



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Unidad Académica Sisal

Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación

Impactos en la dinámica atmosférica  
debido al cambio de uso de suelo  
asociado al crecimiento antropogénico en  
la Península de Yucatán, México.

**TESIS**

Para obtener el título de:

**LICENCIADA EN MANEJO SUSTENTABLE DE ZONAS COSTERAS**

**PRESENTA:**

Nayeli Anaí Patlán García

**DIRECTORA DE TESIS:**

Dra. María Eugenia Allende Arandía

Sisal, Yucatán, México 2022





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Hoja de Datos del Jurado

## Datos del alumno

---

Patlán García Nayeli Anái  
Tel. 55 8578 8062  
anai.patlan@ciencias.unam.mx  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación  
Licenciatura en Manejo Sustentable de Zonas Costeras  
314247900

## Datos del Jurado

---

Datos del tutor  
(Secretario)

Dra. María Eugenia Allende Arandía  
Instituto de Ingeniería, UNAM

Datos del sinodal 1  
(Presidente)

Dr. Alec Torres Freyermuth  
Instituto de Ingeniería, UNAM

Datos del sinodal 2  
(Vocal)

Dra. Erika Danaé López Espinoza  
Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM

Datos del sinodal 3  
(Suplente)

Dra. Ruth Cerezo Mota  
Instituto de Ingeniería, UNAM

Datos del sinodal 4  
(Suplente)

Dr. Wilmer Rey Sánchez  
Instituto de Ingeniería, UNAM

Datos del trabajo escrito

Impactos en la dinámica atmosférica debido al cambio de uso de suelo asociado al crecimiento antropogénico en la Península de Yucatán, México.

174 pág.  
2022

## Agradecimientos.

Me gustaría agradecer a Dios por haberme permitido comenzar mi pequeña aventura fuera de casa y por estar presente. A mi familia por soportar el duro proceso que ha implicado estudiar en un lugar lejano y todo el tiempo que me tomo terminar la tesis. A los hermanos Mario y María que cuidaron de mí en mi estadía en Yucatán y por enseñarme mucho de la vida.

A la Dra. Maru por compartir sus conocimientos, por su paciencia y el apoyo incondicional en el desarrollo de este estudio, aun con las dificultades técnicas y de la distancia. A los miembros del jurado por sus comentarios, sugerencias y correcciones para mejorar el trabajo de la tesis.

En general me gustaría agradecer a todas aquellas personas que me apoyaron y me impulsaron a seguir adelante, y aquellas que a lo largo de la licenciatura formaron parte de mi vida de alguna manera.

Agradezco la beca otorgada por el Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros del Instituto de Ingeniería de la UNAM, asociada al apoyo otorgado al proyecto No. 1146 “Observatorio costero para estudios de resiliencia al cambio climático” del Programa de Cátedras CONACyT.

Agradezco al Servicio Meteorológico Nacional y a la Secretaría de Marina por habernos proporcionado datos de las estaciones meteorológicas de la región de la Península de Yucatán. También agradezco al European Center for Medium-Range Weather Forecasts por proporcionarnos la base de datos de reanálisis ERA-Interim y al National Center for Atmospheric Research patrocinado por la National Science Foundation por haber desarrollado el modelo WRF.

También quisiera agradecer el apoyo técnico que recibí por parte del Ing. Gonzalo U. Martín Ruiz para poder llevar a cabo las simulaciones numéricas y la asesoría en el uso de software avanzado.

# Contenido

|   |           |
|---|-----------|
| Índice de Figuras   | A         |
| Índice de Tablas  | D         |
| Siglas y acrónimos  | E         |
| <b>Resumen</b>  | <b>1</b>  |
| <b>1. Introducción</b>  | <b>3</b>  |
| 1.1 Justificación   | 8         |
| 1.2 Objetivos   | 8         |
| 1.2.1 Objetivo General  | 8         |
| 1.2.2 Objetivos Particulares  | 8         |
| <b>2. Marco teórico</b>   | <b>9</b>  |
| 2.1 Dinámica atmosférica  | 9         |
| 2.1.1 La atmósfera  | 9         |
| 2.1.2 Dinámica de la atmósfera                                      | 11        |
| 2.1.3 Condiciones meteorológicas                                    | 12        |
| 2.1.4 Clima   | 15        |
| 2.2 La zona costera   | 16        |
| 2.3 Uso de suelo  | 19        |
| 2.4 Impactos de la dinámica atmosférica por cambios de uso de suelo | 21        |
| 2.4.1 Cambio climático  | 23        |
| 2.4.2 Escenarios de cambio climático                                | 25        |
| 2.5 Modelo numérico de la atmósfera: WRF                            | 25        |
| 2.6 Estadísticos  | 29        |
| 2.7 Análisis de datos   | 31        |
| <b>3. Metodología</b>   | <b>36</b> |
| 3.1 Área de estudio   | 37        |
| 3.1.1 Contexto geográfico   | 37        |
| 3.1.2 Contexto socioeconómico                                       | 38        |
| 3.2 Datos   | 39        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 3.2.1     | Datos meteorológicos                              | 39        |
| 3.2.2     | Crecimiento poblacional INEGI                     | 40        |
| 3.2.3     | Datos de uso de suelo                             | 42        |
| 3.3       | Configuración del modelo                          | 46        |
| 3.4       | Validación del modelo                             | 49        |
| <b>4.</b> | <b>Resultados y Discusiones</b>                   | <b>57</b> |
| 4.1       | Península de Yucatán                              | 57        |
| 4.1.1     | Sisal   | 61        |
| 4.1.2     | Progreso  | 64        |
| 4.1.3     | Campeche  | 67        |
| 4.1.4     | Playa del Carmen                                  | 73        |
| 4.1.5     | Cancún  | 80        |
| 4.1.6     | Mérida  | 85        |
| 4.2       | Similitudes y su relación con el CUS              | 91        |
| <b>5.</b> | <b>Conclusiones</b>                               | <b>93</b> |
| <b>6.</b> | <b>Referencias</b>                                | <b>96</b> |
| <b>7.</b> | <b>Anexos</b>                                     | <b>I</b>  |
| a.        | Anexo 1. Escala de huracanes Saffir-Simpson (SSH) | I         |
| b.        | Anexo 2. Pruebas de significancia                 | II        |
| c.        | Anexo 3. Resultados                               | V         |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Zonas deforestadas en el periodo 2001-2016.  | 5  |
| <b>Figura 2.</b> Estructura vertical de la atmósfera en función de su altitud y estructura térmica.   | 10 |
| <b>Figura 3.</b> Ángulo de incidencia de la radiación solar al planeta Tierra.  | 11 |
| <b>Figura 4.</b> Zonificación del litoral o perfil de zona costera.   | 17 |
| <b>Figura 5.</b> Desarrollo socioeconómico en la zona costera.  | 18 |
| <b>Figura 6.</b> Porcentaje de cobertura y uso de suelo (US) en la Península Yucatán categorizado por escala de análisis (local, municipal y regional). | 20 |
| <b>Figura 7.</b> Efecto del CUS en el deterioro ambiental y el aumento en las emisiones de GEI que afectan la dinámica atmosférica y propician el CC.   | 24 |
| <b>Figura 8.</b> Componentes principales del sistema que conforma el WRF.   | 26 |
| <b>Figura 9.</b> Diagrama de flujo del modelo WRF para una simulación típica.   | 29 |
| <b>Figura 10.</b> Ubicación geográfica de las ciudades de estudio en la PY.   | 36 |
| <b>Figura 11.</b> Ubicación geográfica de la Península de Yucatán (PY).   | 37 |
| <b>Figura 12.</b> Crecimiento poblacional en la Península de Yucatán (número de habitantes).  | 38 |
| <b>Figura 13.</b> Ubicación geográfica de las ciudades de estudio y de las EMAs y ESIME utilizadas.   | 40 |
| <b>Figura 14.</b> Ajuste lineal del área urbana para cada ubicación de estudio de 1996 – 2016.  | 43 |
| <b>Figura 15.</b> Polígonos de cada localidad de estudio para 1996, 2016 y 2036.  | 44 |
| <b>Figura 16.</b> LULC empleado en las modelaciones numéricas.  | 46 |
| <b>Figura 17.</b> Dominios utilizados para realizar las simulaciones en el modelo.  | 47 |
| <b>Figura 18.</b> Comparación entre los diferentes LULC (CUS) que tiene a disposición el modelo WRF.  | 49 |
| <b>Figura 19.</b> Serie de tiempo simulada (línea gris) y medida (línea negra) de 2016 para la ubicación de Campeche.                                   | 52 |
| <b>Figura 20.</b> Serie de tiempo simulada (línea gris) y medida (línea negra) de 2016 para la ubicación de Mérida.                                     | 52 |
| <b>Figura 21.</b> Serie de tiempo simulada (línea gris) y medida (línea negra) de 2016 para la ubicación de Progreso.                                   | 53 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 22.</b> Serie de tiempo simulada (línea gris) y medida (línea negra) de 2016 para la ubicación de Cancún.   | 53 |
| <b>Figura 23.</b> Variación diurna y elipses ajustadas en la localidad de Campeche para 2016.   | 55 |
| <b>Figura 24.</b> Variación diurna y elipses ajustadas en la localidad de Mérida para 2016.   | 55 |
| <b>Figura 25.</b> Variación diurna y elipses ajustadas en la localidad de Progreso para 2016.   | 56 |
| <b>Figura 26.</b> Promedios anuales de la temperatura del aire en la PY para: a) 1996, b) 2016, y c) 2036.  | 58 |
| <b>Figura 27.</b> Diferencias de los promedios estacionales de la temperatura del aire en la PY: 1996-2016, 2016-2036, y 1996-2036.   | 59 |
| <b>Figura 28.</b> Promedios anuales de la magnitud del viento en la PY para: a) 1996, b) 2016, y c) 2036.   | 60 |
| <b>Figura 29.</b> Diferencias de los promedios estacionales de la magnitud del viento en la PY: 1996-2016, 2016-2036, y 1996-2036   | 61 |
| <b>Figura 30.</b> Variables atmosféricas en la localidad de Sisal, Yucatán.   | 63 |
| <b>Figura 31.</b> Rosa de vientos en la localidad de Sisal, Yucatán, para 2016.   | 63 |
| <b>Figura 32.</b> Variables atmosféricas en la localidad de Progreso, Yucatán.  | 65 |
| <b>Figura 33.</b> Rosa de vientos en la localidad de Progreso, Yucatán, para 2016.  | 66 |
| <b>Figura 34.</b> Variables atmosféricas en la localidad de Campeche, Campeche.   | 69 |
| <b>Figura 35.</b> (a) Series de tiempo de la temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años para la localidad de Campeche, Campeche.             | 70 |
| <b>Figura 36.</b> (a) Series de tiempo de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años para la localidad de Campeche, Campeche.               | 71 |
| <b>Figura 37.</b> Diferencias espaciales de la temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) para la localidad de Campeche, promediada estacionalmente.   | 72 |
| <b>Figura 38.</b> Diferencias espaciales de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para la localidad de Campeche, promediada estacionalmente.   | 73 |
| <b>Figura 39.</b> Variables atmosféricas en la localidad de Playa del Carmen, Quintana Roo.   | 75 |
| <b>Figura 40.</b> (a) Series de tiempo de la temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años para la localidad de Playa del Carmen, Quintana Roo. | 76 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 41.</b> (a) Series de tiempo de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años para la localidad de Playa del Carmen, Quintana Roo. | 77 |
| <b>Figura 42.</b> Diferencias espaciales de la temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) para la localidad de Playa del Carmen, Quintana Roo, promediada estacionalmente.   | 79 |
| <b>Figura 43.</b> Diferencias espaciales de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para la localidad de Playa del Carmen, Quintana Roo, promediada estacionalmente.   | 79 |
| <b>Figura 44.</b> Variables atmosféricas en la localidad de Cancún, Quintana Roo.   | 81 |
| <b>Figura 45.</b> (a) Series de tiempo de la temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años, para la localidad de Cancún, Quintana Roo.        | 83 |
| <b>Figura 46.</b> (a) Series de tiempo de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años, para la localidad de Cancún, Quintana Roo.          | 83 |
| <b>Figura 47.</b> Diferencias espaciales de la temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) para la localidad de Cancún, Quintana Roo, promediada estacionalmente.   | 85 |
| <b>Figura 48.</b> Diferencias espaciales de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para la localidad de Cancún, Quintana Roo, promediada estacionalmente.   | 85 |
| <b>Figura 49.</b> Variables atmosféricas en la localidad de Mérida, Yucatán.  | 87 |
| <b>Figura 50.</b> (a) Series de tiempo de la temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años, para la localidad de Mérida, Yucatán.             | 88 |
| <b>Figura 51.</b> (a) Series de tiempo de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años, para la localidad de Mérida, Yucatán.               | 89 |
| <b>Figura 52.</b> Diferencias espaciales de la temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) para la localidad de Mérida, Yucatán, promediada estacionalmente.  | 90 |
| <b>Figura 53.</b> Diferencias espaciales de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para la localidad de Mérida, Yucatán, promediada estacionalmente.  | 91 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1.</b> Clasificación y estacionalidad de los fenómenos meteorológicos que se presentan dentro de la Península de Yucatán (PY).  | 13 |
| <b>Tabla 2.</b> Modelos matemáticos utilizados en el cálculo para obtener la tasa de crecimiento poblacional.  | 41 |
| <b>Tabla 3.</b> Ajuste lineal del cambio de área urbana utilizado para cada localidad de estudio.  | 43 |
| <b>Tabla 4.</b> Configuración del modelo WRF.  | 47 |
| <b>Tabla 5.</b> Validación estadística del Modelo WRF.   | 51 |
| <b>Tabla 6.</b> Parámetros característicos obtenidos del ajuste de las elipses y la varianza explicada de la señal diurna para cada componente del viento ( $u_S$ , $v_S$ ) en 1) Campeche, 2) Mérida, 3) Progreso, 4) Cancún. | 54 |

## SIGLAS Y ACRÓNIMOS

|             |  |
|-------------|--|
| ARW         | Advanced Research WRF – Búsqueda avanzada WRF  |
| AWS o EMA's | Automatic Weather Stations - Estaciones Meteorológicas Automáticas                             |
| BIAS        | Sesgo  |
| CC          | Cambio Climático.  |
| CCC         | Coeficiente de Correlación Circular  |
| CCCPY       | Comisión Regional de Cambio Climático de la Península de Yucatán                               |
| CICY        | Centro de Investigación Científica de Yucatán  |
| CMNUCC      | Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático                              |
| CSD         | Desviación estándar circular   |
| CUS         | Cambio de Uso de Suelo   |
| DV          | Dirección del viento   |
| ECMWF       | European Center for Medium-Range Weather Forecasts   |
| ENSO        | El Niño – Oscilación del Sur   |
| ESIME       | Estaciones Sinópticas Meteorológicas   |
| GEI         | Gases de Efecto Invernadero  |
| GEMPAK      | General Equilibrium Modelling Software   |
| GoM         | Golfo de México  |
| GrADS       | Grid Analysis and Display System   |
| ICU         | Isla de calor urbana   |
| INEGI       | Instituto Nacional de Estadística y Geografía  |
| IPCC        | Intergovernmental Panel on Climate Change - Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático |
| LULC        | Cambio de cobertura y uso del suelo, por sus siglas en inglés                                  |
| MATLAB      | MATrix LABoratory  |
| MCI         | Manejo costero integrado   |
| MCb         | Mar Caribe   |
| m.s.n.m.    | Metros sobre el nivel del mar  |
| MV          | Magnitud del viento  |
| NAO         | Oscilación del Atlántico Norte   |
| NCAR        | National Center for Atmospheric - Centro Nacional de Investigación Atmosférica                 |
| NCL         | NCAR Command Language  |

|          |   |
|----------|---|
| NMM      | Nonhydrostatical Mesoscale Model  |
| ONU      | Organización de las Naciones Unidas   |
| PBL      | Planetary Boundary Layer - Capa límite planetaria   |
| PIB      | Producto Interno Bruto  |
| PMDUM    | Programa Municipal de Desarrollo Urbano de Mérida   |
| PNUD     | Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo  |
| PR       | Presión atmosférica   |
| PY       | Península de Yucatán  |
| r        | Coefficiente de correlación lineal  |
| RMSE     | Error cuadrático medio, por sus silabas en inglés   |
| SD       | Desviación Estándar   |
| SE       | Servicios Ecosistémicos   |
| SEDUMA   | Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente  |
| SEMAR    | Secretaría de Marina  |
| SEMARNAP | Antiguo nombre de SEMARNAT (1994-2000), donde la secretaría también se encargaba de cuestiones relacionadas a la pesca. |
| SEMARNAT | Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales   |
| SMN      | Servicio Meteorológico Nacional   |
| SVD      | Descomposición en valores singulares  |
| TE       | Temperatura   |
| UMDI     | Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación   |
| UNAM     | Universidad Nacional Autónoma de México   |
| US       | Uso de Suelo  |
| VAPOR    | Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers  |
| WPS      | Sistema de preprocesamiento del WRF   |
| WRF      | Weather Research and Forecasting Model  |
| WSI      | WRF Software Infrastructure - Infraestructura del sistema WRF   |

## RESUMEN

La necesidad del ser humano por la explotación de los recursos naturales ha causado un gran deterioro ambiental, provocando que los ecosistemas se vean fuertemente amenazados. El cambio de uso de suelo (CUS) es uno de los factores que afecta principalmente la pérdida de algunos ecosistemas, lo cual a su vez impacta en los procesos de interacción entre lo biótico y lo abiótico. Una alteración derivada del cambio de uso de suelo, es el cambio en los patrones de la dinámica atmosférica, la cual tiene un papel fundamental en los procesos locales y regionales, además de contribuir al cambio climático (CC), aumentando la temperatura de la superficie terrestre, modificando la magnitud del viento y su dirección. Debido a lo anterior, la planeación del crecimiento urbano, así como el manejo, la protección y conservación de los recursos naturales es de vital importancia para el equilibrio del sistema.

Para este trabajo se realizó un análisis del CUS en las últimas dos décadas y en dos décadas a futuro en seis ciudades costeras ubicadas en la Península de Yucatán. Se definió como año de control el 2016 y se reportan los cambios para 1996 y 2036. Para ello se utilizó el modelo atmosférico de mesoescala Weather and Research and Forecasting (WRF), actualizando el mapa base de uso de suelo del modelo y proponiendo escenarios de crecimiento urbano para cada localidad. Se realizaron simulaciones numéricas de la atmósfera de alta resolución espacial y temporal para estudiar y analizar el impacto que la dinámica atmosférica tiene por el CUS derivado de las actividades antropogénicas. Se calculó linealmente el CUS en las seis ubicaciones, y posteriormente se analizó su impacto en la temperatura del aire, humedad, presión atmosférica y velocidad del viento.

Los resultados obtenidos muestran que en las ciudades en donde el área urbana aumentó significativamente (419% de 1996-2016) como la ciudad de Cancún, los cambios en las condiciones atmosféricas fueron evidentes, en relación a las localidades donde el CUS fue mínimo (12.5% de 2006-2016) como es el caso de la localidad de Sisal. Se encontró que el crecimiento urbano en las ciudades costeras de Cancún, Mérida y Playa del Carmen, provocó un aumento en la temperatura del aire sobre la superficie urbanizada generando un efecto de isla de calor con diferencias de hasta  $0.8^{\circ}\text{C}$  con respecto a 1996. Por otro lado, se obtuvo una diferencia de la magnitud del viento de hasta  $1.5\text{ ms}^{-1}$  entre el año 2036 y 2016

en las tres ciudades antes mencionadas. En el caso de Mérida, Playa del Carmen y Campeche el efecto de la fricción generado por la expansión en la cobertura urbana sugiere una disminución de la velocidad del viento. Sin embargo, en el caso particular de Cancún se observó que la magnitud del viento aumentó, lo anterior debido al incremento en el gradiente térmico, el cual resultó ser más relevante que el efecto de la fricción en superficie. En este sentido, reconocer los impactos en la dinámica de la atmósfera y las consecuencias ambientales asociadas derivadas del CUS, hace necesario contar con una adecuada planificación urbana en la PY.

**Palabras clave:** Cambio de uso de suelo, dinámica atmosférica, modelo atmosférico WRF, crecimiento urbano, Península de Yucatán.

## 1. INTRODUCCIÓN

Nuestro planeta es un sistema complejo y dinámico, el cual alberga una gran diversidad y riqueza de ecosistemas. Los ecosistemas a su vez son dinámicos y complejos, donde los conjuntos de especies que habitan dentro del mismo tienen numerosas interacciones entre ellas y con su medio abiótico. La biodiversidad que posee cada ecosistema tiene funciones específicas en los diferentes procesos naturales. Estas funciones pueden ser vitales para el desarrollo y funcionamiento de la vida en la Tierra como la conocemos hoy en día, ya que los ecosistemas proveen además de hábitat a diferentes organismos, nos brindan diferentes servicios ecosistémicos (SE) (Meza Carreto, 2018).

La Península de Yucatán (PY) es una región donde se combinan ecosistemas tanto marinos como terrestres. Debido a su tipo de clima (subhúmedo cálido), a la geomorfología de la región (planicie cárstica costera), y a su posición geográfica, (zona tropical), hallamos un perfil característico de interacción tierra-mar. Este perfil está compuesto por selva baja inundable, manglar, laguna costera o ciénega, isla de barrera, dunas costeras, el área de playa y el mar donde pueden observarse pastos marinos, bancos de arena particularmente en el Golfo de México, o barreras de arrecifes de coral en el Caribe (Herrera Silveria et al., 2005). Cabe señalar que toda la PY se caracteriza por su extensa masa forestal (selva) (Ellis et al., 2017).

Por otro lado, el crecimiento poblacional en la PY de las últimas décadas ha tenido un aumento demográfico no planificado (Sotelo, 2000). Debido a que es una región costera importante en el desarrollo económico y social del país (Sotelo, 2000), se ha identificado un flujo migratorio, donde los asentamientos humanos han ido incrementando. Este crecimiento poblacional no previsto en la PY ha generado diversos impactos en los socio-ecosistemas, principalmente en la zona costera y los asociados a eventos extremos del clima marino y atmosférico (Sotelo, 2000; Barrales Hassan, 2017; Ellis et al., 2017). Lo anterior se observa de igual forma en el aumento de la demanda por los recursos naturales, la consecuente contaminación provocada por la mal gestión y generación de residuos sólidos y líquidos (Sotelo, 2000). Además, a la ineficiencia e ineficacia de las políticas públicas para el manejo y aprovechamiento de los ecosistemas tanto terrestres como marinos. En conjunto, el mal funcionamiento de los sectores económico y social para el crecimiento

urbano, han ocasionado un declive en la estabilidad de los ecosistemas y como consecuencia en el clima (Barrales Hassan, 2017; Ellis et al., 2017). Esto remarca la estrecha relación hombre-medio ambiente, y la dependencia del ser humano con la naturaleza a lo largo de la historia.

Un aspecto importante asociado a estos cambios, es el uso de suelo (US), el cual se relaciona estrechamente con las actividades económicas. El US se puede definir como la gestión y modificación del medio natural, comprendido en las acciones y actividades que la sociedad humana realiza sobre un área, zona o región determinada, ya sea para mantenerla o transformarla (Rivera Martínez, 2018). Por lo que, el cambio de uso de suelo se refiere a las modificaciones que el ser humano hace en la cubierta natural asociada a la remoción total o parcial de la vegetación con el fin de darle otros usos, como la agricultura, la ganadería, asentamientos humanos y zonas urbanas, entre otros (Rosete Vergés et al., 2008; Cuevas et al., 2010). Estas actividades antropogénicas han ocasionado la pérdida y degradación de los ecosistemas, lo que se observa directamente en la pérdida de hábitat y especies, la fragmentación del hábitat, la reducción de los recursos naturales disponibles, el incremento en la erosión, la disminución en la fertilidad del suelo, las alteraciones en los servicios ecosistémicos o ambientales, los efectos en los valores culturales y estéticos, además de contribuir a cambios en la dinámica atmosférica debido a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) ( $\text{CO}_2$ ;  $\text{N}_2\text{O}$ ;  $\text{CH}_4$ ) y a la isla de calor, que contribuye al calentamiento de la atmósfera y por tanto al cambio climático (Galicia et al., 2007; Bueno-Hurtado et al., 2015). Sin embargo, no todas las actividades humanas son consideradas como un CUS, ya que también existen modificaciones en las coberturas, que generan cambios sutiles y alteran el orden ecosistémico pero sin transformar completa o permanentemente su composición (Alanis Anaya, 2018).

A lo largo de las últimas décadas la alteración del territorio en la PY, se ha intensificado, en particular por el crecimiento demográfico no planificado asociado al crecimiento económico de la región. Por lo que los cambios ambientales del socio-ecosistema son el resultado de un CUS acelerado, que impacta inicialmente a la vegetación primaria y se observa en el elevado índice de deforestación de selvas y manglares (Cuevas et al., 2010). Históricamente, el CUS era administrado y gestionado por los habitantes de la región. Antiguamente los mayas, tenían zonas en las que dejaban a la tierra recuperarse de los CUS,

principalmente ocasionados por la agricultura (Alonso Velasco y Velásquez Torres, 2019). Estas zonas eran denominadas “T’olché” (Alonso Velasco y Velásquez Torres, 2019). Sin embargo, en la época de la colonia debido a la gran extensión de selva en la PY, comenzó el modelo de explotación forestal como una actividad económica (Alonso Velasco y Velásquez Torres, 2019). Por lo que, en el siglo XVI se inició la extracción de madera de forma masiva. Cabe mencionar que a principios del siglo XX la mayoría de las tierras mayas quedaron a disposición de grandes empresas de explotación forestal asociadas al mercado mundial. Sumado a ello, el crecimiento poblacional y las nuevas demandas por el CUS forestal a suelos agrícolas y ganaderos propició que a fines de la década de los 70’s, la región de la PY tuviera serios problemas de deforestación (Ellis et al., 2017; Alonso Velasco y Velásquez Torres, 2019). Para que esta crisis de deforestación aconteciera, durante el siglo XX, los gobiernos de Campeche y Yucatán otorgaban permisos de corte de madera o extracción en las zonas colindantes del territorio, es decir, en los límites con el estado de Quintana Roo (Alonso Velasco y Velásquez Torres, 2019). A fines de la década de los 50’s la política colonizadora por parte de las autoridades, implementó un programa en el cual se proponía el desmonte del bosque tropical con el fin de ampliar el sector agrícola. No obstante, la mayoría de los proyectos agrícolas propuestos fracasaron, dejando así áreas extensas de masa arbórea deforestada abandonadas (Alonso Velasco y Velásquez Torres, 2019). Asimismo, durante las últimas décadas el panorama en la PY no ha cambiado, esta vegetación ha sufrido un severo deterioro (Figura 1), debido a las actividades agrícolas y ganaderas, y a la extracción de productos maderables (López Jiménez et al., 2019).

Estos índices de deforestación en la región tienen como consecuencia directa, un impacto local en la dinámica atmosférica (Acevedo Rojas, 2017). De modo, que la complejidad entre la relación del ser humano y el medio ambiente, puede ser estudiada desde diferentes perspectivas. En este caso, el enfoque directo entre la actividad

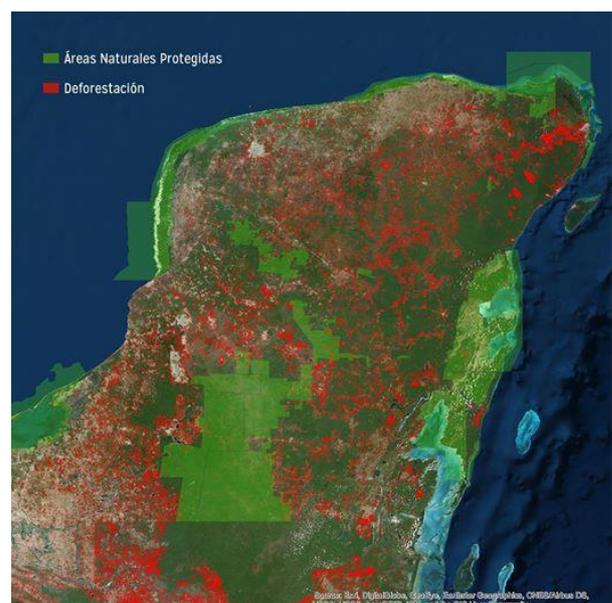


Figura 1. Zonas deforestadas en el periodo 2001-2016. Fuente: Pronatura Península de Yucatán, A.C.

antropogénica y el crecimiento poblacional, que afecta la dinámica atmosférica, ha sido principalmente estudiada desde el punto de vista de la contaminación (Llerena, 1991; Ballester Díez et al., 1999; Hernández Martínez, 2009; Castillo Sierra, 2018). Esta contaminación del aire en la atmósfera ha sido ocasionada por el deterioro ambiental a causa de las grandes ciudades, donde existe un aglomerado industrial que emite miles de sustancias y partículas que tienen un efecto en la atmósfera y en la salud pública. Introducido desde la Revolución Industrial a mediados del siglo XVIII, se ha modificado la composición de la atmósfera y por lo tanto algunos de sus procesos. Los cambios más evidentes se han observado en la temperatura global, por lo que se considera que las actividades antropogénicas han contribuido en lo que hoy se conoce como cambio climático (Hartmann, 2015).

La dinámica atmosférica tiene un rol fundamental en procesos como la liberación de calor de la superficie terrestre asociado a los cambios de temperatura y humedad, es el medio de transporte de partículas biológicas, y también está asociada a fenómenos como las brisas en la zona costera de la PY (Barrales Hassan, 2017; Castillo Sierra, 2018). En este sentido el CUS al estar interrelacionado con la dinámica de la atmósfera, las emisiones de GEI, la liberación de metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), y monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), así como el secuestro de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), favorece al cambio climático y a su vez genera una complicada interacción entre causa-efecto (Santillán, 2017).

La temperatura en el planeta juega un papel fundamental en los procesos físicos, químicos y biológicos, ya que determina las interacciones bióticas (Andrade et al., 2009) y abióticas (Rutllant et al., 1998). Además, es clave en la actividad microbiana (González Polo et al., 2004), define cómo se desarrolla la vida, y tiene la capacidad de influir en el intercambio energético entre la litósfera y la atmósfera. Por otro lado, la superficie del suelo o el uso que se le dé, impacta directamente en la cantidad de calor que se emite a la atmósfera y que posteriormente se acumula. Lo anterior hace que las propiedades físicas de la atmósfera cambien (Hartmann, 2015; Acevedo Rojas, 2017).

La isla de calor tiene un efecto en la dinámica atmosférica que se manifiesta con un cambio en la temperatura del aire en los niveles bajos o en las condiciones climáticas a lo largo del tiempo (Villanueva Solis et al., 2013; Primo Salazar, 2015). Considerando que el microclima

de un lugar o región se ve afectado, entonces los flujos de energía y materia entre un objeto y su entorno inmediato, así como la interrelación de las condiciones térmicas y químicas del sitio, están en función del tipo y densidad de cobertura vegetal (Acevedo Rojas, 2017). En las zonas donde el CUS promueve una pérdida de la cobertura vegetal, se ha observado un aumento local de la temperatura. A diferencia de lo que sucede en sitios con cobertura vegetal. Lo anterior sugiere que las zonas, donde el CUS debido a la urbanización y a las actividades económicas locales genera una isla de calor (Villanueva Solis et al., 2013; Primo Salazar, 2015; Barrales Hassan, 2017).

Acevedo Rojas (2017) reporta que el CUS altera las características del microclima en la selva húmeda en Brasil, por lo que cuando ésta se encuentra fragmentada, su capacidad para amortiguar estos cambios ambientales se ve mermada. Él encuentra que las temperaturas más elevadas están en las zonas deforestadas y que alteran la dinámica atmosférica local. Por otra parte, Rodríguez Eraso et al. (2010) observaron que el CUS en regiones específicas del territorio colombiano está modificando el clima local. Éste último estudio logró evidenciar que la dinámica de cambio de cobertura vegetal y uso de suelo ha generado un impacto en el clima, y éste presenta una variabilidad tanto espacial como temporal.

Actualmente, el uso de los modelos numéricos, sirven como herramienta para el pronóstico del tiempo atmosférico y las condiciones meteorológicas, así como para la representación simulada de las condiciones atmosféricas bajo diferentes escenarios (presentes y futuros), lo que hace que tengan una gran variedad de aplicaciones. En particular, con estos modelos numéricos se pueden simular y reproducir los procesos físicos involucrados en la generación y evolución de fenómenos meteorológicos que se dan en una zona o región determinada (Taylor Espinosa, 2009 y 2014; Meza Carreto, 2018). De esta forma se puede analizar la respuesta climática ante el CUS y por ende, ante el fenómeno del CC. El modelo atmosférico WRF ha sido utilizado para proyectos de investigación y predicción del clima. Skamarock et al. (2008), Garzón Núñez (2014), Meza Carreto (2018), Morales Rayo (2018), Rivera Martínez (2018), son algunos autores que han utilizado este modelo para el estudio de la atmósfera, así como el estudio de los procesos y fenómenos que en ella ocurren.

## 1.1 JUSTIFICACIÓN

La Península de Yucatán es una región geográfica con gran potencial para el desarrollo socioeconómico en México. Además, de que posee diferentes tipos de ecosistemas (terrestres, dulceacuícolas y marinos) de alto valor ecosistémico tanto biótico como abiótico, es una fuente de divisas para el desarrollo socioeconómico de la región (Sotelo, 2000; Herrera Silveria et al., 2005). Sin embargo, como se ha reportado en los últimos años (Sotelo, 2000; Ellis et al., 2017), el CUS desordenado a través de la historia ha provocado el deterioro ambiental alrededor del mundo sin descartar a la PY. En la PY el desarrollo socioeconómico ligado al CUS, junto con la mala gestión por parte de las autoridades, ha impactado negativamente la cobertura vegetal de la selva maya. El deterioro ambiental en la PY y la urbanización de la región debida al crecimiento poblacional han generado un aumento en las emisiones de GEI que a su vez altera la dinámica atmosférica y contribuye con el cambio del clima (Galicia et al., 2007; Bueno-Hurtado et al., 2015; Barrales Hassan, 2017; Ellis et al., 2017). Por lo que, al entender la estrecha relación entre el ser humano y el medio ambiente, se podrán tomar mejores decisiones de cómo administrar los recursos naturales disponibles y de esta manera mitigar el impacto en el equilibrio del sistema climático.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar el impacto del cambio de uso de suelo en la dinámica atmosférica en la región de la Península de Yucatán haciendo uso de la modelación numérica.

### 1.2.2. OBJETIVOS PARTICULARES

- ✓ Construir distintos escenarios (pasado, presente y futuro) de uso de suelo de acuerdo al crecimiento poblacional (área urbanizada) que ha tenido la región de la Península de Yucatán en los últimos 20 años.
- ✓ Construir una simulación numérica de la dinámica atmosférica de un año para los distintos escenarios de cambio de uso de suelo (pasado, presente y futuro).
- ✓ Estudiar el impacto del cambio de uso de suelo en la dinámica atmosférica.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 DINÁMICA ATMOSFÉRICA

#### 2.1.1. LA ATMÓSFERA

La atmósfera es una capa gaseosa que rodea la Tierra, esta se compone principalmente por una mezcla de gases, como nitrógeno ( $N_2$ ), oxígeno ( $O_2$ ), argón (Ar), vapor de agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) entre otros, a esta mezcla de gases se le conoce típicamente como aire. La atmósfera se encuentra sobre la superficie terrestre y tiene un espesor claramente definido, sin embargo por convención su altitud máxima es más de 800 km (Hartmann, 2015; Castillo Sierra, 2018)

Gracias a ella es posible el desarrollo de la vida en la tierra, ya que funciona como filtro que regula la entrada y salida de energía (radiación solar), además de servir como protección de meteoros. En la atmósfera se originan los procesos climatológicos y meteorológicos que determinan las condiciones ambientales en cada zona y región. Ésta está formada por una serie de capas en las cuales suceden diferentes procesos que definen su dinámica a diferentes niveles (Hernández Martínez, 2009; CUAED-UNAM, 2014; Hartmann, 2015):

#### ⌘ Tropósfera

Se extiende sobre la superficie terrestre hasta la tropopausa, con una altura aproximada de 18 km en los trópicos y 12 km en latitudes medias. En esta capa se producen importantes movimientos verticales y horizontales (vientos), y es la zona de nubes, donde ocurren los cambios en el clima (lluvias, temperatura, humedad, presión, entre otros). Esta capa contiene alrededor del 85-90% de la masa de la atmósfera. (Hernández Martínez, 2009; CUAED-UNAM, 2014).

