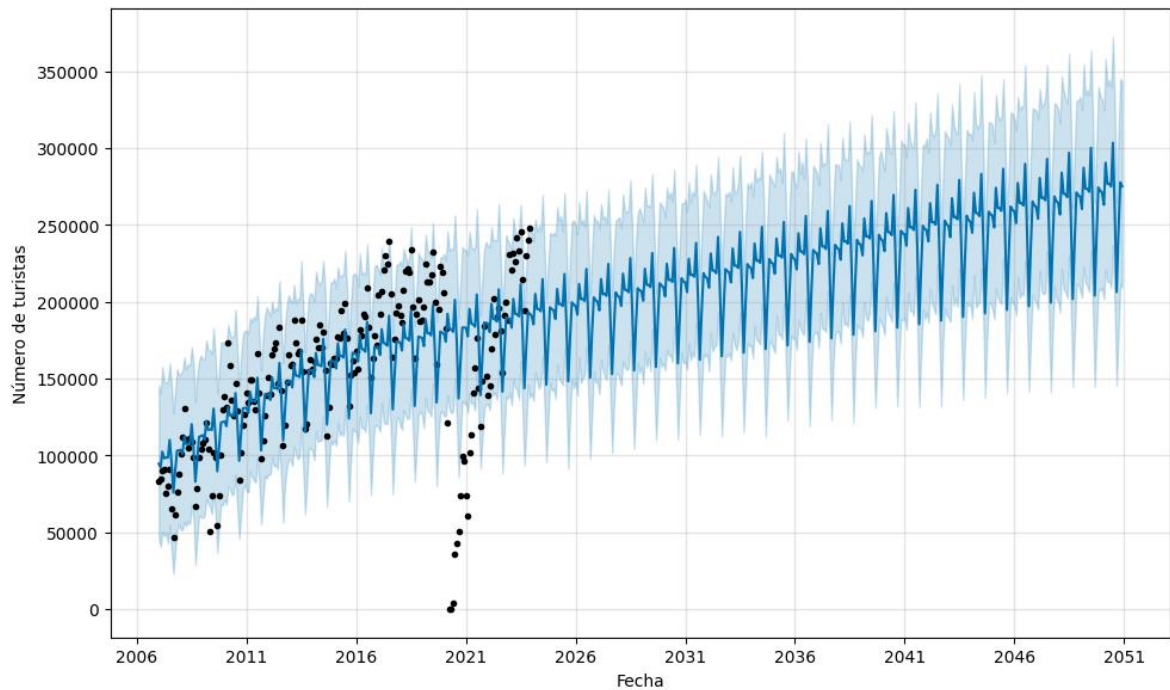
A partir de los datos de la tabla anterior se estableció el promedio de visitantes en Tulum respecto a los visitantes en el Riviera Maya, ajustados a una función de distribución de probabilidad tipo normal para definir una proyección de dichas proporciones al año 2025 tal como se muestra en la Figura 34.

Figura 34. Proyección del porcentaje de visitantes de Tulum con respecto a Riviera Maya (2022-2050).



La proyección de los visitantes en el destino Riviera Maya se llevó a cabo considerando la tendencia y estacionalidad de la serie de tiempo 2007-2023 y utilizando el modelo local de series temporales estructurales bayesianas Prophet, el cual es ideal para capturar tendencias a largo plazo con patrones estacionales (Figura 35).

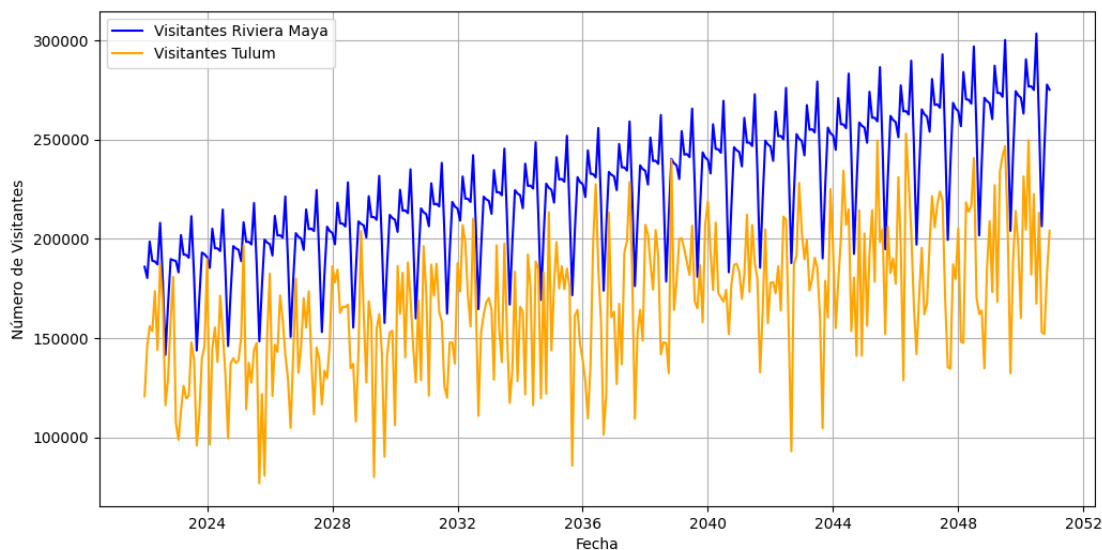
Figura 35. Proyección de visitantes en el destino Riviera Maya al 2050.



Fuente: Elaboración propia con base en datos de DATATUR.

La proyección de visitantes de la Figura 35 anterior ajustada con la proporción estimada de la Figura 34 permitió generar la proyección estimada para los visitantes en la localidad de Tulum como se muestra en la Figura 36.

Figura 36. Proyección de visitantes en Riviera Maya y Tulum (2022-2050).



Por último, a través del modelo Prophet fue estimada la proyección de visitantes de la localidad de Akumal para así completar los visitantes a nivel municipal. Los datos históricos utilizados fueron los obtenidos directamente de DATATUR para el destino Akumal (Figura 37).

Figura 37. Proyección de visitantes para la localidad de Akumal.

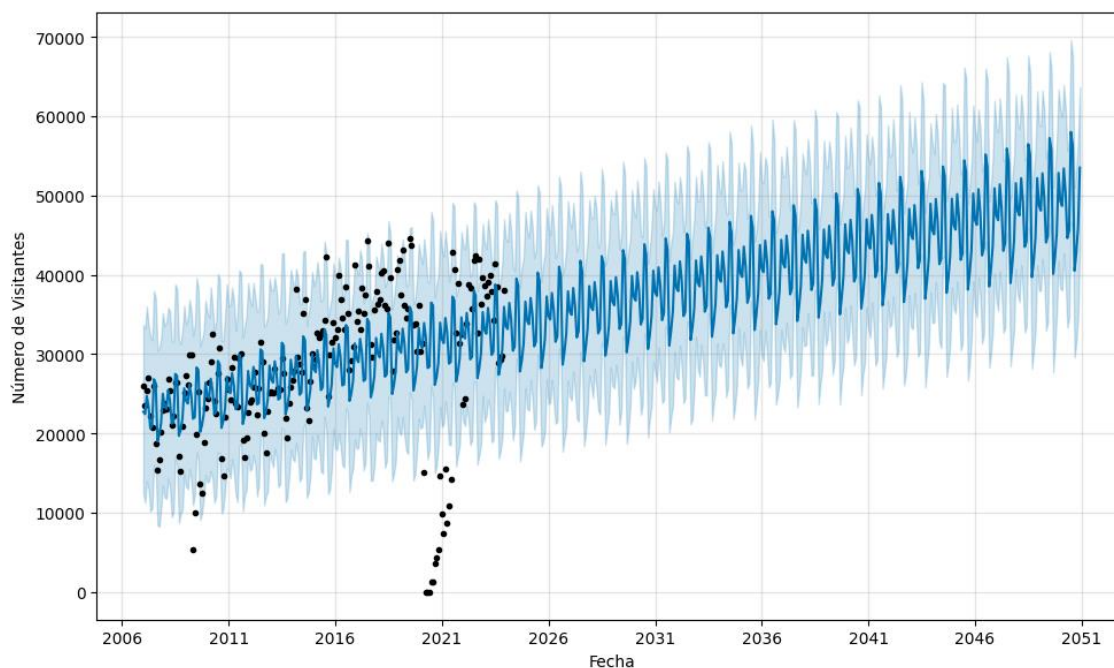


Tabla 38. Resultados de proyecciones de visitantes para el año 2050 en Tulum.

Año	Visitantes Tulum (2050)	Visitantes Akumal (2050)	Total (2050)
Enero	160,146	49,313	1,155,637
Febrero	231,503	48,697	1,596,019
Marzo	204,620	53,426	1,444,947
Abril	249,726	50,341	1,714,428
Mayo	181,985	44,647	1,275,642
Junio	222,546	45,615	1,530,313
Julio	167,329	58,026	1,228,928
Agosto	213,247	56,320	1,507,988
Septiembre	152,974	40,521	1,082,157
Octubre	152,071	42,739	1,083,882
Noviembre	182,208	45,931	1,281,263
Diciembre	204,051	53,524	1,441,743
Población flotante			16,344,997

Fuente: Elaboración propia a partir del modelo Prophet.

Bajo el supuesto de que el abasto de agua potable per cápita se mantendrá en la proporción actual ($3.57 \text{ m}^3/\text{persona/año}$) y considerando la población flotante estimada (16,344,997) y la población residente en 2050 (102,095), se tiene que la demanda de agua estimada es de 58.73 hm^3 , cifra que representa un 57.4% mayor al consumo actual. Asimismo, tomando en cuenta que la ETR bajo escenarios de cambio climático disminuirán alrededor de 11.52 mm y que la tendencia del abatimiento del acuífero es de 0.3 metros por año se tienen los parámetros de la Tabla 39.

Tabla 39. Parámetros estimados para el cálculo de la disponibilidad de agua al 2050.

Parámetro	Descripción	Volumen actual ($\text{hm}^3/\text{año}$)	Volumen 2050 ($\text{hm}^3/\text{año}$)
B	Volumen de bombeo	37.31	58.73
ETR	Evapotranspiración real	1,710.14	1,689.4
Sh	Salidas de flujo subterráneo horizontal	23	23
Eh	Entradas de flujo subterráneo horizontal	2	2
AV(S)	Cambio de almacenamiento del acuífero	-14.47	-17.92

Para la estimación de la disponibilidad media anual en el municipio de Tulum fueron utilizados los parámetros de la tabla anterior que permiten estimar la recarga vertical y la disponibilidad natural media comprometida, además de considerar que de acuerdo con los modelos de cambio climático la precipitación media anual se verá disminuida en promedio 60.4 mm, lo que representa una disminución del 5% en la recarga vertical. Los resultados de estos ajustes se presentan en la Tabla 40, donde la disponibilidad media anual estimada para el municipio de Tulum para el año 2050 es de 514.53, manifestando una disminución de casi 100 hm³ con respecto a la estimación actual, aunque aún suficiente para garantizar el consumo actual y la disponibilidad natural comprometida.

Tabla 40. Parámetros estimados para el cálculo de la disponibilidad media anual de agua al 2050 en Tulum.

Parámetro	Descripción	Volumen actual (hm ³ /año)	Volumen 2050 (hm ³ /año)
R	Recarga total	1,814.98	1,665.63
DNC	Disponibilidad natural comprometida	1,164.52	1,092.38
VEAS	Volumen concesionado	37.31	58.73
DMA	Disponibilidad media anual	613.14	514.53

9.4.7 DISPONIBILIDAD PERCÁPITA

En el análisis anterior se muestra de forma integrada el consumo de agua de la población residente y la población flotante, de tal manera que a partir de esta integración se estima un consumo per cápita de 3.57 m³/persona/año (residentes y turistas-noche). Dicho consumo es un referente global del suministro per cápita actual del recurso, sin embargo, generaliza situación de la dotación y suministro. Con el propósito de reflejar datos que permitan identificar la situación actual del abasto de agua de la población residente con respecto a la población flotante a continuación se describen y desglosan los datos de forma independiente.

De acuerdo con el REPDA, para el año 2023 en el municipio de Tulum 7.138 hm³ del agua subterránea concesionada corresponden al consumo público (Tabla 32), lo cuales equivalen a 3,138 millones de litros al año, que divididos entre la población residente al 2020 (46,721 habitantes) corresponden a una dotación diaria per cápita de 418.6 lt/hab/día.

Los datos del REPDA también señalan un consumo de la industria integrada y servicios de 28.81 hm³/año (Tabla 32), que divididos entre el número de visitantes al 2023 (433,083 para Akumal y 1,805,341 para Tulum) se tiene un consumo per cápita para la población flotante de 35.3 lt/turista/día.

Cabe señalar que estos consumos ya están considerados en las proyecciones señaladas en el apartado anterior, ya que la estimación de 3.57 m³/persona/año considera población residente, visitantes y turistas noche.

9.5 ESCENARIO CONTEXTUAL

El escenario contextual se enfoca en analizar los posibles cambios en el sistema derivados de la aplicación de programas, proyectos y acciones gubernamentales, a nivel nacional, estatal y municipal con incidencia en el área de ordenamiento. Este análisis considera cómo estas intervenciones pueden influir en la transformación del territorio, ya sea catalizando o inhibiendo el desarrollo de sectores específicos.

Este escenario, integra la influencia de los planes y programas gubernamentales en las variables que conforman el sistema socioambiental del municipio de Tulum. Su propósito es ofrecer una visión de las posibles trayectorias futuras del sistema en función de estas intervenciones.

En este sentido, la Tabla 41 presenta los planes y programas considerados para el desarrollo de este escenario. Dichos instrumentos corresponden a los analizados previamente en el apartado 8.7 del Capítulo VIII, de la etapa de Diagnóstico. A partir de sus objetivos, políticas, estrategias, proyectos y acciones se identifica su potencial incidencia en los patrones de uso del territorio y el desarrollo sectorial del municipio.

Tabla 41. Planes y programas gubernamentales.

Plan o Programa
Planes, Programas, Proyectos y Acciones en el Ámbito Federal
Plan Nacional de Desarrollo 2019 - 2024
Programa Sectorial de Economía 2020-2024
Programa Sectorial de Agricultura y Desarrollo Rural 2020-2024
Programa Sectorial de Bienestar 2020-2024
Programa Sectorial de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano 2020-2024
Programa Sectorial de Turismo 2020-2024
Programa Sectorial de Educación 2020-2024
Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recurso Naturales 2020-2024
Programa Institucional 2020-2024 de la Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero
Programa Institucional del Fideicomiso de Fomento Minero 2020-2024
Programa Institucional 2020-2024 Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura
Programa Institucional 2020-2024 del Fondo Nacional de Fomento al Turismo
Programa Institucional de la Comisión Nacional Forestal 2020-2024
Programa Institucional del Instituto Nacional del Suelo Sustentable
Planes, Programas, Proyectos y Acciones en el Ámbito Estatal
Plan Estatal de Desarrollo de Quintana Roo 2023-2027
Programa Sectorial de Desarrollo Urbano Incluyente, Secretaría de Desarrollo Territorial Urbano Sustentable del Estado de Quintana Roo
Programa Sectorial de Desarrollo Económico Integral, Secretaría de Desarrollo Económico del Estado de Quintana Roo

Plan o Programa
Programa Sectorial de Medio Ambiente y Sustentabilidad, Secretaría de Ecología y Medio Ambiente del Estado de Quintana Roo
Programa Especial de Pueblos y Comunidades Indígenas, Instituto para el Desarrollo del Pueblo Maya y las Comunidades Indígenas del Estado de Quintana Roo
Planes, Programas, Proyectos y Acciones en el Ámbito Municipal
Plan Municipal de Desarrollo 2021-2024
Programa Sectorial: Comunidad Ordenada, Infraestructura y Participación Ciudadana Municipal 2021-2024
Programa Sectorial de Desarrollo Económico Municipal 2021-2024
Programa Sectorial de Bienestar Municipal
Programa Sectorial Ambiental Municipal 2021-2024

METODOLOGÍA

A partir del modelo conceptual del sistema socioambiental, fue formulado el escenario contextual para el Programa de Ordenamiento Ecológico Local de Tulum. Como ya fue señalado, la prospectiva contempló el efecto que tendría sobre el territorio la implementación de los instrumentos de planificación gubernamental presentados en la Tabla 41.

En la modelación del sistema, se utilizó un análisis de impacto cruzado, a través del método KSIM o simulación K, por Kane (1972)⁴⁶, para un periodo de 25 años. El algoritmo de la KSIM se fundamenta en una serie de ecuaciones que explican cinco postulados. El primero expresa que el valor de una variable en un tiempo dado ($t+1$) depende de su valor en el instante anterior, t , y del grado de cambio que experimente en ese lapso. El segundo establece que todas las variables del sistema deben estar normalizadas en el intervalo $[0,1]$, de forma tal que:

$$0 \leq x_{it} \leq 1, \text{ para toda } i = 1, 2, \dots, n \text{ y } t \geq 0$$

donde i es el índice de variables, n es el número total de variables y t es el tiempo de simulación.

Los postulados tres, cuatro y cinco se expresan mediante la siguiente ecuación por diferencia:

$$x_{it+1} = x_{it}^{\Phi_{it}}$$

⁴⁶ Merino-Benítez, T. y L. A. Bojórquez-Tapia. 2021. Manual: Modelación y simulación dinámica de sistemas socioambientales. México: UNAM.

El exponente Φ_{it} representa el cambio de una variable x_i del tiempo t al tiempo $t+1$. A su vez, este exponente se define por la siguiente ecuación:

$$\Phi_{it} = \frac{\frac{1+\Delta t}{2} \sum_{j=1}^N \left[\left| \alpha_{ij} + \beta_{ij} \frac{dx_j}{dt} \right| - \left(\alpha_{ij} + \beta_{ij} \frac{dx_j}{dt} \right) \right] x_j}{\frac{1+\Delta t}{2} \sum_{j=1}^N \left[\left| \alpha_{ij} + \beta_{ij} \frac{dx_j}{dt} \right| + \left(\alpha_{ij} + \beta_{ij} \frac{dx_j}{dt} \right) \right] x_j}$$

9.5.1 RESULTADOS

El modelo para el escenario contextual, muestra una dinámica socioambiental que refleja los efectos de las intervenciones gubernamentales y de políticas públicas previstas para el territorio. Este escenario, basado en la Gráfica 31, permite vislumbrar cambios moderados en diversas variables clave, lo que sugiere que los programas y acciones de los tres órdenes de gobierno tienen una influencia importante, aunque no siempre suficiente para modificar las tendencias de largo plazo observadas en el escenario tendencial (Gráfica 30).

Con relación a los sectores que se desarrollan en el municipio de Tulum, los asentamientos humanos muestran un patrón de crecimiento más regulado en el escenario contextual en contraste con el escenario tendencial, atribuido a la implementación de políticas de planeación territorial y urbana. Un ejemplo claro de la puesta en marcha de estas políticas, es el trabajo que el municipio de Tulum ha venido realizando para consolidar la ordenación del territorio, particularmente en su ámbito urbano. Esto se evidencia en la reciente publicación, el 20 de septiembre de 2024, en el Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo, del Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tulum. Además, destaca la labor en curso para concretar el Programa de Desarrollo Urbano del corredor Tulum-Cobá, un proyecto que refleja el compromiso de las autoridades municipales por garantizar la congruencia y armonización entre los diferentes instrumentos de planeación para el territorio. Este enfoque busca no solo regular el crecimiento urbano, sino también promover un desarrollo más equilibrado y sostenible en la región.

El sector turístico en Tulum en el escenario contextual, evidencia un ritmo de desarrollo más mesurado, donde las intervenciones buscan equilibrar el crecimiento económico con la sostenibilidad ambiental. Este enfoque se ve influenciado por las políticas del Programa Sectorial de Turismo 2020-2024, el Plan Maestro de Turismo Sustentable Quintana Roo 2030, los cuales fomentan la diversificación de la oferta turística a través de prácticas de bajo impacto.

En este contexto, se ha priorizado el impulso del turismo de naturaleza y comunitario, modelos que integran la conservación de los recursos naturales y culturales como ejes fundamentales del desarrollo turístico. Como resultado, en el escenario contextual, el crecimiento del sector ecoturístico es más dinámico y sostenido, reflejando un progreso impulsado por los objetivos, estrategias y acciones delineadas en los programas y planes previamente mencionados.