#### ⌘ Estratósfera

Se extiende de la tropopausa hasta la estratopausa a una altura de 50 km. En esta capa, no existen movimientos verticales, pero sí horizontales. Estos movimientos horizontales son los que transportan las partículas suspendidas por todo el globo terráqueo con gran rapidez, ya que la velocidad del viento alcanza los  $200 \text{ kmh}^{-1}$ . En esta capa se encuentra la mayor concentración de ozono (ozonósfera), cuya función es absorber los rayos UV y convertirlos en calor. En esta zona de la atmósfera la temperatura aumenta con la altitud hasta llegar a la estratopausa donde la

temperatura se mantiene constante para posteriormente disminuir. (Hernández Martínez, 2009; CUAED-UNAM, 2014).

### ⌘ Mesósfera

Esta capa se encuentra sobre los 50 km de altura hasta la mesopausa, la cual alcanza los 85 km de altitud. Este estrato es el frío de la atmósfera, ya que su temperatura llega a disminuir hasta  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La baja temperatura, junto con la baja densidad del aire, determina la formación de turbulencias y ondas atmosféricas que actúan a escalas espaciales y temporales muy grandes, por lo que esta capa es muy importante en los procesos fotoquímicos (Hernández Martínez, 2009; CUAED-UNAM, 2014).

### ⌘ Termósfera o Ionósfera

Se ubica encima de la mesopausa y se extiende más allá de los 85 km de altura, hasta los 600-700 km, terminando en la termopausa. En esta capa los escasos gases atmosféricos presentes, absorben los rayos X y gamma que provienen del sol, este proceso genera un aumento de la temperatura dependiendo del nivel de radioactividad solar (Hernández Martínez, 2009; CUAED-UNAM, 2014).

### ⌘ Exósfera

Es el límite exterior de la atmósfera. En esta capa, la gravedad desaparece y muchos átomos escapan al espacio. Se calcula que termina a una altitud de 800 km (CUAED-UNAM, 2014).

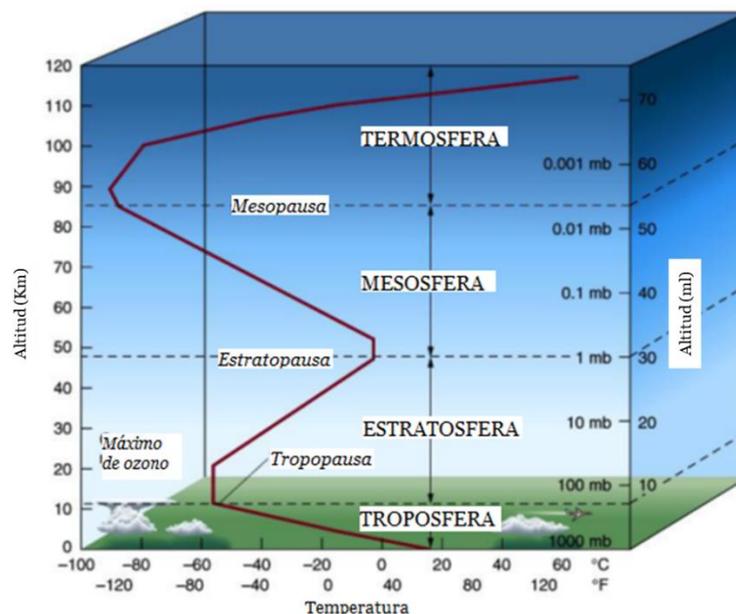


Figura 2. Estructura vertical de la temperatura de la atmósfera en función de su altitud. Fuente: Chimot, J. (2018).

De las capas atmosféricas descritas anteriormente (Figura 2), el presente trabajo se enfocará en los procesos y fenómenos que ocurren en la atmósfera baja, es decir, en la tropósfera.

### 2.1.2. DINÁMICA DE LA ATMÓSFERA

Ahora bien, la circulación atmosférica se debe a la incidencia de radiación solar que llega a la superficie terrestre (Figura 3) y se refiere al movimiento del aire a gran escala. El movimiento del aire entonces, es el resultado del calentamiento diferencial entre zonas o regiones del planeta, incluso entre el continente y los cuerpos de agua como el océano. Este calentamiento diferencial genera el movimiento de las masas de aire de una zona a otra con el objetivo de equilibrar el gradiente térmico, dando lugar a la “circulación atmosférica global”. La energía solar recibida en la atmósfera, se transporta o distribuye alrededor del globo terráqueo mediante las masas de aire (Universidad de la República de Uruguay, 2011; Hartmann, 2015).

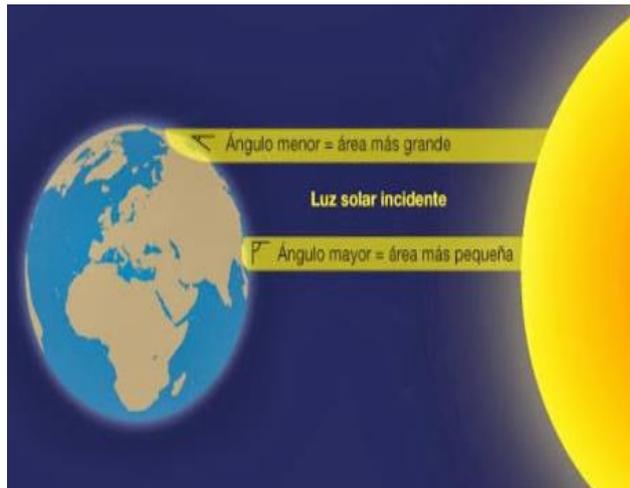


Figura 3. Ángulo de incidencia de la radiación solar al planeta Tierra. Fuente: <http://biogeo.esy.es/BGzESO/repartodesigual.htm>

La radiación solar es el componente principal que define la circulación atmosférica; existe una fracción de energía emitida por el sol la cual se refleja (albedo), otra que se absorbe y otra que se transmite. Por lo que la dinámica de la atmósfera está determinada por la diferencia de energía que recibe, es decir: 1) la diferencia constante de temperatura entre el ecuador y los polos, 2) la rotación de la tierra, y 3) la presencia de las masas continentales. La energía solar que llega a la superficie terrestre se transforma en radiación de baja energía (infrarrojo), y posteriormente se refleja hacia la atmósfera. Ésta energía reflejada puede ser absorbida mediante algunos gases presentes en la atmósfera de forma natural. Éste proceso denominado como efecto invernadero (EI) es por el cual se calienta la superficie terrestre lo suficiente para el desarrollo de la vida como la conocemos, sin éste mecanismo la temperatura media global sería  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Caballero et al., 2007; Hartmann, 2015).

Entonces, la dinámica atmosférica se debe a un conjunto de procesos los cuales poseen una serie de interacciones entre la zona terrestre, el océano y la atmósfera. Desde el año 1985 la dinámica atmosférica se vinculó con el movimiento de las masas de aire las cuales interaccionan con el relieve circundante (Romero y Vinagre, 1985), sin embargo, de acuerdo a la definición de Castillo Sierra (2018) ésta es referida como la “suma de procesos atmosféricos derivados de las propiedades físicas y sustancias químicas en la atmósfera y el medio ambiente”.

Para referirnos al estado de la atmósfera empleamos usualmente los conceptos como “tiempo” y “clima”. No obstante, el uso indistinto de dichos términos crea confusión al suponer que los eventos atmosféricos de corta duración son climáticos o viceversa. Lo cual es erróneo, ya que supone que ambos términos son referidos para los mismos procesos, cuando no es así. Por ello, es importante distinguir entre los conceptos de tiempo y clima, para poder identificar los tipos de fenómenos que experimentamos diariamente, el cómo estudiarlos, y así poder conocer los efectos que éstos causan (Hartmann, 2015; Torres Puentes, 2019).

El tiempo (meteorológico) es considerado como el estado actual de la atmósfera en un lugar y momento determinado, y es descrito por parámetros atmosféricos como la temperatura, la humedad, la precipitación, la nubosidad, el viento y la presión. Mientras que a las variaciones en períodos de mínimo 30 años o más son las que se denominan como clima, siendo así el conjunto de todas las condiciones meteorológicas que predominan en un lugar o una región en particular durante un período de tiempo (Hartmann, 2015; Torres Puentes, 2019). El clima es representado por datos estadísticos de las condiciones meteorológicas registradas de un cierto lugar.

### 2.1.3. CONDICIONES METEOROLÓGICAS

Respecto al tiempo atmosférico y de acuerdo a su definición no se puede determinar en concreto un estado de la atmósfera de manera generalizada. Sin embargo, se encuentra estrechamente relacionado con los diferentes fenómenos meteorológicos que influyen en el cambio del clima. Los fenómenos meteorológicos que frecuentemente ocurren en la PY se pueden clasificar de la siguiente forma:

Tabla 1. Clasificación y estacionalidad de los fenómenos meteorológicos que se presentan dentro de la Península de Yucatán (PY). Fuente: Comisión Nacional del Agua (2017); Capurro (2002) & OEA (1993)

| ESTACIÓN DEL AÑO                           | CONDICIONES METEOROLÓGICAS   |
|--|--|
| <p><b>Primavera</b><br/>(Marzo – Mayo)</p> | <p>En estos meses la PY se ve afectada por una temporada de “Secas”. Como su nombre lo indica en esta época existe una ausencia de precipitaciones, así como un aumento gradual en las temperaturas. Cabe mencionar que entre más cercanía se tenga con la zona costera la temperatura disminuye y la humedad aumenta.</p>   |
| <p><b>Verano</b><br/>(Junio – Octubre)</p> | <p>Fenómenos de origen ciclónico. Entre estos fenómenos se encuentran:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>⌘ <i>Depresiones tropicales.</i><br/>Éstas derivan lentamente de la circulación general de la atmósfera y requieren de una temperatura mínima de 26 a 27 °C. Es el fenómeno que da nacimiento a un huracán. Es una zona donde la presión atmosférica desciende con respecto a lo que le rodea (una perturbación en el campo isobárico), donde las aguas de superficie calientan el aire, que asciende y luego es bloqueado por el aire más caliente de los vientos alisios. El encuentro de estas dos masas de aire origina una inversión atmosférica; en esta etapa, se da el agrupamiento de nubes y el desarrollo de tormentas eléctricas con velocidades sostenidas de aproximadamente 63 km/h.</li> <li>⌘ <i>Tormentas tropicales.</i><br/>Son consecuencia de la intensificación de una depresión tropical. El crecimiento del sistema ocurre cuando la presión en el centro de la tormenta desciende bastante por debajo de los 1.000 milibares (mb) mientras que la presión</li> </ul> |

|  |  |
|--|--|
|  | <p>exterior del sistema permanece constante. En el momento de que la presión atmosférica disminuye, los vientos alisios se desplazan en una espiral por la rotación de la tierra, generando así velocidades del viento proporcionales al gradiente de presión. De modo, que el agrupamiento de nubes con tormentas eléctricas y vientos es aproximadamente de 63 a 117 km/h; estas tormentas se pueden convertir en huracanes.</p> <p>⌘ <i>Huracanes.</i></p> <p>Alcanzan vientos sostenidos superiores a 119 km/h. Éste fenómeno se clasifica en 5 categorías y está basado en la intensidad de la tormenta, que refleja el daño potencial de los vientos asociados. El método de categorización comúnmente usado es el desarrollado por H. Saffir y R.G. Simpson (Anexo 1).</p> <p>Estas borrascas o sistemas ciclónicos, ocasionan lo que generalmente se conoce como “mal tiempo”, pues provocan afectaciones debidas a los fuertes vientos, precipitaciones y corrientes intensas, oleaje y marea de tormenta en las costas. Lo anterior se debe a que la PY está rodeada por cuatro regiones de gran actividad ciclónica: el Golfo de Tehuantepec, la Sonda de Campeche, el Caribe Oriental y la región Atlántica.</p> |
| <p><b>Otoño e Invierno<br/>(Noviembre –<br/>Febrero)</b></p> | <p>Se identifica la época de “Frentes fríos”. En esta temporada el estado atmosférico está determinado por el desplazamiento de masas de aire frío procedentes de las regiones polares del norte, las cuales provocan lluvias de baja intensidad, pero de mayor duración, y a su vez provocan fuertes vientos conocidos como “Nortes”.</p>   |

#### 2.1.4. CLIMA

La distribución del clima en los estados de la Península de Yucatán está vinculada con (Durán y Méndez, 2010):

- I. La ausencia de elevaciones significativas del terreno: La PY se encuentra a una altitud cercana al nivel medio del mar, en el estado de Yucatán su altitud media es de 31 m.s.n.m., en Quintana Roo la altitud media es de 28 m.s.n.m., y la altitud media del estado de Campeche es de 111 m.s.n.m. (topographic-map.com, s.f.), es decir, su topografía no presenta elevaciones importantes, de forma que es considerada como una gran semi-planicie en la que paradójicamente se tiene una complicada microtopografía (Durán y Méndez, 2010).
- II. Las corrientes marinas: Son corrientes cálidas que influyen de modo importante en los vientos cálidos-húmedos o secos que se distribuyen por la región. Estas corrientes marinas que bordean la PY son derivadas de la corriente Ecuatorial del Atlántico Norte, de ésta se desprende la corriente del Caribe la cual atraviesa el Canal de Yucatán y a su vez forma la corriente del Golfo de México (Durán y Méndez, 2010).
- III. Los vientos alisios o circulación del este: En el verano la PY recibe vientos procedentes de la Celda Bermuda Azores, que generan gran actividad atmosférica. Estos vientos están cargados de humedad, que dan lugar a una intensa precipitación conforme se adentran a la península. La llegada de estos vientos es lo que determina el régimen de lluvia que prevalece en los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo (Durán y Méndez, 2010).
- IV. Las ondas tropicales: Éstas se producen en el cinturón de los vientos alisios. Son líneas de flujo onduladas superpuestas a los vientos del este. Tienen una dirección este-oeste y contribuye a las lluvias durante los meses de verano (Durán y Méndez, 2010).
- V. Las depresiones o tormentas tropicales: Éstas se producen en el seno de las ondas tropicales. Constituyen zonas de baja presión que se forman por el calentamiento del océano y pueden desarrollarse hasta formar huracanes en sus diferentes categorías. Las tormentas tropicales que afectan a la PY se generan principalmente en el Atlántico Oriental o en el Mar de las Antillas (Durán y Méndez, 2010).

- VI. Los frentes fríos, nortes o masas de aire polar: Éstos se generan por el choque de los vientos circumpolares con los vientos del oeste provenientes de los anticiclones de latitudes medias. En ocasiones dan lugar a una disminución abrupta de la temperatura con vientos intensos y en algunos casos con lluvias de ligeras a muy fuertes, dependiendo de la saturación que hayan tenido en el Golfo de México (Durán y Méndez, 2010). Los eventos de Norte pueden interactuar con huracanes (i.e., Isidoro en 2002 y Roxanne en 1995).
- VII. Las brisas en las zonas costeras: Este es un fenómeno atmosférico causado por los gradientes térmicos entre el mar y el continente. De acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial éstas son “viento de las regiones costeras que sopla durante el día (noche) desde una extensión grande de agua (continente), en este caso el océano (PY), hacia tierra (océano) debido al calentamiento diurno del suelo continental (agua)”. Su dinámica está en función de la orografía, la morfología litoral y parámetros físicos como la fuerza de coriolis. El alcance espacial de las brisas va más allá del litoral y tiene una influencia directa en el estado de la atmósfera de ciertas regiones y redundante en el clima local (Alomar Garau, 2013).

El clima en la PY por tanto, presenta un patrón cálido subhúmedo en la mayor parte del territorio.

## 2.2 LA ZONA COSTERA

La zona costera, es un sistema dinámico que puede ser delimitado de acuerdo a sus fronteras políticas o económicas, o de acuerdo con la similitud de los procesos naturales que modulan el sistema. En México, la zona costera al ser de competencia federal comprende únicamente 20 metros tierra adentro, medidos a partir de la pleamar máxima (Rivera Arriaga, 2004). Sin embargo, ésta tiene mayor alcance de lo delimitado por la ley mexicana. Un claro ejemplo de ello son las interacciones bióticas y abióticas que ocurren en el sistema mar-tierra, las cuales son de gran importancia, principalmente para los ecosistemas asociados. Los ecosistemas asociados a la zona costera son: los arrecifes de coral, humedales, manglares, dunas costeras, entre otros, y cada uno de éstos tiene una influencia substancial en el desarrollo humano. Por ello, el litoral ha sido zonificado (perfil de zona costera, Figura 4) y utilizado desde diferentes perspectivas para el manejo y gestión integral de la zona costera (Rivera Arriaga, 2004).

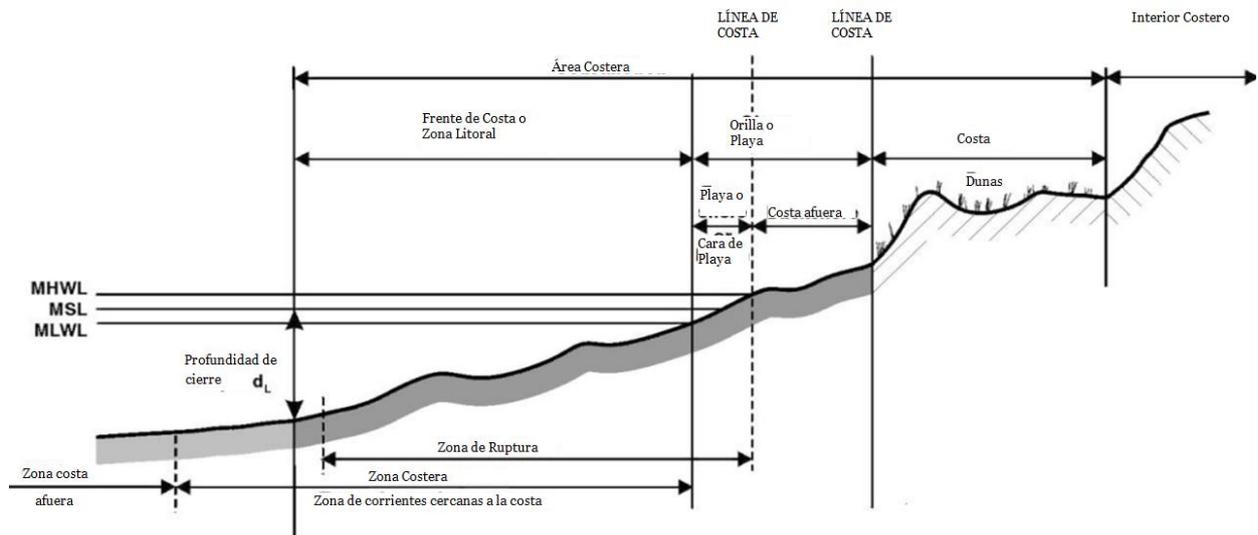


Figura 4. Zonificación del litoral o perfil de zona costera. Fuente: Ibarra Marinas y Belmonte Serrato (2017), obtenido de Coastal Engineering Research Center (1994)

En el año 2000 se propuso una definición por parte del INE y la SEMARNAP (actualmente SEMARNAT), la cual menciona que:

*“La zona costera abarca desde el límite marino de la plataforma continental y mar territorial, hasta los límites geopolíticos de los municipios con frente litoral o que están contiguos, tierra adentro. Por lo tanto la zona costera constituye una amplia y heterogénea región que mantiene intensas interacciones físicas, biológicas y socioeconómicas, en donde ocurre un dinámico intercambio de energía y materiales entre ecosistemas terrestres, marinos y la atmósfera.”*

Por lo que este sistema dinámico, está determinado por la influencia que ejercen los procesos biológicos, ecológicos, oceanográficos, atmosféricos, sociales, económicos, culturales y políticos específicos en la zona. La zona costera está en constante cambio en diferentes escalas espacio-temporales. Dependiendo del fenómeno y/o variable, éste puede actuar o impactar de formas diferentes en un proceso, por ejemplo cambios en la línea de costa debido al transporte de sedimentos (erosión o sedimentación), cambio en la intensidad y dirección de las brisas (oleaje y corrientes), o incluso actividades humanas como la urbanización (pérdida de biodiversidad y deforestación) (Herrera Silveria et al., 2005; Ibarra Marinas y Belmonte Serrato, 2017).

La evolución y el crecimiento de la zona costera a través del tiempo, es el resultado de la combinación de diversos factores como: los factores geológicos (tectónica, geodinámica costera<sup>1</sup>), factores propios del océano (olas, corrientes y mareas), factores atmosféricos (tiempo atmosférico, clima, cambio climático), factores ecológicos, y factores propios de la acción antropogénica (sociales, culturales, políticos, económicos, desarrollo urbano, turismo) (Ibarra Marinas y Belmonte Serrato, 2017). Sin embargo, los factores antropogénicos (Figura 5) generalmente tienen un impacto negativo, ya que tienen la capacidad de cambiar la región litoral de manera rápida y en algunos casos de manera irreversible, lo que modifica o altera la dinámica del sistema en la zona costera (Ibarra Marinas y Belmonte Serrato, 2017), lo cual se puede observar en el caso de la PY. En esta región la dinámica costera se ha visto impactada principalmente en las últimas décadas, por factores antropogénicos (Ellis et al., 2017).



Figura 5. Desarrollo socioeconómico en la zona costera. Fuente: Forbes, México 2020, Lozano, L.F. Sitio: Cancún.

<sup>1</sup>La geodinámica costera se entiende como el estudio de los agentes o fuerzas que interviene en los procesos dinámicos de la zona costera, específicamente de la parte terrestre. Ésta comprende procesos donde hay avances (acreción) y retrocesos (erosión) de la línea costera debido a factores de sedimentación por acarreo costero o sedimentación deltáica; emersión, sumersión, o elevación del nivel del mar.

## 2.3 USO DE SUELO

En las últimas décadas el manejo y alteración del medio natural sobre la superficie terrestre ha ido incrementándose significativamente en función del crecimiento urbano. La cobertura del suelo y sus cambios en la superficie terrestre son una muestra de la dinámica natural en el territorio, así como de la influencia de las actividades humanas (Acevedo Rojas, 2017). Debido a lo anterior se ha observado un aumento en la demanda de los recursos naturales, en donde la antropogenización juega un papel fundamental. Por lo tanto, una forma de evaluar el impacto del crecimiento urbano en el sistema natural es a través del cambio de uso de suelo (CUS). El CUS se entiende como una fuerza funcional en el cambio ambiental global, y sus consecuencias son incuantificables (Alanis Anaya, 2018). El CUS puede ser explicado por 3 factores principales, que no son excluyentes entre sí sino dinámicos entre ellos. Estos factores son:

### I. Biofísicos:

Están relacionados con cuestiones naturales que resultan atractivos para realizar actividades antrópicas como la morfología, tipo de suelo, hidrología, fertilidad del suelo, el tipo de vegetación, pendientes, litología, entre otros.

### II. Sociales:

Éste puede tener diferentes causas, pero principalmente se debe a la escasez de recursos, vulnerabilidad por pérdidas materiales, cambios en la organización social, consumismo (demanda incontable de los recursos naturales). Y a su vez éstos dependen o están en función de la edad y género de la población.

### III. Gubernamentales:

Éstos son medidas (cuantificadas) por instituciones gubernamentales en respuesta a la interacción de los factores biofísicos y sociales, en algunas ocasiones contribuyen a la transformación del suelo o a su conservación.

Los procesos de cambio de cobertura vegetal y US en los tres estados de la PY pueden ser ocasionados por diferentes causas, las cuales suelen ser complejas y diversas dependiendo de las eco-regiones y estados de los que se traten, no obstante, los CUS en la PY suelen estar relacionados con procesos de deforestación, principalmente debido a la expansión ganadera, seguido por las actividades agrícolas (Figura 6). Éstos últimos, relacionados con

los programas de colonización y desarrollo agropecuario del gobierno federal, crecimiento de población y mercados (Ellis et al., 2017). Por lo que se puede decir, que en la PY el uso de suelo se ve influenciado por las demandas sociales que involucran cuestiones económicas.

### Estudios de Cambio de Cobertura

#### ESCALA

- Local
- Municipal
- ◆ Regional
- ejidos\_campeche16n
- Área Natural Protegida
- Deforestado 2001-2013 (Hansen et al. 2013)

#### Porcentaje de Cobertura Arbórea

- Mayor : 100
- Menor : 0

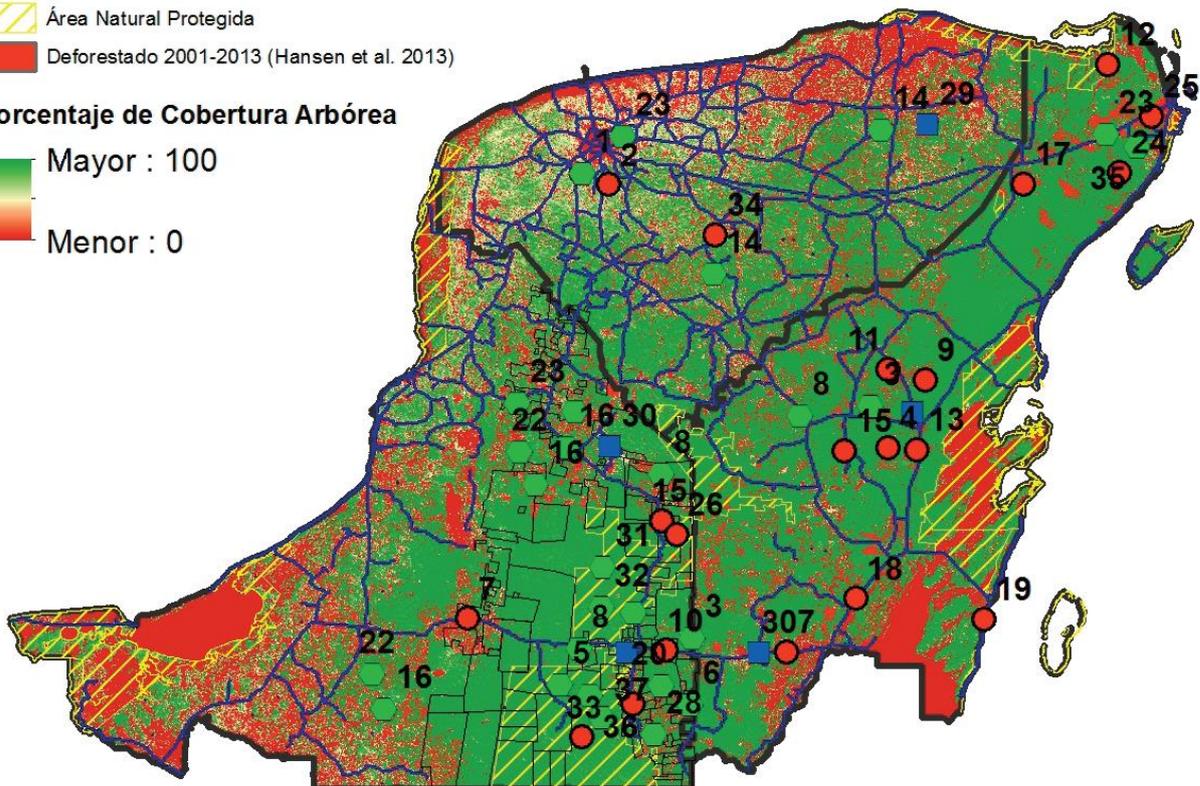


Figura 6. Porcentaje de cobertura y uso de suelo (US) en la Península Yucatán categorizado por escala de análisis (local, municipal y regional) reportado en las publicaciones seleccionadas del artículo de Ellis et al., (2017).

Este cambio radical en la cobertura de suelo en la región tropical, en particular para la PY, data de los años 70's cuando los programas federales otorgaron permisos para el CUS. Para las décadas de los 80's y 90's, la deforestación de la cobertura forestal en la selva maya ya se observaba fuertemente impactada (Ellis et al., 2017; Llamas y Colditz, 2017; Alonso Velasco y Velásquez Torres, 2019; López Jiménez et al., 2019).

Ellis et al. (2017), realizaron una recopilación de información publicada en diversos artículos sobre el cambio de cobertura vegetal y CUS en la PY. De acuerdo con los

resultados de su investigación, ellos encuentran que para el estado de Campeche la causa directa del CUS se debe principalmente a la ganadería, seguida de la agricultura y la urbanización. Las causas del CUS se relacionan con los programas de desarrollo agropecuario, subsidios para la agricultura, el incremento de la población en algunos ejidos del estado y a la degradación del suelo por la invasión del helecho (*Pteridium*) en los cultivos.

En el caso del estado de Quintana Roo, el proceso de CUS se ha dividido en regiones (Bautista et al., 2012; Ellis et al., 2017). En las regiones noreste y este del estado el desarrollo económico ha sido principalmente por el sector turístico, lo que tiene una relación directa con la expansión urbana (crecimiento poblacional, migración) y el aumento significativo de infraestructura. En esta región noreste y este del estado se ubica la ciudad de Cancún y la zona de la Riviera Maya, las cuales han sido el principal foco de atención, ya que hasta el 2010 se había reportado una pérdida vegetal (manglar y selva baja) de 121 km<sup>2</sup>, específicamente a lo largo del corredor turístico Cancún-Tulum. Por el contrario, las causas atribuidas al CUS en la zona sur del estado se deben a la expansión del uso de suelo ganadero y agrícola. Esta expansión desmedida, ha sido impulsada por las políticas de desarrollo y subsidios (PROCAMPO) del gobierno, sumada al crecimiento poblacional. En esta región también se consideran los impactos causados por fenómenos naturales (huracanes e incendios) y por los programas de conservación y manejo de los recursos naturales en el interior del estado, enfocados principalmente en la zona maya.

Para el estado de Yucatán, el CUS se debe principalmente a la expansión urbana en la ciudad de Mérida. Lo anterior en respuesta a la floreciente actividad industrial y turística, al desarrollo agrícola (programas del gobierno y subsidios), a la extracción de productos maderables y a la ganadería (Alonso Velasco y Velásquez Torres, 2019; López Jiménez et al., 2019). A diferencia del estado de Campeche y Quintana Roo, en Yucatán el CUS debido a la pérdida de cobertura vegetal ha estado presente desde épocas coloniales.

#### 2.4 IMPACTOS EN LA DINÁMICA ATMOSFÉRICA DEBIDO AL CAMBIO DE USO DE SUELO

Con lo descrito en las secciones anteriores, se puede decir que la influencia humana ha modificado de manera negativa el medio ambiente y es ocasionado principalmente por la

explotación desmedida y no planificada de la superficie terrestre, es decir, el cambio de uso de suelo. En particular el uso de suelo está asociado con características inherentes a la superficie terrestre, como la regulación del balance de radiación del sistema superficie terrestre-atmósfera, la humedad de la capa superficial del suelo, los flujos de masa (vapor de agua y/o CO<sub>2</sub>) y al flujo de energía (calor) en la atmósfera (Rodríguez Eraso et al., 2010). De modo que el suelo puede fungir como un puente de transferencia energética entre la litósfera y la atmósfera, que a su vez se encuentra conectada con la hidrósfera (Acevedo Rojas, 2017).

Debido al CUS, que genera un deterioro ambiental, inevitablemente conlleva un impacto en el sistema climático, el cual Rodríguez Eraso et al. (2010) divide en dos categorías:

**Procesos Biogeoquímicos:** Se da una alteración de los ciclos biogeoquímicos y hay un cambio en la composición química de la atmósfera. Asimismo se ve afectada la capacidad de los ecosistemas terrestres para procesar el carbono, al igual que los procesos ecológicos y fisiológicos en el suelo y la vegetación de incorporarlo. El intercambio de gases: metano, óxido nitroso, isopreno, vapor de agua y CO<sub>2</sub> se ven modificados (emisiones de gases de efecto invernadero), además de que se rompe el equilibrio del carbono y por lo tanto del intercambio gaseoso por fotosíntesis, y respiración, al igual que el balance en las tasas de mortalidad y perturbaciones de la vegetación.

**Procesos Biofísicos:** Existe una afectación de los flujos de superficie mediante la modificación del albedo, cambios en la rugosidad de la superficie, desequilibrio entre la pérdida de calor sensible y latente, así como cambios en la estructura y distribución de los ecosistemas terrestres.

Estos cambios sobre la superficie afectan el equilibrio del sistema climático, por lo que tienen un impacto espacio-temporal en el cual la relación entre la pérdida de cobertura vegetal y el patrón de distribución de los asentamientos humanos juega un papel fundamental. Esto se ve reflejado directamente en el comportamiento y mecanismos que determinan la dinámica de la atmósfera.

#### 2.4.1. CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático como su nombre lo indica es el cambio, alteración o modificación en el clima global del planeta Tierra (Pardo Buendía, 2007). De acuerdo con el glosario del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), definen al cambio climático como (IPCC, 2013):

*“La variación del estado del clima identificable en los cambios del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes en la composición de la atmósfera o del uso del suelo.”*

Por otra parte, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), hace una diferenciación entre el cambio climático relacionado a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y a la variabilidad climática por causas naturales. En el artículo 1, la CMNUCC define el cambio climático como:

*“El cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”.*

El CC actualmente es considerado como uno de los mayores retos que la sociedad mundial enfrenta según la Organización de las Naciones Unidas (ONU). De acuerdo con Pardo Buendía (2007) la evolución y variabilidad del clima históricamente se ha debido a causas naturales. Sin embargo, el cambio climático actual es definido por causas sociales: la masiva emisión de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, metano, óxidos de nitrógeno) pero sobre todo por la combustión de compuestos fósiles (petróleo y otros) en los últimos 150 años, es decir, desde el inicio de la industrialización hasta nuestros días. El IPCC en su 3<sup>er</sup> informe de evaluación en el 2001, concluye que el CC es real y que las actividades humanas son las principales causantes. Ya que después de la industrialización, deforestación y agricultura a gran escala, las cantidades de gases de efecto invernadero en la atmósfera se incrementaron

a niveles nunca antes registrados, por lo que mencionan que a medida que la población, las economías y el nivel de vida próspera, también lo hace el nivel acumulado de emisiones de GEI.

El CUS además de ser un factor importante en el deterioro ambiental (Figura 7) debido a la pérdida de ecosistemas, fragmentación del hábitat, modificaciones en la cubierta vegetal, disminución de especies, entre otros, está intrínsecamente relacionado con el aumento de las emisiones de GEI (Acevedo Rojas, 2017; Castillo Sierra, 2018). Como consecuencia estos GEI generados se mueven y se acumulan en otras partes del planeta, contribuyendo así al CC (Duarte, et al., 2006). Además, el aumento del CUS en los últimos años hace imprescindible plantear posibles escenarios que ayuden en la creación de planes de manejo que mitiguen el daño que la antropogenización ocasiona a los diferentes ecosistemas. Por ello el Atlas de escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán desarrollado por el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) en 2009, es un instrumento que ayuda a comprender los retos y las fortalezas de la Península de Yucatán frente al CC (Orellana Lanza, et al., 2009).

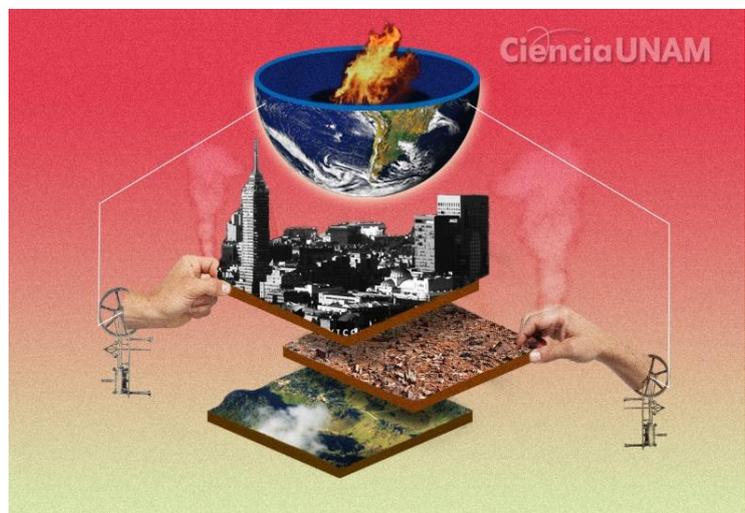


Figura 7. Efecto del CUS en el deterioro ambiental y el aumento en las emisiones de GEI que afectan la dinámica atmosférica y propician el CC. Fuente: Santillán, DGDC UNAM (2017).

El CC al ser una problemática mundial, en la PY a partir de la décimo sexta Conferencia de las Partes de Cambio Climático de la Convención Marco de las Naciones Unidas que se realizó en la ciudad de Cancún, Q. Roo, en el 2010, se reunieron esfuerzos y recursos en materia de Cambio Climático firmando el Acuerdo General de Coordinación entre los Estados de la Península de Yucatán (CCPY, s/a; Gobierno de Yucatán s/a). Estableciendo estrategias regionales fundadas en 3 proyectos principales: REDD+, Adaptación y Fondo de Cambio Climático; los cuales se cimentaron principalmente en los diagnósticos contenidos en los programas estatales de cambio climático de los estados de Campeche, Quintana Roo

y Yucatán. (Orellana-Lanza et al., 2009; PNUD México-INECC, 2016). Estas políticas públicas y estrategias buscan reducir los impactos del CC, mejorando las condiciones de vida de las comunidades.