El sector agrícola y ganadero muestra una tendencia decreciente en ambos escenarios; sin embargo, en el escenario contextual, la reducción es más gradual y los niveles finales son ligeramente superiores. Esto sugiere la implementación de estrategias orientadas a la sostenibilidad y el fortalecimiento de estas actividades a través de políticas de apoyo que no comprometen los recursos naturales. Estos esfuerzos se reflejan en los planes de desarrollo a nivel nacional, estatal y municipal, así como en diversos programas sectoriales, entre ellos los de Agricultura y Desarrollo Rural, Bienestar y el Programa Especial para Pueblos y Comunidades Indígenas, que buscan fomentar prácticas productivas más resilientes y sustentables. Entre los programas impulsados por el gobierno federal destaca “Sembrando Vida”, dirigido a las y los sujetos agrarios para impulsar su participación efectiva en el desarrollo rural, con lo que se busca contribuir a generar empleos, incentivar la autosuficiencia alimentaria, mejorar los ingresos y recuperar la cobertura forestal.

En el caso del sector apícola/meliponicultura, el escenario tendencial proyecta un crecimiento moderado y sostenido. Sin embargo, en el escenario contextual, este crecimiento es más acelerado desde las primeras etapas, lo que refleja su priorización como una actividad económica sostenible y compatible con los objetivos de conservación ambiental. Esta priorización se evidencia en diversos planes y programas, como el Programa Sectorial de Agricultura y Desarrollo Rural, el Plan Estatal de Desarrollo, el Programa Sectorial de Desarrollo Económico Integral de Quintana Roo y el Programa Sectorial de Desarrollo Económico Municipal de Tulum. En este marco, destaca la implementación del programa municipal “Kanan Jobon”, una iniciativa orientada a fortalecer la producción y el cuidado de la miel, beneficiando a los apicultores del municipio y sus alrededores.

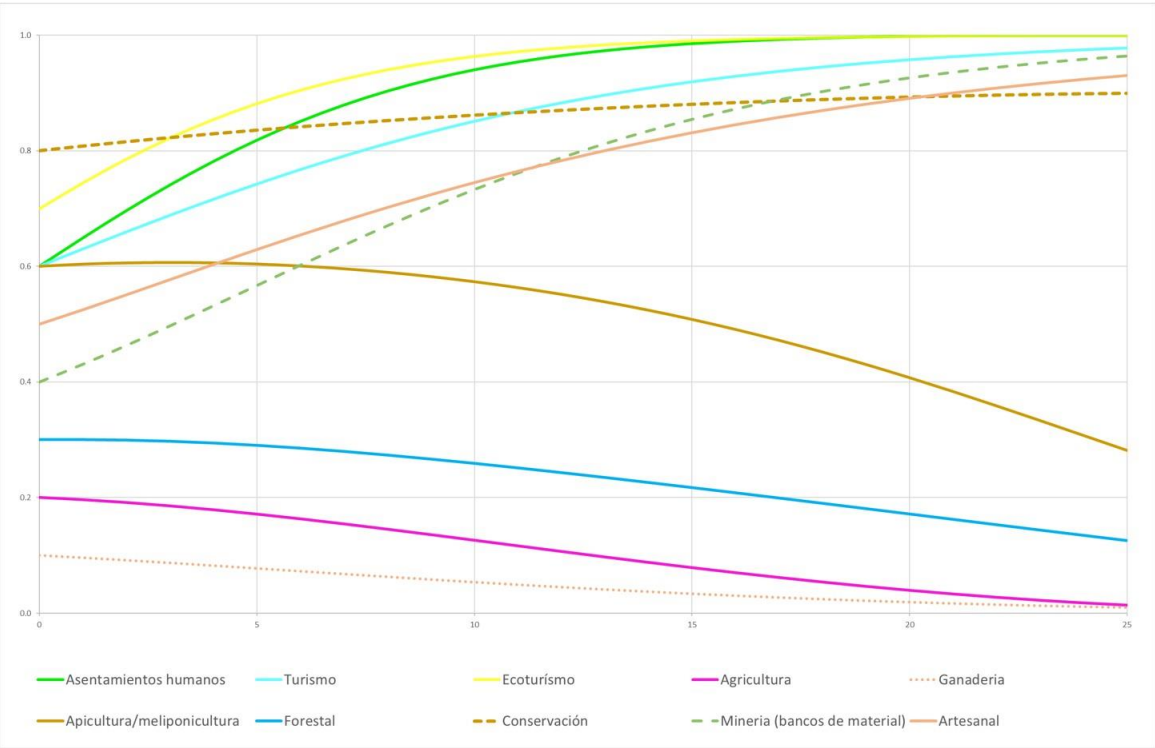
En el escenario tendencial, el sector forestal muestra una disminución gradual, impulsada principalmente por la expansión de otros sectores productivos que son prioritarios para la economía del municipio. Sin embargo, en el escenario contextual, aunque también se observa una reducción, esta es más controlada y tiende a estabilizarse a largo plazo, reflejando un enfoque más equilibrado en la gestión del territorio. Este comportamiento responde a la implementación de diversas estrategias y programas de apoyo, como el Programa Nacional Forestal y el Programa Institucional 2020-2024 de la Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero, entre otros. Estos programas buscan fortalecer la gestión sostenible de los recursos forestales, promoviendo su conservación y aprovechamiento responsable, al tiempo que impulsan el desarrollo económico local.

En el sector minero, particularmente en la extracción de material pétreo, ambos escenarios proyectan un crecimiento exponencial y sostenido. No obstante, en el escenario contextual, este crecimiento es más moderado, lo que refleja la influencia en la regulación más estricta sobre los sectores productivos que estimulan esta actividad.

En el escenario contextual, el sector artesanal experimenta un mayor impulso para su desarrollo, respaldado por instrumentos de política pública implementados en los distintos niveles de gobierno. Estas estrategias han posicionado la actividad artesanal como una alternativa económica viable, fomentando su fortalecimiento a través de incentivos, programas de apoyo y medidas que promueven la preservación de las tradiciones locales y el desarrollo sostenible.

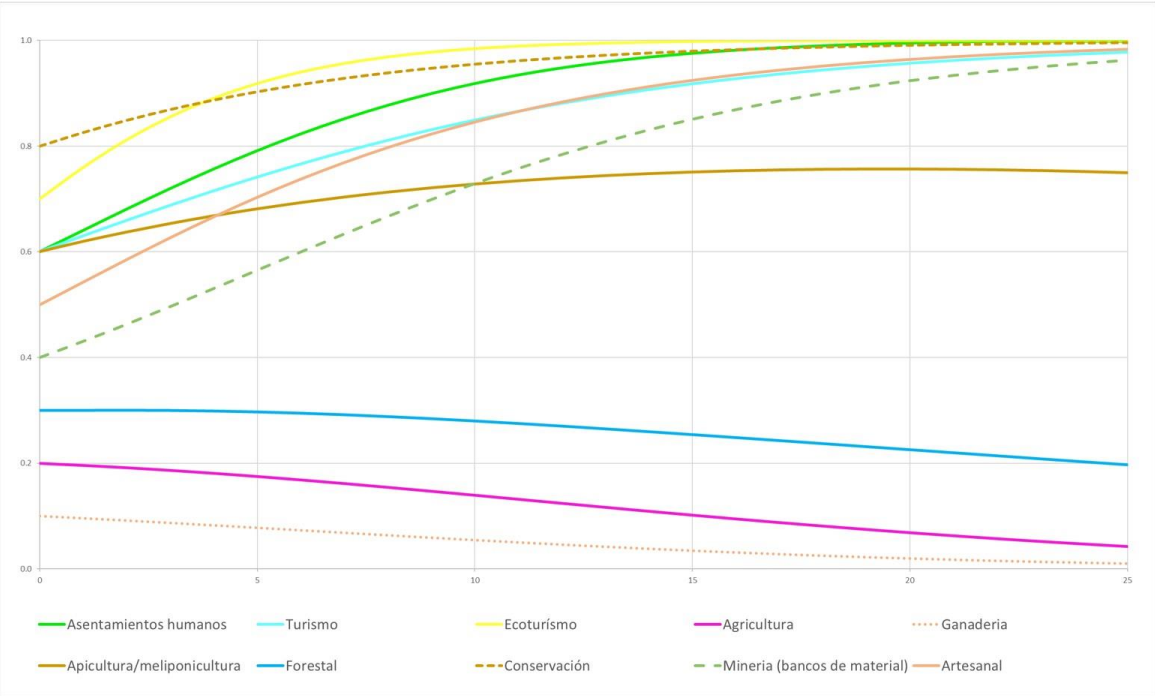
Finalmente, en comparación con el escenario tendencial, el sector conservación muestra en el escenario contextual una tendencia al alza más marcada. Este avance se relaciona con el fortalecimiento de políticas y programas enfocados en la preservación de ecosistemas y la gestión sostenible del patrimonio natural, de manera particular destacan los objetivos y estrategias planteadas en el Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2020-2024. Sin embargo, cabe señalar que algunas acciones gubernamentales dirigidas al desarrollo económico y social, como los proyectos de gran envergadura (Tren Maya, Parque del Jaguar), tienen efectos contradictorios al generar impactos ambientales que pueden contrarrestar los avances logrados en conservación.

Gráfica 26. Escenario tendencial, sectores.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 27. Escenario contextual, sectores.



Fuente: Elaboración propia.