#### 2.4.2. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Se entiende por escenario a una descripción de un estado futuro del mundo coherente, internamente consistente y plausible. Un escenario no es un pronóstico o una predicción, es más bien una serie de imágenes de cómo se podría ver el mundo en un futuro (Orellana Lanza et al., 2009).

Un escenario de cambio climático es una descripción verosímil y a menudo simplificada del clima futuro. Éstos se construyen o plantean, sobre la base de una serie intrínsecamente coherente de relaciones climatológicas, y son elaborados para ser expresamente utilizados en la investigación de las posibles consecuencias de los cambios climáticos de origen antrópico. Actualmente también se utilizan como instrumento auxiliar para la elaboración de modelos de impacto (Orellana Lanza et al., 2009; Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2017).

Por lo anterior, es de gran importancia considerar diferentes escenarios de CUS y de esta forma poder evaluar el impacto a futuro que éste pudiera tener en las interacciones biofísicas de los sistemas costeros.

#### 2.5 MODELO NUMÉRICO DE LA ATMÓSFERA: WRF

Para poder estudiar los cambios en la dinámica de la atmósfera por CUS, se utilizó datos del modelo WRF desarrollado por el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR). Este modelo atmosférico de mesoescala, permite realizar simulaciones del estado del tiempo con alta resolución espacio-temporal sobre áreas o regiones específicas, y puede ser configurado para aplicaciones operativas, de pronóstico o de investigación (Skamarock et al., 2008; López Méndez, 2009; Taylor Espinosa, 2014; Meza Carreto, 2018; Morales Rayo, 2018; Rivera Martínez, 2018). El WRF tiene la capacidad de correr con datos reales o con condiciones idealizadas, y puede ser empleado para realizar pronóstico del clima en tiempo real, modelaciones de calidad del aire, estudios meteorológicos, asimilación de datos y modelaciones de interacción océano-atmósfera.

Además hoy en día, el código del modelo ha sido optimizado y abierto a la comunidad, de modo que puede ser adaptado, tanto en supercomputadoras como en computadoras de reciente generación, siendo así uno de los modelos más utilizados por la comunidad científica. El modelo se ha ido actualizando a lo largo de su desarrollo, contribuyendo a la eficiencia y eficacia de este modelo de mesoescala. De las diferentes versiones existentes, para el presente trabajo se utilizó la versión WRF v.3.6.1.

### WRF Software Infraestructure (WSI)

Los principales componentes del sistema WRF se muestran en la Figura 8. Éste está formado por un sistema de preprocesamiento (WPS) y la infraestructura del sistema WRF (WSI), donde en este último se resuelven las ecuaciones de la física de la atmósfera, se lleva a cabo la asimilación de datos y la utilización de algunas opciones relacionadas con la química atmosférica.

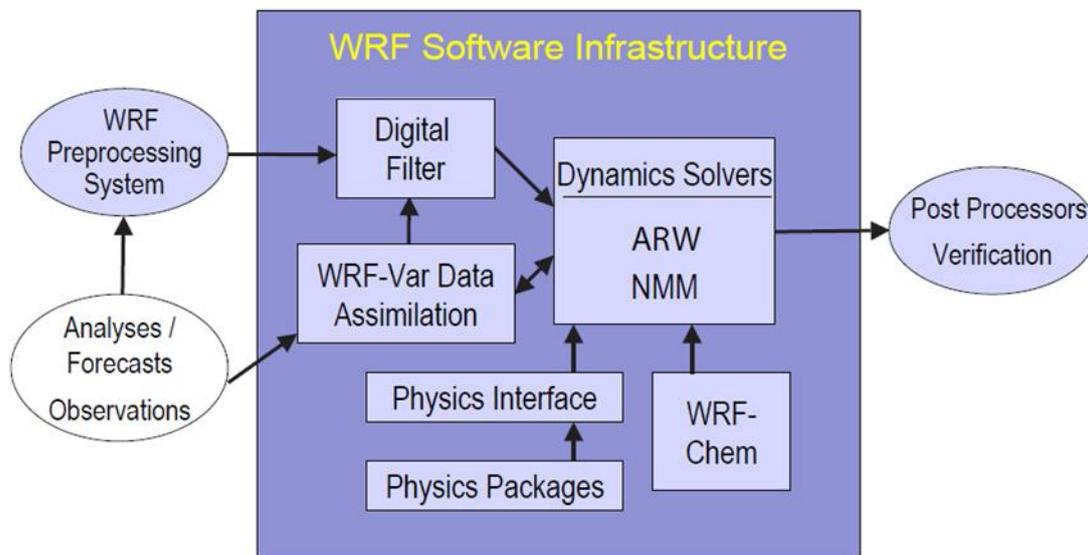


Figura 8. Componentes principales del sistema que conforma el WRF. Fuente: Skamarock et al. (2008).

El modelo cuenta con dos núcleos que resuelven la física del modelo, el primero es el Advanced Research WRF (ARW) y el segundo es el Nonhydrostatical Mesoscale Model (NMM). En este trabajo se utilizó el núcleo ARW, el cual ha sido diseñado para el pronóstico e investigación atmosférica (Meza Carreto, 2018), por lo que se describen a continuación algunas de sus principales características:

- ⌘ Ecuaciones: Estas consideran un fluido totalmente comprimible, no-hidrostático y basado en un flujo Euleriano. Asimismo, cuenta con una opción hidrostática y conserva las variables escalares.
- ⌘ Variables: componentes de velocidad “ $u$ ” y “ $v$ ” en coordenadas cartesianas, velocidad vertical “ $w$ ”, temperatura potencial, geopotencial y presión superficial. Opcionalmente, la energía cinética turbulenta y cualquier número de escalares como la proporción de mezcla de vapor de agua, proporción de mezcla de lluvia / nieve, proporción de mezcla de agua de nube / hielo y compuestos químicos y trazadores.
- ⌘ Coordenadas vertical: Estas dan seguimiento al terreno y permiten un estiramiento en los niveles verticales. El tope del modelo es una superficie de presión constante.
- ⌘ Malla horizontal: Malla escalonada tipo Arakawa C.
- ⌘ Integración en tiempo: Utiliza un esquema Runge-Kutta de 2<sup>do</sup> y 3<sup>er</sup> orden con un paso de tiempo menor para ondas acústicas y de gravedad. Tiene capacidad de pasos de tiempo variables.
- ⌘ Discretización espacial: Utiliza esquemas de 2<sup>do</sup> y 6<sup>to</sup> orden en la horizontal y vertical.
- ⌘ Condiciones de frontera laterales: Periódicas, abiertas y simétricas.
- ⌘ Condiciones de frontera en superficie: Parametrizaciones físicas o de deslizamiento libre.
- ⌘ Rotación de la tierra: se incluyen los términos completos de Coriolis.
- ⌘ Anidamiento: Mallas interactivas unidireccionales, bidireccionales y móviles.
- ⌘ Malla global: Tiene la capacidad para realizar simulaciones globales utilizando un filtro polar de Fourier y condiciones periódicas de este a oeste.

Respecto a la física del modelo, sus principales características son:

- ⌘ Microfísica: Esquemas simplificados para simulaciones idealizadas y esquemas complejos que resuelven explícitamente procesos de precipitación, vapor de agua y nubes.
- ⌘ Parametrizaciones de cúmulus: Esquemas de ajuste y flujo de masa para el modelado de mesoescala.

- ⌘ Capa límite planetaria (Planetary Boundary Layer, PBL): Predicción de energía cinética turbulenta o esquemas no lineales.

Mayores detalles y referencias del modelo se pueden encontrar en las guías de usuario del WRF (<https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/index.php>), y en Skamarock et al. (2008).

### **Descripción del funcionamiento del WRF**

De manera general, el funcionamiento del modelo WRF se divide en dos etapas principales (Figura 9), el pre-procesamiento y la ejecución del modelo (procesamiento), sin embargo, también existe una de post-procesamiento en la cual se pueden visualizar las salidas del modelo. A continuación se describen brevemente las etapas de funcionamiento del modelo:

#### ω **Pre-procesamiento.**

Los datos de entrada (input) se procesan con el WRF Preprocessing System. Éste es usado para simulaciones reales; donde se definen los dominios de la simulación, se interpolan los datos de la superficie (terrestre/océano) a los dominios, se decodifican e interpolan los datos meteorológicos que alimentan al modelo, y se especifican otras características del experimento. Como resultado de la compilación de datos, el WPS genera tres archivos ejecutables denominados:

***geogrid.exe***: Configura el dominio y anidamientos a simular. En este archivo se crean los datos de la superficie (terrestre/océano) a partir de datos geográficos estadísticos, al interpolar los datos a las mallas del modelo.

***ungrib.exe***: Genera los datos meteorológicos GRIB y los empaqueta en un formato de archivos intermedios. Generalmente los datos de entrada que decodifica provienen de modelos globales.

***metgrid.exe***: Interpolan horizontalmente los datos meteorológicos en el dominio. Estos archivos son los que se utilizan como entrada para el modelo WRF (*real.exe*).

Cabe mencionar que para que el modelo funcione correctamente, lo esencial es que el *geogrid* y el *ungrib* se ejecuten correctamente, de modo que al interpolar los datos en el *metgrid* se usen como datos de entrada del modelo.

### ω Procesamiento.

En esta etapa, cualquiera de los casos de simulación ideal o real, se lleva a cabo la integración numérica del dominio principal y de los anidamientos, si es el caso. Una vez compilado el WRF, genera dos archivos ejecutables:

**real.exe:** Éste interpola verticalmente los datos en las coordenadas del modelo.

**wrf.exe:** Y éste último ejecuta la simulación numérica.

### ω Post-procesamiento.

Esta etapa es independiente al código del modelo, en donde a partir de las salidas del wrf.exe se pueden generar gráficos que permitan la visualización de las simulaciones realizadas. Para el presente trabajo se utilizó MATLAB de forma independiente.

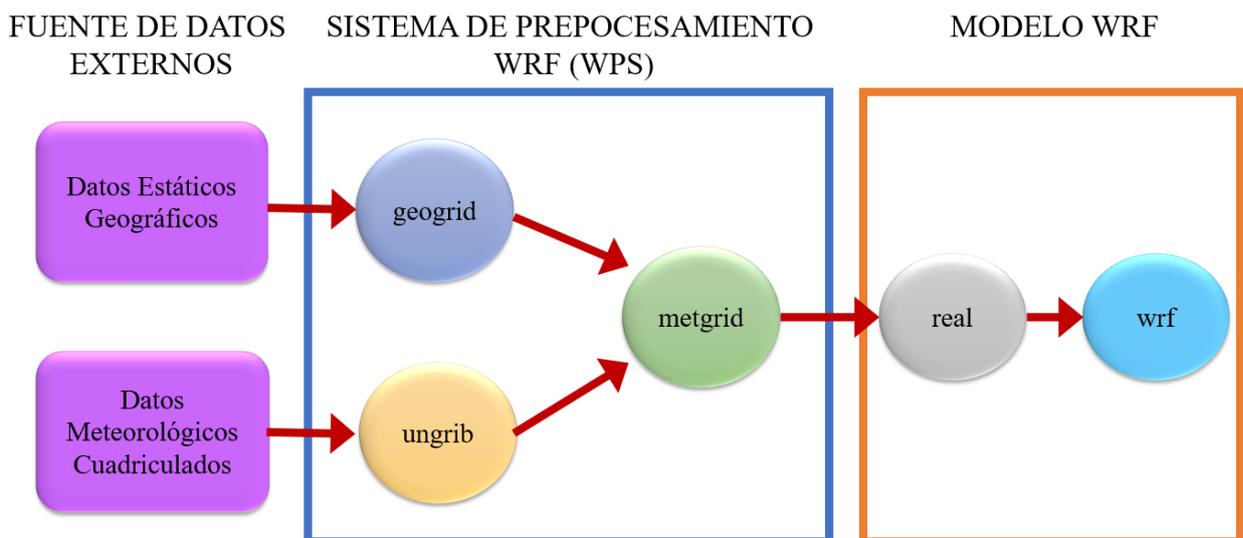


Figura 9. Diagrama de flujo del modelo WRF para una simulación típica. Fuente: WRF-ARW Online Tutorial.

## 2.6 ESTADÍSTICOS

Para la validación del modelo se utilizaron diferentes herramientas estadísticas, las cuales han sido usadas en diversos estudios para el análisis de datos meteorológicos. Autores como López Méndez (2009), Taylor Espinosa (2009, 2014), Wilks (2011), Garzón Nuñez (2014), Meza Carreto (2018), entre otros han utilizado estos estadísticos para la validación del WRF, ya que permiten medir la precisión de la simulación.

A continuación se describen los estadísticos utilizados en la validación del viento y la temperatura.

**Coefficiente de correlación lineal (r).** Permite describir el grado de asociación lineal que existe entre dos variables cuantitativas (x, y). La correlación entre las distintas variables puede ser positiva o negativa dependiendo de la relación de éstas. Es positiva cuando en la medida que aumenta una de ellas aumenta la otra, es decir, hay una relación directa entre las dos variables. Por el contrario, es negativa en la medida que aumenta una variable y disminuye la otra, la relación es inversa entre las variables. La expresión matemática para calcularla este coeficiente es:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)S_x S_y} \quad (1)$$

donde: “x” representa los valores simulados, “y” los valores observados;  $\bar{x}$  y  $\bar{y}$  son el promedio de los valores simulados y observados respectivamente.  $S_x$  y  $S_y$  representan las desviaciones estándar de la variable según corresponda; y “n” es el número total de datos. En los estadísticos posteriores tendrán el mismo significado.

**Desviación estándar (SD;  $\sigma$ ).** Es la raíz cuadrada de la varianza. Donde la varianza es la que mide la dispersión de los valores de una variable respecto a la media aritmética, es decir, el promedio de los cuadrados de las desviaciones estándar alrededor de la media aritmética. La SD es una medida que permite comparar el grado de dispersión de los datos de diferentes variables con respecto al valor promedio. A mayor SD la dispersión de los datos es mayor, y a menor SD indica que los datos se encuentran más agrupados. Su fórmula matemática es:

$$SD = \sqrt{S^2} \quad (2)$$

donde:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (3)$$

$x_i$  son el conjunto de datos.

**Error cuadrático medio (RMSE).** Indica el grado de correspondencia promedio entre los valores simulados y los observados. Éste cuantifica la cantidad de error que hay entre dos conjuntos de datos, es decir, cuantifica la distancia cuadrática media entre un estimador y un parámetro. Se expresa como:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x-y)^2}{n}} \quad (4)$$

**Sesgo (BIAS).** Es una medida que cuantifica el error sistemático del modelo. Éste proporciona información sobre la tendencia que tiene el modelo al simular una variable, es decir, sobrestimar o subestimar.

$$BIAS = \sum_{i=1}^n \frac{(x-y)}{n} \quad (5)$$

En particular la dirección del viento necesita especial atención pues el cálculo de los estadísticos difiere, ya que se trata de un vector. Cabe mencionar, que para analizar la dirección, se ha calculado con una variante del RMSE. A continuación se describen los estadísticos usados en la validación de esta variable.

**Coefficiente de correlación circular (CCC).** Éste analiza la relación entre dos variables aleatorias circulares. Entonces, el CCC se calcula como:

$$CCC = \frac{\sum_{i=1}^n \sin(a_i - \bar{a}) \sin(b_i - \bar{b})}{\{\sum_{i=1}^n \sin^2(a_i - \bar{a}) \sin^2(b_i - \bar{b})\}^{1/2}} \quad (6)$$

donde: “ $a_i$ ” y “ $b_i$ ” son los datos angulares, con su media angular  $\bar{a}$  y  $\bar{b}$ , respectivamente.

**Desviación estándar circular (CSD).** Es una medida de dispersión angular, la cual se define:

$$CSD(\bar{\theta}) = (-2 \log \bar{R})^{1/2} [0, \infty] \quad (7)$$

donde:  $R = MVL$ , es el tamaño del vector resultante.

$$MVL = (x^2 + y^2)^{1/2}; \quad x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(\theta_i) \quad y \quad y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin(\theta_i) \quad \theta_i \text{ es el ángulo.}$$

## 2.7 ANÁLISIS DE DATOS

En esta sección se describen los diferentes métodos para el análisis de los datos.

**Filtro paso bajo.** Se aplica a una señal de entrada de la cual se extrae solo una parte del espectro de frecuencias de la señal original. El filtro es un método por el cual un conjunto de datos iniciales (datos de entrada – input) “ $x_n$ ” es transformado a un conjunto de datos de salida (output) “ $y_n$ ” por medio de una relación lineal, mostrada a continuación:

$$y_n = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h_k x_{n-k} \quad (8)$$

donde “ $h_k$ ” son los ‘pesos’ adecuadamente escogidos.

Este filtro, denominado paso bajo, da como respuesta un acondicionamiento en la salida de la señal, ya que retiene las frecuencias indeseadas pues únicamente permite el paso de las frecuencias bajas y atenúa las frecuencias altas, lo cual indica con qué periodicidad ocurre un evento y proporciona información de la frecuencia, fase y amplitud.

**Componente diurna y ajuste de la elipse.** Un componente diurno es un componente que tiene un único período en el día (NOAA glossary, 1999). La varianza explicada por el componente de viento diurno se calculó:

$$S_{diurnal} = 1 - \left[ \frac{\sum_i^n (\phi_M^i - \phi_{diurnal}^i)^2}{\sum_i^n (\phi_M^i - \bar{\phi}_M)^2} \right]^{1/2} \quad (9)$$

donde  $\Phi$  corresponde a cada componente del viento.

Para obtener la componente diurna del viento, se ajustó una señal sinusoidal con una frecuencia de 24 horas mediante el método de mínimos cuadrados a cada componente del viento. De esta forma, se ajustó una señal elíptica y se obtuvieron sus respectivos parámetros característicos utilizando:

$$u_i = A_0 + A_1 \cos(\omega t_i) + A_2 \sin(\omega t_i) \quad (10)$$

$$v_i = B_0 + B_1 \cos(\omega t_i) + B_2 \sin(\omega t_i) \quad (11)$$

Donde ( $A_0$ ,  $B_0$ ) son las constantes que indican el desplazamiento de la elipse central alejándose del origen y están relacionadas con el viento medio, que no varía en una escala diurna; ( $A_1$ ,  $B_1$ ) y ( $A_2$ ,  $B_2$ ) indican la inclinación, la rotación y la magnitud de los semiejes de la elipse. La frecuencia diurna ( $2\pi/24$  hrs) está representada por  $\omega$  y  $t_i$  es la hora del día.

Los valores de los coeficientes se obtuvieron aplicando el método de descomposición de valores singulares (SVD). Después de calcular los coeficientes zonal y meridional para la señal completa, se obtuvieron la magnitud de los semiejes, la inclinación de la elipse (ángulo del eje semi-mayor con respecto al este) y el tiempo en el que se obtuvo el viento alineado con el eje mayor. Este análisis se realizó tanto para los datos observados como para los datos simulados.

**Descomposición en valores singulares (SVD).** Éste método utilizado en algebra lineal propuesto en forma independiente por Beltrami en 1873 y Jordan un año posterior (1874), sirve para ‘descomponer’ una matriz  $A$  en el producto de dos matrices unitarias<sup>2</sup>  $U, V^T$  ( $T$  indica la matriz transpuesta<sup>3</sup> de  $V$ ) y una matriz diagonal<sup>4</sup>  $\Sigma$  (los elementos de la diagonal son comúnmente conocidos como valores singulares de  $A$ ). Las columnas de  $U$  y  $V$  son denominadas direcciones principales de salida y de entrada, respectivamente (Buffo y Verdiell, 2004; Taylor Espinosa, 2009; Zaballa s/a). Gracias a su generalización a espacios de dimensión infinita y que a finales de los 60’s algunos autores mostraron cómo calcularla numéricamente y usarla como herramienta para muchos algoritmos estables, fue que los valores singulares se convirtieron en objetos muy útiles en la comunidad de analistas numéricos del álgebra matricial (Buffo y Verdiell, 2004).

Los valores singulares son el resultado de la búsqueda de reducir las formas cuadráticas a una forma diagonal mediante cambios de base ortonormales, donde las aplicaciones lineales transforman las esferas en hiperelipses, lo cual es demostrado en el teorema SVD (Zaballa s/a). El teorema SVD se puede aplicar a matrices reales o complejas. Sea  $A$  una matrix  $\in M_{m \times n}$ , una SVD es una factorización si

$$A = U\Sigma V^T \quad (12)$$

Donde existe una matriz unitaria  $U$  de  $m \times m$ , una matriz unitaria  $V$  de  $n \times n$ , y  $\Sigma \in M_{m \times n}$  es una matriz rectangular diagonal de rango  $r \leq \min \{m, n\}$ , cuyas entradas diagonales no nulas  $\sigma_1, \dots, \sigma_r$  son positivas y forman una secuencia decreciente:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r.$$

<sup>2</sup> Matriz unitaria  $U$  es una matriz especial, que como una transformación lineal  $L(x) = Ux$ , preserva las figuras en el espacio.

<sup>3</sup> En caso de la matriz unitaria  $V$  sea hermitiana,  $T$  indica la transpuesta conjugada.

<sup>4</sup> La matriz diagonal es la matriz cuadrada con entradas nulas a excepción de la diagonal principal.

En esta situación las columnas de U se llaman vectores singulares izquierdos, las columnas de V se llaman vectores singulares derechos, y los números  $\sigma_1, \dots, \sigma_r$  se llaman valores singulares de A. A veces se definen también  $\sigma_i = 0$  para todo  $i > r$ .

En este trabajo la demostración del teorema SVD no se contempla, sino, en las aplicaciones que pueda tener para el desarrollo de este estudio. Actualmente el SVD posee numerosas aplicaciones, una de las más importantes es en el procesamiento de señales, reconocimiento de patrones, análisis de series de tiempo, teoría de control, entre otras.

**Prueba T-Student.** Es un método utilizado para examinar las diferencias entre dos muestras independientes que tengan una distribución normal y a la vez homogeneidad en sus varianzas. La expresión matemática es:

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{s_x^2}{n} + \frac{s_y^2}{m}}} \quad (13)$$

donde:  $\bar{x}$  y  $\bar{y}$  son el promedio de los valores de las muestras.  $S_x$  y  $S_y$  representan las desviaciones estándar; “n” y “m” el tamaño de las muestras.

Para ello se utilizó la función “ttestz” de Matlab, en la cual se especifican:

- **Alfa:**  $\alpha$  – grado de significancia
- **Número de Colas:** de acuerdo con el tipo de hipótesis nula a evaluar puede ser:
  - a) de 2 colas ( $H_0: \bar{x} = \bar{y}$ )
  - b) distribución a la derecha ( $H_0: \bar{x} > \bar{y}$ )
  - c) distribución a la izquierda ( $H_0: \bar{x} < \bar{y}$ )

Obteniendo de éste modo:

- **h** (resultado de la hipótesis)  
h=1, indica el rechazo de la hipótesis nula  
h=0, indica la aceptación de la hipótesis nula
- **p** (valor de probabilidad) Valores pequeños ponen en duda la validez de la hipótesis nula
- **ci** (intervalo de confianza)
- **tstat** (valor estadístico de la prueba)

- ***df*** (grados de libertad)
- ***sd*** (estimación agrupada de la desviación estándar)

Este análisis se realizó para los datos simulados que se encontraban dentro del área del polígono de cada localidad para los tres años de estudio (Resultados en Anexo 2). Las  $H_0$  que se plantearon son:

1.  $H_0: \bar{x} = \bar{y}$  (2 colas)
2.  $H_0: \bar{x} > \bar{y}$  (1 cola)

### 3. METODOLOGÍA

Para poder estudiar la variabilidad de la atmósfera, en particular de la temperatura del aire y el viento, en la región de la Península de Yucatán asociada al cambio de uso de suelo, se utilizó el modelo numérico de investigación y pronóstico del tiempo Weather Research and Forecasting. Se realizó una simulación numérica de la atmósfera incluyendo diferentes mapas de uso de suelo espaciados 20 años desde 1996 hasta 2036 para seis ubicaciones estratégicas en la región. El modelo numérico fue validado a escala local utilizando datos medidos de estaciones meteorológicas disponibles, ubicadas en la PY y en algunos de los sitios de estudio. Los sitios de estudio están distribuidos de la siguiente manera: en el estado de Campeche, la ciudad de Campeche ( $19.83^{\circ}\text{N}$ ,  $-90.51^{\circ}\text{O}$ ); en el estado de Yucatán, la ciudad de Mérida ( $20.97^{\circ}\text{N}$ ,  $-89.61^{\circ}\text{O}$ ), el puerto de Progreso ( $21.28^{\circ}\text{N}$ ,  $-89.66^{\circ}\text{O}$ ) y el puerto de Sisal ( $21.16^{\circ}\text{N}$ ,  $-90.03^{\circ}\text{O}$ ), y finalmente en el estado de Quintana Roo, la ciudad de Cancún ( $21.16^{\circ}\text{N}$ ,  $-86.85^{\circ}\text{O}$ ) y Playa del Carmen ( $20.63^{\circ}\text{N}$ ,  $-87.07^{\circ}\text{O}$ ) (Figura 10). El período de estudio será de un año para cada mapa de uso de suelo y corresponde a los años 1996, 2016 y al escenario de CUS para el año 2036.



Figura 10. Ubicación geográfica de las ciudades de estudio en la PY.

### 3.1 ÁREA DE ESTUDIO

#### 3.1.1. CONTEXTO GEOGRÁFICO

La PY localizada al extremo sureste (entre los 18°N y 21°30'W) de la República Mexicana, cuenta con 3 de las 17 entidades federativas con apertura al mar (estados costeros). Estas 3 entidades federativas están referidas a los estados de Yucatán, Quintana Roo y Campeche (Figura 11).

La PY se encuentra en una región de escaso relieve, por lo que dependen en gran medida de los recursos naturales costeros y está sumamente influenciada por los fenómenos y eventos naturales que ocurren en el Golfo de México (GoM) y el Mar Caribe (MCb). Estos eventos, incluyen a los frentes fríos, huracanes, tormentas tropicales (OEA, 1993; Capurro, 2002; Comisión Nacional del Agua, 2017).

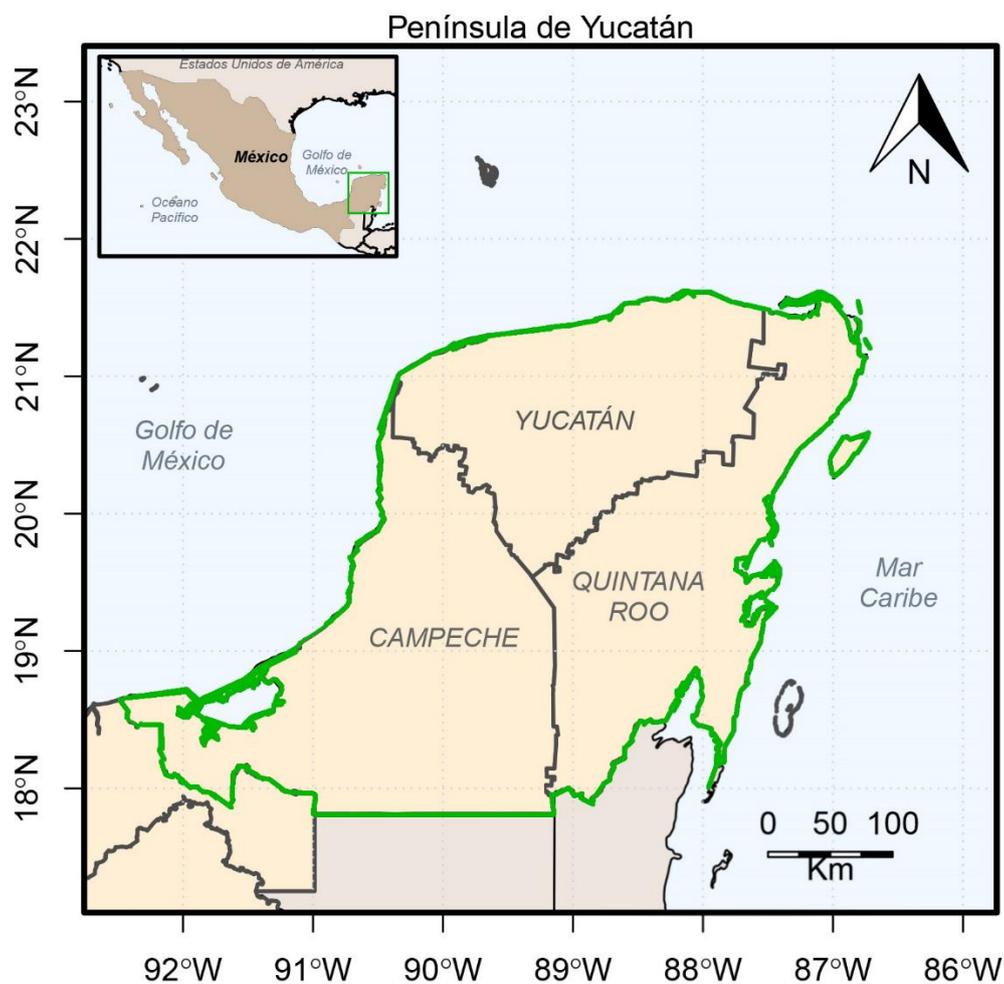


Figura 11. Ubicación geográfica de la Península de Yucatán (PY). La PY se encuentra delimitada por el color verde.

La PY constituye un grupo de ecosistemas terrestres, dulceacuícolas, y marinos de alto valor biogeográfico y ecosistémico. Además de ser una región donde la interacción océano-atmósfera es determinante para el clima. Esto debido a su geomorfología y a su extenso litoral (Durán y Méndez, 2010).

3.1.2. CONTEXTO SOCIOECONÓMICO

La población de la PY representa al 3.9% de la población total del país. De acuerdo al Censo General de Población y Vivienda 2015 efectuado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) el 1.8% corresponde al estado de Yucatán, el 0.8% al estado de Campeche, y el 1.3% a Quintana Roo (INEGI, 2015). Los censos poblacionales realizados por el INEGI muestran un claro crecimiento poblacional en la PY. En particular, el indicador de la SEMARNAT IC6.3-5 evidencia el flujo de incremento en la población costera de estas tres entidades federativas. Entre 1990 y el 2015, la tasa de crecimiento poblacional para los estados de la PY revela que para Campeche la tasa de crecimiento fue de 2.06%, para Yucatán de 1.79%, y para Quintana Roo del 4.46%, en tan solo 25 años (INEGI, 2019). El crecimiento poblacional en la PY en los últimos años de acuerdo a los censos realizados por el INEGI, se observa en la Figura 12.

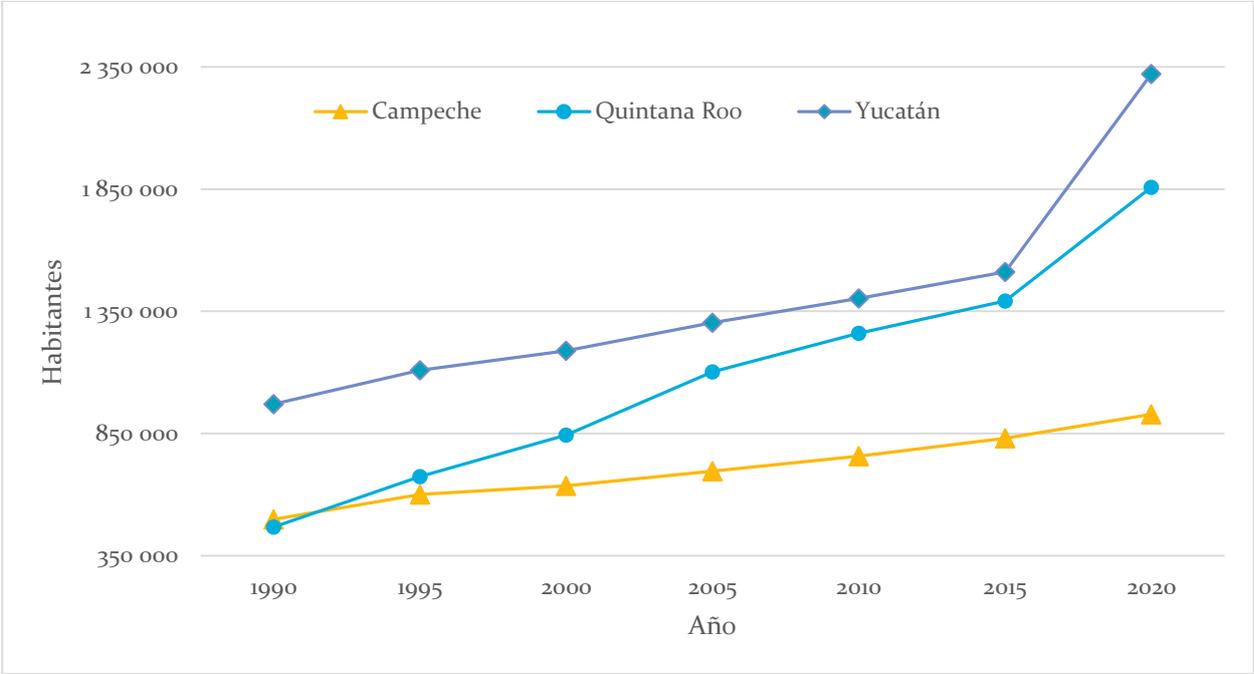


Figura 12. Crecimiento poblacional en la Península de Yucatán (número de habitantes). Fuente: INEGI 2019 y 2020.

En cuanto al aspecto económico de cada uno de estos tres estados, el Producto Interno Bruto (PIB) en 2018 representó para el estado de Yucatán el 3.2% con respecto al total nacional, para el estado de Campeche el -1.6%, y para Quintana Roo el 5.1%, siendo las actividades terciarias (principalmente actividades derivadas a servicios del turismo, hotelería y entretenimiento, junto al comercio) las que tuvieron mayor aportación de acuerdo a los datos del INEGI para el 2015 (INEGI, 2015). De modo que el establecimiento de las actividades económicas terciarias cuyo objetivo es proveer servicios a los otros sectores económicos, han influenciado fuertemente al ordenamiento territorial de la península y de sus principales ciudades.

### 3.2 DATOS

#### 3.2.1 DATOS METEOROLÓGICOS

Se utilizaron datos observados de estaciones meteorológicas automáticas (EMAs o AWS, por sus siglas en inglés) y de estaciones sinópticas meteorológicas (ESIME). Las EMAs y las ESIME tienen la capacidad de reportar en tiempo real o guardar los datos para futuras consultas o recuperaciones, éstas monitorean las variables meteorológicas en los sitios en donde se ubican. Estas estaciones meteorológicas están conformadas por un grupo de sensores atmosféricos que registran y transmiten la información meteorológica de forma automática. Tienen un alcance de 5 km de radio, en terreno plano, y son capaces de medir, la rapidez y dirección del viento, la presión atmosférica, la temperatura y humedad relativa del aire, así como la radiación solar y la precipitación (Taylor Espinosa, 2009).

En la región de la PY se localizan 35 EMAs (<https://smn.conagua.gob.mx/es/estaciones-meteorologicas-automaticas>), de las cuales se utilizaron datos de una EMA y tres ESIME. Las estaciones meteorológicas automáticas seleccionadas fueron 4 estaciones meteorológicas distribuidas en los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo (datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional de México), una de ellas perteneciente a la Armada de México (SEMAR) ubicada en Quintana Roo, y las otras 3 al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), ubicadas en Yucatán y Campeche (Figura 13).