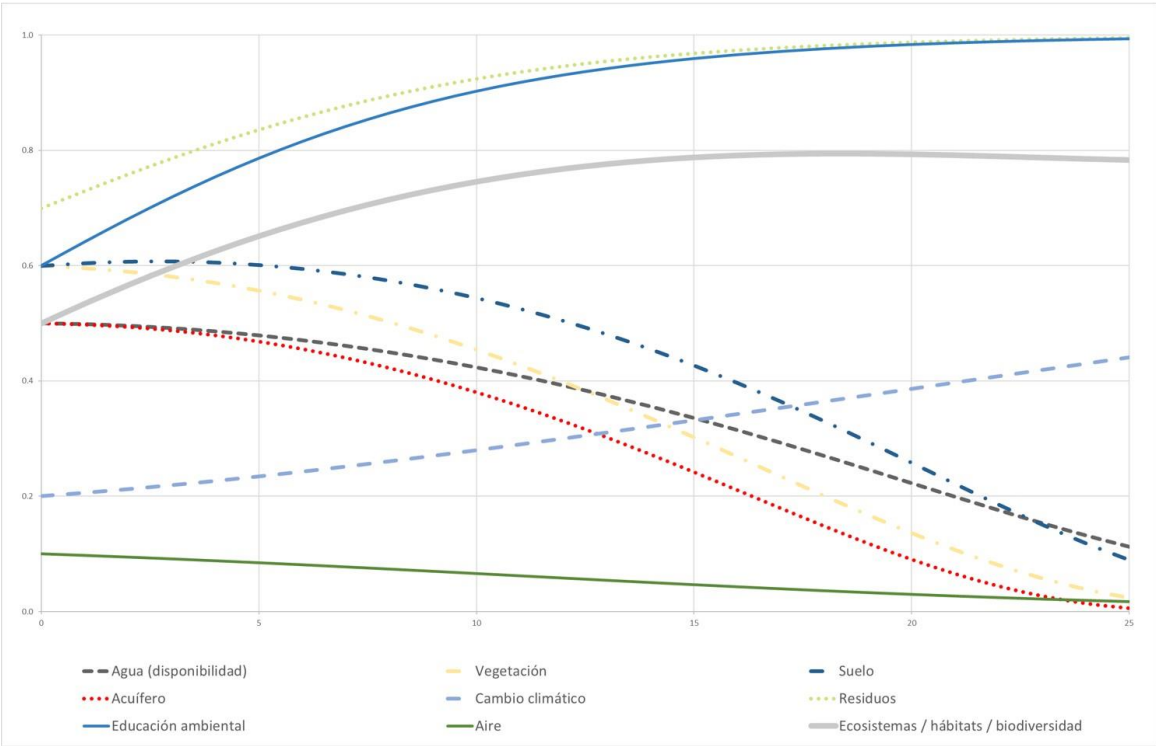
En cuanto a los recursos naturales, el escenario tendencial muestra una disminución progresiva en elementos clave como el agua, el suelo y la vegetación, además de un deterioro del acuífero, atribuido a la sobreexplotación, la expansión de actividades humanas y los efectos del cambio climático. Esta degradación también impacta negativamente en los ecosistemas, hábitats y la biodiversidad, acelerando procesos de deterioro ambiental. A su vez, esta tendencia se ve reflejada en ecosistemas, hábitats y biodiversidad. En contraste, en el escenario contextual, estas variables ambientales presentan señales de mejora, con una ligera tendencia hacia la recuperación. Sin embargo, esta recuperación no es lo suficientemente significativa como para revertir por completo las trayectorias críticas observadas en el escenario tendencial. Este avance moderado refleja la implementación de estrategias y objetivos en políticas públicas con un enfoque activo en la protección y gestión sostenible de los recursos naturales. Entre las iniciativas de alcance federal que contribuyen a este proceso, destacan el establecimiento de Áreas Naturales Protegidas, como el Área de Protección de Flora y Fauna Jaguar y el Área de Protección de Flora y Fauna Felipe Carrillo Puerto, así como el Programa de Ordenamiento Territorial de la Región Sur-Sureste y el Programa Territorial Operativo de la Zona Sur de la Riviera Maya, los cuales buscan equilibrar el desarrollo con la conservación ambiental.

En cuanto al cambio climático persiste como un desafío significativo, con una trayectoria ascendente que pone de manifiesto la insuficiencia de las acciones actuales para mitigar sus impactos. Este elemento sigue siendo un factor determinante en la vulnerabilidad del municipio.

Con relación al manejo de residuos. a diferencia del escenario tendencial, en el escenario contextual el crecimiento es más mesurado y controlado, reflejando un enfoque más integral en su gestión y tratamiento. Este comportamiento está influenciado por la implementación de programas y estrategias orientadas a la reducción, reutilización y disposición adecuada de los desechos. Uno de los programas clave en este proceso es “Desarrollo Ciudad Limpia y Mágica”, contemplado en el Plan Municipal de Desarrollo 2021-2024, el cual busca mejorar fomentar el manejo de residuos y promover la cultura del reciclaje para minimizar el impacto ambiental derivado de la generación.

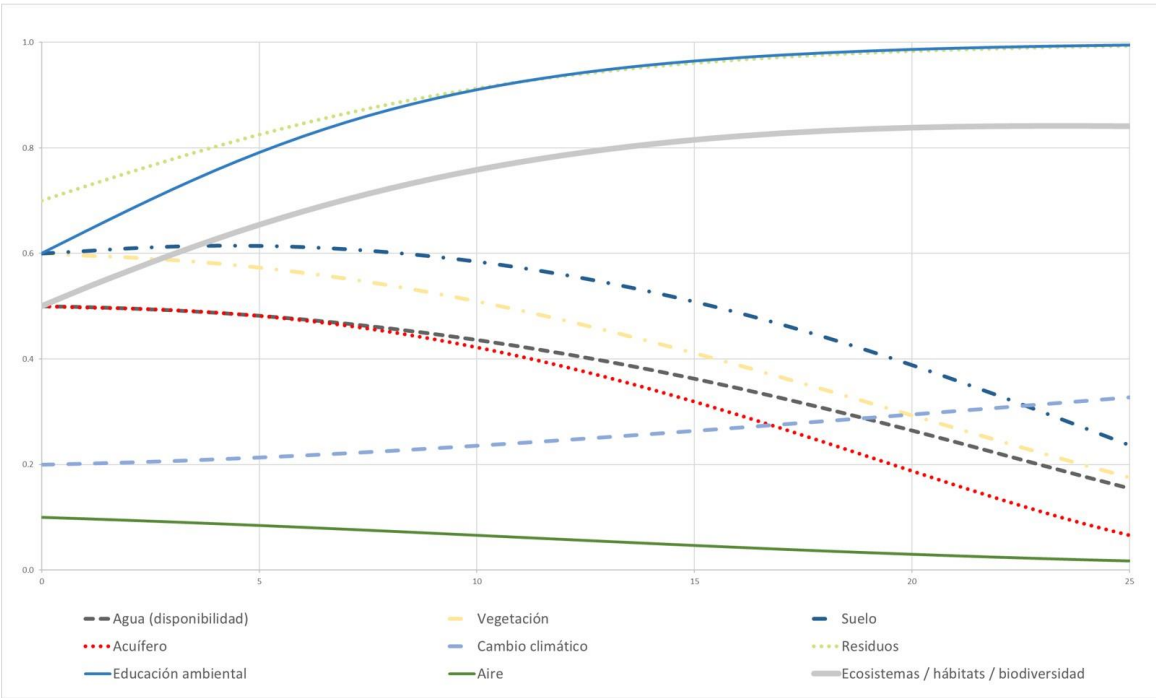
Finalmente, la educación ambiental en el escenario contextual, el incremento es más pronunciado y sostenido, lo que refleja un esfuerzo estratégico en la política pública por posicionar a este factor como un pilar para fomentar la participación social y la adopción de prácticas sostenibles.

Gráfica 28. Escenario tendencial recursos naturales.



Fuente: Elaboración propia.

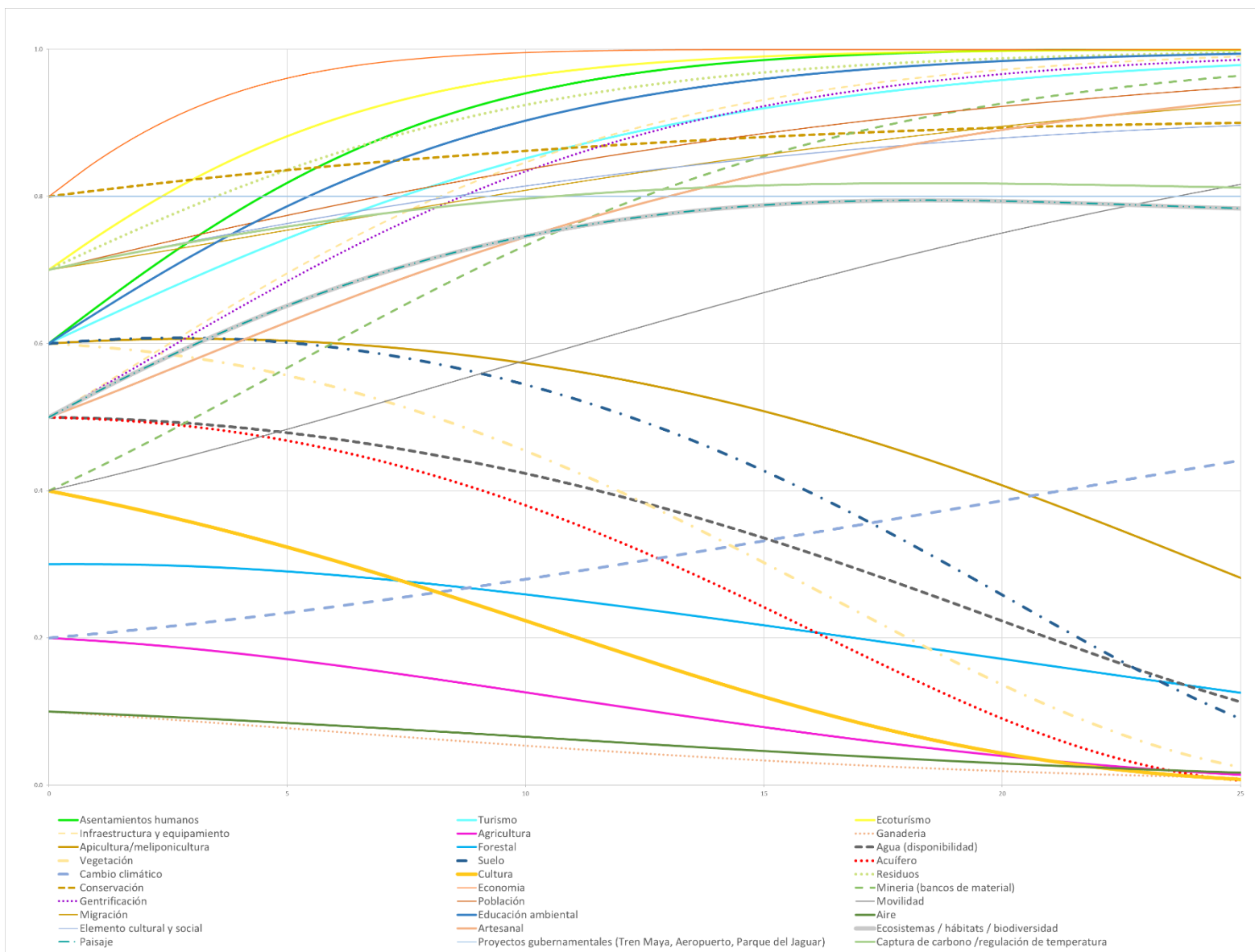
Gráfica 29. Escenario contextual, recursos naturales.