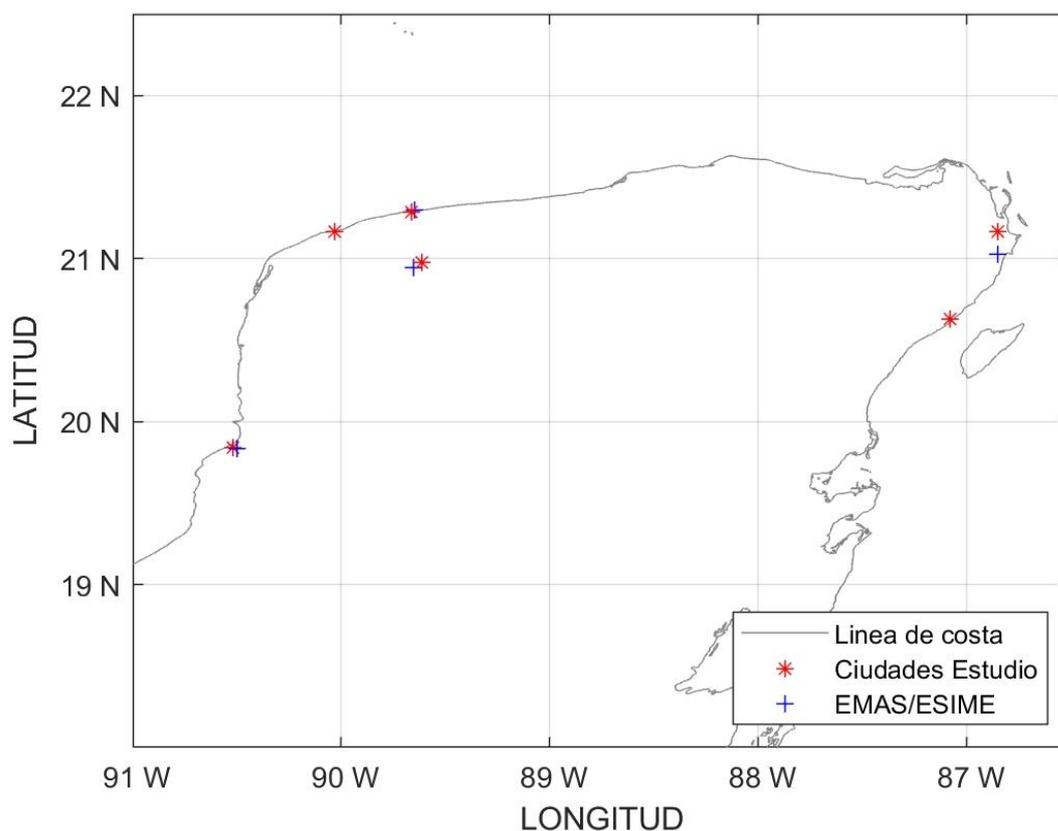


Figura 13. Ubicación geográfica de las ciudades de estudio y de las EMAs y ESIME utilizadas.

Las variables analizadas de cada estación meteorológica fueron: la velocidad del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ), la dirección del viento ( $^{\circ}$ ) y la temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ). Todos los datos fueron verificados para control de calidad, por lo que cada una de las series de tiempo debía de tener más del 95% de datos válidos. Se consideraron datos no válidos, aquellos valores extremos u outliers ( $\pm 2$  desviaciones estándar) o que tuvieran valores igual a cero (más de dos mediciones continuas).

Los datos de las EMAs tienen un intervalo de muestreo de 10 min y los datos de la SEMAR de 15 min. Para este trabajo se aplicó un filtro paso bajo con frecuencia de corte de 1 hr utilizando los datos medidos cada 60 min, esto para separar los procesos de alta frecuencia que ocurren a una escala espacial pequeña (del orden de metros).

### 3.2.2 CRECIMIENTO POBLACIONAL INEGI

El crecimiento poblacional entendido como el flujo de movimientos que una población sostiene a lo largo del tiempo, es decir, su dinámica poblacional, está en función de 3 componentes principales: los nacimientos, las defunciones, y la migración. De acuerdo a

Torres Dregó (2011) esta tasa de crecimiento poblacional puede ser estimada siguiendo un patrón preestablecido, un modelo matemático. Los tres modelos básicos para este cálculo son: aritmético, geométrico y exponencial (Tabla 2).

Para el cálculo de la tasa de crecimiento poblacional de las localidades ubicadas en la PY, se utilizó el modelo matemático geométrico o de interés compuesto. Para ello se utilizaron los censos de población del INEGI de los últimos años, con base en el estado y municipio de la zona de estudio. De acuerdo a la información disponible por estado, se encontraron datos del año 1990 y de ahí cada lustro hasta el año 2015. Por otro lado en el caso de los municipios se encontró información únicamente del año 2010 y 2020.

Tabla 2. Modelos matemáticos utilizados para obtener la tasa de crecimiento poblacional.

| Aritmético / Lineal   | Geométrico / Interés compuesto  | Exponencial   |
|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Supone que la población tiene un comportamiento lineal, es decir, constante.</li> <li>◆ Para periodos cortos de tiempo (menor a 2 años).</li> <li>◆ Formulas:               <math display="block">r = \frac{P^{t+n} - P^t}{a(P^t)}</math> <math display="block">r = \frac{1}{a} \left( \frac{P^{t+n} - P^t}{P^t} \right)</math> <math display="block">r = \left( \frac{P^{t+n} - P^t}{a} \right) \div P^t</math> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Supone un crecimiento porcentual constante en el tiempo.</li> <li>◆ Se puede usar para periodos largos de tiempo.</li> <li>◆ Formulas:               <math display="block">r = \sqrt[a]{\left(\frac{P^{t+n}}{P^t}\right)} - 1</math> <math display="block">r = \left(\frac{P^{t+n}}{P^t}\right)^{1/a} - 1</math> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Supone que el crecimiento se produce en forma continua y no cada unidad de tiempo.</li> <li>◆ Formulas:               <math display="block">r = \frac{\ln P^{t+n} - \ln P^t}{a}</math> <math display="block">r = \frac{\ln(P^{t+n} \div P^t)}{a}</math> <math display="block">r = \frac{1}{a} \ln(P^{t+n} \div P^t)</math> </li> </ul> |
| <p>Donde:</p> <p style="text-align: center;"><math>r</math> = Tasa de crecimiento anual</p> <p style="text-align: center;"><math>P^{t+n}</math> = Población al momento actual</p> <p style="text-align: center;"><math>P^t</math> = Población inicial o base</p> <p style="text-align: center;"><math>a</math> = La amplitud o distancia en tiempo</p>  |   |   |

### 3.2.3 DATOS DE USO DE SUELO

Se utilizó un mapa base de US de la PY para las ciudades de estudio, basado en la cobertura urbana mostrada en las imágenes de satélite de la aplicación “Google Earth Pro”. En cada ciudad se definieron 5 polígonos, comenzando desde 1996, espaciados cada 10 años, hasta llegar al 2036. Los polígonos entre 1996 y 2016 se delimitaron utilizando como referencia el historial de imágenes satelitales de Google Earth.

El año establecido como presente (año de control), fue 2016 (último mapa actualizado de Google Earth para el año 2019), debido a la disponibilidad de las imágenes de satélite. El acercamiento de las imágenes para delimitar los polígonos fue a una altitud de 12-20 m sobre la superficie, con el fin de tener mayor precisión en el área urbana, no obstante para las superficies rectas como calles en el límite de la ciudad, donde aparentemente no existen cambios, la continuidad del polígono se hizo a una altitud de 50-250 m. De esta forma también se realizaron los polígonos para los años 1996 y 2006. En el caso de la localidad de Campeche las imágenes satelitales del año 1996 a una altitud próxima a la superficie no existían sino hasta el año 2003, por lo que para la delimitación del polígono se consideró a una altitud aproximada de 18 km.

Para la delimitación de los polígonos de 10 (2026) y 20 (2036) años a futuro se propusieron dos escenarios mediante un ajuste lineal del cambio de área urbana para cada ciudad (Figura 14 y Tabla 3). El resultado de la tendencia lineal para cada localidad se consideró como el área total urbanizada o con que tuviera un CUS para los años futuros. El polígono del año 2016 sirvió como base para extender el área de los polígonos que se proponen como posibles escenarios de CUS a futuro, esta extensión siguió el patrón de crecimiento urbano mostrado en cada ciudad. Los polígonos (Figura 15) se trabajaron en formato KMZ para posteriormente utilizarlos como mapa base en el modelo atmosférico. Debido a que en algunas localidades de estudio el CUS no fue significativo en 10 años, este estudio se llevó a cabo considerando el CUS de 20 años. Por lo anterior los años que se utilizaron para generar los mapas base fueron 1996, 2016 y 2036.

Tabla 3. Ajuste lineal del cambio de área urbana utilizado para cada localidad de estudio.

| LOCALIDAD        | R <sup>2</sup> | FORMULA (y=ax+b)      |
|------------------|----------------|-----------------------|
| Campeche         | 0.99           | $y = 0.545x - 1050.5$ |
| Mérida           | 0.9446         | $y = 7.75x - 15325$   |
| Progreso         | 0.9349         | $y = 0.442x - 872.7$  |
| Cancún           | 0.9343         | $y = 7.71x - 15364$   |
| Playa del Carmen | 0.9987         | $y = 3.54x - 7056.6$  |

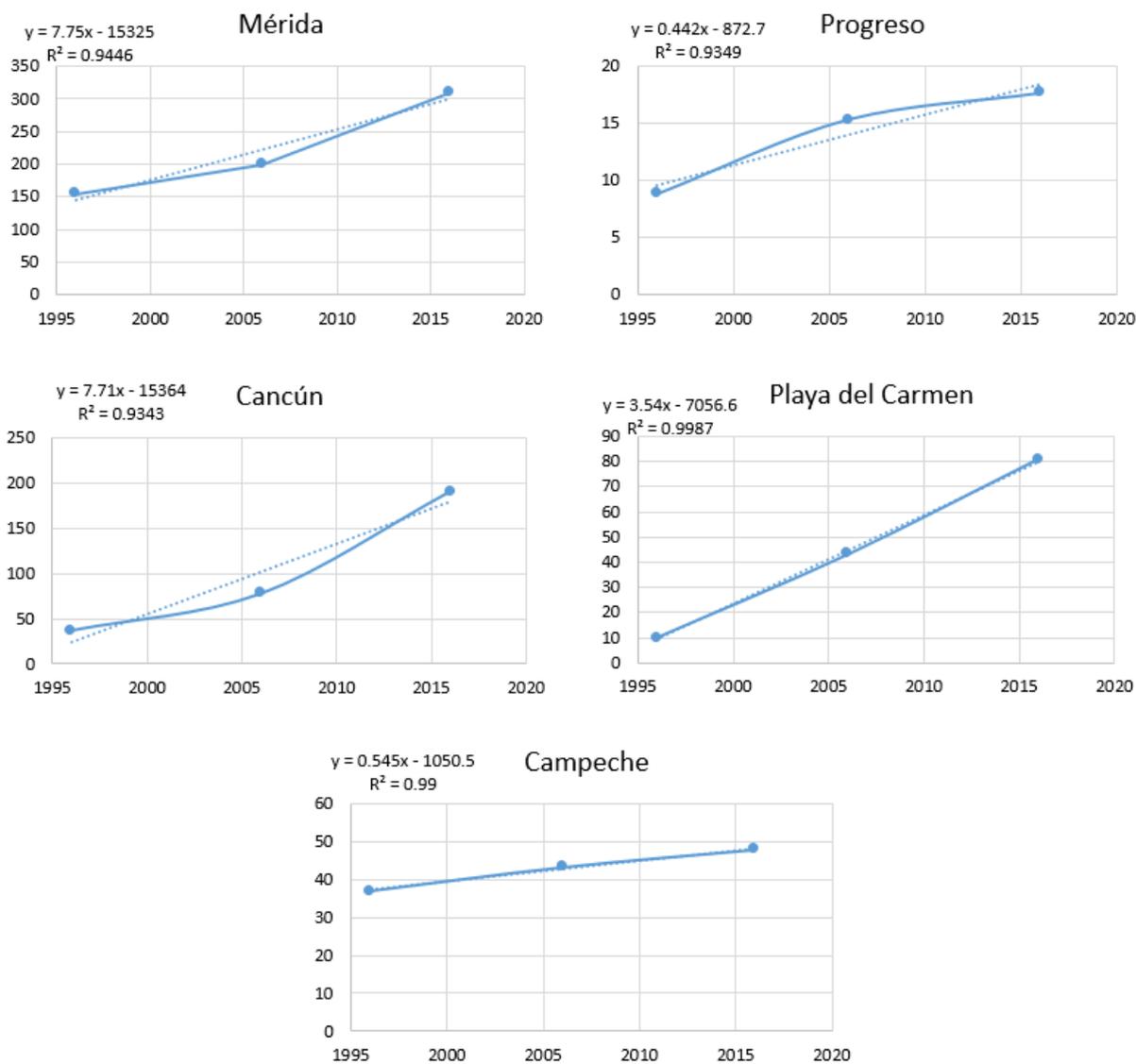


Figura 14. Ajuste lineal del área urbana para cada ubicación de estudio de 1996 – 2016.

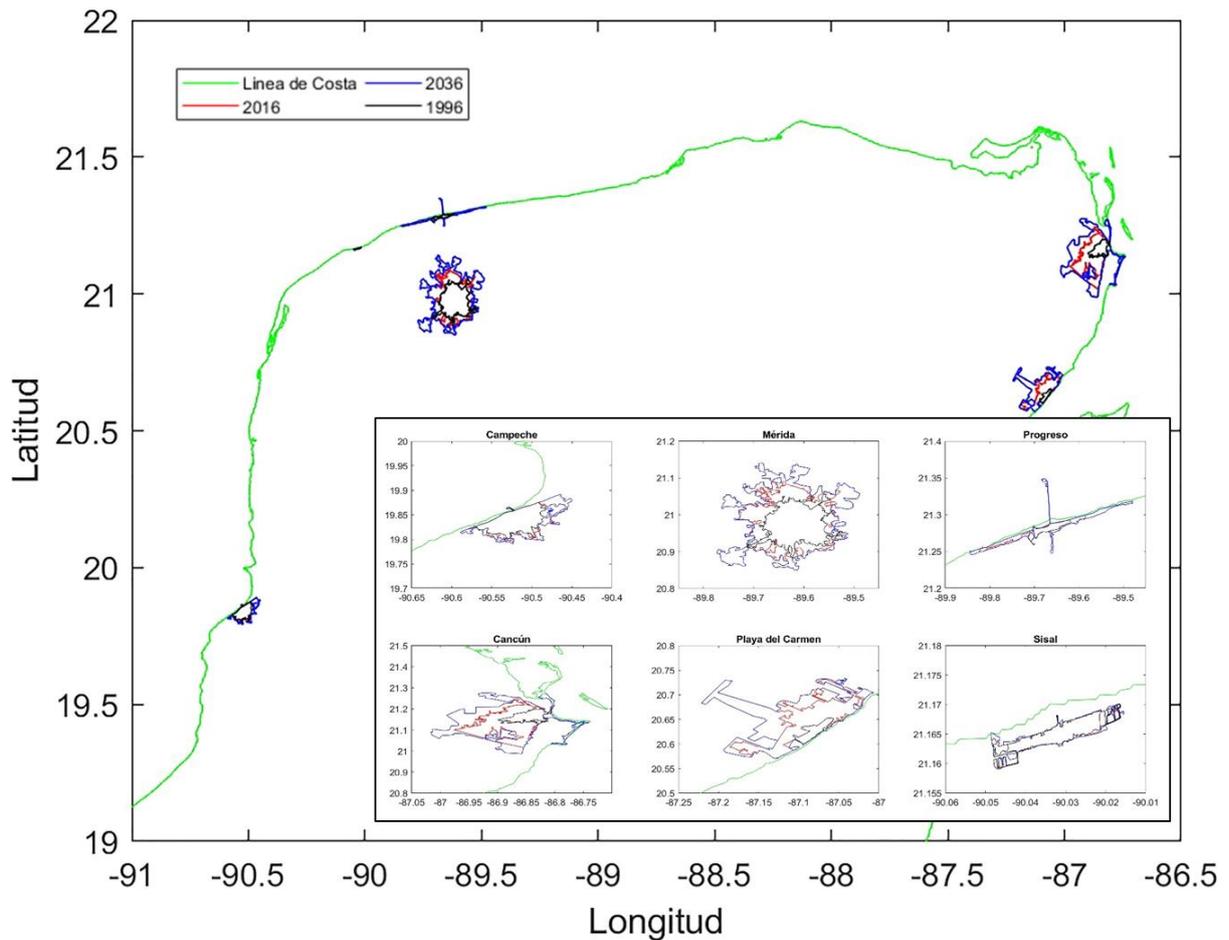


Figura 15. Polígonos de cada localidad de estudio para 1996, 2016 y 2036. Año de referencia (presente) 2016. Fuente: Google Earth Pro 2019.

Del formato KMZ de los polígonos definidos para 1996, 2016 y 2036 se consideraron las siguientes condiciones de mancha urbana:

- 1996: estimación de las condiciones pasadas de la mancha urbana de 1996 para las 6 ciudades analizadas.
- 2016 (condiciones actuales): mancha urbana y cobertura vegetal representativa de la actualidad.
- 2036: mancha urbana proyectada a 2036 de las 6 ciudades analizadas.

Para construir la base de datos del CUS o cambio de cobertura y uso de suelo (LULC, por sus siglas en inglés) se empleó la serie VI de INEGI (INEGI, 2015) homologada al esquema de clasificación USGS (United States Geological Survey). Para más información, se puede consultar a: Rivera Martínez (2018), López Espinoza (2020) y Aquino Martínez (2021). La

serie VI del INEGI abarca un periodo de elaboración de 2015-2017 con datos de campo de 2015 y el año 2014 como referencia de la información, los datos utilizados son de LANDSAT 8 con una resolución espacial de 30 m y 15 capas de uso de suelo y vegetación a una escala de 1:250,000 (INEGI, 2016 y 2017) El esquema de clasificación USGS está descrito mediante 24 clases y la mancha urbana está representada como “Urban and Built-up Land” o categoría 1. Una vez realizada la homologación (Figura 16b) mediante el software de geoprocésamiento espacial ARCGIS se crearon los archivos binarios que emplea el modelo WRF. Para el caso de los polígonos de 1996 y 2036, a la información de LULC de la serie VI se le superpone la mancha urbana estimada a 1996 y proyectada a 2036. Estas condiciones de mancha urbana, de 1996 y 2036, se realizaron de acuerdo a los polígonos definidos anteriormente (Figura 15).

En particular en el caso del experimento de 1996, al eliminar la información urbana actual y superponer la de 1996, no se cubrieron totalmente todas las áreas urbanizadas, por lo que fue necesario introducir información complementaria de mapas de LULC antiguos y representativos de la época. Para ello se introdujo, sólo en esas áreas, información de la serie II de INEGI. El resultado final se puede observar en la Figura 16a. Por otro lado, para el caso del experimento de 2036 únicamente se superpuso la mancha urbana proyectada sobre la información de LULC actualizada (Figura 16c).

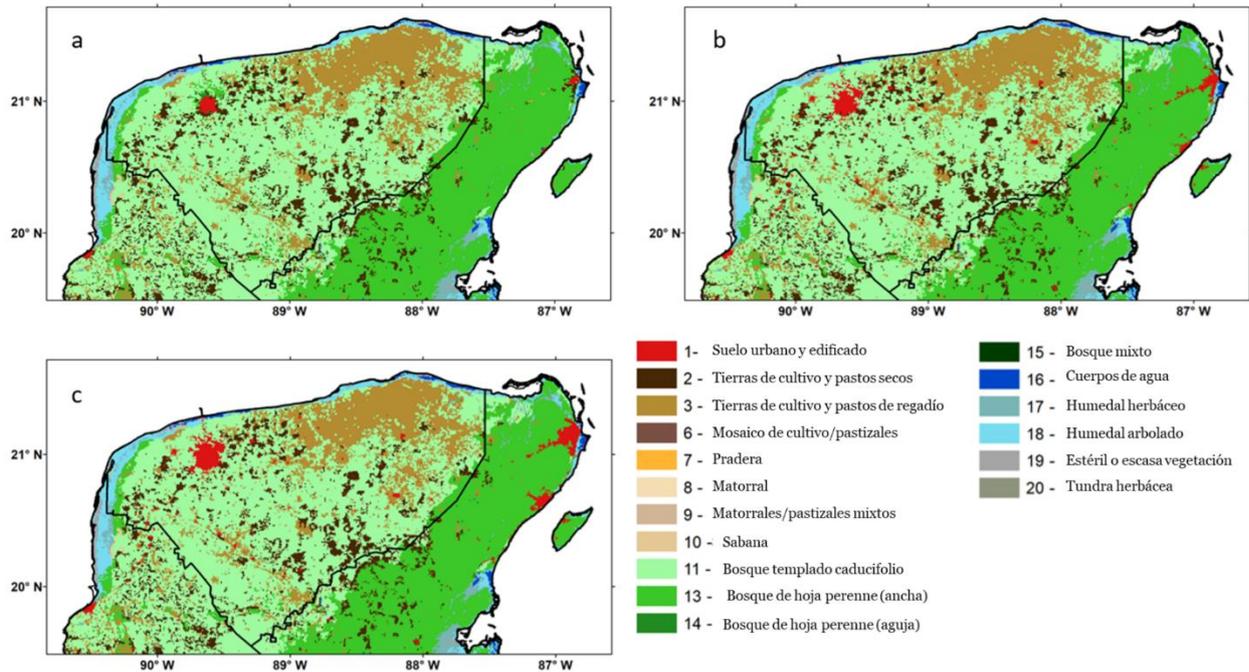


Figura 16. LULC empleado en las modelaciones numéricas. a) mancha urbana 1996, b) con condiciones actuales de mancha urbana (serie VI homologada) (2016), y c) mancha urbana proyectada a 2036.

### 3.3 CONFIGURACIÓN DEL MODELO

Para los experimentos numéricos de este estudio, se utilizó la configuración predeterminada del pronóstico operativo del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM. Las simulaciones numéricas que se realizaron para los análisis en este trabajo son producto de la versión 3.6.1 del modelo WRF del núcleo ARW.

#### **Dominios**

La simulación consta de 3 dominios. Estos dominios computacionales son mallas rectangulares anidadas con distintas resoluciones espaciales, donde el dominio más grande abarca desde los 101°W a los 70°W y de los 50°N a los 35°N. Este dominio (D<sub>1</sub>) tiene una resolución espacial de 33 km e incluye el GoM, el MCb y parte del Pacífico tropical. El segundo dominio (D<sub>2</sub>) tiene una resolución espacial de 11 km e incluye el sur del GoM, parte del Banco de Campeche y el Canal de Yucatán. Y el tercer dominio (D<sub>3</sub>), es el dominio de mayor resolución espacial, 3 km de resolución, y abarca la península de Yucatán (Figura 17). Se definieron treinta niveles verticales con una distribución logarítmica normal, donde el último nivel de la atmósfera está fijo a 50 hPa.

## WPS Domain Configuration



Figura 17. Dominios utilizados para realizar las simulaciones en el modelo. El D<sub>1</sub> es el recuadro negro (toda la imagen), el D<sub>2</sub> el recuadro blanco, y el D<sub>3</sub> se encuentra limitado por el recuadro rojo.

### Parametrización

Los esquemas de parametrización que resuelven la física del modelo en este trabajo se muestran en la Tabla 4. Éstos se establecieron de acuerdo a los esquemas de parametrización estándar para regiones tropicales (Tewari et al., 2004; Gunwani y Mohan, 2017; Fonseca et al., 2019).

Tabla 4. Configuración del modelo WRF.

| PARÁMETROS   | D <sub>1</sub>   | D <sub>2</sub> | D <sub>3</sub> | FUENTES  |
|--|--|----------------|----------------|--|
| Microfísica Atmosférica                                      | Esquema WRF Single-Moment 3-class                        |                |                | Hong et al. (2004)   |
| Esquema de capa límite planetaria                            | Esquema de la Universidad Yonsei (YSU)                   |                |                | Hong et al. (2006)   |
| Modelo de Superficie Terrestre                               | Unified Noah Land Surface Model                          |                |                | Tewari et al. (2004)   |
| Superficie de la capa Física o Física de la capa superficial | MM5 similarity based on Monin-Obukhov and Carlson-Boland |                |                | Dyer y Hicks (1970); Webb (1970); Zhang y Anthes (1982); Beljaars (1995) |

|                             |                                       |                       |             |
|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-------------|
| Long wave radiation scheme  | Rapid Radiative Transfer Model Scheme | Taubman et al. (1997) |             |
| Short wave radiation scheme | Dudhia Scheme                         | Dudhia (1989)         |             |
| Cumulus Physics             | Kain-Fritsch Scheme                   | Explicit              | Kain (2004) |

### Condiciones iniciales y de frontera

Las condiciones iniciales y de frontera que se utilizaron son de la base de datos de reanálisis atmosférico global del ERA-Interim, del European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (Uppala et al., 2011). Estos datos tienen una resolución espacial de  $0.75^\circ \times 0.75^\circ$  y una resolución temporal de 6 horas (ECMWF, 2006) (Carvalho et al., 2014).

Las ecuaciones del modelo se integraron cada 180, 60 y 60 seg para los dominios D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> y D<sub>3</sub> respectivamente. Los pasos de tiempo utilizados para las simulaciones numéricas, fueron probados para cada dominio de acuerdo a la configuración del modelo que se definió para la zona de estudio. Se realizó una simulación de control actualizando el mapa base de cambio de cobertura y uso del suelo considerando información del año 2016. Posteriormente, se cambiaron los mapas de LULC para 1996 y para el escenario de proyección 2036. Las condiciones iniciales y de frontera que se utilizaron para las tres simulaciones numéricas, 1996, 2016 y 2036, fueron las del año 2016, ya que el objetivo de este estudio era identificar los cambios en algunas variables atmosféricas asociadas al LULC. Por lo anterior, cabe señalar que el uso de los forzamientos del año 2016 en todos los casos, elimina la variabilidad por eventos específicos de cada año en particular o cualquier variación interanual, incluyendo si éstos fuesen forzamientos de proyección climática. Las salidas del modelo tienen una resolución temporal de 3 hrs para el D<sub>1</sub> y D<sub>2</sub>, y de 1 hora para el D<sub>3</sub>. Los datos que se analizan en este trabajo corresponden a los del D<sub>3</sub>. Cabe mencionar que la simulación numérica para cada escenario fue de un año.

### Mapas de uso de suelo

El modelo WRF tiene a disposición información de cobertura vegetal y uso de suelo (LULC) a nivel global, la cual comúnmente es empleada para realizar las simulaciones numéricas (USGS y MODIS). Sin embargo, ésta no es representativa de las condiciones actuales de LULC en el área de estudio y particularmente para la mancha urbana, a una escala local. En

la Figura 18 se observa en color rojo la poca representatividad del área urbana sobre las localidades de estudio. Ésto resulta importante debido a que el modelado atmosférico requiere de una representación precisa de LULC para poder estimar correctamente la circulación atmosférica, así como los flujos de energía y de agua (López Espinoza, 2020; Aquino Martínez, 2021).

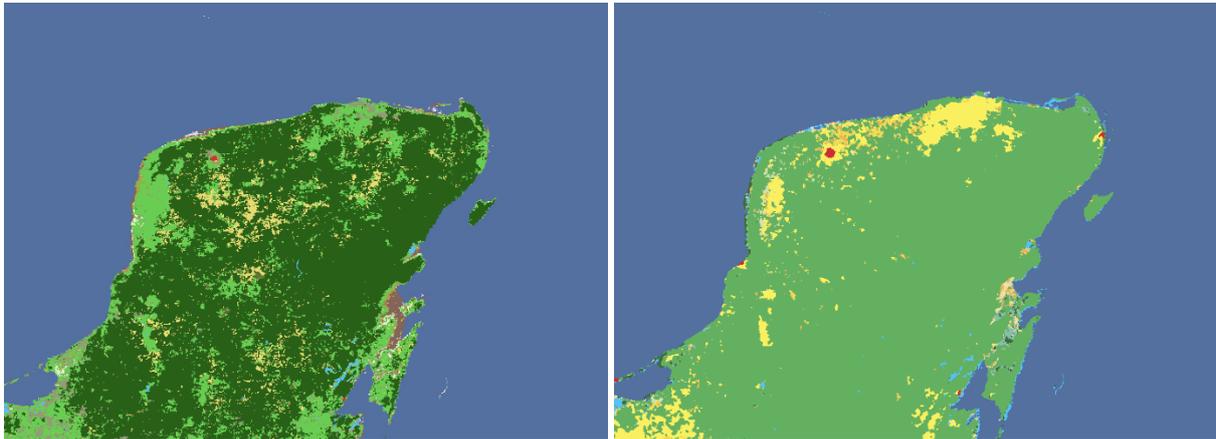


Figura 18. Comparación entre los diferentes LULC (CUS) que tiene a disposición el modelo WRF. a) USGS y b) MODIS. El color rojo presenta la mancha urbana.

Una vez creados los archivos binarios con el software ARCGIS se realizaron las simulaciones numéricas incluyendo esta información dentro del programa geogrid.exe. La información final de LULC empleada en geogrid.exe, para cada experimento, se puede observar en la Figura 16 (sección 3.2.3).

#### 3.4 VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación del modelo WRF se realizó con los datos disponibles de las EMAs y de las ESIME ubicadas en Campeche, Mérida, Progreso y Cancún. Para obtener las series temporales del modelo se identificó el punto de malla más cercano a la ubicación de cada una de las estaciones meteorológicas en el dominio D<sub>3</sub> y se extrajo el periodo de tiempo equivalente a los datos medidos válidos y disponibles. La simulación que se utilizó para la validación del modelo fue la simulación de control del año 2016. Las variables que se consideraron fueron: las componentes  $u$  y  $v$  de la velocidad del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ), la dirección del viento ( $^{\circ}$ ) y la temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ). Posteriormente se hizo una evaluación estadística y una comparación de la variabilidad diurna en cada localidad. Las herramientas estadísticas utilizadas se describen en la sección 2.6 y 2.7.

## Evaluación del modelo

### Estadística

Los resultados de la evaluación estadística (Tabla 5), muestran en general que para la magnitud del viento (MV) de todas las ubicaciones el coeficiente de correlación ( $r$ ) fue menor a 0,5, sin embargo, la simulación numérica si representa su variabilidad temporal. En promedio los datos simulados tienen un error cuadrático medio (RMSE) de  $2.154 \text{ ms}^{-1}$  y una desviación estándar (SD) de  $1.444 \text{ ms}^{-1}$ . En el caso de los datos observados, el RMSE fue de  $1.065 \text{ ms}^{-1}$ , con un sesgo (BIAS) positivo únicamente en la estación 2 (correspondiente a Mérida), lo que indica una subestimación de los datos simulados. Respecto a la dirección del viento (DV), para las ubicaciones de Mérida, Progreso y Cancún el coeficiente de correlación circular (CCC) obtenido fue mayor a 0,5, en promedio los datos simulados tienen una desviación estándar circular (CSD) de  $0.814^\circ$  y los datos observados es de  $1.096^\circ$ .

Respecto a la Temperatura (TE), en todas las ubicaciones el  $r$  fue mayor a 0,5, en promedio para los datos simulados se obtuvo un RMSE de  $4.4^\circ\text{C}$  y una SD de  $2.7^\circ\text{C}$ , mientras que para los datos observados se obtuvo un RMSE de  $3.86^\circ\text{C}$  y un BIAS positivo en todos los sitios de estudio, lo anterior indica una subestimación de la temperatura en los datos simulados. En relación a la presión atmosférica (PR) en todas las ubicaciones el  $r$  fue mayor a 0,8, en promedio los datos simulados tienen un RMSE de  $1004.91 \text{ mbar}$  y una SD promedio de  $2.723 \text{ mbar}$ , mientras que en los datos observados se obtuvo un RMSE de  $0.038 \text{ mbar}$ , y un BIAS negativo en todas las ubicaciones, lo que sugiere una sobreestimación de los datos simulados.

Cabe resaltar que el coeficiente de correlación entre los datos observados y los simulados es mayor para las variables de TE y PR, específicamente en las estaciones 1, 2 y 4 para la variable TE (correspondiente a Campeche, Mérida y Cancún, respectivamente), y en todas las estaciones para la PR. Aunque las correlaciones de MV y DV no son altas, estas superan el 50% en las estaciones 2, 3 y 4 (correspondiente a Mérida, Progreso y Cancún) para la DV, y el 40% en las estaciones 1,2 y 3 (correspondiente a Campeche, Mérida y Progreso) para la MV. En general, se puede decir que los datos simulados representan satisfactoriamente la variabilidad de la magnitud del viento y la temperatura para la región.

Tabla 5. Validación estadística del Modelo WRF. Estadísticos: Error Cuadrático Medio (RMSE), Sesgo (BIAS), Desviación Estándar (SD) y Coeficiente de Correlación lineal (r) para las variables: magnitud del viento (MV), temperatura del aire (TE) y presión atmosférica (PR); y la Desviación Estándar Circular (CSD) y Coeficiente de Correlación Circular (CCC) para la variable dirección del viento (DV). ND: No hay datos.

| Est. Met.      | Nombre       |                     | CAMPECHE | MERIDA   | PROGRESO | CANCUN   | VAR.     |       |
|----------------|--------------|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
|                | No. Estación |                     | 1        | 2        | 3        | 4        |          |       |
| D <sub>3</sub> | RMSE         | (ms <sup>-1</sup> ) | 1.423    | 1.258    | 2.807    | ND       | MV       |       |
|                | BIAS         | (ms <sup>-1</sup> ) | -0.778   | 0.208    | -1.949   | ND       |          |       |
|                | SD           | (ms <sup>-1</sup> ) | S        | 1.195    | 1.247    | 1.996    |          | 1.339 |
|                |              |                     | O        | 1.107    | 1.170    | 1.773    |          | ND    |
|                | r            | (ms <sup>-1</sup> ) | S vs O   | 0.467    | 0.474    | 0.431    | ND       |       |
|                | CSD          | (°)                 | S        | 0.859    | 0.809    | 0.703    | 0.884    | DV    |
|                |              |                     | O        | 1.324    | 1.204    | 0.920    | 0.936    |       |
|                | CCC          | (°)                 | S vs O   | 0.479    | 0.522    | 0.599    | 0.647    |       |
|                | RMSE         | (°C)                |          | 4.433    | 3.483    | ND       | 2.380    | TE    |
|                | BIAS         | (°C)                |          | 3.722    | 2.181    | ND       | 1.423    |       |
|                | SD           | (°C)                | S        | 3.323    | 3.688    | 1.277    | 2.532    |       |
|                |              |                     | O        | 3.487    | 4.894    | ND       | 3.547    |       |
|                | r            | (°C)                | S vs O   | 0.751    | 0.836    | ND       | 0.855    |       |
|                | RMSE         | (hPa / mbar)        |          | 1003.61  | 1004.62  | 1006.17  | 1005.26  | PR    |
|                | BIAS         | (hPa / mbar)        |          | -1003.60 | -1004.62 | -1006.17 | -1005.26 |       |
|                | SD           | (hPa / mbar)        | S        | 2.94     | 2.82     | 2.82     | 2.31     |       |
| O              |              |                     | 0.04     | 0.04     | 0.04     | 0.03     |          |       |
| r              | (mbar)       | S vs O              | 0.92     | 0.92     | 0.91     | 0.88     |          |       |

En las Figuras 19 – 22 se muestran las variables simuladas y medidas de cada ubicación. En cada una de estas figuras se muestra su concordancia entre los datos simulados y los datos observados. En algunas gráficas se muestran huecos por la falta de datos medidos de las estaciones meteorológicas o mediciones incorrectas de alguna de las variables, lo cual podría indicar una falla en los sensores. Cabe señalar que las mediciones incorrectas no se consideraron para la validación, ya que el control de calidad de los datos medidos se hizo por variable.

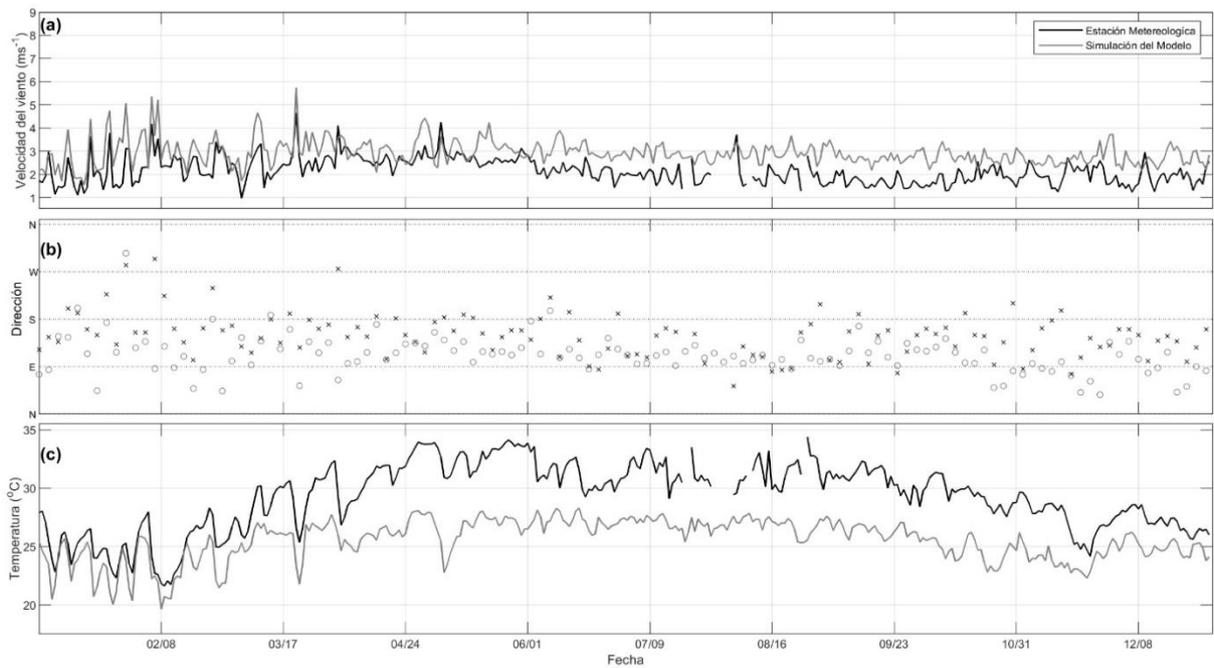


Figura 19. Serie de tiempo simulada (línea gris) y observada (línea negra) de 2016 para la ubicación de Campeche. (a) es la magnitud de la velocidad del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ) a 10 m, (b) la dirección del viento ( $^{\circ}$ ) y (c) la temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) a 2m. Las gráficas muestran los datos cada 24 hrs.