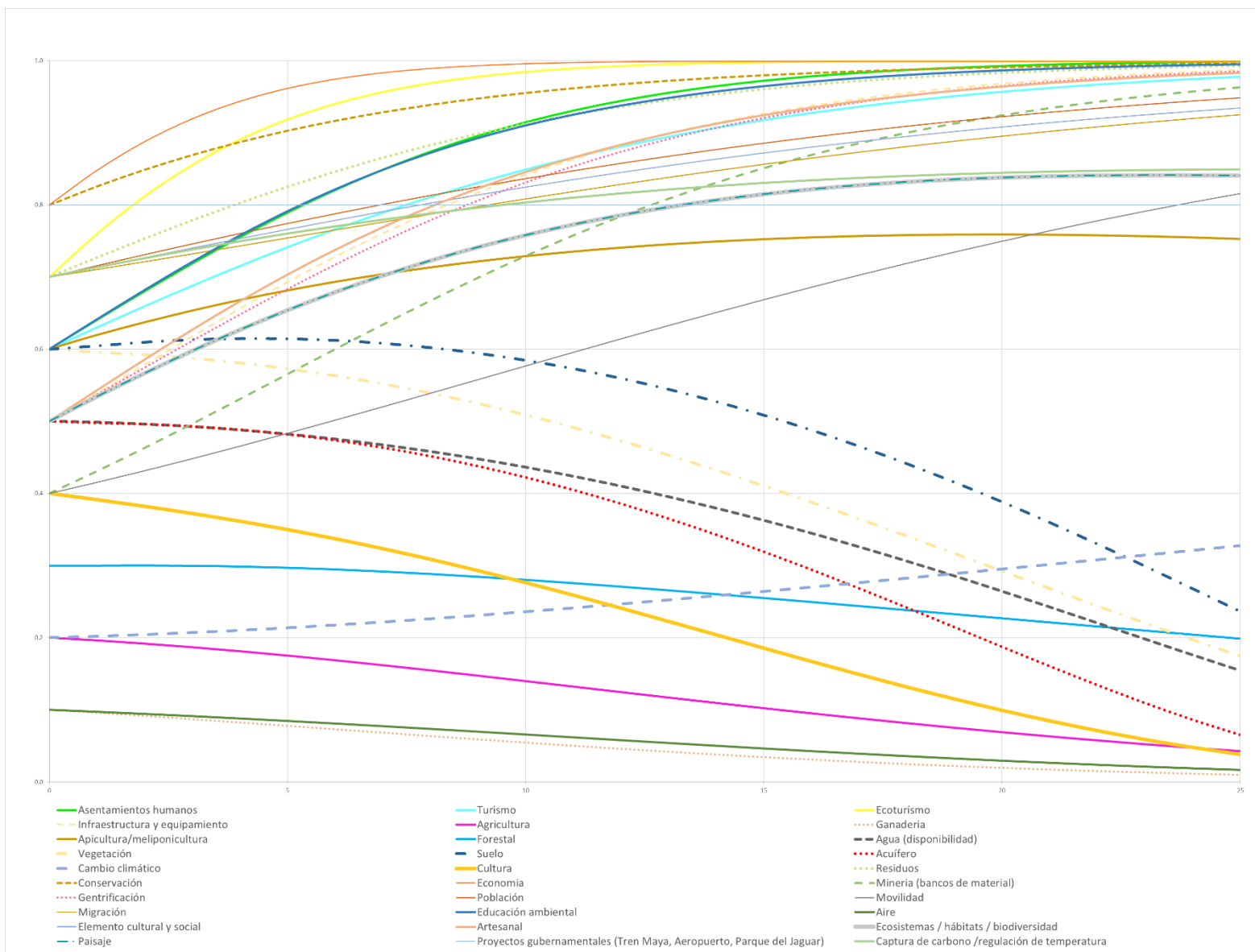
Fuente: Elaboración propia.

En conclusión, el escenario contextual revela que las políticas gubernamentales pueden desempeñar un papel fundamental en la configuración de las dinámicas socioambientales y, en el contexto de este escenario, nos permite identificar las áreas en donde se encuentran influyendo, así como las áreas de oportunidad en donde los desafíos persisten.

Gráfica 30. Escenario tendencial.



Gráfica 31. Escenario contextual.



De acuerdo con Zubicaray et al., (2021)⁴⁷, los patrones demográficos que se presentan en diversas urbes de México no siempre guardan una relación directa con los patrones de expansión urbana. En la historia reciente, el fenómeno urbano mexicano se ha caracterizado por el crecimiento de la mancha urbana a un ritmo superior al del crecimiento poblacional, es decir, por procesos de expansión urbana de baja densidad. En el periodo comprendido entre 1980 y 2010 la población de las zonas urbanas de México se duplicó, mientras que la huella de las manchas urbanas creció en promedio siete veces (SEDESOL, 2012)⁴⁸.

EL crecimiento demográfico metropolitano se ha manifestado de forma desigual en todo el país, con un crecimiento más acelerado en ciudades costeras con una actividad económica basada en el turismo y por lo general todavía pequeñas como Cabo San Lucas y San José del Cabo en Baja California Sur, Playa del Carmen y Cozumel en Quintana Roo y Puerto Vallarta en Jalisco (Zubicaray et al., 2021).

La densidad de población observada en los centros de población tiende al incremento, y esta es una tendencia que se ve favorecida por la naturaleza de las políticas públicas, todo ello con el fin de concentrar ciudades donde la accesibilidad y trayectos cotidianos no mermen la calidad de vida de los ciudadanos. Sin embargo, no existe una política clara de atención a los asentamientos irregulares por lo que la hipótesis que integra este escenario considera que la expansión será acotada a los límites de los planes de desarrollo urbano decretados.

Para la integración del escenario contextual se han incorporado variables relacionadas con políticas gubernamentales, que a través de instrumentos pueden funcionar como restricciones al crecimiento o expansión de la superficie construida, tal es el caso de las Áreas Naturales Protegidas, la regulación en materia de humedales y los Programas de Desarrollo Urbano, los cuales se considera tienen relación directa con las tendencias derivadas de las interrelaciones sectoriales y su posterior efecto en las tasas de cambio de uso de suelo.

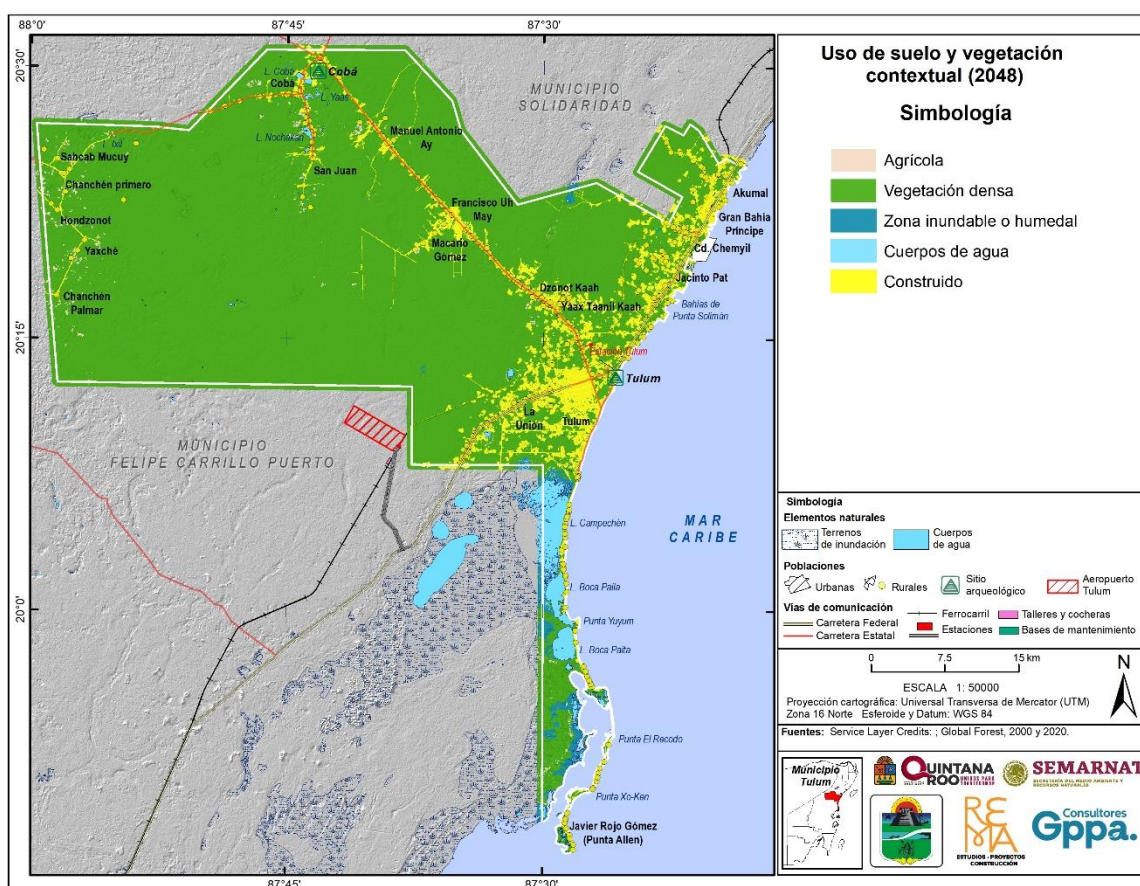
⁴⁷ Zubicaray Díaz, G. y otros. (2021). Las ciudades mexicanas: tendencias y sus impactos. Recuperado de: https://urbantransitions.global/wp-content/uploads/2021/02/Las_ciudades_mexicanas_digital.pdf.

⁴⁸ SEDESOL. (2012). La expansión de las ciudades 1980 – 2010, México. Secretaría de Desarrollo Social y Agrario.

Con base en los resultados de la matriz de cambios probables estimados en el escenario tendencial se realizó un ejercicio de modelación que permitió determinar los cambios probables a partir de ponderar los sectores favorecidos por la asignación de programas gubernamentales que inhiben las tendencias de cambio no deseadas.

Cabe señalar que en este escenario la integración de planes y programas no cambio o modificó las interacciones entre sectores, más bien se plantean como impulsores del crecimiento de cada sector y por lo tanto ejercen más peso en la influencia que ya se presenta entre estos.

Mapa 15. Tendencia de cambio de cobertura, año 2048.



Fuente: Elaboración propia.

A diferencia del escenario tendencial, el mapa de cobertura de uso de suelo y vegetación del escenario contextual manifiesta un crecimiento o expansión de la superficie construida principalmente en las zonas aprovechables para el desarrollo urbano dentro de los PDU, de tal forma que el resto del territorio municipal mantiene una tasa de cambio mucho menor, sobre todo las zonas inundables y las áreas naturales protegidas. En general se puede concluir que en un escenario contextual la presión sobre la vegetación natural es menor que en el tendencial.

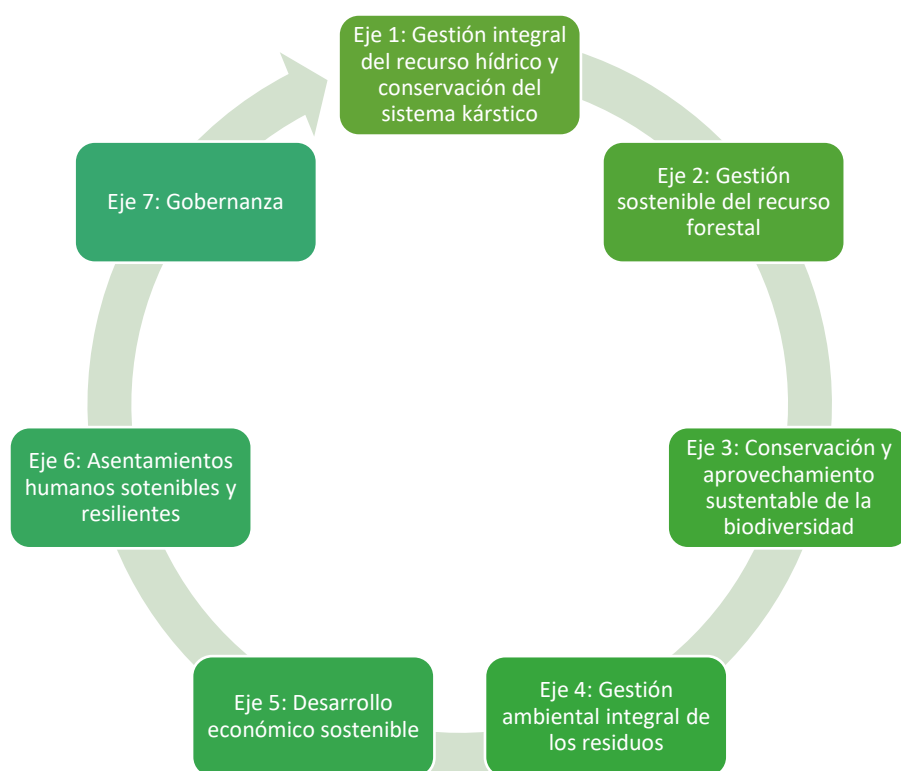
9.6 ESCENARIO ESTRATÉGICO

El escenario estratégico identifica el tipo de intervenciones requeridas para prevenir los conflictos ambientales y el deterioro de los bienes y servicios ambientales. Este escenario sirve de fundamento para generar el patrón de ocupación del territorio y las regulaciones en la propuesta de modelo.

Este escenario incorpora la influencia o efecto en el sistema socioambiental de los ejes, objetivos y metas delineados por la participación ciudadana, con el propósito de consolidar la imagen objetivo del municipio de Tulum, orientando su desarrollo hacia un modelo sostenible y equilibrado. A través del análisis de las tendencias de las variables clave, se evalúa el potencial impacto de las estrategias formuladas, resultado del enfoque participativo adoptado en los talleres de participación social.

Para recapitular, la Figura 38 presenta de manera esquemática los ejes estratégicos que configuran y orientan la tendencia de este escenario estratégico. Los objetivos y metas asociados a cada eje, junto con su descripción detallada, se encuentran disponibles en el apartado 9.3.1.1 de este documento para una consulta más profunda.

Figura 38. Ejes estratégicos.



Estos ejes estratégicos, objetivos y metas no solo responden a las necesidades actuales de Tulum, sino que también se proyectan hacia el futuro, teniendo en cuenta el cambio climático, el crecimiento poblacional y la conservación de la biodiversidad.

El Eje Estratégico 1, dedicado a la gestión integral del recurso hídrico y la conservación del sistema kárstico, es fundamental para asegurar la disponibilidad y calidad del agua, recursos relevantes para el bienestar humano y la funcionalidad de los ecosistemas. La correcta gestión de los acuíferos y el sistema kárstico permitirá mitigar los riesgos asociados a la sobreexplotación de los recursos hídricos y las alteraciones en los ciclos naturales, garantizando así su preservación para generaciones futuras.

Por otro lado, el Eje Estratégico 2 sobre la gestión sostenible del recurso forestal, tiene como propósito salvaguardar las masas forestales del municipio, decisivos para la regulación del clima, la protección del suelo y la provisión de servicios ecosistémicos. Este eje promoverá el uso racional de los recursos forestales, asegurando que las actividades productivas no comprometan la integridad de los ecosistemas, a la vez que se fomente su restauración y conservación.

El Eje Estratégico 3, que aborda la conservación y aprovechamiento sustentable de la biodiversidad, es otro pilar del programa. Este eje busca proteger la biodiversidad del municipio, asegurando que los ecosistemas naturales sean conservados y que el aprovechamiento de sus recursos se realice de manera responsable y sostenible. De esta manera, se equilibran las necesidades de desarrollo con la necesidad de proteger los elementos naturales que sustentan los servicios ambientales y la calidad de vida de la población.

En cuanto a los Ejes Estratégicos 4 y 5, que se enfocan en la gestión ambiental integral de los residuos y el desarrollo económico sostenible, ambos tienen un impacto directo en la calidad ambiental del municipio. La adecuada gestión de los residuos y la regulación del desarrollo económico son vitales para evitar la contaminación, la sobreexplotación de los recursos naturales y la degradación de los ecosistemas. Estos ejes promoverán una economía que no dependa de la explotación desmedida de los recursos, sino que fomente prácticas productivas responsables y sostenibles.

El Eje Estratégico 6, dedicado a los asentamientos humanos sostenibles y resilientes, será clave para guiar el crecimiento urbano del municipio. Este eje busca que los asentamientos se desarrollen de manera ordenada y resiliente frente a los impactos del cambio climático y otros riesgos, garantizando que los habitantes de Tulum vivan en un entorno seguro, saludable y ambientalmente responsable.

Finalmente, el Eje Estratégico 7, enfocado en la gobernanza, asegura que exista una coordinación efectiva entre los diferentes niveles de gobierno y otros actores relevantes. Una gobernanza sólida permitirá que las políticas y estrategias del establecidas en este instrumento sean implementadas de manera eficiente y participativa, asegurando su efectividad en la conservación y el desarrollo sostenible del municipio.

En conjunto, estos ejes estratégicos conforman un marco integral que permitirá a Tulum transitar hacia un desarrollo urbano, social y económico que sea compatible con la conservación de sus recursos naturales. El propósito de estos ejes es garantizar que el municipio pueda enfrentar los retos actuales y futuros, promoviendo la sostenibilidad, la resiliencia y el bienestar de sus habitantes a través de una gestión responsable y equilibrada de su territorio.

METODOLOGÍA

Como ya fue señalado, en el escenario estratégico, la prospectiva contempló el efecto que tendría la imagen objetivo definida para el Programa de Ordenamiento Ecológico Local de Tulum, dado que representa las expectativas sociales vinculadas al desarrollo municipal que considera la prevención de los procesos de deterioro ambiental a través del cumplimiento de ejes, objetivos y metas como medidas de corrección.

Al igual que en el escenario contextual, la modelación se basó en el uso del método KSIM (simulación K) propuesto por Kane, para un horizonte temporal de 25 años.

9.6.1 RESULTADOS

Como se puede apreciar en la Gráfica 37, este escenario exhibe una transformación significativa en la dinámica del sistema socioambiental, considerando la tendencial del sistema presentada en el apartado 9.4 y lo observado en la Gráfica 36. La participación ciudadana, traducida en ejes estratégico concretos, parece ejercer una influencia positiva en la mitigación de tendencias negativas y en la promoción de un desarrollo más equilibrado y respetuoso con el medio ambiente.

En el caso de los asentamientos humanos, el escenario tendencial muestra un crecimiento constante, con una expansión que pone en riesgo los ecosistemas sensibles. El escenario estratégico, alineado con el Eje Estratégico 6, busca consolidar asentamientos sostenibles y resilientes, limitando el crecimiento a áreas definidas como urbanizables y promoviendo medidas de adaptación al cambio climático. Esto asegura que los asentamientos sean inclusivos, respeten el entorno natural y proporcionen condiciones de vida dignas.

Para el sector turístico, el escenario tendencial evidencia un desarrollo continuo, pero insuficientemente regulado, lo que podría intensificar la presión sobre los recursos naturales y los ecosistemas. En contraste, el escenario estratégico, el crecimiento es más ordenado y sostenible, alineándose con los Ejes Estratégicos 3 y 5. Estos ejes priorizan la conservación de la biodiversidad y el equilibrio entre el desarrollo y la protección de los ecosistemas naturales.

El ecoturismo y la apicultura/meliponicultura, sectores económicos de bajo impacto ambiental, en el escenario estratégico, experimentan una tendencia ascendente, lo que indica un creciente interés por parte de la ciudadanía hacia estas prácticas. Estos sectores además de generar ingresos económicos, pueden contribuir a la conservación de la biodiversidad, la generación de empleos y el fortalecimiento de las comunidades locales.

El sector agrícola y ganadero, en el escenario tendencial enfrenta un declive debido a la pérdida de viabilidad económica. Sin embargo, el escenario estratégico, la reducción es más controlada, sugiriendo la incorporación de estrategias que compatibilicen la producción con la conservación de los recursos naturales, alineándose con los Ejes Estratégicos 3 y 5, que incentivan la promoción de alternativas con valor agregado y prácticas que minimicen su impacto ambiental.