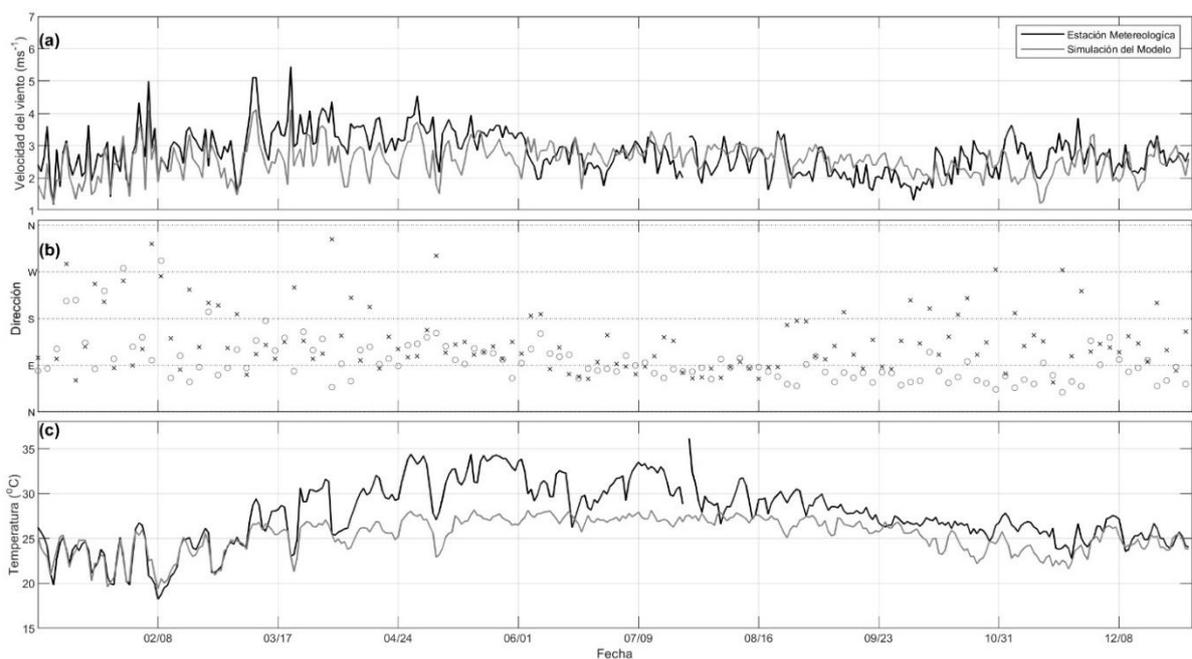


Figura 20. Serie de tiempo simulada (línea gris) y observada (línea negra) de 2016 para la ubicación de Mérida. (a) es la magnitud de la velocidad del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ) a 10 m, (b) la dirección del viento ( $^{\circ}$ ) y (c) la temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) a 2m. Las gráficas muestran los datos cada 24 hrs.

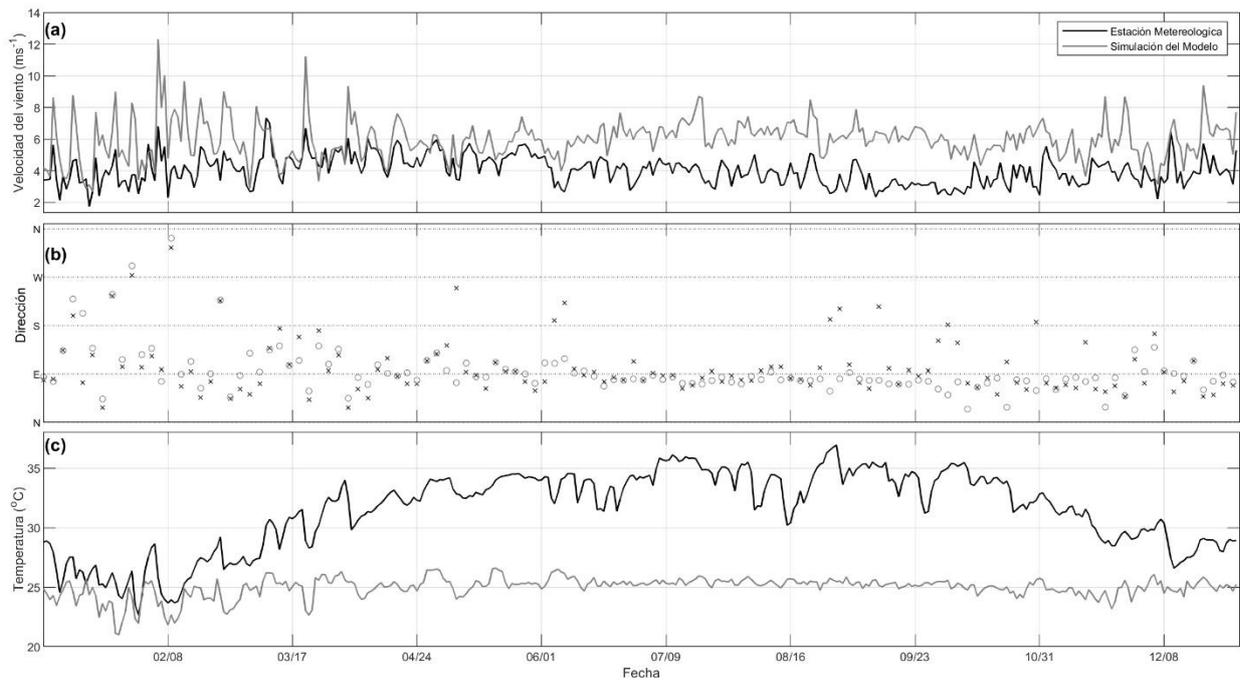


Figura 21. Serie de tiempo simulada (línea gris) y observada (línea negra) de 2016 para la ubicación de Progreso. (a) es la magnitud de la velocidad del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ) a 10 m, (b) la dirección del viento ( $^{\circ}$ ) y (c) la temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) a 2m. Las gráficas muestran los datos cada 24 hrs.

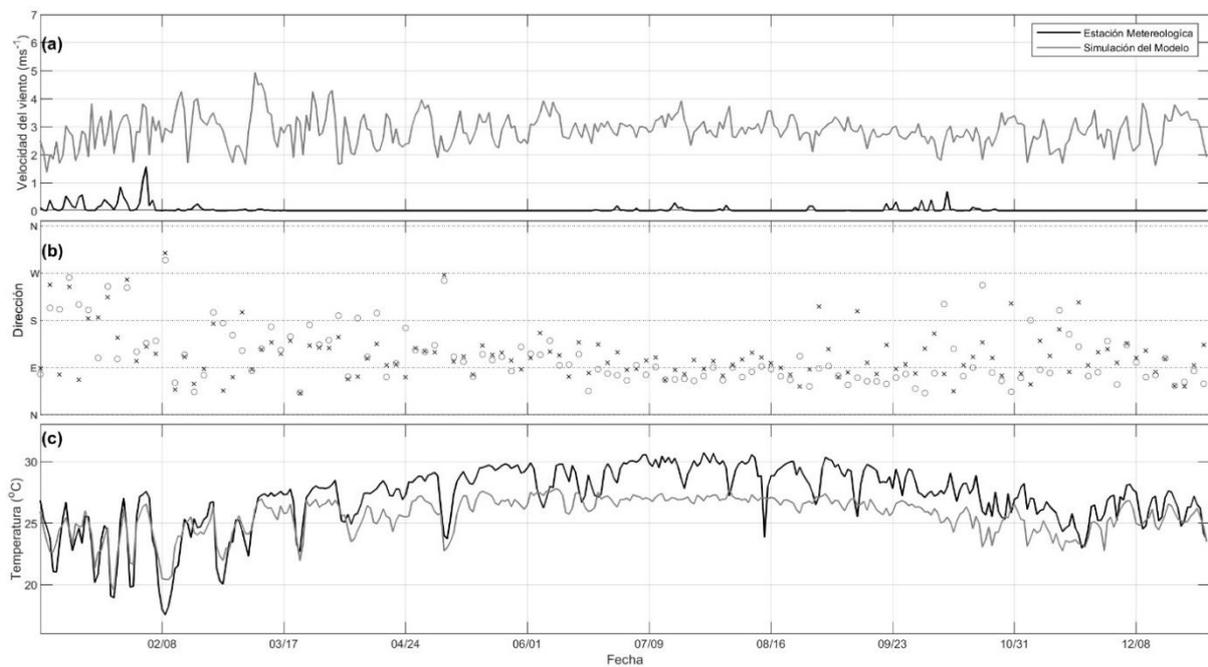


Figura 22. Serie de tiempo simulada (línea gris) y observada (línea negra) de 2016 para la ubicación de Cancún. (a) es la magnitud de la velocidad del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ) a 10 m, (b) la dirección del viento ( $^{\circ}$ ) y (c) la temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) a 2m. Las gráficas muestran los datos cada 24 hrs.

## Componente diurna

Respecto a la variabilidad diurna, las estaciones 1-3 presentan un giro anticiclónico, es decir, en sentido horario. En este caso, un giro anticiclónico de la elipse, es explicado por el efecto de Coriolis<sup>5</sup> sobre los vientos que generan la brisa, lo que está asociado a la latitud a la cual se encuentra cada localidad. Mientras, un giro ciclónico como se presenta en la estación 4, puede ser explicado por procesos no lineales que tienen lugar en la zona donde se produce la brisa marina (Taylor Espinosa, 2009) (Figuras 23-25; Tabla 6) o por el efecto de la dinámica atmosférica de mayor escala espacial.

Tabla 6. Parámetros característicos obtenidos del ajuste de las elipses y la varianza explicada de la señal diurna para cada componente del viento ( $u_s$ ,  $v_s$ ) en 1) Campeche, 2) Mérida, 3) Progreso, 4) Cancún. El giro de la elipse indica la dirección de rotación del viento (Ciclónico (C) y Anticiclónico (A)); ( $\theta$ ) representa el ángulo mínimo formado entre el semieje mayor y el Este; SEMa y SEMe son la magnitud del semi eje mayor y menor respectivamente; (Ex) la excentricidad; ( $t_{max}$ ) la hora del día cuando se presenta la máxima amplitud (cuando el viento se encuentra alineado con el SEMa); S y O indican los datos simulados y observados respectivamente. ND: No hay datos.

| Est. | $\theta$ (°) |        | Dir    | Ex   |      | Giro |    | $t_{max}$<br>(hrs) | SEMa<br>(ms <sup>-1</sup> ) |      | SEMe<br>(ms <sup>-1</sup> ) |      | Varianza |       |       |       |
|------|--------------|--------|--------|------|------|------|----|--------------------|-----------------------------|------|-----------------------------|------|----------|-------|-------|-------|
|      | S            | O      |        | S    | O    | S    | O  |                    | S                           | O    | S                           | O    | S        |       | O     |       |
|      |              |        |        |      |      |      |    |                    |                             |      |                             |      | $u_s$    | $v_s$ | $u_s$ | $v_s$ |
| 1    | 126.83       | 142.57 | NW, SE | 0.96 | 0.98 | C    | A  | 1.13; 11.22        | 0.72                        | 1.07 | 0.20                        | 0.19 | 0.80     | 0.68  | 0.45  | 0.58  |
| 2    | -34.87       | 143.76 | NW, SE | 0.91 | 0.98 | C    | A  | 4.16; 0.12         | 0.72                        | 0.80 | 0.29                        | 0.17 | 0.81     | 0.53  | 0.60  | 0.64  |
| 3    | 70.15        | 72.32  | NE, SW | 0.86 | 0.99 | A    | A  | 0.10; 11.22        | 1.59                        | 1.83 | 0.80                        | 0.23 | 0.95     | 0.89  | 0.90  | 0.70  |
| 4    | -0.66        | ND     | W, E   | 1    | ND   | C    | ND | 7.20; 4.16         | 1.15                        | ND   | 0.03                        | ND   | 0.83     | 0.84  | ND    | ND    |

5. Efecto producido por la rotación de la tierra. Es un movimiento inercial que desvía a los cuerpos en movimiento hacia la derecha (movimiento anticiclónico) en el Hemisferio Norte, y en el Hemisferio Sur son hacia la izquierda (Giro ciclónico).

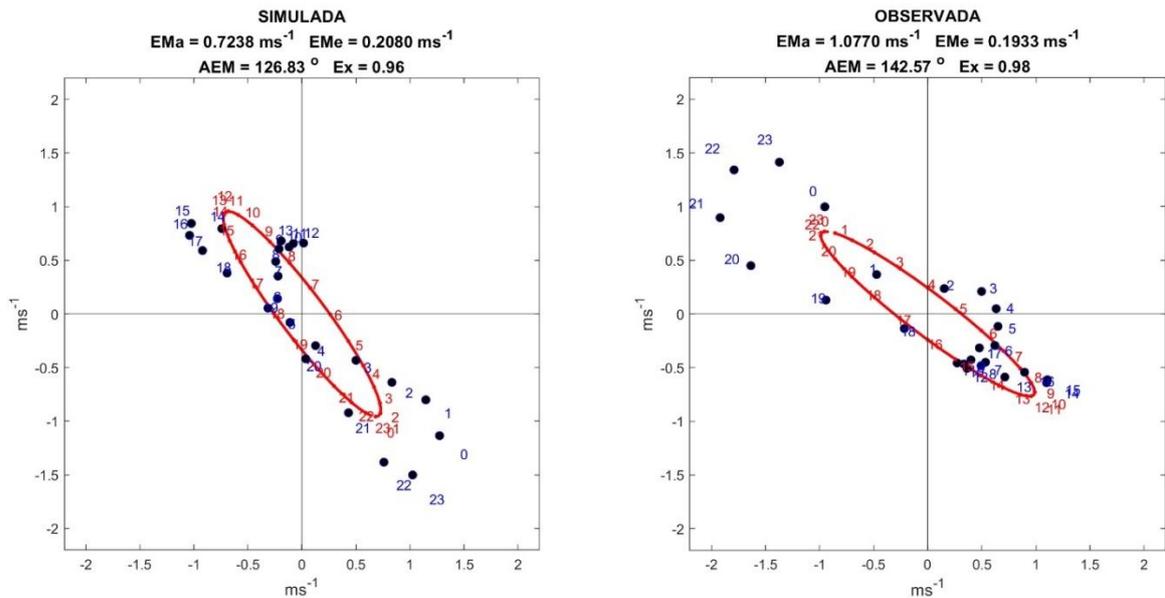


Figura 23. Variación diurna y elipses ajustadas en la localidad de Campeche para 2016. La línea roja es la elipse calculada por el método SVD y los puntos negros son los promedios horarios. Los parámetros característicos de las elipses se muestran en la parte superior de cada panel: la magnitud de los semi-ejes mayor (EMa) y menor (EMe), y el ángulo mínimo entre el semi-eje mayor y la dirección este (AEM). La columna de la izquierda corresponde a los datos simulados y la columna derecha a los datos observados.

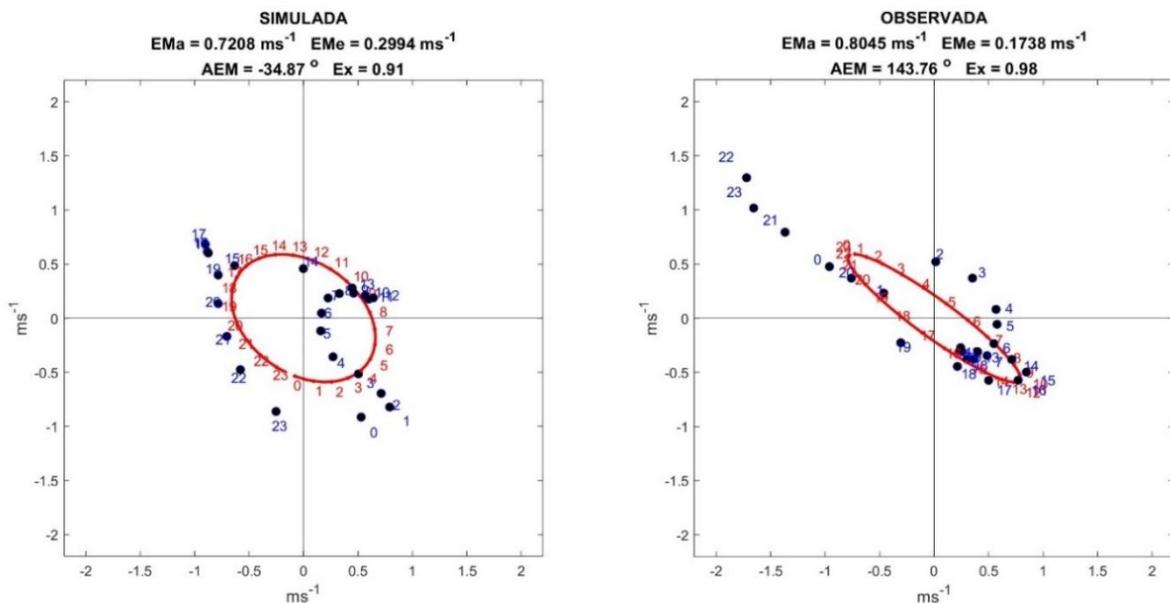


Figura 24. Variación diurna y elipses ajustadas en la localidad de Mérida para 2016. La línea roja es la elipse calculada por el método SVD y los puntos negros son los promedios horarios. Los parámetros característicos de las elipses se muestran en la parte superior de cada panel: la magnitud de los semi-ejes mayor (EMa) y menor (EMe), y el ángulo mínimo entre el semi-eje mayor y la dirección este (AEM). La columna de la izquierda corresponde a los datos simulados y la columna derecha a los datos

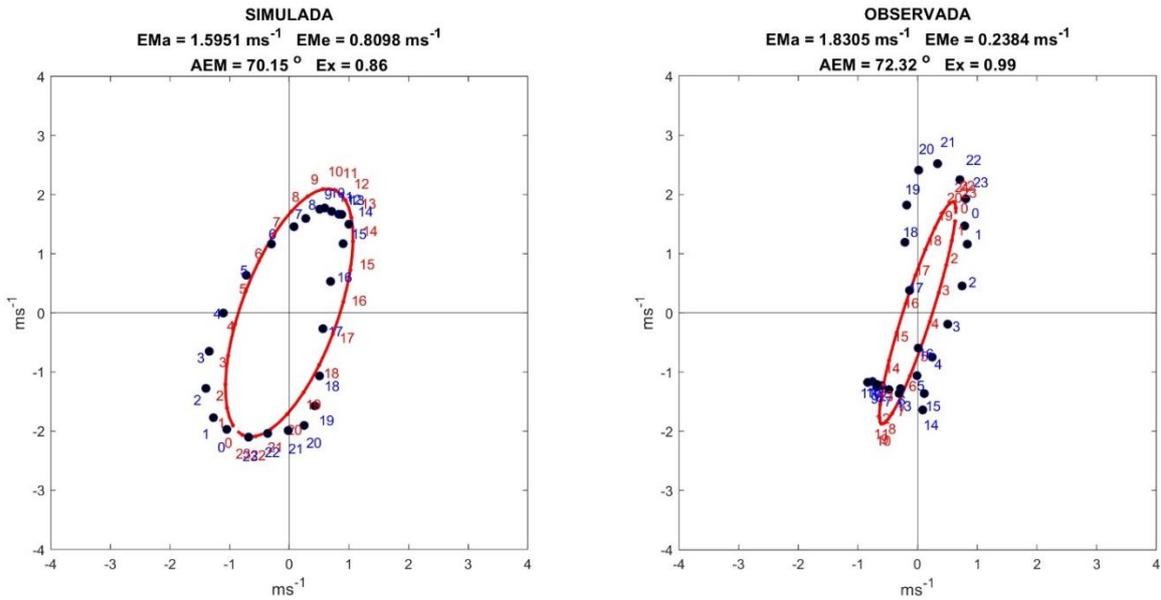


Figura 25. Variación diurna y elipses ajustadas en la localidad de Progreso para 2016. La línea roja es la elipse calculada por el método SVD y los puntos negros son los promedios horarios. Los parámetros característicos de las elipses se muestran en la parte superior de cada panel: la magnitud de los semi-ejes mayor (EMa) y menor (EMe), y el ángulo mínimo entre el semi-eje mayor y la dirección este (AEM). La columna de la izquierda corresponde a los datos simulados y la columna derecha a los datos

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se presentan los resultados del análisis de los datos obtenidos con las simulaciones numéricas del WRF para los años 1996, 2016 y 2036. Se presentan los resultados de manera general en la PY, y de manera específica en cada sitio de estudio. Para analizar cómo es que el CUS modifica la dinámica atmosférica mediante la formación de la isla de calor y la obstaculización del viento que altera la circulación local, se estudió la variabilidad temporal de 5 variables atmosféricas, así como la variabilidad espacial de la temperatura del aire y la magnitud del viento.

Los resultados obtenidos que no se incluyeron en esta sección pero que se utilizaron para las discusiones, se pueden consultar en la sección de Anexos.

### 4.1 PENÍNSULA DE YUCATÁN

Resultados de la evaluación regional de la temperatura del aire y la magnitud del viento.

#### **Temperatura**

En la Figura 26 se observan los promedios anuales de la temperatura del aire para cada año de estudio (1996, 2016 y 2036), en ella se observa que la PY, en los tres años analizados, presenta temperaturas medias anuales superiores a 24 °C en la mayor parte de su territorio. Esta temperatura media anual es mayor sobre la superficie del mar (más de 1 °C) y a lo largo de la zona costera, la cual disminuye hacia el interior de la península (< 24 °C). En este sentido, la temperatura media anual del aire en la PY se ve fuertemente influenciada por las corrientes marítimas cálidas, ya que éstas son capaces de almacenar una gran cantidad de calor, principalmente en los meses de verano, además de contribuir en las variaciones de temperatura dentro del territorio (PNUD México-INECC, 2016), debido a las diferencias térmicas entre ambas superficies.

Analizando las diferencias entre los tres años, se observa un aumento de la temperatura del aire en una zona puntual al noreste de la península y sobre la costa noreste desde 1996 (Figura 27a) a 2036 (Figura 27c). Esta diferencia de temperatura muestra el crecimiento de la mancha urbana asociado a las ciudades de Mérida, Cancún y Playa del Carmen. Lo anterior sugiere la presencia del fenómeno denominado “isla de calor”. La isla de calor es

una característica evidente del microclima urbano, la cual se observó de manera evidente en las ciudades en donde el CUS fue mayor.

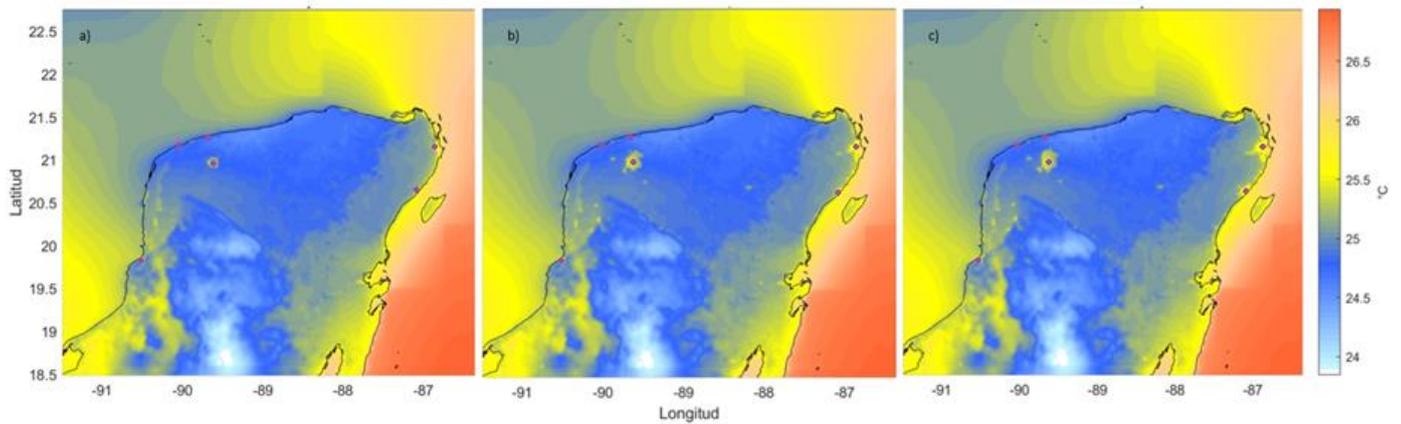


Figura 26. Promedios anuales de la temperatura del aire en la PY para: a) 1996, b) 2016, y c) 2036. Los asteriscos morados muestran la ubicación de las localidades de estudio. Los mapas se muestran individualmente en el Anexo 3.

Como se mencionó en la sección 3.3.3, esta región se caracteriza por tener una estacionalidad atmosférica bien definida, por lo que se obtuvieron las diferencias estacionales de la temperatura del aire entre los tres años de estudio. Las diferencias de los promedios estacionales (Figura 27) muestran cambios significativos entre los años de 1996 a 2016 y entre 1996 a 2036, principalmente durante los meses de primavera y verano en zonas específicas y para los meses de otoño en la región de la PY. Cabe señalar que las diferencias de temperatura que ocurren en zonas específicas coinciden con la temporada de secas (primavera) y la de lluvias (verano). Estas zonas específicas en donde la diferencia de temperatura a lo largo del tiempo es significativa, coinciden con las ubicaciones de estudio. Estas diferencias de acuerdo al CUS propuesto, podrían llegar a ser hasta  $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante el verano desde 1996 hasta 2036, en particular para las ciudades de Mérida y Cancún. Por otra parte, se puede observar que la diferencia de temperatura del aire por el CUS entre 1996 y 2016 supera los  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sin embargo, de acuerdo al escenario de CUS para 2036 estas diferencias serán de  $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  del 2016 al 2036, y la máxima diferencia de temperatura se observaría en la periferia de las ciudades de Mérida, Cancún y Playa del Carmen.

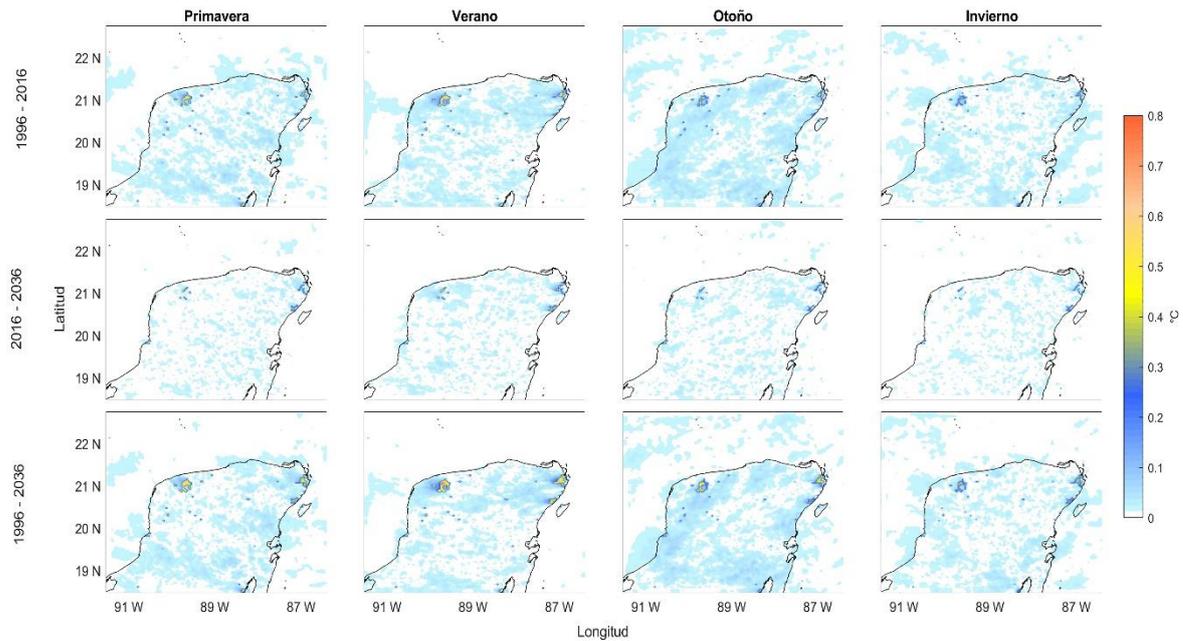


Figura 27. Diferencias de los promedios estacionales de la temperatura del aire en la PY: 1996-2016, 2016-2036 y 1996-2036.

## Magnitud del Viento

En relación a los resultados obtenidos de los promedios anuales para la magnitud del viento (Figura 28), se observa una diferencia significativa entre la superficie de la península y el océano, con una región de transición a lo largo del litoral que rodea la PY. Sobre el océano, se observaron velocidades mayores a  $6 \text{ ms}^{-1}$ , mientras que sobre el territorio de la PY se observaron velocidades promedio de  $3 \text{ ms}^{-1}$ , lo que hace evidente el efecto de la fricción. Cabe señalar que al norte de la península se identifica una región que va desde la costa hacia tierra adentro, donde las velocidades oscilan alrededor de los  $4 \text{ ms}^{-1}$ , esto puede deberse a que en esa zona se identifica una gran extensión de territorio deforestado. Esta zona está ubicada entre las comunidades de Tizimin e Izamal, pertenecientes al estado de Yucatán y se reporta que el aumento en el CUS se debe principalmente al crecimiento de la actividad ganadera (Ellis et al., 2017). Respecto a la zona de transición, se observa que es más ancha en la costa oeste que en la costa este de la PY, con velocidades entre  $5$  y  $5.5 \text{ ms}^{-1}$ , lo cual coincide con las velocidades y amplitudes promedio de las brisas de esta región (Reyes Aquino, 2013).

Entre los años de estudio, no se observan diferencias significativas, sin embargo, las diferencias de los promedios estacionales de la magnitud del viento (Figura 29), las zonas de la ciudad de Mérida y de Cancún entre los años de 1996 a 2016 y de 1996 a 2036, muestran un cambio de la magnitud del viento mayor a  $0.5 \text{ ms}^{-1}$ . También se pueden observar algunos puntos específicos que sugieren un cambio en la fricción, asociado a un CUS. Uno de los puntos específicos más importantes es el que se observa en el periodo de 2016 a 2036, ya que corresponde a la localidad de Progreso y de acuerdo al crecimiento económico de la región es el Puerto de Altura de Progreso que resulta de gran relevancia socioeconómica a nivel regional ocasionado un acelerado crecimiento poblacional y urbano (Chiappa Carrara & Guadarrama Chávez, 2013; García Benítez, Adame Martínez & Álvaro Granados, 2017). Al igual que la temperatura, el cambio en la magnitud del viento se presenta en los meses de primavera en zonas específicas y al sureste sobre el MCB, y en el otoño al noreste del dominio sobre la superficie oceánica ya en el GoM.

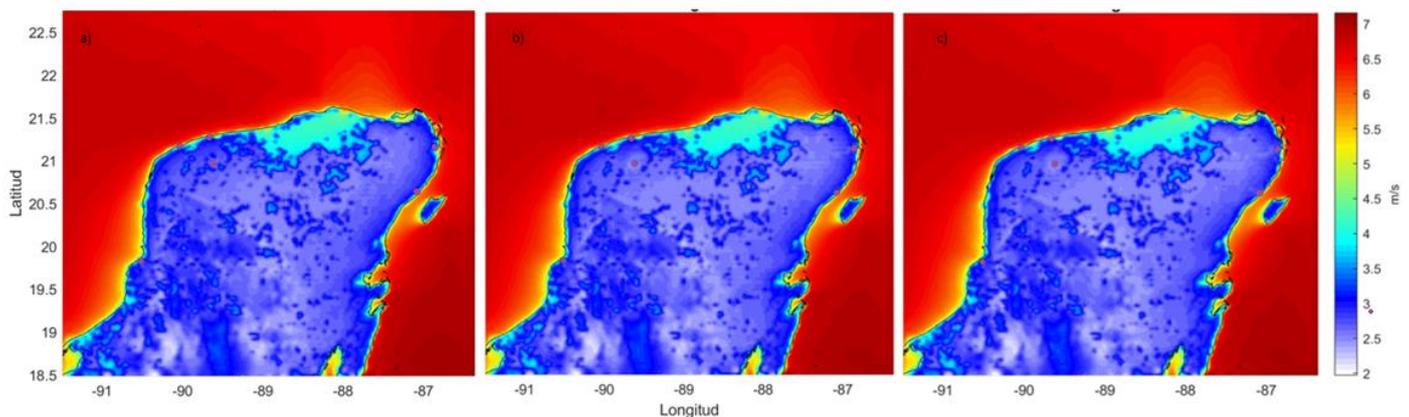


Figura 28. Promedios anuales de la magnitud del viento en la PY para: a) 1996, b) 2016, y c) 2036. Los asteriscos morados muestran la ubicación de las localidades de estudio. Los mapas se muestran individualmente en el Anexo 3.

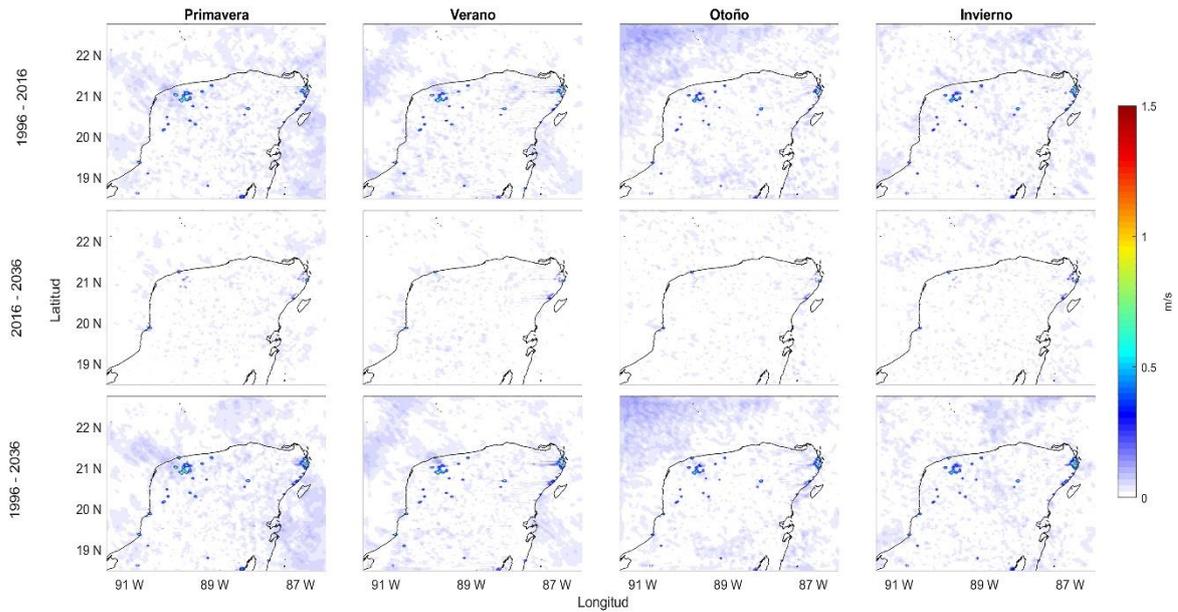


Figura 29. Diferencias de los promedios estacionales de la magnitud del viento en la PY: 1996-2016, 2016-2036, y 1996-2036.

De acuerdo a los resultados regionales que se observaron, el cambio de temperatura en zonas específicas por un CUS asociado al crecimiento urbano, es determinante en la dinámica de los vientos. Inicialmente se analizarán los sitios de menor impacto debido al CUS y posteriormente los de mayor impacto. En las localidades menos afectadas por el CUS (Sisal y Progreso), se describirán las condiciones atmosféricas promedio de la temperatura del aire, magnitud del viento y humedad dentro de los polígonos que delimitan el CUS para cada año de estudio. Por otra parte, para los sitios más afectados (Campeche, Playa del Carmen, Cancún y Mérida), además de las condiciones meteorológicas, se analizarán los promedios estacionales de la temperatura y la magnitud del viento, así como sus diferencias.