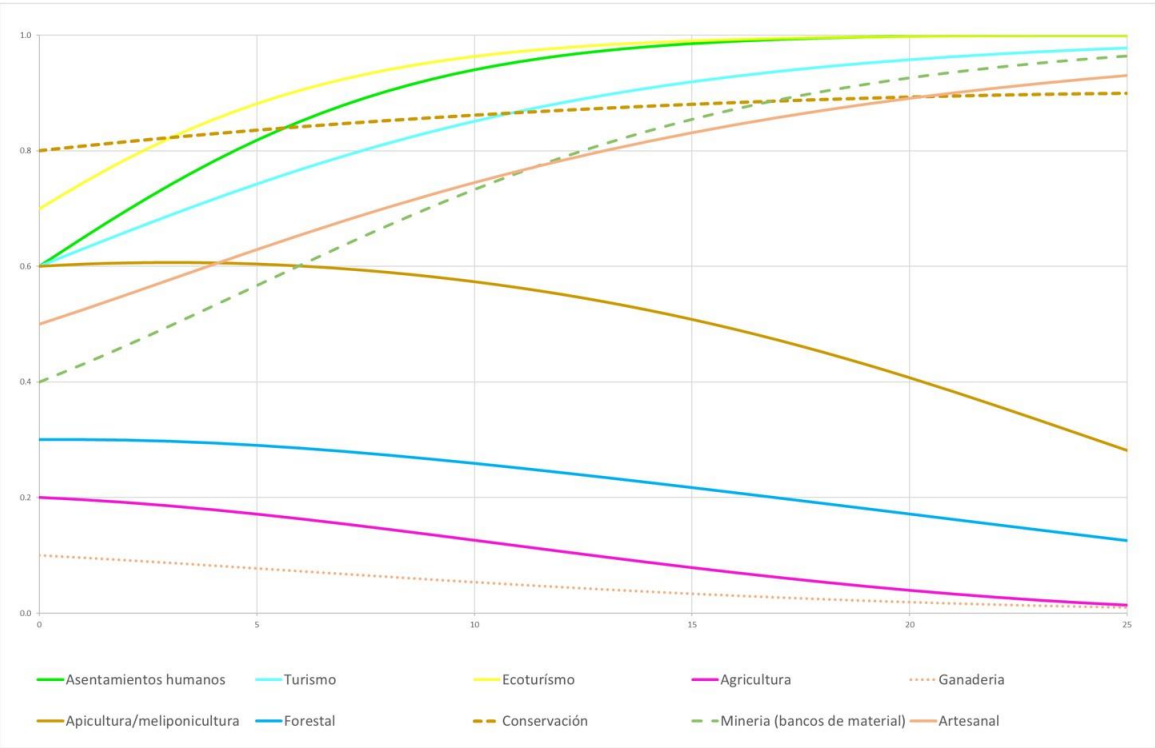
Las actividades forestales muestran un declive en el escenario tendencial, sin embargo, en el escenario estratégico, esta disminución es mitigada por esfuerzos de conservación y manejo sostenible, promovidos por el Eje Estratégico 2, que busca salvaguardar las masas forestales y los servicios ecosistémicos que estas proveen.

El sector artesanal mantiene una tendencia estable en ambos escenarios, pero en el estratégico se fomenta como una actividad económica que complementa los objetivos de conservación y desarrollo sostenible. Este enfoque está vinculado a la diversificación económica y la generación de ingresos para las comunidades locales, promoviendo prácticas de bajo impacto ambiental.

En el caso de la minería (bancos de material), el escenario tendencial muestra un crecimiento constante, mientras que en el estratégico se observan mayores restricciones, manteniéndose en niveles más reducidos. Esto evidencia un enfoque regulatorio que minimiza los impactos de esta actividad sobre el suelo y los ecosistemas, alineado con los objetivos de gestión integral del territorio.

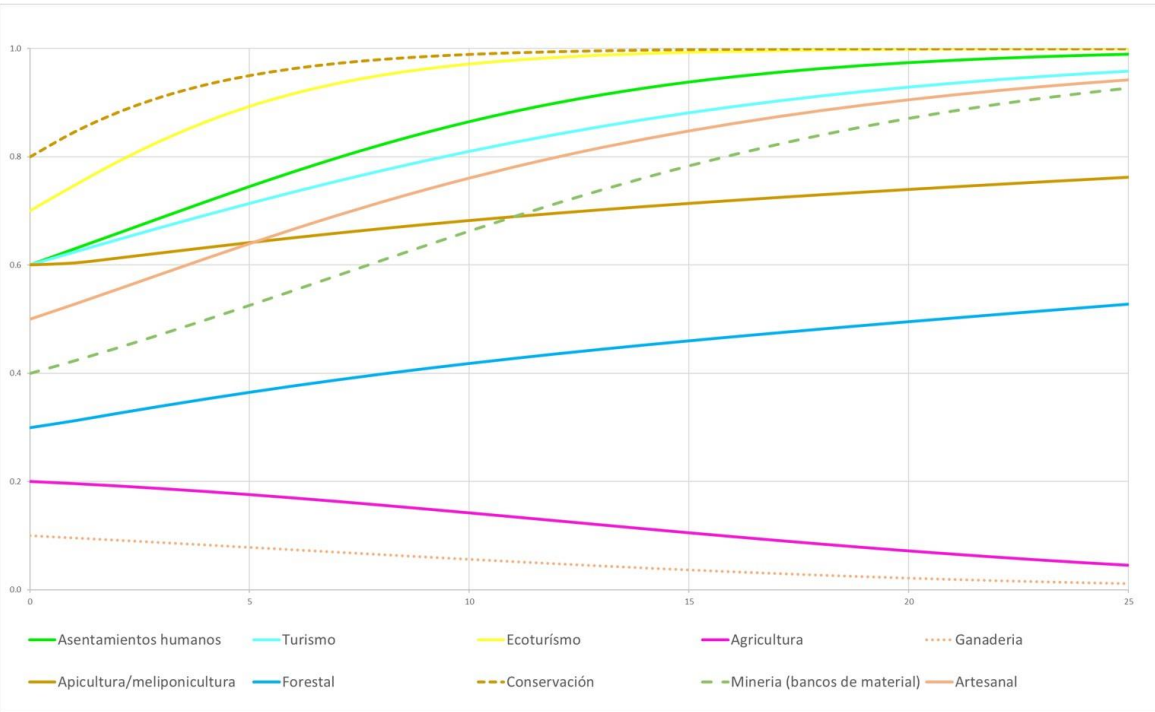
El rubro de conservación experimenta un crecimiento notablemente más significativo en el escenario estratégico, evidenciando la priorización de la protección de ecosistemas y hábitats naturales como una política central de este instrumento. El Eje Estratégico 3 es central en esta tendencia, con objetivos que incluyen la ampliación de áreas protegidas y la restauración de hábitats clave.

Gráfica 32. Escenario tendencia, sectores.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 33. Escenario estratégico, sectores.



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las variables ambientales, en el caso del recurso hídrico, el escenario tendencial refleja una disminución constante tanto en la disponibilidad de agua como en la integridad del acuífero. En contraste, el escenario estratégico, alineado con el Eje Estratégico 1, muestra una estabilización y mejora en estos aspectos. Esto es producto de medidas como la protección de zonas de recarga, la regulación de actividades de riesgo, el tratamiento terciario de aguas residuales y la priorización del agua para consumo humano y caudal ecológico. Estas acciones no solo garantizan la sostenibilidad del recurso, sino que también fortalecen la funcionalidad de los ecosistemas asociados.

La cobertura vegetal experimenta una pérdida significativa en el escenario tendencial. En el estratégico, esta tendencia se revierte mediante la implementación de programas de restauración y reforestación, la certificación forestal, y el incremento de la superficie protegida a nivel municipal. Estas acciones, planteadas en los Ejes Estratégicos 2 y 3, aseguran no solo la conservación de la biodiversidad, sino también la provisión de servicios ecosistémicos esenciales como la regulación del clima y la protección del suelo.

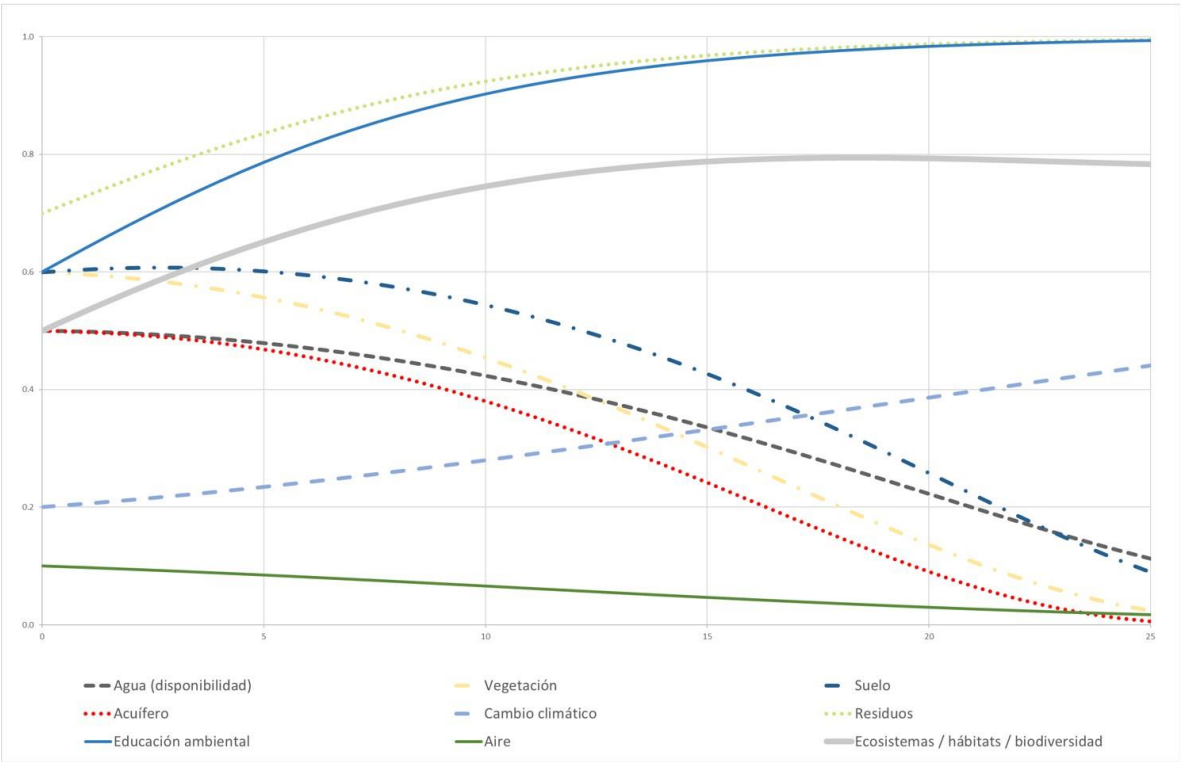
El suelo, en el escenario tendencial, muestra una degradación progresiva debido a la presión que otras actividades productivas ejercen sobre este recurso. En el estratégico, la calidad y disponibilidad del suelo se estabilizan gracias a políticas de regulación del cambio de uso de suelo y restauración de áreas degradadas. Estas medidas están respaldadas por los Ejes Estratégicos 2 y 6, que abordan la conservación de ecosistemas y la planificación territorial.

La calidad del aire presenta una tendencia decreciente en el escenario tendencial, atribuida a las emisiones contaminantes de actividades urbanas e industriales. En el escenario estratégico, el aire mejora de manera significativa gracias a medidas promovidas en varios ejes estratégicos, como el uso de tecnologías limpias, la transición hacia energías renovables y la reducción de la contaminación asociada a los asentamientos humanos y actividades productivas. Estas acciones están alineadas con los objetivos de los Ejes 5 y 6, que buscan minimizar las emisiones y promover comunidades más sostenibles.

El cambio climático, en el escenario tendencial, presenta una creciente vulnerabilidad debido a la degradación de los ecosistemas que contribuyen a su mitigación. En el estratégico, la vulnerabilidad disminuye, ya que las medidas integradas en todos los ejes estratégicos priorizan la restauración de hábitats clave, la conectividad ecológica y el uso de soluciones basadas en la naturaleza. Estas acciones fortalecen la resiliencia del municipio frente a fenómenos climáticos extremos.

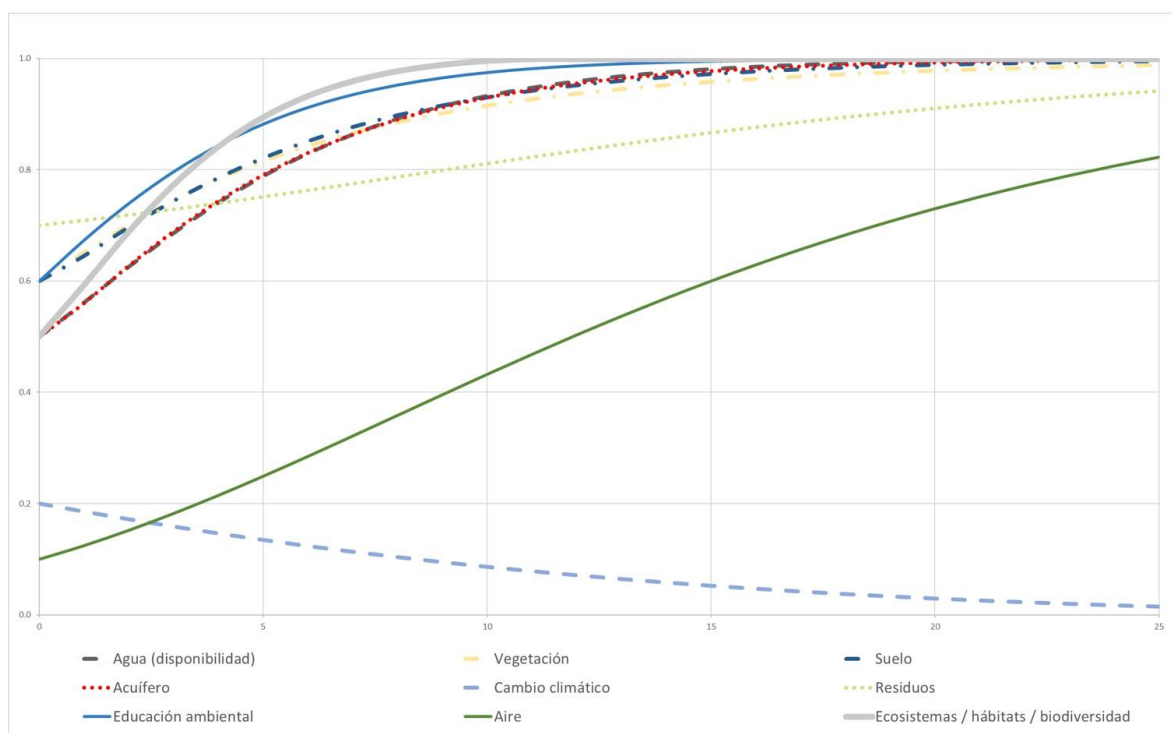
En cuanto a la gestión de residuos, el escenario tendencial refleja un incremento en la generación sin una gestión adecuada, mientras que el estratégico evidencia una mejora significativa en la capacidad para manejar residuos mediante la implementación de infraestructura de tratamiento, modelos de economía circular y programas de sensibilización comunitaria. Estas acciones, alineadas con el Eje Estratégico 4, minimizan la contaminación y protegen los recursos naturales.

Gráfica 34. Escenario tendencial, recursos naturales.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 35. Escenario estratégico, recursos naturales.



Fuente: Elaboración propia.

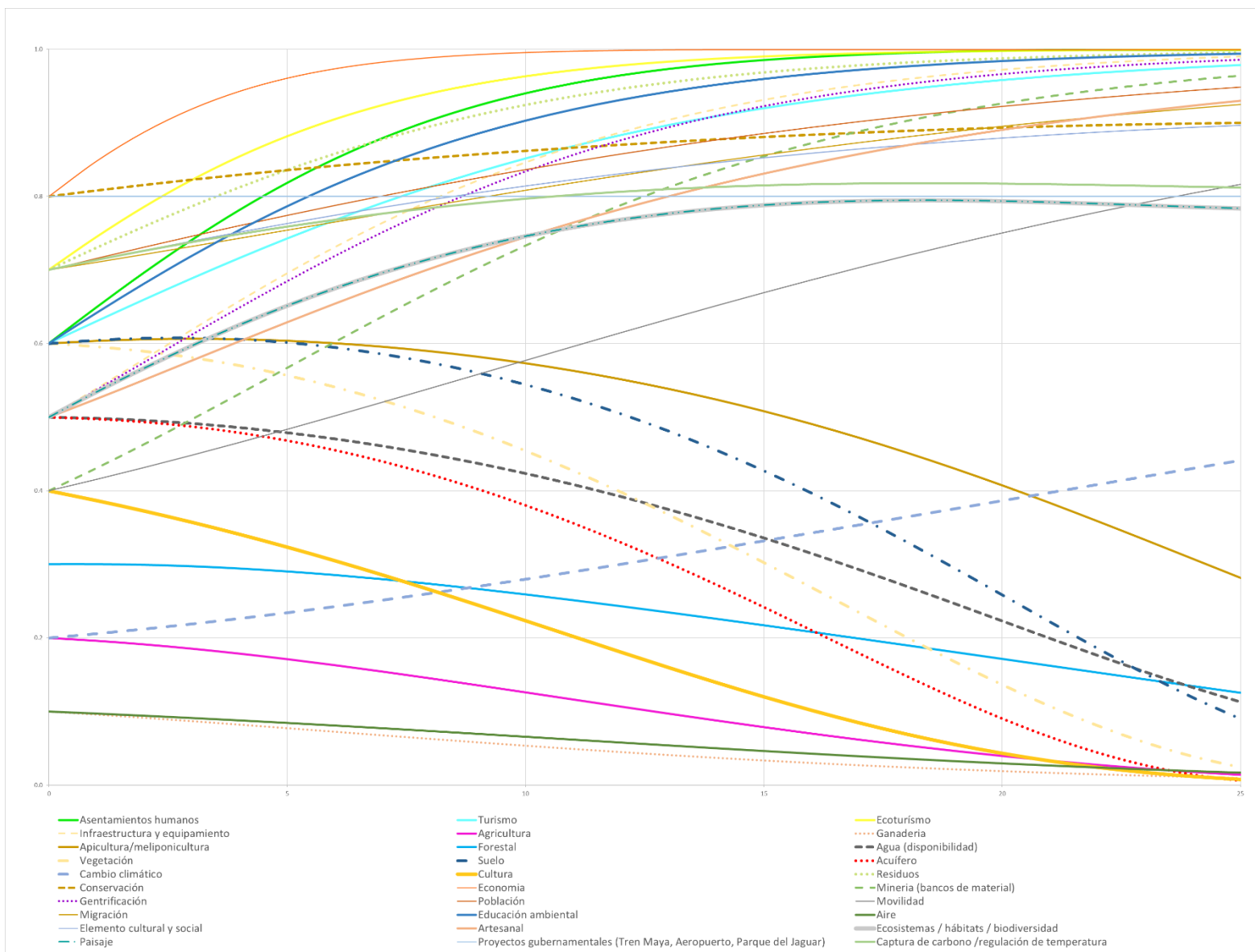
En conclusión, el escenario estratégico del programa de ordenamiento ecológico local de Tulum evidencia el impacto significativo que tiene la participación ciudadana en la construcción de un futuro sostenible. Las estrategias definidas, orientadas hacia la gestión integral de los recursos naturales y residuos, así como la promoción de un desarrollo equilibrado, generan resultados positivos en la dinámica socioambiental del municipio. Este enfoque transforma las tendencias negativas observadas en el escenario tendencial, abordando las causas subyacentes de la degradación ambiental y proponiendo soluciones integrales que equilibran el desarrollo económico con la sostenibilidad.

Enmarcado en los siete ejes estratégicos, el escenario estratégico establece un marco robusto para la resiliencia de Tulum, fortaleciendo su capacidad para enfrentar desafíos como el cambio climático, la urbanización acelerada y la pérdida de biodiversidad, mientras garantiza la calidad de vida de sus habitantes. Este enfoque integral posiciona al municipio como un modelo de desarrollo sostenible, donde la protección de los recursos naturales se integra estrechamente con la prosperidad económica y social. Los sectores productivos, en este contexto, se redirigen hacia prácticas más responsables, fomentando una conexión sólida entre el crecimiento económico, la conservación de la biodiversidad y la gestión eficiente de los recursos.

La gobernanza, destacada en el Eje Estratégico 7, es un elemento clave para coordinar la implementación de políticas públicas, fortalecer la capacidad técnica y garantizar la participación social en la toma de decisiones. Además, la integración de medidas de adaptación al cambio climático en los ejes estratégicos refuerza la capacidad del municipio para mitigar fenómenos como la pérdida de biodiversidad, la escasez de agua y la degradación del suelo.

En conjunto, el escenario estratégico redefine el modelo de desarrollo de Tulum, priorizando la conservación de su patrimonio natural, el bienestar de su población y la construcción de una economía diversificada y resiliente. Este enfoque no solo busca la sostenibilidad a largo plazo, sino que también promueve un desarrollo equilibrado y participativo que minimiza los impactos negativos y maximiza los beneficios sociales, económicos y ambientales. Con esta proyección, Tulum enfrenta sus retos ambientales y sociales con una visión holística que asegura un futuro más equilibrado, sostenible y resiliente.

Gráfica 36. Escenario tendencial.



Gráfica 37. Escenario estratégico.