#### 4.1.1 SISAL

La localidad costera de Sisal es una comunidad que tienen como principal actividad económica la pesca desde 1885, y que con el establecimiento de la Reserva Estatal El Palmar en 1990, dio paso a que el CUS en la localidad sea mediante el Programa de Ordenamiento Costero del Estado de Yucatán y a otras políticas de conservación (Torales Ayala, 2019). Debido a que Sisal se ha conservado como una localidad de pequeña escala espacial hasta

hace 4 años que empezaron los desarrollos inmobiliarios, la variabilidad atmosférica se ha mantenido relativamente constante desde 1996.

### **Variables atmosféricas**

Considerando los valores promedio de cada una de las variables analizadas en la localidad se encontró que tanto para 1996 y 2016, como para la proyección de CUS a 2036, la variabilidad anual es similar (Figuras A-12 a A-15, en la sección de anexos). Se observó que la variabilidad del viento asociada a la llegada de los frentes fríos durante los meses de septiembre a mayo, alcanza las máximas velocidades de febrero a abril ( $> 8 \text{ ms}^{-1}$  en algunos casos, máxima de  $9 \text{ ms}^{-1}$ ), al igual que las mínimas temperaturas ( $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y los mínimos valores de humedad relativa ( $\sim 60\%$ ). Por otra parte, se observa el periodo más cálido, que va de junio a agosto, con temperaturas superiores a los  $26 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (máxima de  $27.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) con una humedad relativa mayor a  $95\%$  (máxima de  $96.5\%$ ), durante este periodo de tiempo la magnitud del viento disminuye, oscilando alrededor de los  $4 \text{ ms}^{-1}$  (Figura 30). La dirección predominante del viento a lo largo del año es del NE-SE, excepto con la llegada de los frentes fríos a la zona, que presenta una dirección del NO-N (Figura 31). Las diferencias entre 1996, 2016 y 2036 para este sitio de estudio, se observaron en la magnitud de los eventos más intensos que se presentan en la localidad para las tres variables, sin embargo, las diferencias no son significativas. En promedio, la velocidad del viento en Sisal es de  $3.8 \text{ ms}^{-1}$  y la temperatura del aire es de  $24.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . La variabilidad de la humedad relativa en esta localidad está altamente relacionada con las variaciones de la temperatura, ya que los máximos y mínimos ( $60.2\%$ ) de saturación se observan durante los mismos periodos de tiempo.

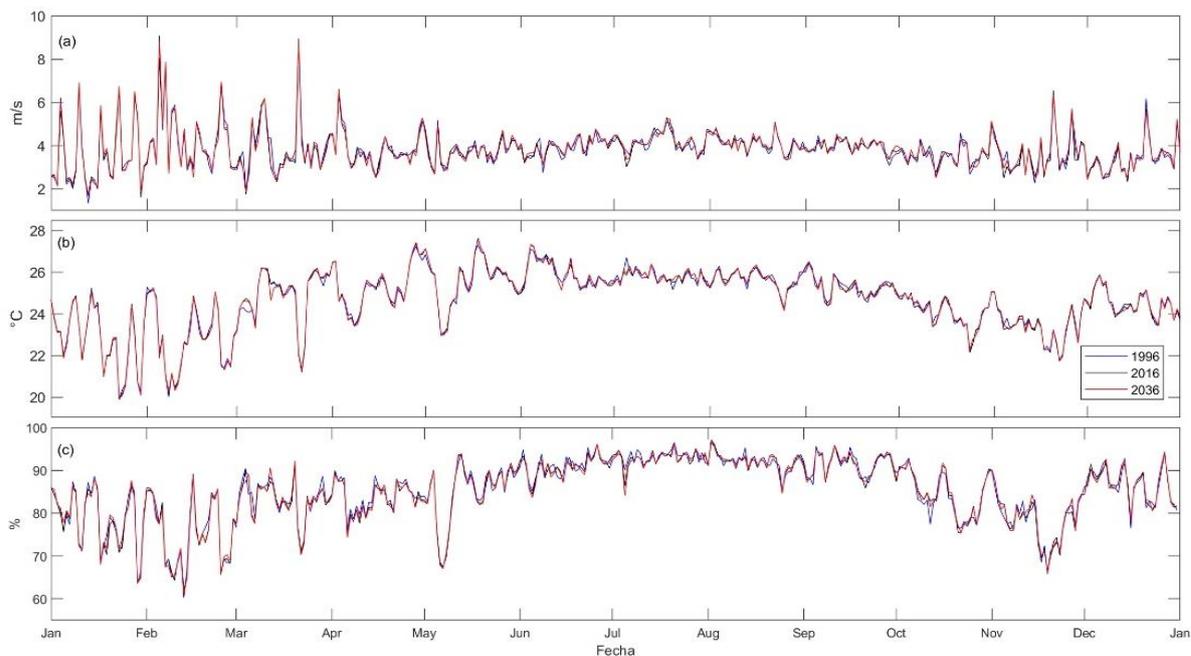


Figura 30. Variables atmosféricas en la localidad de Sisal, Yucatán. (a) Magnitud de la velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), (b) temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ) y (c) humedad relativa (%). Las series de tiempo muestran los datos cada 24 hrs, para 1996 (azul), 2016 (negro) y 2036 (rojo).

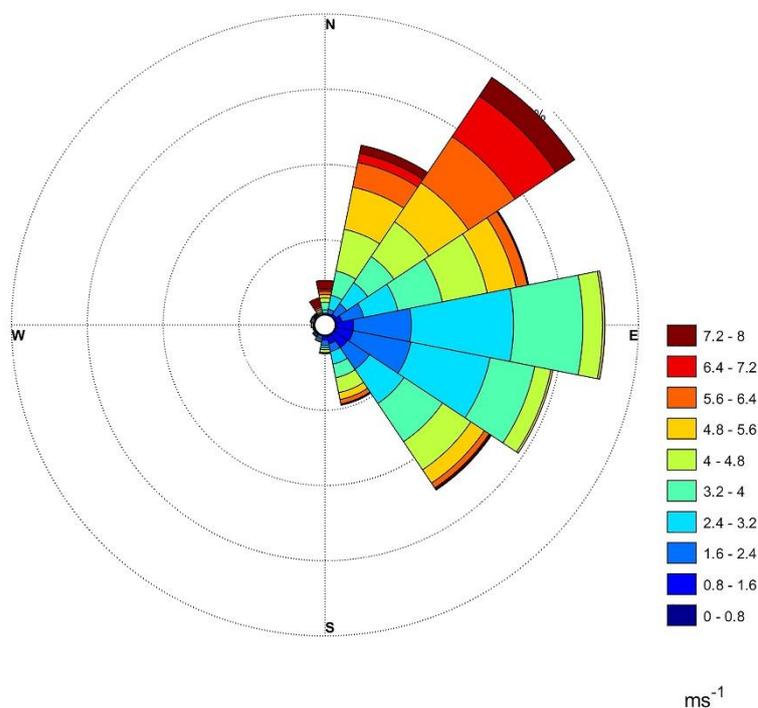


Figura 31. Rosa de vientos en la localidad de Sisal, Yucatán, para 2016. Los colores indican la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ), la orientación de los conos su dirección ( $^{\circ}$ ) y los círculos concéntricos el porcentaje de ocurrencia (%).

De 1996 a 2016 el crecimiento urbano en Sisal no fue significativo, ya que el desarrollo más importante durante este periodo de tiempo fue en 2004 con la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación (UMDI), sede foránea de la UNAM, y la construcción de caminos e infraestructura para el relleno del humedal (Chiappa Carrara & Guadarrama Chávez, 2013; Urrea Mariño, U. 2016). Por lo anterior, las condiciones atmosféricas no presentan diferencias importantes, respecto a lo observado en 1996. En cuanto al año 2036 al igual que en el año 2016 se observan pequeñas variaciones en las condiciones atmosféricas y principalmente en los eventos de mayor intensidad. En el caso de la temperatura del aire, el promedio anual fue de 24.6 °C en los tres años, la mínima temperatura disminuyó 0.1 °C para 2016 y en 2036 no cambió respecto a 1996. En los valores máximos de temperatura, se observó un aumento de 0.3 °C de 1996 a 2016 y de 0.2°C de 1996 a 2036. La humedad relativa se mantuvo por arriba del 80% de mayo a septiembre, para los tres años, sin embargo, del 2016 a 2036 el máximo disminuyó en 0.4% y el mínimo en 1.1%, lo que sugiere que hubo un cambio en los flujos de calor, asociado al CUS. Respecto a la magnitud y dirección del viento no se observaron diferencias significativas de 1996 a 2036.

#### 4.1.2 PROGRESO

La localidad de Progreso, es una comunidad costera, que gracias a su cercanía con la ciudad de Mérida, tiene una relevancia socioeconómica no sólo en el estado, sino a nivel regional, ya que, a partir de la construcción del puerto de abrigo en 1870 (Chiappa Carrara y Guadarrama Chávez, 2013), éste se ha utilizado por las embarcaciones de carga y turísticas que llegan a la región. Como consecuencia, Progreso ha tenido un crecimiento poblacional que ha provocado el agotamiento del espacio destinado para uso urbano, por lo que al igual que en la comunidad de Sisal se ha rellenado la Ciénaga para ganar terreno. Estas áreas son altamente susceptibles a la inundación durante eventos de Norte (Rey et al., 2020). Debido a lo anterior, se ha registrado un aumento significativo en la mancha urbana (García Benítez et al., 2017).

#### **Variables atmosféricas**

Con base en el promedio de cada una de las variables atmosféricas analizadas dentro del polígono de la localidad, se encontró que tanto para 1996 y 2016, como para el escenario

futuro de 2036 de CUS, la variabilidad anual es similar (Anexo 3, Figuras A-27 a A-33) (Figura 32). Se observó que la variabilidad del viento asociada a la temporada de frentes fríos, durante los meses de septiembre a mayo, alcanzó velocidades máximas de enero a mediados de marzo ( $> 7 \text{ ms}^{-1}$  en algunos casos, con una velocidad máxima de  $7.6 \text{ ms}^{-1}$ ), al igual que las mínimas temperaturas ( $20.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y los mínimos valores de humedad relativa ( $\sim 58\%$ , a excepción de un mínimo presentado en el mes de mayo). Por otra parte, se observa el periodo más cálido en Progreso que va de los meses de abril a agosto, con temperaturas superiores a los  $26 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (máxima de  $27.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) con una humedad relativa mayor a  $80\%$  (máxima de  $95.9\%$ ). Durante este periodo de tiempo la magnitud del viento disminuye, oscilando entre los  $3$  y  $4 \text{ ms}^{-1}$ . La dirección predominante del viento a lo largo del año es NE-SE, excepto con la llegada de los frentes fríos a la zona, que presenta una dirección del NO-N (Figura 33).

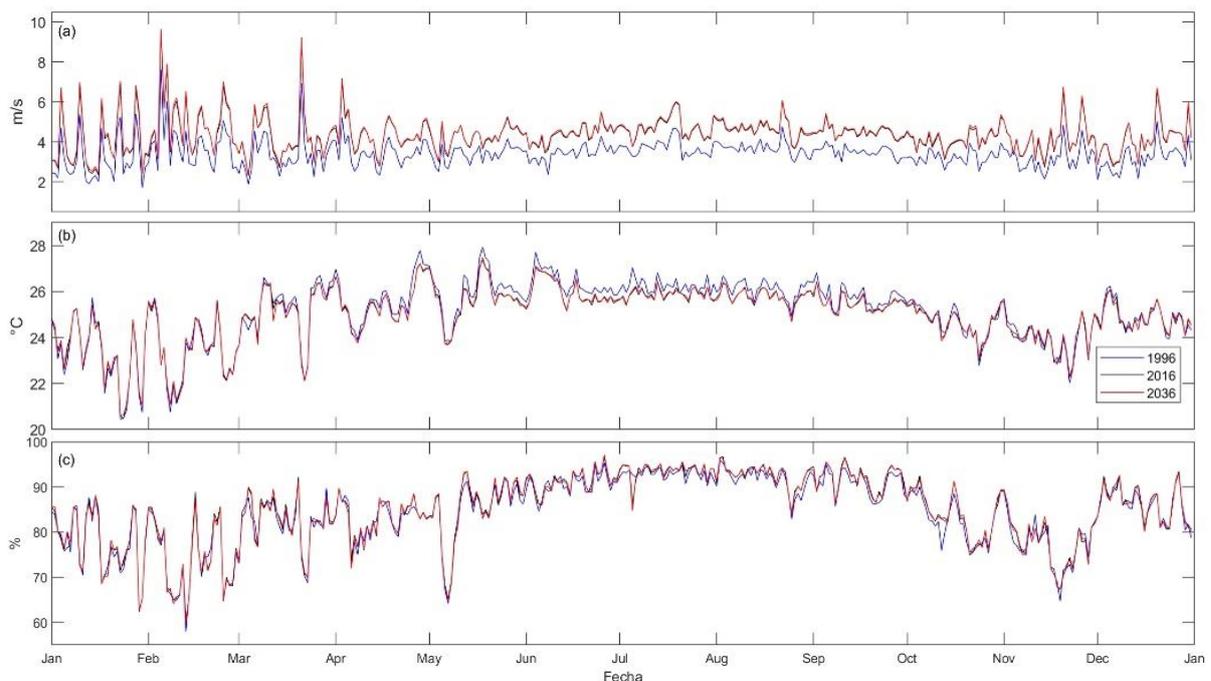


Figura 32. Variables atmosféricas en la localidad de Progreso, Yucatán. (a) Magnitud de la velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), (b) temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ) y (c) humedad relativa (%) promediadas dentro de los polígonos. Las series de tiempo muestran los datos cada 24 hrs, para 1996 (azul), 2016 (negro) y 2036 (rojo).

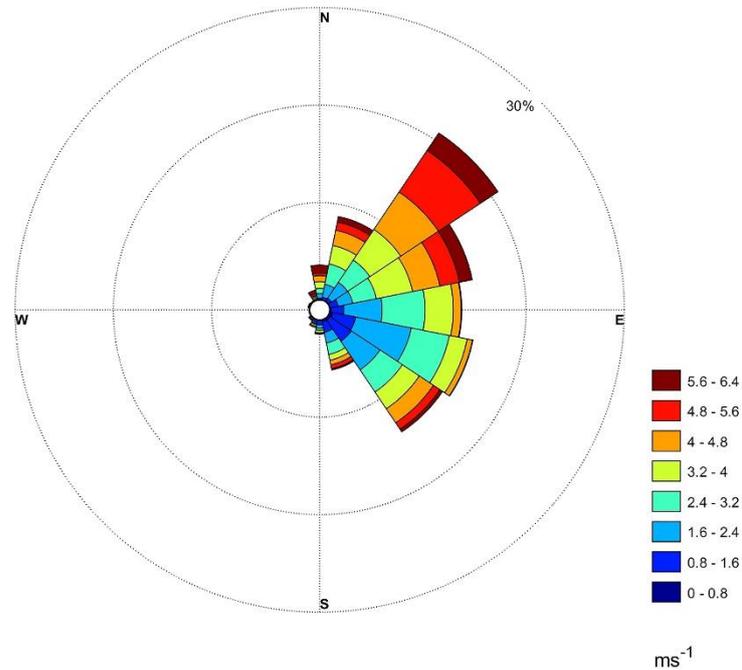


Figura 33. Rosa de vientos en la localidad de Progreso, Yucatán, para 2016. Los colores indican la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ), la orientación de los conos su dirección ( $^{\circ}$ ) y los círculos concéntricos el porcentaje de ocurrencia (%).

Las diferencias entre los tres años (1996, 2016 y 2036), se observaron durante los eventos más intensos que se presentan en la localidad, tanto para la temperatura del aire, para la magnitud del viento como para la humedad relativa, sin embargo, estas diferencias no son significativas. De 1996 a 2016 en promedio, la velocidad del viento en Progreso es de  $4.3 \text{ ms}^{-1}$ , la temperatura del aire es de  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y la de la humedad relativa es de  $85\%$ . En particular, la humedad relativa, al igual que en Sisal, está vinculada con las variaciones de la temperatura, puesto que los valores máximos y mínimos ( $60.4\%$ ) de saturación se observan durante los mismos periodos de tiempo. Las condiciones meteorológicas no presentan diferencias importantes, respecto a lo observado entre 1996 y 2016. En cuanto al año 2036, del mismo modo que en el año 2016, se observan pequeñas variaciones en las condiciones atmosféricas y principalmente en los eventos de mayor intensidad. La humedad relativa se mantuvo por arriba del  $80\%$  de mayo a septiembre, para los tres años, sin embargo, del 2016 al 2036, el máximo aumentó en  $0.34\%$  y el mínimo disminuyó en  $0.58\%$ . En la dirección del viento no se observaron diferencias significativas de 1996 a 2036.

Respecto a la temperatura del aire, el promedio anual fue de 25 °C en 2016 y 2036, donde el máximo de temperatura disminuyó 0.55 °C para 2016 y 0.46 °C para 2036 respecto a 1996. Mientras que los valores mínimos de temperatura se mantuvieron alrededor de 20.4 °C en los tres años. Al aplicar la prueba de t-Student se observó que en el periodo de 1996 a 2016 si hay diferencias significativas, al igual que en el periodo de 1996 a 2036, sin embargo, durante el periodo de 2016 a 2036 no se encontraron diferencias significativas en la temperatura del aire. Lo anterior sugiere que durante el periodo de 1996-2016 el CUS fue más significativo. Además, se observó que la máxima temperatura del aire fue disminuyendo. Respecto a la magnitud del viento el promedio anual aumentó 0.95 ms<sup>-1</sup> para 2016 y 1 ms<sup>-1</sup> para 2036, respecto a 1996. Al igual, la velocidad mínima del viento aumentó 0.6 ms<sup>-1</sup> para 2016 y 0.65 ms<sup>-1</sup> para 2036. Los valores máximos de la velocidad del viento aumentaron en 1.86 ms<sup>-1</sup> para 2016 y en 2 ms<sup>-1</sup> para 2036 con respecto a 1996. En la prueba de t-Student se obtuvo que para los tres años de estudio si hay diferencias significativas, donde la magnitud del viento aumentó desde 1996 a 2036, sugiriendo un cambio en el gradiente térmico tierra-mar.

#### 4.1.3 CAMPECHE

La ciudad de Campeche (San Francisco de Campeche), capital del estado de Campeche y cabecera del municipio de Campeche, funge un papel socioeconómico importante en el estado. En la ciudad se concentra más del 80% de la población del municipio de Campeche (municipio más poblado del estado). A partir de octubre del 2004, el gobierno estatal determinó que el CUS en la ciudad de Campeche dependería del Convenio de Colaboración entre la Federación y el Estado que busca transitar hacia el desarrollo sustentable de Campeche (Gobierno del municipio de Campeche, 2012).

#### **Variables atmosféricas**

De acuerdo a los resultados obtenidos, en promedio para la temperatura del aire, la magnitud del viento y la humedad relativa correspondientes a 1996 y 2016, así como para el escenario futuro de CUS del año 2036, se encontró que la variabilidad anual es similar (Figuras A-44 a A-47, en la sección de anexos) (Figura 34). El viento en la ciudad de Campeche para 1996 presenta una dirección predominante del E-SE en los meses de abril a septiembre y una velocidad anual promedio de 3.2 ms<sup>-1</sup>. Las máximas velocidades se

observan en los meses de primavera (máxima de  $6.5 \text{ ms}^{-1}$ ) y las mínimas durante los meses de invierno (mínima de  $1.7 \text{ ms}^{-1}$ ). De igual forma, se observa una variabilidad similar en la temperatura del aire, los valores máximos ( $27.9 \text{ }^\circ\text{C}$ , entre abril y junio) y mínimos ( $19.7 \text{ }^\circ\text{C}$ ) de la temperatura están asociados con la temporada de secas, la temporada de lluvias y con la llegada de los frentes fríos. El promedio anual de la temperatura del aire es de  $25.3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Por otra parte, se observó una humedad relativa promedio de  $82.4\%$ , siendo superior al  $75\%$  durante los meses de verano, (máximo  $93.5\%$ ), debido a la temporada de lluvias, y mínimo ( $58.9\%$ ) durante los meses de invierno, correspondiente a la temporada de secas.

Para el año 2016 y el 2036 las condiciones atmosféricas presentan algunas diferencias con relación al año 1996. Respecto a la temperatura del aire, el promedio anual no cambió en 2016 con respecto a 1996, sin embargo, para 2036 aumentó  $0.1^\circ\text{C}$ . La temperatura mínima se conservó en  $\sim 19.7^\circ\text{C}$ , y su temperatura máxima aumentó  $0.2^\circ\text{C}$  para 2036. Por otra parte, en la magnitud del viento no se observaron cambios significativos para 2016, sin embargo, la velocidad máxima disminuyó  $0.2 \text{ ms}^{-1}$ . Para el 2036 la velocidad mínima disminuyó  $0.06 \text{ ms}^{-1}$  y la máxima disminuyó en  $0.37 \text{ ms}^{-1}$ , mostrando al igual que en Progreso, el efecto de fricción en la rapidez del viento (Barrales Hassan, 2017) asociado al CUS. En cuanto a la humedad relativa el promedio anual se conservó para 2016, sin embargo, para 2036 disminuyó  $0.4\%$  respecto a 1996. En 2016 la humedad relativa máxima aumentó en  $0.56\%$  y para 2036 aumentó  $0.63\%$  respecto a 1996. Mientras que los valores mínimos de la humedad relativa aumentaron en  $0.47\%$  para 2016 y en  $2.07\%$  para 2036.

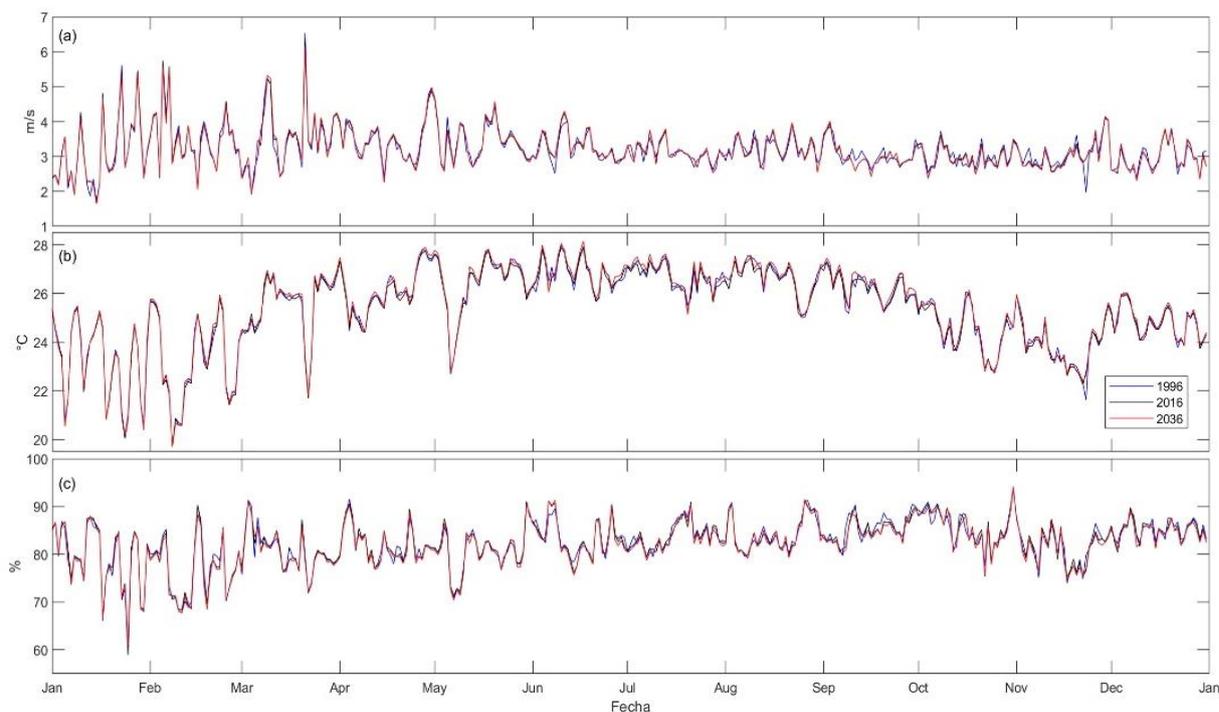


Figura 34. Variables atmosféricas en la localidad Campeche, Campeche. (a) Magnitud de la velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), (b) temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ) y (c) humedad relativa (%) promediadas dentro de los polígonos. Las series de tiempo muestran los datos cada 24 hrs, para 1996 (azul), 2016 (negro) y 2036 (rojo).

Al obtener las diferencias de las series de tiempo de la temperatura del aire (Figura 35), se observó que el promedio de las diferencias para el periodo de 1996 a 2016 fue de  $0.04^{\circ}\text{C}$  con una desviación estándar (SD) de  $0.4^{\circ}\text{C}$ . Para el periodo de 2016 a 2036 presentan un promedio de  $-0.1^{\circ}\text{C}$  con una SD de  $0.31^{\circ}\text{C}$ . Lo anterior indica que, de acuerdo con el escenario de CUS propuesto para la ciudad de Campeche, la temperatura sobre el polígono del área urbana podría aumentar  $0.1^{\circ}\text{C}$  en los siguientes 20 años. Al aplicar la prueba t-Student se obtuvo que, si hay una diferencia significativa evidente entre 2016 a 2036, mostrando un aumento en la temperatura del aire. Sin embargo, en la prueba se observó que entre 1996 y 2036 no existen diferencias significativas. Cabe señalar que las diferencias más significativas se encontraron en los valores máximos y mínimos, y en el máximo periodo de estudio, es decir, al comparar 1996 y 2036, como es el caso del mes de noviembre, del cual se obtuvo un promedio de las diferencias de  $-0.06^{\circ}\text{C}$  con una SD  $0.43^{\circ}\text{C}$ .

En el caso de la magnitud del viento (Figura 36) entre 1996 y 2016 el promedio de las diferencias fue de  $0.01 \text{ ms}^{-1}$  con una desviación estándar de  $0.5 \text{ ms}^{-1}$ . Entre el 2016 y 2036 se

obtuvo un promedio de  $-6.82e-4 \text{ ms}^{-1}$  con una SD de  $0.06 \text{ ms}^{-1}$ , lo cual indica que la magnitud de la velocidad del viento estará influenciada por el CUS, derivado del aumento del gradiente térmico. Al igual que en el análisis de la temperatura, durante el mes de noviembre se observa una mayor diferencia de la magnitud del viento respecto a todo el año. Lo anterior, posiblemente causado por la temporada de frentes fríos que llegan a la región, obteniendo un promedio de las diferencias de  $0.01 \text{ ms}^{-1}$  con una SD  $0.51 \text{ ms}^{-1}$ . La prueba t-Student de dos colas indica que no existen diferencias significativas entre los tres años (1996, 2016 y 2036), sin embargo, en la prueba de una sola cola se observó que la magnitud del viento es menor para el año 2036, siendo 1996, el año con mayores velocidades. Lo anterior podría indicar el aumento en el efecto causado por la fricción derivado por el crecimiento urbano, es decir, más infraestructura urbana que debilitan la velocidad del viento.

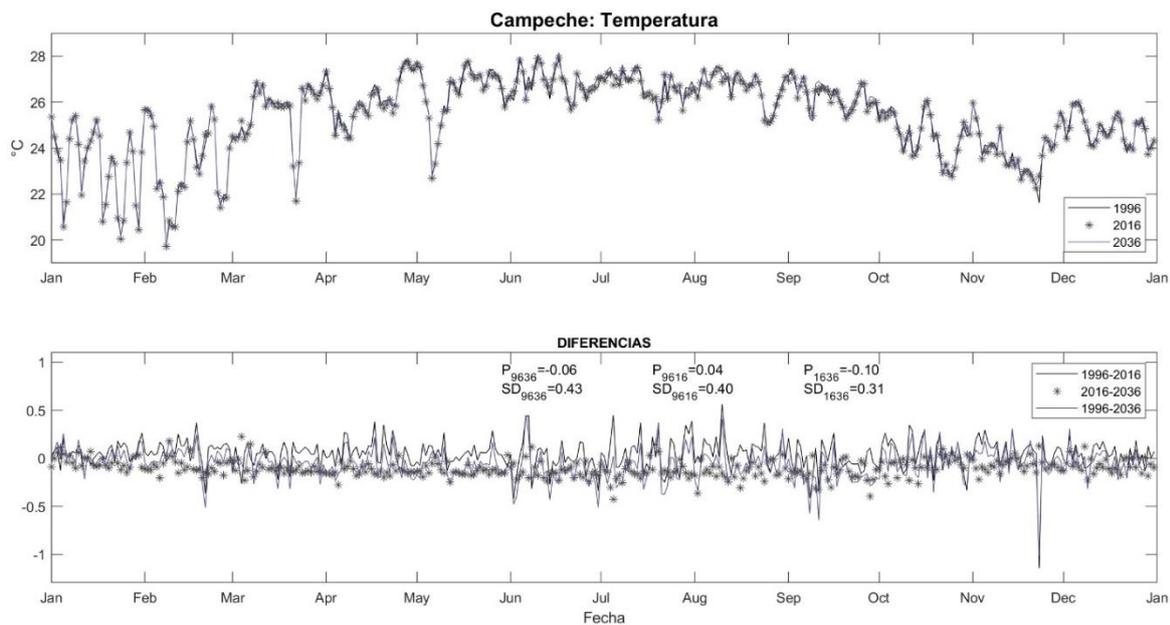


Figura 35. (a) Series de tiempo de la temperatura del aire a 2 m (°C) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años para la localidad de Campeche, Campeche. Se indican los promedios y las desviaciones estándar para cada diferencia.

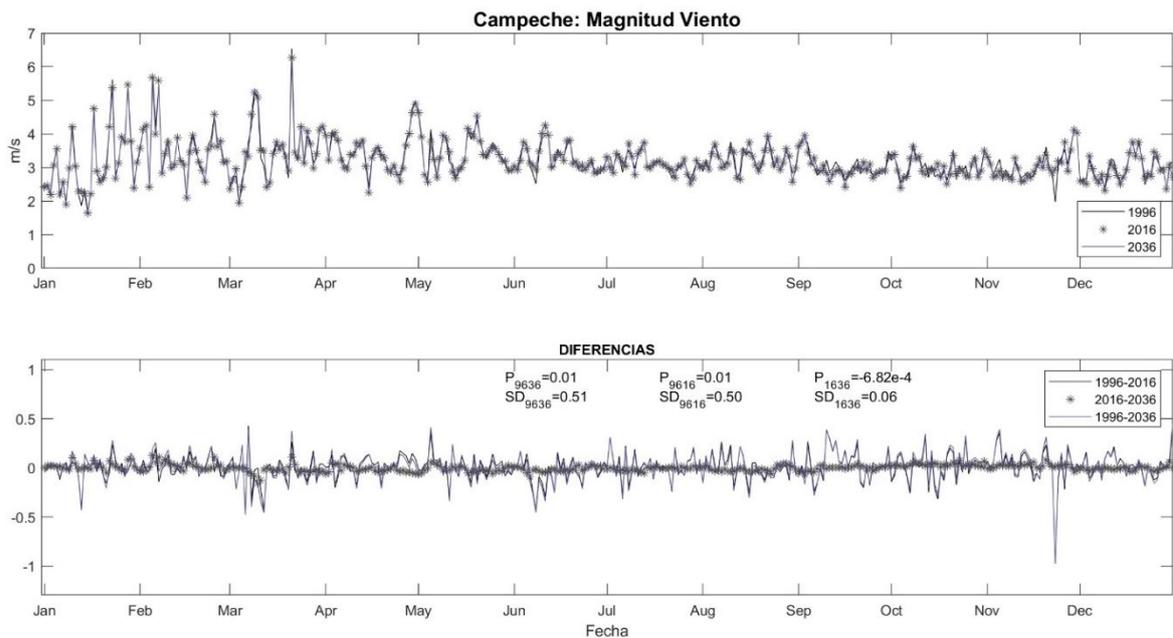


Figura 36. (a) Series de tiempo de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años para la localidad de Campeche, Campeche. Se indican los promedios y las desviaciones estándar para cada diferencia.

## Variabilidad estacional

Debido a que la mayor variabilidad tanto de la temperatura como de la magnitud del viento se encontró en los máximos y mínimos de cada variable, se realizó un análisis de las diferencias espaciales con un intervalo de tiempo estacional (Anexo 3, Figuras A-56 a A-60), para poder estudiar el efecto del CUS de acuerdo con los eventos atmosféricos que ocurren en la región en cada época del año.

Respecto a la temperatura del aire (Figura 37) como se mencionó anteriormente entre los años 1996-2016, no existen diferencias significativas ( $< 0.1^{\circ}\text{C}$ ), lo cual indica que el CUS no ha sido significativo durante este periodo de tiempo y la máxima diferencia de temperatura se observa en los meses de otoño. Por el contrario, el CUS de acuerdo con el escenario propuesto (2016-2036), muestra que la máxima diferencia de temperatura del aire se presenta en los meses de primavera y verano ( $\sim 0.4^{\circ}\text{C}$ ), principalmente al sur de la ciudad de Campeche. Este mismo patrón se observa en el periodo de 1996-2036. El intervalo de variabilidad de la temperatura oscila entre  $0.2^{\circ}\text{C}$  y  $0.4^{\circ}\text{C}$ , lo que sugiere que la planeación respecto al CUS en los próximos 20 años, asociado al aumento de distintas actividades económicas, principalmente actividades comerciales (Gobierno del municipio de

Campeche, 2012), será determinante en los meses en los cuales se presentan las temperaturas más elevadas a lo largo del año.

La misma variabilidad estacional que se observa en la temperatura del aire, se observa en la magnitud del viento (Figura 38), sin embargo, en el caso de la magnitud del viento es evidente la influencia de los eventos atmosféricos de mayor escala espacial, como en los meses de invierno que se caracterizan por la llegada de los frentes fríos. Por otra parte, durante los meses de primavera y verano se encontró una diferencia importante en la magnitud del viento al norte de la ciudad, con velocidades que superan los  $0.5 \text{ ms}^{-1}$  y al sur con velocidades  $\sim 0.25 \text{ ms}^{-1}$ . Lo anterior sugiere la presencia de un gradiente de temperatura que podría hacer que el viento se intensifique al norte y vaya hacia el sur (Barrales Hassan, 2017), por lo que la dinámica local se vería modificada. Por otra parte, se observa que en los meses de primavera la intensificación del viento al sur de la ciudad no se presenta, esto podría estar asociado a la disminución de los frentes fríos o a la disminución del gradiente térmico, ya que esta época del año se considera como una época de transición, donde la temperatura del aire comienza a aumentar y el rango de variabilidad entre el máximo y el mínimo disminuye.

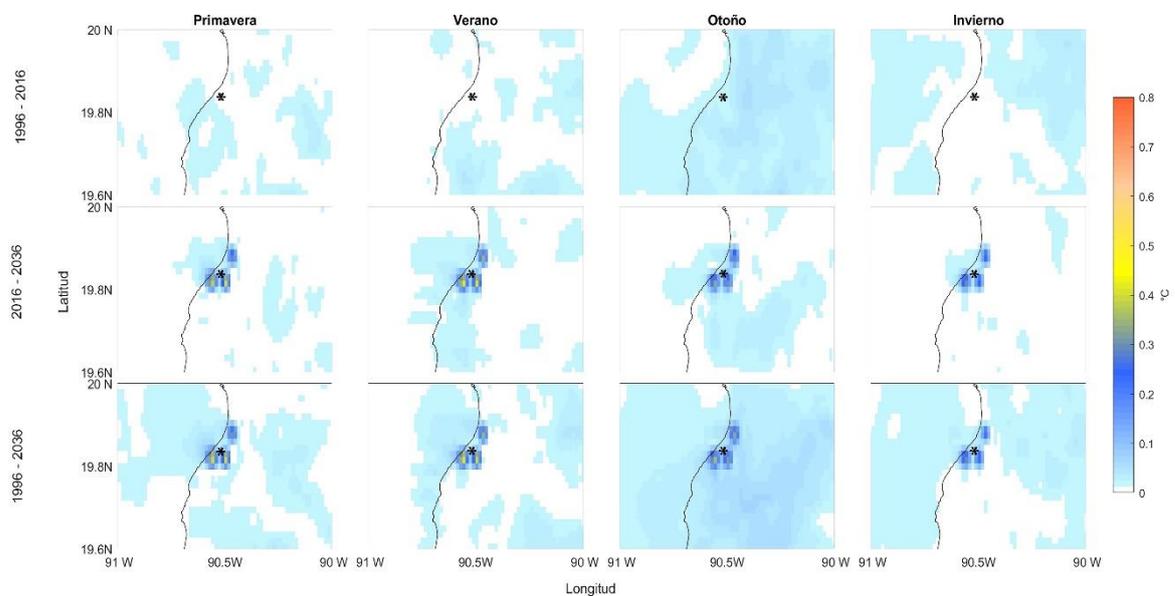


Figura 37. Diferencias espaciales de la temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) para la localidad de Campeche, promediada estacionalmente. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Campeche en la Península de Yucatán.

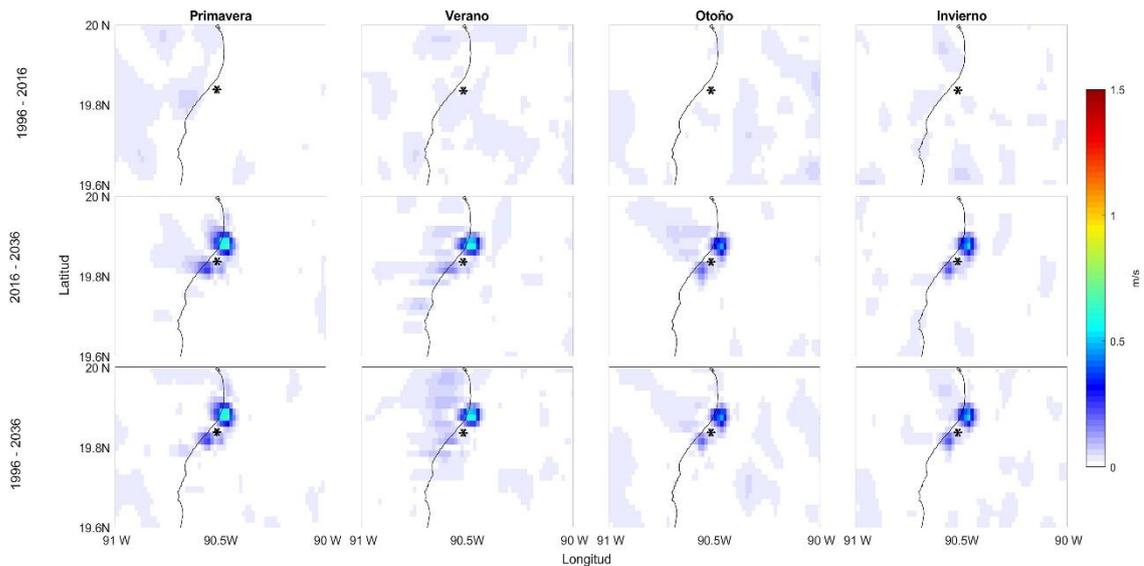


Figura 38. Diferencias espaciales de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para la localidad de Campeche, promediada estacionalmente. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Campeche en la Península de Yucatán.

#### 4.1.4 PLAYA DEL CARMEN

Playa de Carmen se ubica en el municipio de Solidaridad, en el litoral costero caribeño de la Riviera Maya. Por lo que, la urbanización de la ciudad ha ocasionado la pérdida de 2,514.6 hectáreas (ha) de vegetación durante el periodo 1985-2015. Esta situación en consecuencia del rápido crecimiento demográfico causado por la oferta de trabajo que demandan los servicios turísticos de esta ciudad (Ochoa Jiménez et al., 2020). Este CUS debió considerar el Programa de Ordenamiento Ecológico Local (POEL) del Municipio de Solidaridad, el cual se presenta simultáneamente, con la Bitácora Ambiental de Ordenamiento Ecológico. Con base en este Programa Municipal de Desarrollo Urbano consideran que el acelerado crecimiento de la ciudad continuará incrementando de acuerdo al aumento en el sector turístico del municipio, lo que ocasionará una saturación urbana (Programa Municipal de Desarrollo Urbano de Solidaridad, 2010).

#### Variables atmosféricas

Las condiciones atmosféricas observadas en esta localidad (Figuras A-61 a A-67, Anexo 3) muestran para el año 1996 que la dirección del viento es predominante del E-NE, principalmente durante los meses de verano (de junio a septiembre), mientras que en los meses de octubre a abril se observa una mayor variabilidad en la dirección del viento.

Respecto a la magnitud del viento se encontró una velocidad máxima de  $6.9 \text{ ms}^{-1}$  durante el primer trimestre del año, mientras que la velocidad mínima fue de  $1.8 \text{ ms}^{-1}$  durante los meses de invierno, el promedio anual de la magnitud del viento para este año fue de  $3.8 \text{ ms}^{-1}$ . En cuanto a la temperatura del aire, el promedio anual fue de  $25.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$  con máximos entre los meses de primavera y verano (marzo a septiembre), alcanzando hasta  $27.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , y mínimos de  $19.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$  en el mes de enero (invierno). La humedad relativa promedio fue de  $82.8\%$ , con un mínimo de  $66\%$  y con máximos superiores a  $90\%$  (máximo de  $95.3\%$ ). Respecto a la presión atmosférica se observa un patrón similar al de las otras variables, con una mayor variabilidad entre los meses de septiembre a abril.

Comparando la variabilidad atmosférica entre los tres años (1996, 2016 y 2036) (Figura 39) se observó que la dirección del viento y la presión atmosférica son similares en los tres años, ya que la mayor variabilidad de ambas variables se encontró durante los meses de septiembre a abril. Esta variabilidad está asociada a procesos de mayor escala, en el caso de la ciudad de Playa del Carmen podría deberse al debilitamiento de los vientos Alisios que permiten la llegada de los frentes fríos que atraviesan la Península de Yucatán. Respecto a la magnitud del viento se observaron diferencias en la velocidad mínima y máxima entre los tres años de estudio, donde el año 1996 obtuvo velocidades más altas del viento que en los otros dos años, disminuyendo  $1.12 \text{ ms}^{-1}$  para 2016 y  $1.23 \text{ ms}^{-1}$  para 2036. Por el contrario, en el 2036 se observaron las más bajas velocidades del viento, hasta un mínimo de  $1.61 \text{ ms}^{-1}$ . Respecto a la temperatura del aire el promedio anual no se observaron diferencias significativas. Sin embargo, se observó que el mínimo de temperatura disminuyó  $0.12 \text{ }^{\circ}\text{C}$  para 2016 y  $0.28 \text{ }^{\circ}\text{C}$  con respecto a 1996. Por otra parte, el promedio anual de la humedad relativa disminuyó progresivamente, ya que se observó una humedad relativa promedio de  $82.05\%$  en el 2016 y  $81.32\%$  para el 2036, lo que sugiere una pérdida de  $1.46\%$  respecto a 1996. Del mismo modo, los valores máximos y mínimos de la humedad relativa también disminuyeron, en la humedad relativa máxima para 2016 fue de  $93.64\%$  y para 2036 fue de  $92.28\%$ ,  $1.65\%$  y  $3.01\%$  menor respecto a 1996 correspondientemente. Mientras que en la humedad mínima para el 2016 disminuyó  $1.69\%$  con respecto a 1996 y para el 2036 disminuyó  $0.5\%$  con respecto al 2016.

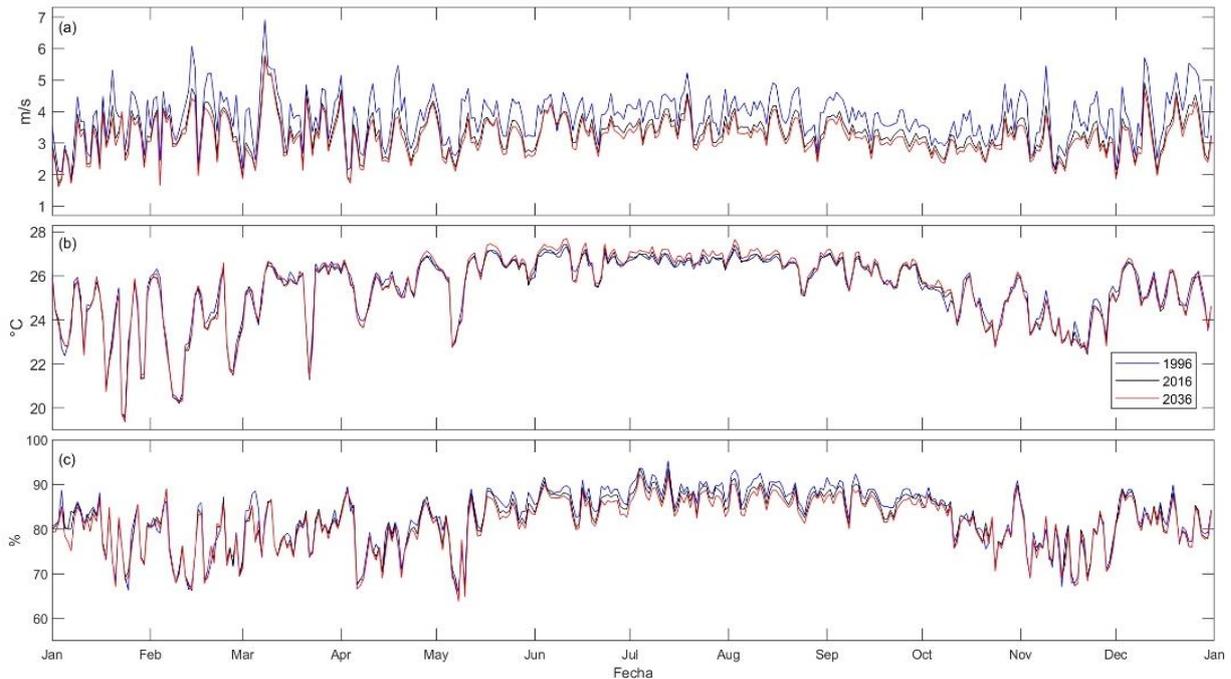


Figura 39. Variables atmosféricas en la localidad Playa del Carmen, Quintana Roo. (a) Magnitud de la velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), (b) temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ) y (c) humedad relativa (%) promediadas dentro de los polígonos. Las series de tiempo muestran los datos cada 24 hrs, para 1996 (azul), 2016 (negro) y 2036 (rojo).

Al obtener las diferencias de las series de tiempo de la temperatura del aire (Figura 40) y la magnitud del viento (Figura 41), se observó que el promedio de las diferencias para la temperatura del aire, durante el periodo de 1996 a 2016, fue de  $0.06^{\circ}\text{C}$  con una SD de  $0.55^{\circ}\text{C}$ , en comparación con la diferencia obtenida para el periodo de 2016 a 2036, del cual se obtuvo un promedio de  $-0.07^{\circ}\text{C}$  y una SD de  $0.44^{\circ}\text{C}$ . Lo anterior sugiere que el CUS más significativo que ha tenido Playa del Carmen ocurrió durante el periodo de 1996-2016, ya que el rango de variabilidad de las diferencias oscila entre  $-0.54^{\circ}\text{C}$  y  $0.14^{\circ}\text{C}$  durante los eventos extremos de temperatura. Cabe señalar que sumado al CUS proyectado para 2036, este rango de diferencias oscila entre  $-0.14^{\circ}\text{C}$  y  $0.14^{\circ}\text{C}$ . Al aplicar la prueba t-Student se obtuvo que no hay una diferencia significativa evidente entre ninguno de los tres años (1996, 2016 y 2036), sin embargo, se observó que el año 2016 tiene temperaturas menores al 2036, aunque para 1996 la temperatura fue mayor.

Por otra parte, respecto a las diferencias obtenidas de la magnitud del viento para el periodo de 1996-2016, se obtuvo un promedio de  $0.52 \text{ ms}^{-1}$  y una SD de  $0.63 \text{ ms}^{-1}$ , mientras que para el periodo de 2016-2036 se obtuvo un promedio de las diferencias de  $0.14 \text{ ms}^{-1}$  y una SD de  $0.13 \text{ ms}^{-1}$ . Estos valores coinciden con los resultados obtenidos en las diferencias de temperatura, en donde la variabilidad atmosférica más importante se presenta durante el periodo de 1996-2016. Lo anterior se debe a que el sector turístico creció de manera importante, causando la construcción de nueva infraestructura hotelera (Herrera Serna, 2018; Ochoa Jiménez, et al. 2020). Finalmente, entre el periodo de 1996-2036 el promedio y la SD obtenidos fueron de  $0.67 \text{ ms}^{-1}$  en ambos casos, lo que sugiere que las variaciones en la magnitud del viento podrían ser del mismo orden. Los resultados de la prueba t-Student indican que, si hay diferencias significativas entre los tres años, por lo que la disminución gradual de la velocidad del viento sugiere que el efecto de la fricción por el CUS debe ser considerado en la planeación para el crecimiento urbano.

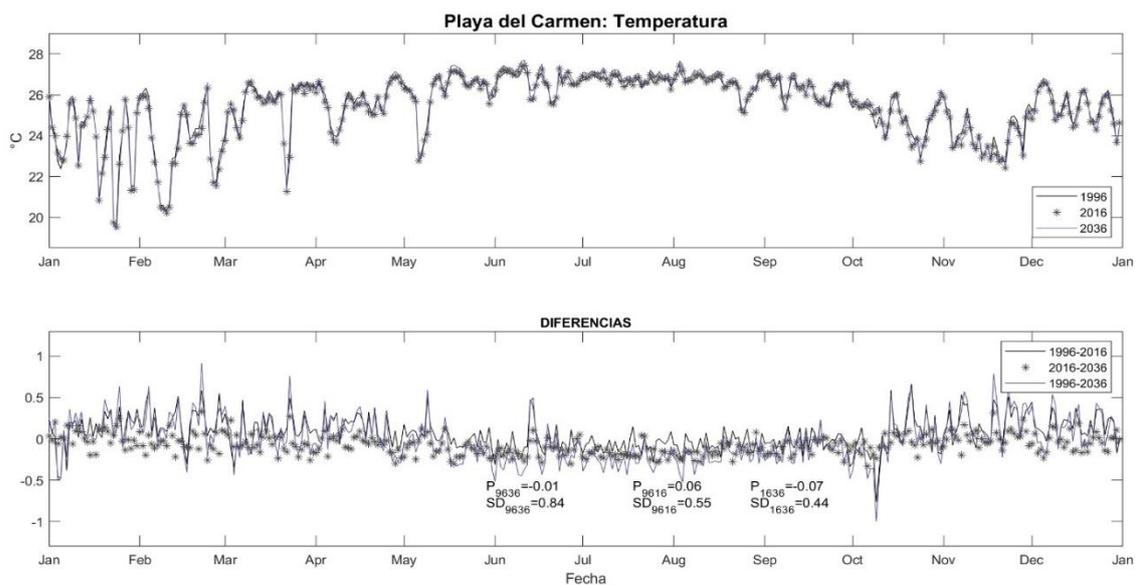


Figura 40. (a) Series de tiempo de la temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años para la localidad de Playa del Carmen, Quintana Roo. Se indican los promedios y las desviaciones estándar para cada diferencia.

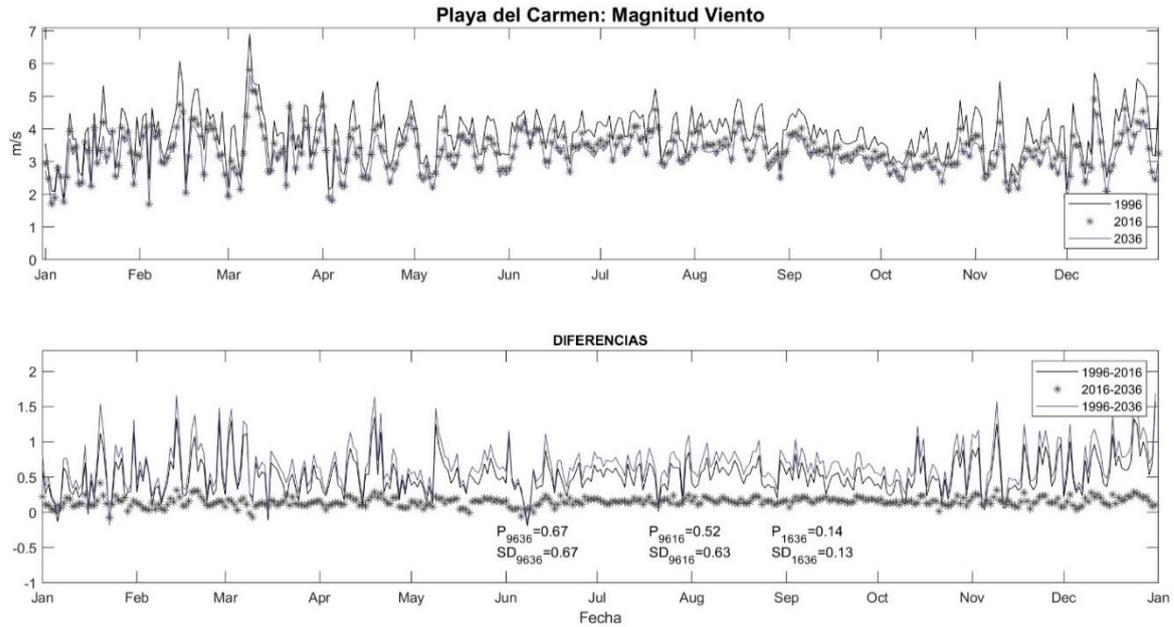


Figura 41. (a) Series de tiempo de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años para la localidad de Playa del Carmen, Quintana Roo. Se indican los promedios y las desviaciones estándar para cada diferencia.

### Variabilidad estacional

De acuerdo con los promedios estacionales para la localidad de Playa del Carmen (Figuras A-73 a A-77, Anexo 3), se observa que la temperatura del aire en el área urbanizada es mayor que en las áreas circundantes, de  $\sim 0.2$  °C, sin considerar la estación del año en la que se encuentre. Lo anterior es más evidente para el año 2036 (Figura 42) en donde el polígono propuesto de CUS, muestra el efecto de isla de calor (sección 4.1), principalmente en los meses de primavera y verano. Por otra parte, se observa la estacionalidad de la temperatura, la cual disminuye durante los meses de otoño e invierno y aumenta en primavera y verano, sin embargo, el rango de variación es mayor considerando desde 1996 hasta 2036, de  $\sim 0.5$  °C, principalmente durante los meses de verano y primavera. Respecto a las diferencias entre los años 1996-2016 se observó al norte de la ciudad, en la zona costera, un aumento de  $0.3$  °C en verano y de  $0.4$  °C en primavera. En el periodo de 2016-2036 el área donde se observó un aumento significativo de temperatura se ubica al oeste y sur de Playa del Carmen principalmente durante los meses más calientes que corresponden a los meses de verano y primavera, con diferencias entre  $0.4$  °C y  $0.5$  °C, respectivamente. Para los meses de otoño e invierno se encontró que la diferencia de temperatura en la ciudad es de  $0.3$  °C. Por lo anterior, las diferencias entre 1996 y 2036 muestran un aumento significativo de la

temperatura. Por otra parte, se observa una isla de calor en la periferia de la ciudad con una diferencia de entre  $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la cual coincide con el polígono asociado al CUS.

Respecto a la magnitud del viento para cada año de estudio, se observa un patrón en el que la magnitud del viento disminuye al cruzar el canal formado por la Isla de Cozumel y el continente. Lo anterior, debido a que la isla de Cozumel funge como una barrera natural que por fricción superficial hace que la magnitud del viento disminuya y por lo tanto afecte directamente la variabilidad local del viento en Playa del Carmen (Barrales Hassan, 2017). Cabe señalar que a lo largo del litoral el viento alcanza velocidades hasta de  $4\text{ ms}^{-1}$ , sin embargo, cuando los vientos alisios se intensifican la rapidez del viento en el Mar Caribe supera los  $7\text{ ms}^{-1}$ . El efecto de sombra que se observa por la presencia de la Isla de Cozumel y el cambio en el gradiente de temperatura para 2036, da lugar a una variabilidad importante en la magnitud del viento que podría contribuir a que el efecto de isla de calor en Playa de Carmen se intensifique (Primo Salazar, 2015; Barrales Hassan, 2017).

Por otra parte, las variaciones en la magnitud del viento (Figura 43), en este caso, coinciden con el calentamiento diferencial por el CUS. Se observa que la mayor variabilidad es evidente durante el periodo de 1996 a 2016, incluso al norte de la ciudad sobre la línea de costa. Principalmente, estos cambios en la magnitud del viento se observan en los meses de invierno, donde las diferencias muestran valores superiores a  $0.5\text{ ms}^{-1}$  al norte de Playa del Carmen y dentro del polígono de estudio. Durante el periodo de 2016-2036, las diferencias más significativas se observan al oeste y sur de la ciudad, siendo estas variaciones menores a  $0.5\text{ ms}^{-1}$ . Al analizar el periodo de 1996-2036 las diferencias de la magnitud del viento durante todo el año no sólo superan los  $0.5\text{ ms}^{-1}$ , sino también se encuentran a lo largo de la costa hacia el norte de Playa del Carmen. La mayor variabilidad en la magnitud del viento se observó en los meses de invierno y la menor variabilidad en los meses de otoño. Las diferencias encontradas en esta ubicación no sólo están asociadas al CUS (escala local), ya que la variabilidad atmosférica de mesoescala en esta región da lugar a variaciones importantes que afectan significativamente la dinámica local. Las diferencias en la velocidad del viento durante el invierno están moduladas por la llegada de los frentes fríos a la PY, los cuales son resultado de una compleja respuesta de la circulación atmosférica (Barrales Hassan, 2017) que llega desde la región N-NW. La variabilidad atmosférica presente en el MCB está relacionada principalmente a eventos

como el ENSO (El Niño - Oscilación del Sur) y a la Oscilación del Atlántico Norte (NAO). La NAO es un evento atmosférico de ocurrencia periódica, la cual genera gradientes de presión atmosférica a gran escala y se presentan durante el invierno. Este evento atmosférico produce cambios en la temperatura superficial del aire y en la velocidad y dirección del viento (Sánchez Santillán et al., 2005; Palacios Hernández et al., 2017).

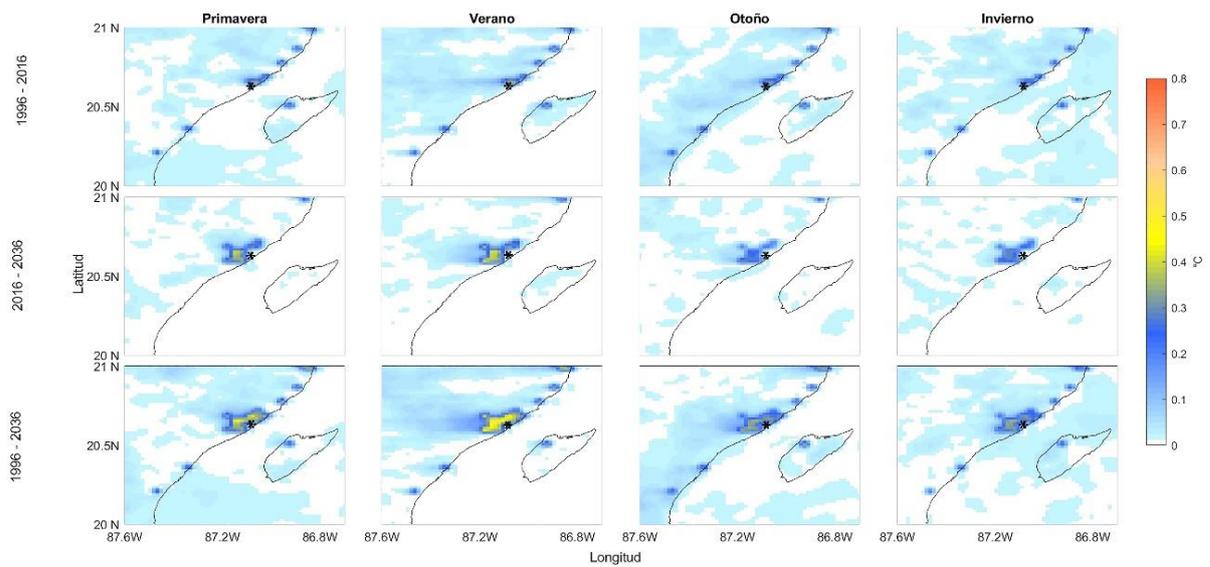


Figura 42. Diferencias espaciales de la temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) para la localidad de Playa del Carmen, Quintana Roo, promediada estacionalmente. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Playa del Carmen en la Península de Yucatán.

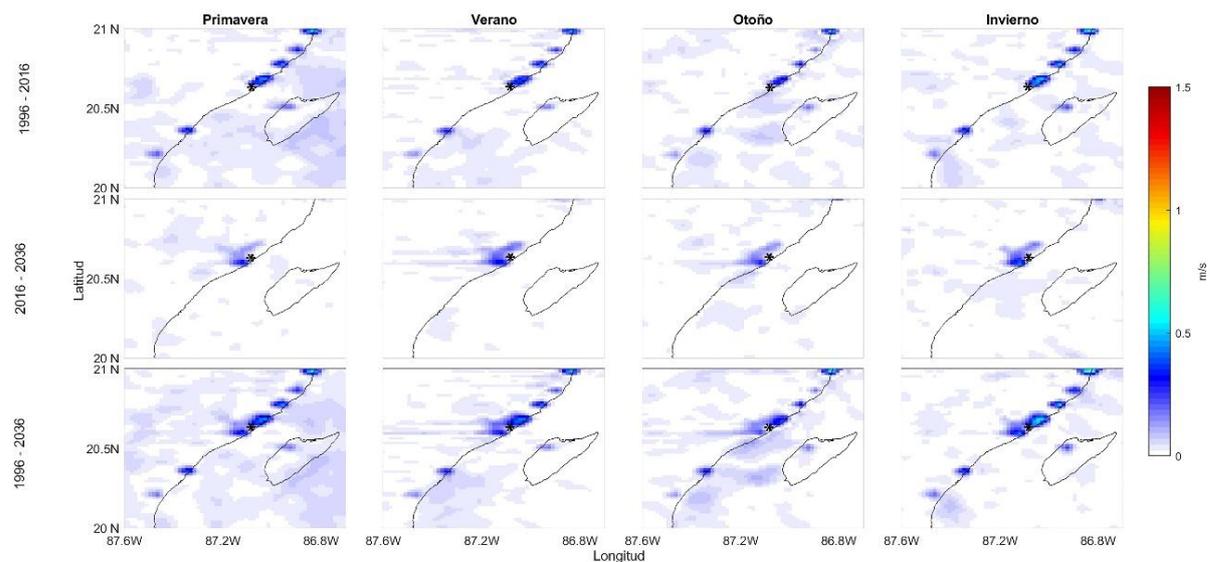


Figura 43. Diferencias espaciales de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para la localidad de Playa del Carmen, Quintana Roo, promediada estacionalmente. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Playa del Carmen en la Península de Yucatán.

#### 4.1.5 CANCÚN

La ciudad costera de Cancún se localiza en el noreste de la PY en el estado de Quintana Roo, y pertenece al municipio de Benito Juárez. El CUS en esta localidad se asocia principalmente a la acelerada urbanización y al elevado índice de migración ocasionados por el desarrollo turístico en la zona, mismo que se comenzó a promover desde la década de los 70's (Mc Coy Cador, y Sosa Ferreira, 2016; Barrales Hassan, 2017; Ellis et al., 2017). Esta migración ha dado lugar a la construcción de asentamientos irregulares, provocando un desarrollo urbano desordenado. Lo anterior, es posible observarlo tanto en la zona urbana como en la zona hotelera (Mc Coy Cador, y Sosa Ferreira, 2016). Además, la demanda de US para el sector turístico tuvo una tasa de crecimiento entre el 2005 y el 2010 de 500 hectáreas (ha) por año (Barrales Hassan, 2017). De acuerdo al Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población Cancún 2014-2030, lo anterior ha conducido a un desarrollo insostenible en la ciudad.

#### **Variables atmosféricas**

Las condiciones meteorológicas observadas en la ciudad de Cancún (Anexo 3, Figuras A-78 a A-89) (Figura 44) dentro del polígono urbano, mostraron para el año 1996 que la dirección del viento es predominante del NE, principalmente en los meses de verano (de junio a septiembre), mientras que en los meses de octubre a abril se observa una mayor variabilidad. En la magnitud del viento se observó una velocidad máxima de  $5.4 \text{ ms}^{-1}$  durante marzo y abril (en primavera), mientras que la velocidad mínima encontrada fue de  $1.4 \text{ ms}^{-1}$  durante los meses de invierno (específicamente a principios de año), el promedio anual de la magnitud fue de  $3.1 \text{ ms}^{-1}$ . Respecto a la temperatura del aire, el promedio anual fue de  $25.6 \text{ }^\circ\text{C}$ , con una temperatura máxima de  $27.7 \text{ }^\circ\text{C}$  durante los meses de verano, y una temperatura mínima de  $19.5 \text{ }^\circ\text{C}$  en el mes de enero. Además, se observó que la humedad relativa tuvo un promedio de 80.6%, un mínimo de 58.2% para el mes de febrero, y máximos superiores a 90% (hasta 93.16%) durante los meses de verano (julio y agosto) y en el mes de marzo. Respecto a la presión atmosférica se observaron oscilaciones significativas de noviembre hasta abril.

Al comparar la variabilidad atmosférica entre 1996, 2016 y 2036, se observó que la presión atmosférica y la dirección del viento son similares, ya que presentan un patrón similar y la

mayor variabilidad de ambas variables se presentó durante los meses de septiembre a abril. Lo anterior, debido a su ubicación geográfica y por lo tanto al igual que en la localidad de Playa del Carmen, podría deberse a la entrada de los frentes fríos que atraviesan la PY. Respecto a la magnitud del viento desde 1996, la velocidad mínima se conservó  $\sim 1.4 \text{ ms}^{-1}$  en los tres años. El promedio anual de la magnitud del viento únicamente para el 2016 aumentó  $0.08 \text{ ms}^{-1}$ . Mientras que la velocidad máxima del viento fue aumentando progresivamente, en el caso del 2016 la velocidad aumentó a  $5.4 \text{ ms}^{-1}$  y en el 2036 aumentó a  $5.6 \text{ ms}^{-1}$ ,  $0.07 \text{ ms}^{-1}$  y  $0.26 \text{ ms}^{-1}$  mayor respecto a 1996 correspondientemente. En este caso, el aumento en la magnitud del viento está relacionado principalmente al aumento del gradiente térmico generado por la isla de calor de la ciudad (Barrales Hassan, 2017). Por otra parte, se observó una disminución del promedio anual en la humedad relativa tanto para 2016 como para el 2036, disminuyó en  $0.57\%$  para 2016 y en  $0.96\%$  para 2036 respecto a 1996. La humedad máxima disminuyó  $0.69\%$  para 2016 y  $0.97\%$  para 2036 respecto 1996. La humedad mínima únicamente aumentó  $0.78\%$  para 2016 respecto 1996. Los resultados de la temperatura del aire muestran un aumento  $0.1^\circ\text{C}$  para 2036 en la temperatura máxima del aire respecto a 1996 y un promedio anual  $\sim 25.6^\circ\text{C}$ .

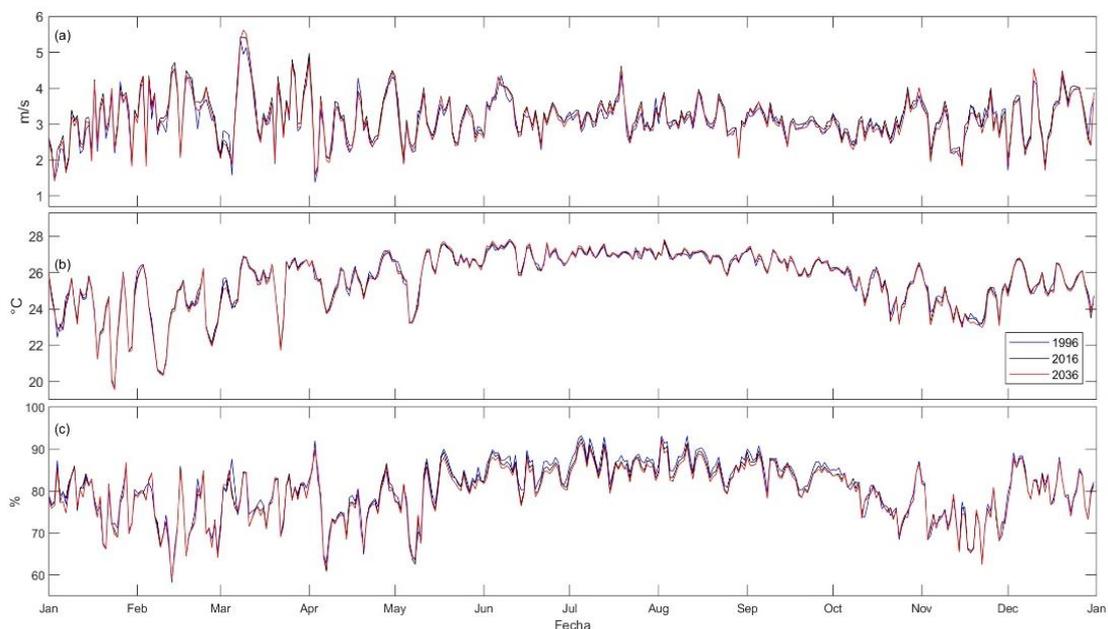


Figura 44. Variables atmosféricas en la localidad Cancún, Quintana Roo. (a) Magnitud de la velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), (b) temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^\circ\text{C}$ ) y (c) humedad relativa (%) promediadas dentro de los polígonos. Las series de tiempo muestran los datos cada 24 hrs, para 1996 (azul), 2016 (negro) y 2036 (rojo).

En las diferencias de las series de tiempo de la temperatura del aire (Figura 45) se observa que durante el periodo de 1996-2016 el promedio de las diferencias fue de  $-0.0056\text{ }^{\circ}\text{C}$  con una SD de  $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en comparación con el obtenido para el periodo de 2016-2036, del cual se obtuvo un promedio de  $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$  con una SD de  $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Lo anterior, sugiere que el CUS más significativo ocurrió durante el periodo de 1996-2016, donde el rango de variabilidad de las diferencias oscila entre  $-0.85$  y  $0.19\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante los eventos extremos de temperatura. En el periodo de 1996-2036 el promedio anual de las diferencias fue de  $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$  con una SD de  $0.51\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Al aplicar la prueba t-Student se obtuvo que no hay diferencias significativas entre los tres años y que el año 1996 presentó temperaturas mayores.

Respecto a las diferencias obtenidas de la magnitud del viento (Figura 46), para el periodo de 1996-2036, se obtuvo un promedio de  $0.03\text{ ms}^{-1}$  y una SD  $0.51\text{ms}^{-1}$ , mientras que para el periodo de 2016-2036 se obtuvo un promedio de  $0.09\text{ ms}^{-1}$  y una SD de  $0.14\text{ ms}^{-1}$ . Lo anterior coincide con los resultados obtenidos en las diferencias de la temperatura del aire, en donde la variabilidad atmosférica más significativa se presentó durante 1996-2016, lo cual se asocia a la demanda y crecimiento del sector turístico. De acuerdo a la prueba t-Student, existen diferencias significativas en el periodo de 1996-2016 y en el de 2016-2036. En el primer periodo, de 1996 a 2016 la magnitud del viento aumentó, sin embargo, para el segundo periodo, la magnitud del viento disminuyó. Lo anterior sugiere que de 1996 a 2016 la dinámica local está modulada por un cambio en el gradiente térmico, mientras que de 2016 a 2036 el efecto de fricción es evidente.

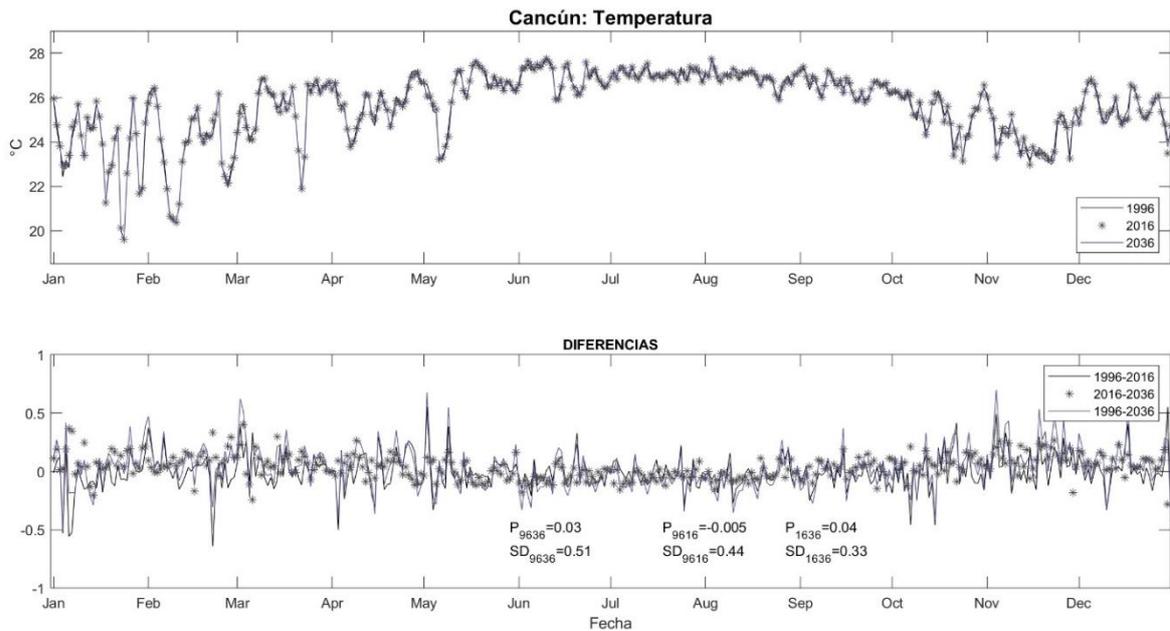


Figura 45. (a) Series de tiempo de la temperatura del aire a 2 m (°C) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años, para la localidad de Cancún, Quintana Roo. Se indican los promedios y las desviaciones estándar para cada diferencia.

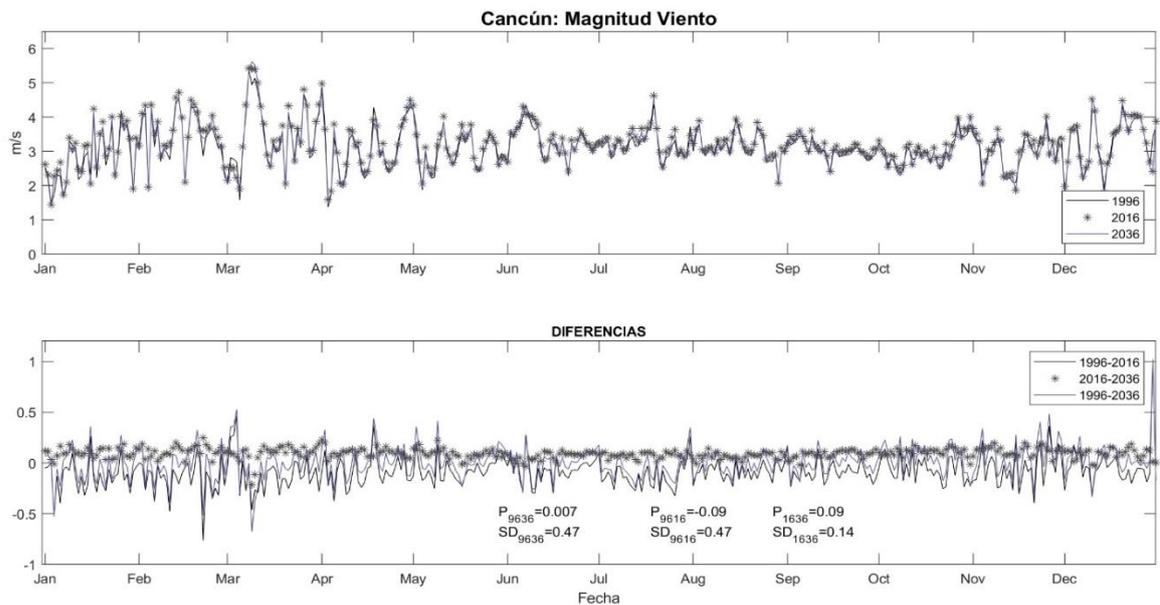


Figura 46. (a) Series de tiempo de la magnitud del viento a 10 m ( $ms^{-1}$ ) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de 20 años, para la localidad de Cancún, Quintana Roo. Se indican los promedios y las desviaciones estándar para cada diferencia.

### Variabilidad estacional

Con base en los promedios estacionales de la ciudad de Cancún (Anexo 3, Figuras A-90 a A-94) para la temperatura del aire y la magnitud del viento, se observa que la temperatura

dentro del área urbanizada es mayor ( $\sim 0.3$  °C) que en las áreas circundantes. Lo anterior es más evidente para el año 2016 y 2036, en donde se muestra el efecto de la isla de calor. Este fenómeno también se observó en el estudio de Barrales Hassan (2017), en el cual al expandir la zona urbanizada se observa un aumento de la temperatura y como consecuencia la intensificación de la isla de calor. Las diferencias espaciales de la temperatura del aire (Figura 47), entre los años 1996-2016, muestran una extensa región con diferencias de 0.3 °C, en particular en el centro de la ciudad donde se observan diferencias de 0.4 °C en invierno y de 0.6 °C en verano. Durante el periodo de 2016-2036 el área en la donde la temperatura del aire aumentó, se observa la influencia del CUS. Lo anterior es evidente al sureste de la ciudad en la zona costera (zona hotelera), mostrando una diferencia de temperatura de hasta 0.8 °C durante los meses de invierno, los cuales son los meses más fríos del año. Las diferencias en la temperatura del aire entre 1996 y 2036, muestran un aumento tanto en la extensión de la ciudad como en la temperatura del aire, con diferencias que superan los 0.6 °C durante los meses de verano.

Por otro lado, respecto a la magnitud del viento (Figura 48), se observó que para el periodo de 1996-2016, el CUS más importante fue al noreste y sur de la ciudad, ya que en estas zonas se observan cambios en la magnitud del viento mayores a  $1.5 \text{ ms}^{-1}$ , principalmente durante los meses de invierno. Durante el periodo de 2016-2036, el área donde se observaron mayores cambios en la velocidad del viento fue en la zona sureste (zona hotelera), con diferencias superiores a  $1.5 \text{ ms}^{-1}$  principalmente en invierno, en el resto de la zona las diferencias son menores a  $0.5 \text{ ms}^{-1}$ . Las diferencias observadas entre 1996-2036 muestran tres zonas claramente definidas dentro de la ciudad, donde la velocidad del viento cambio hasta en  $1.5 \text{ ms}^{-1}$ . Cabe mencionar que la temporada con diferencias significativa en el año, corresponde a los meses de invierno, lo que coincide con la compleja circulación atmosférica de gran escala y con la intensificación del gradiente térmico.

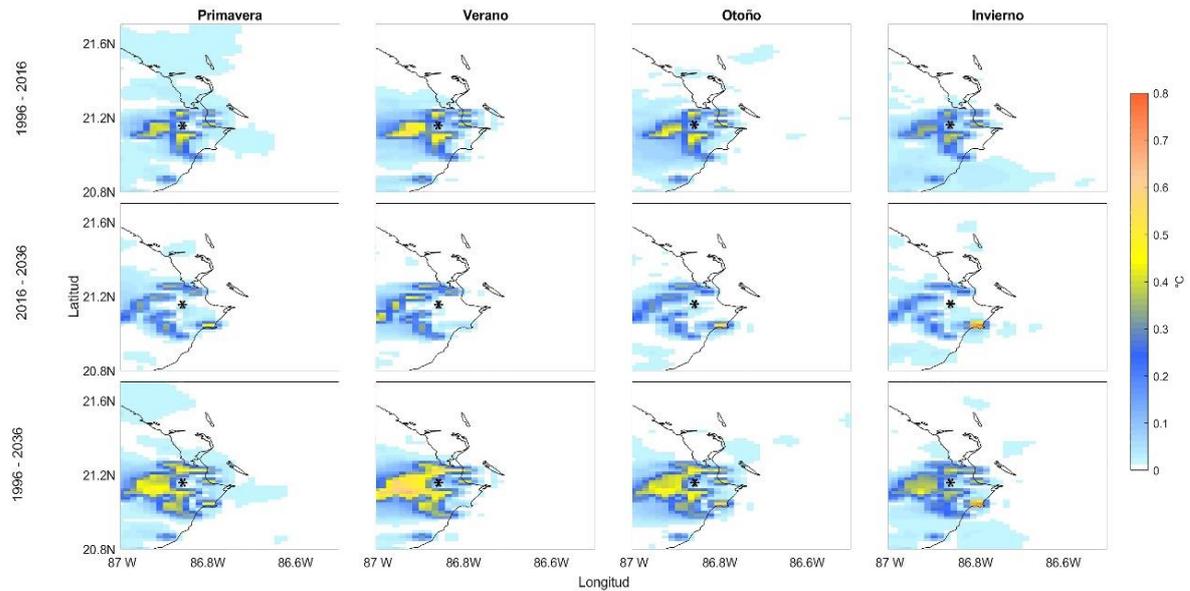


Figura 47. Diferencias espaciales de la temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) para la localidad de Cancún, Quintana Roo, promediada estacionalmente. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Cancún en la Península de Yucatán.

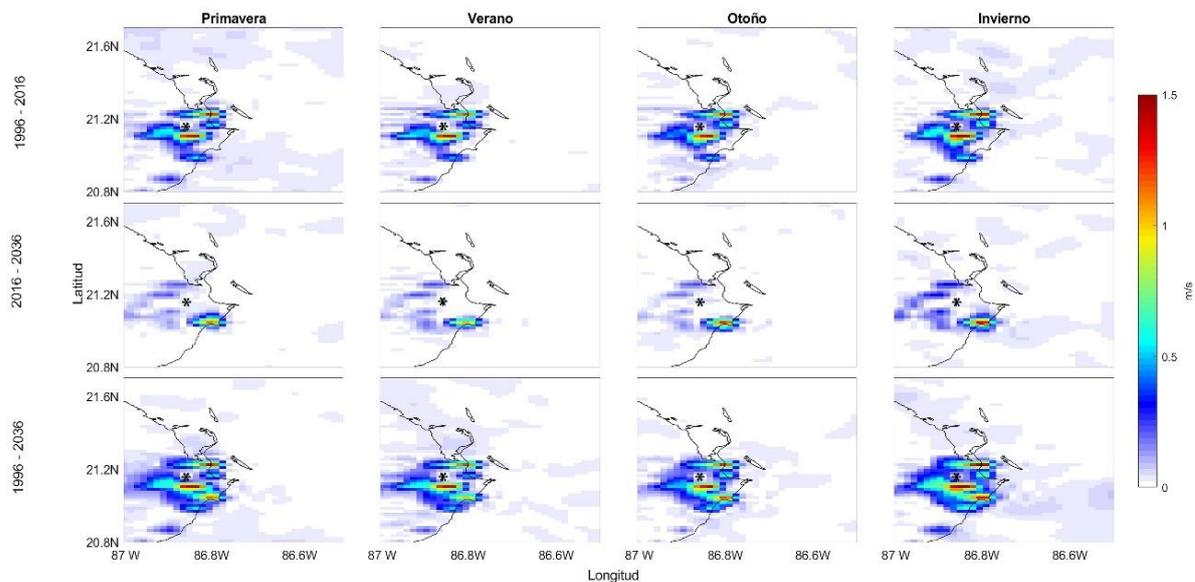


Figura 48. Diferencias espaciales de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para la localidad de Cancún, Quintana Roo, promediada estacionalmente. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Cancún en la Península de Yucatán.

#### 4.1.6 MÉRIDA

La ciudad de Mérida, capital del estado de Yucatán, ha mostrado durante las últimas décadas un ritmo de crecimiento acelerado. Esta notable expansión territorial de la zona

urbanizada muestra un crecimiento promedio alrededor de 80% respecto de la década de los 80's (Navarro Tec et al., 2018). La urbanización de la ciudad es mayor en zonas adyacentes a la ciudad y se distribuye en la periferia, donde una gran cantidad de nuevas colonias, fraccionamientos y centros comerciales han ocasionado un crecimiento explosivo de la zona urbana. De acuerdo a lo encontrado en el estudio de George-Chacon et al. (2019), en el Programa Municipal de Desarrollo Urbano de Mérida (PMDUM), únicamente se habían autorizado 7,828 Ha para desarrollos inmobiliarios entre 1985 y 2015. Sin embargo, en los datos de SEDUMA el crecimiento metropolitano de la ciudad de Mérida entre 1978 y 2010 fue de 19,714 Ha (George-Chacon et al., 2019).

### **Variables atmosféricas**

Las condiciones atmosféricas observadas en la ciudad de Mérida (Anexo 3, Figuras A-95 a A-106) muestran que para el año 1996 la dirección del viento procedente del NE se observó principalmente durante los meses de junio a septiembre, sin embargo, en el primer trimestre del año se observó una mayor variabilidad en la dirección del viento. Respecto a la velocidad del viento se obtuvo un promedio anual de  $2.7 \text{ ms}^{-1}$ , una velocidad máxima de  $4.8 \text{ ms}^{-1}$  en el mes de marzo y una velocidad mínima de  $1.4 \text{ ms}^{-1}$  durante los meses de invierno. La temperatura del aire mostró un promedio anual de  $25.1 \text{ }^\circ\text{C}$ , con máximos durante la temporada de secas (primavera) hasta inicios de lluvias (verano), la temperatura máxima fue de  $28 \text{ }^\circ\text{C}$ . Por otra parte, las temperaturas mínimas se observaron durante los meses de invierno, principalmente durante el mes de enero con un mínimo de  $19.5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Respecto a la humedad relativa se observó un promedio anual de 82.7%, un mínimo de 60.1% y máximos superiores a 90% (máximo de 91.8%). La presión atmosférica tuvo oscilaciones significativas durante los meses de noviembre a abril.

Al comparar la variabilidad atmosférica entre los tres años de estudio (1996, 2016 y 2036) (Figura 49) se observó que la presión atmosférica y la dirección del viento mostraron un patrón similar al observado en 1996. En cuanto a la temperatura del aire se observó un aumento en el promedio anual de  $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$  para el 2016 y el 2036, en la temperatura máxima se observó un aumento de  $0.07 \text{ }^\circ\text{C}$  para 2016 y de  $0.12 \text{ }^\circ\text{C}$  para 2036, con respecto a 1996. La temperatura mínima se conservó  $\sim 19.5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Respecto a la humedad relativa, se encontró una disminución para 2016 con respecto a 1996, la humedad máxima disminuyó 0.68%, la

humedad mínima disminuyó 0.93% y el promedio de humedad anual disminuyó 1.04%. Mientras que para el 2036, la humedad relativa se encontró entre los valores de 1996 y 2016.

Por otra parte, analizando la magnitud del viento, se observó que la velocidad mínima y máxima disminuyó progresivamente, en el caso de la velocidad mínima para 2016 disminuyó 0.03  $\text{ms}^{-1}$  y para 2036 disminuyó 0.04  $\text{ms}^{-1}$ , con respecto a 1996. La velocidad máxima para el 2016 disminuyó 0.61  $\text{ms}^{-1}$  y para el 2036 disminuyó 0.48  $\text{ms}^{-1}$  con respecto a 1996. En cuanto al promedio anual, disminuyó 0.13  $\text{ms}^{-1}$  para 2016 y 0.1  $\text{ms}^{-1}$  para 2036 respecto 1996.

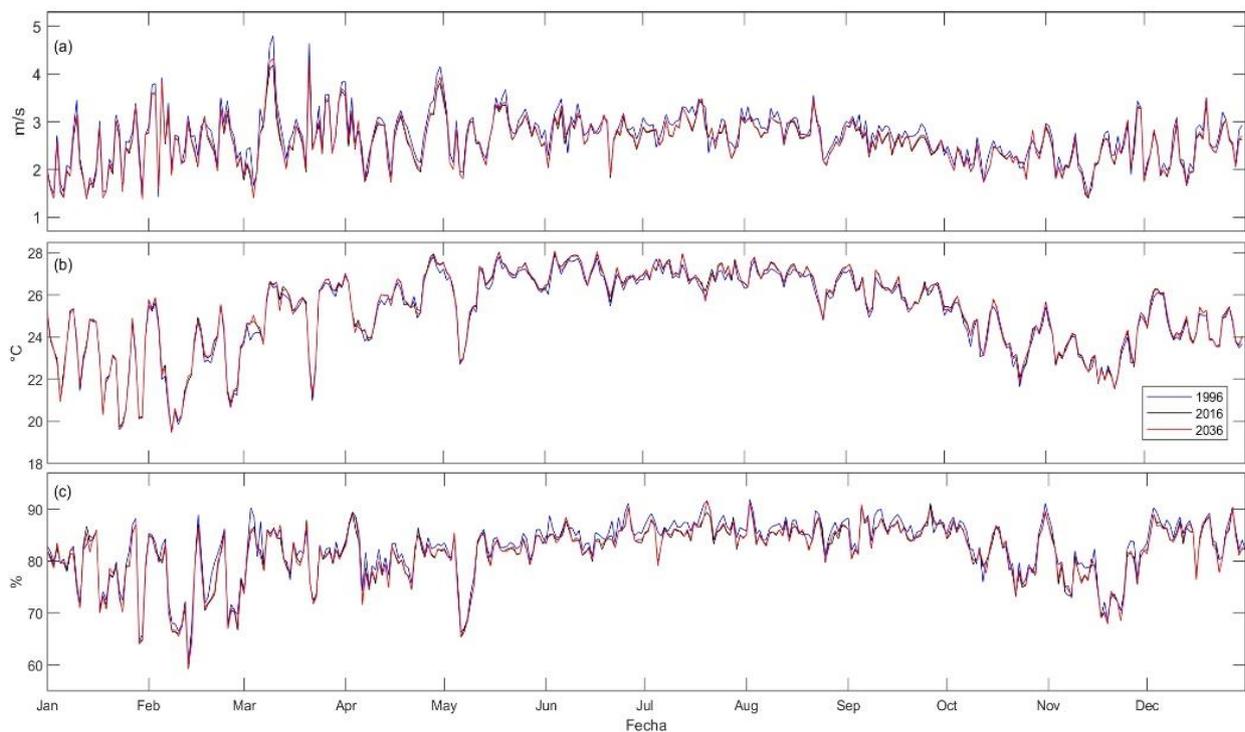


Figura 49. Variables atmosféricas en la localidad Mérida, Yucatán. (a) Magnitud de la velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), (b) temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ) y (c) humedad relativa (%) promediadas dentro de los polígonos. Las series de tiempo muestran los datos cada 24 hrs, para 1996 (azul), 2016 (negro) y 2036 (rojo).

Al obtener las diferencias de las series de tiempo de la temperatura del aire (Figura 50) y la magnitud del viento (Figura 51), se observó que para la temperatura durante el periodo de 1996-2016 el promedio de las diferencias fue de  $-0.13^{\circ}\text{C}$  con una SD de  $0.48^{\circ}\text{C}$ . Entre 2016 y 2036 el promedio de las diferencias fue de  $0.02^{\circ}\text{C}$  y de la SD de  $0.28^{\circ}\text{C}$ . Lo anterior sugiere que el CUS más significativo respecto a la temperatura que ocurrió en Mérida fue de 1996

a 2016, donde el rango de las diferencias oscila entre  $-0.12$  y  $0.58$  °C. Cabe señalar que durante el periodo de 1996-2036 las diferencias en la temperatura tienen un promedio de  $0.1$  °C, con una SD  $0.39$  °C. Al aplicar la prueba de t-Student se obtuvo que existen diferencias significativas en el periodo de 1996 a 2016, del mismo modo que para el periodo de 1996 a 2036, sin embargo, durante el periodo de 2016 a 2036 no se presentaron diferencias significativas. Además, se observó que la temperatura fue mayor en el año 2016.

Respecto a la magnitud del viento, se encontró que las diferencias para el periodo de 1996-2016 tienen un promedio de  $0.13$   $\text{ms}^{-1}$  y una SD de  $0.41$   $\text{ms}^{-1}$ , en comparación al periodo de 2016-2036, donde el promedio de las diferencias fue de  $-0.02$   $\text{ms}^{-1}$  con una SD de  $0.11$   $\text{ms}^{-1}$ . Finalmente, entre el periodo de 1996-2036 se obtuvo un promedio de  $0.1$   $\text{ms}^{-1}$  y una SD  $0.39$   $\text{ms}^{-1}$ . En la prueba t-Student se mostraron diferencias significativas para el periodo de 1996-2016 y de 1996-2036, mientras que para el periodo de 2016-2036 no se observaron diferencias significativas. Lo anterior coincide con los resultados obtenidos en la prueba t-Student de la temperatura. Además, se observó que la magnitud del viento fue disminuyendo a lo largo del tiempo, lo cual sugiere la influencia del CUS en la magnitud de la velocidad del viento, asociado a un aumento en la fricción superficial.

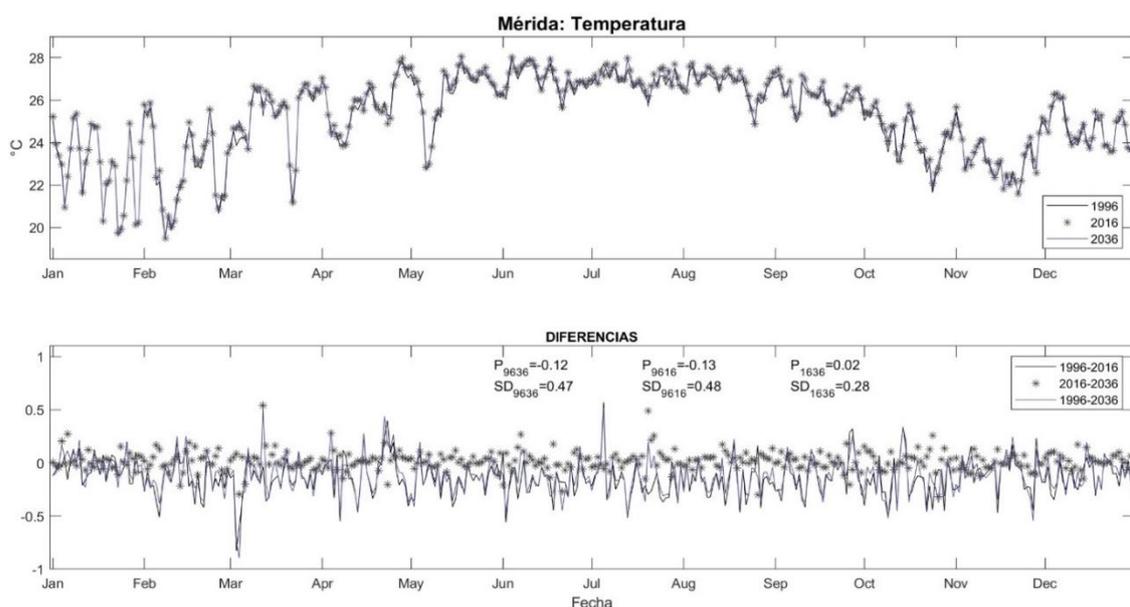


Figura 50. (a) Series de tiempo de la temperatura del aire a 2 m (°C) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años, para la localidad de Mérida, Yucatán. Se indican los promedios y las desviaciones estándar para cada diferencia.

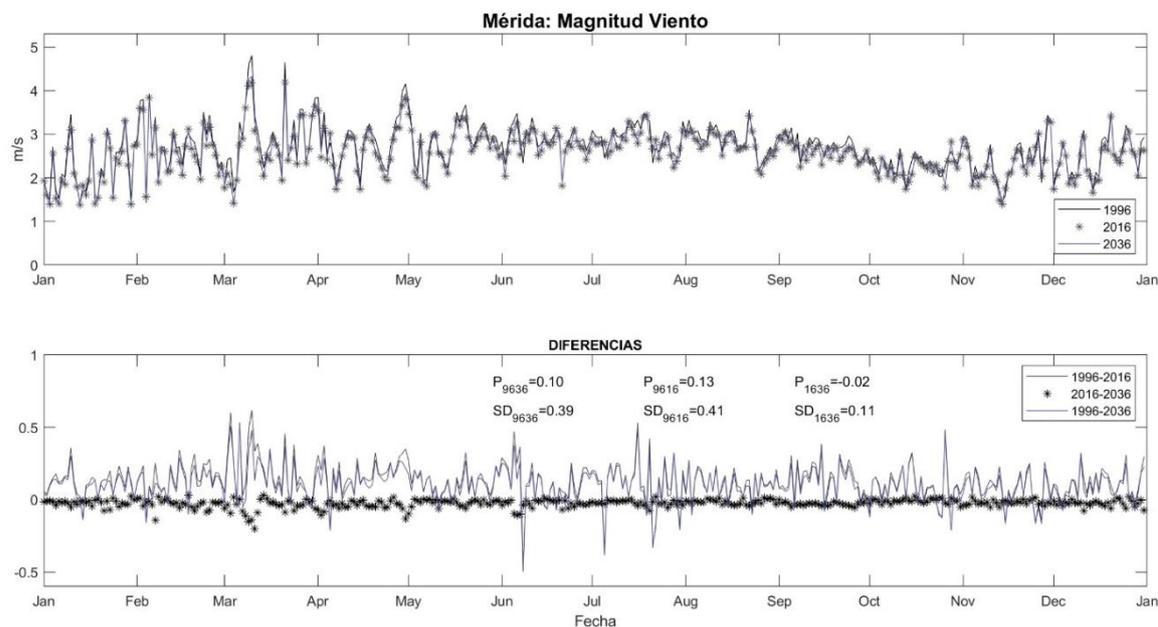


Figura 51. (a) Series de tiempo de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años, para la localidad de Mérida, Yucatán. Se indican los promedios y las desviaciones estándar para cada diferencia.

### Variabilidad estacional

De acuerdo con los promedios estacionales obtenidos para la localidad de Mérida (Anexo 3, Figuras A-107 a A-111) se observa que la temperatura del aire en el área urbanizada tuvo un aumento significativo, principalmente en la zona norte y noroeste de la ciudad.

Lo anterior es más evidente para el periodo de 1996-2036, en donde el polígono de crecimiento de la ciudad muestra el efecto de isla de calor, efecto mostrado en las localidades de Campeche, Playa del Carmen y Cancún. Los promedios estacionales de la temperatura del aire (Figura 52) entre los años 1996-2016, muestran diferencias importantes en la zona noroeste de la ciudad de entre 0.3-0.4 °C en los meses de invierno y de hasta 0.6 °C en los meses de verano. Durante el periodo de 2016 a 2036 las principales diferencias en el área urbanizada oscilaron alrededor de ~0.3 °C en la mayor parte del año, alcanzando diferencias máximas de 0.5 °C en los meses de verano. Por lo que, entre el periodo de 1996-

2036 mostraron diferencias de hasta  $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  en los meses de verano principalmente al noroeste de la ciudad.

Con respecto a la magnitud del viento, se observó que la velocidad del viento disminuye o aumenta de acuerdo al crecimiento de la zona urbana. Se observó que en los meses de primavera y verano, la velocidad del viento alrededor de la ciudad es mayor que en otoño e invierno. Las diferencias de la magnitud del viento (Figura 53) durante el periodo de 1996-2016 muestran cambios significativos al suroeste de la ciudad, con diferencias entre  $0.5\text{ ms}^{-1}$  y  $1\text{ ms}^{-1}$ , siendo los meses de primavera y verano donde se observaron las diferencias más significativas. Entre el 2016 y el 2036 en el polígono de la ciudad se presentaron diferencias menores a  $0.25\text{ ms}^{-1}$ . Sin embargo, durante el periodo de 1996-2036 se observa el mismo patrón en las diferencias de la magnitud del viento que en el periodo de 1996-2016, donde los principales cambios en la velocidad del viento se observan en la zona suroeste de la ciudad. Lo anterior sugiere, una intensificación local del viento como resultado del gradiente térmico que se forma sobre la isla de calor.

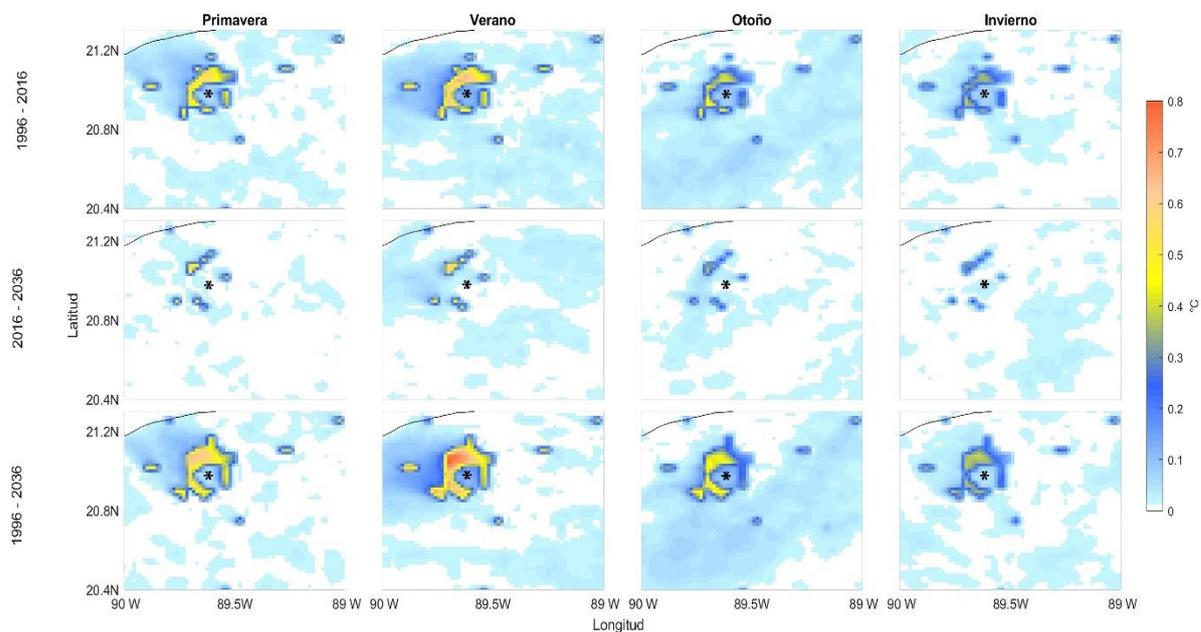


Figura 52. Diferencias espaciales de la temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) para la localidad de Mérida, Yucatán, promediada estacionalmente. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Mérida en la Península de Yucatán.

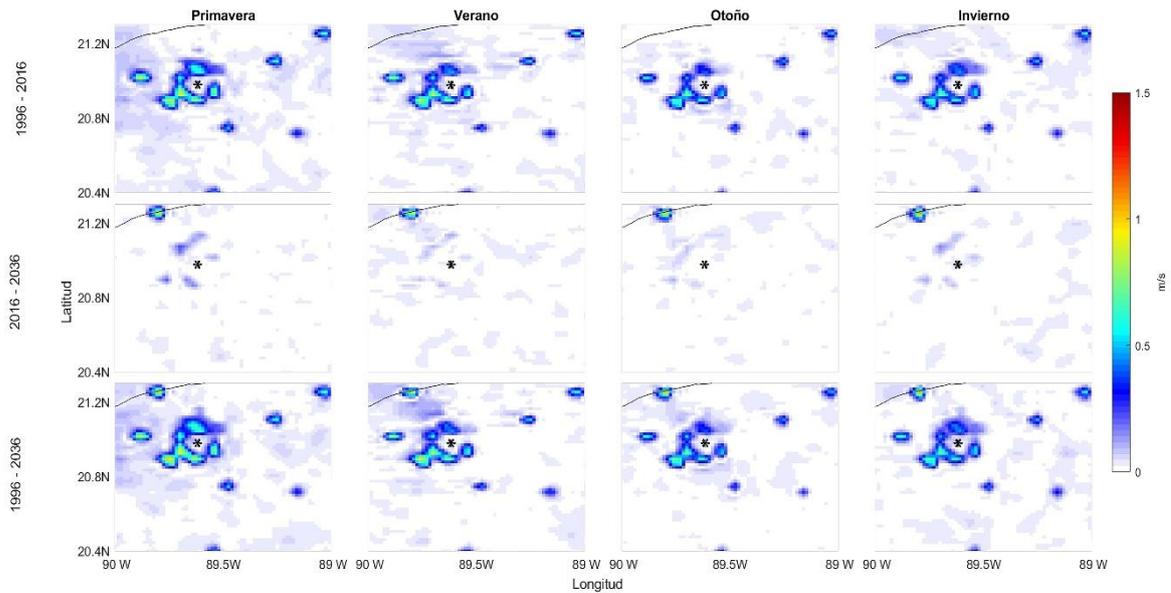


Figura 53. Diferencias espaciales de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para la localidad de Mérida, Yucatán, promediada estacionalmente. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Mérida en la Península de Yucatán.

#### 4.2 SIMILITUDES Y SU RELACIÓN CON EL CUS

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que el cambio en la cobertura del suelo modifica al menos dos de las principales variables que determinan la dinámica atmosférica local. En este sentido, la expansión urbana implica una mayor absorción de calor sobre la superficie terrestre. Lo anterior sugiere un aumento del calor sensible y por lo tanto un cambio en la variabilidad de las condiciones atmosféricas. Las principales variables son: temperatura del aire (aumento en la temperatura de la superficie terrestre), magnitud del viento (cambio de la magnitud y dirección) y humedad relativa (una menor humedad superficial) (Barrales Hassan, 2017; Navarro Tec et al., 2018).

Respecto a la temperatura del aire, un efecto evidente observado en cuatro sitios de estudio es la denominada isla de calor o también llamada isla de calor urbana (ICU). Este efecto se observó principalmente en las localidades de Campeche, Playa del Carmen, Cancún y Mérida, mismo que se amplifica en 2016 y en la proyección propuesta para 2036. Este fenómeno se caracteriza por delimitar su efecto sobre la superficie de las zonas urbanizadas, siendo de menor intensidad en la periferia de la ciudad. Esta ICU es el

resultado del cambio en la cobertura del suelo por el proceso de urbanización y por las actividades que se realizan en la misma ciudad. La primera se caracteriza por cubrir las superficies con materiales impermeables (asfalto, concreto), y la segunda está relacionada principalmente con el transporte y la industria, donde éstas últimas por medio de emisiones térmicas contribuyen al calentamiento urbano (Villanueva Solis et al., 2013; Primo Salazar, 2015). En este sentido, la ICU se ve favorecida cuando el tiempo está en calma (vientos débiles) y sin nubosidad ya que difícilmente se dispersa el calor almacenado, contrariamente, los días con vientos fuertes y nubosidad ayudan a disminuir el efecto de la isla de calor (Barrales Hassan, 2017).

Respecto a la magnitud del viento, los componentes principales que explican un cambio son: 1) La fricción por la rugosidad superficial, 2) el gradiente térmico tierra-mar, el cual involucra una dinámica local (brisas marinas y terrestres) y 3) la intervención de los flujos de calor relacionados con la urbanización (isla de calor) (Piccolo y Campo, 1994; Taylor Espinosa, 2009; Carvalho et al., 2014; Primo Salazar, 2015; Barrales Hassan, 2017). Por lo que, al expandir el área urbana la rugosidad de la superficie aumenta, dando lugar a un aumento de la fricción en la capa límite de la atmósfera y ocasionando que los vientos en superficie disminuyan su magnitud. Ya que, un terreno más plano o menos rugoso significa menor resistencia entre la superficie y la atmósfera, esto daría lugar a velocidades del flujo en superficies más altas.

Sin embargo, hubo casos en los que la magnitud del viento aumentó, como es el caso de la ciudad de Cancún, en donde la fricción no fue significativa con relación al efecto del gradiente térmico por el cambio en la cobertura urbana. Lo anterior sugiere que al amplificarse el efecto de la isla de calor se generó un aumento en el gradiente térmico de la zona urbana y sus alrededores y por lo tanto se observó un incremento en la magnitud del viento (Barrales Hassan, 2017). Cuando se presenta el aumento en la magnitud del viento, las propiedades de las masas de aire que se mueven son distintas a las del aire circundante, lo que produce un cambio en la humedad y en la presión (Taylor Espinosa, 2009).

## 5. CONCLUSIONES

El ser humano constantemente deja cierta huella en el planeta pues su influencia sobre el medioambiente causa principalmente un impacto en los recursos ecosistémicos por medio de factores transformadores como es el CUS. Estos factores son derivados de las actividades antropogénicas como los asentamientos humanos, el turismo, la industria, el aprovechamiento forestal, el transporte, la agricultura, entre otras. En conjunto, todas estas actividades tienen un impacto directo en las condiciones meteorológicas y por lo tanto en la dinámica atmosférica. El análisis de las variables atmosféricas en las 6 ciudades de estudio muestra que el CUS en la PY perturba esta dinámica local y da lugar a fenómenos como: la isla de calor en la zona urbanizada, efecto sobre la magnitud del viento causado por la fricción y el gradiente térmico, así como cambios en la humedad del aire.

En este sentido, en ciudades con gran extensión urbana como Cancún y Mérida la existencia de cambios en las condiciones atmosféricas locales fue evidente, principalmente en la temperatura del aire, la cual aumentó y provocó un efecto de ICU, respecto a 1996. En la magnitud del viento, se observó principalmente un efecto de fricción causado por la rugosidad superficial de cada ciudad, lo cual provocó una disminución en su magnitud. Con excepción de la localidad de Progreso y el caso de la ciudad de Cancún para el periodo de 1996-2016, donde se observó un aumento en la magnitud del viento debido al incremento en el gradiente térmico. Por un lado, este aumento en el gradiente térmico se debe a la interacción tierra-mar de la zona costera y por otro lado al efecto de isla de calor en Cancún. Este incremento resultó tener un efecto mayor que el efecto de la fricción en superficie. Lo anterior muestra la interacción que existe entre las variables atmosféricas, donde si una de las variables atmosféricas cambia, ésta puede perturbar la física de otras variables, dando lugar a un cambio en la dinámica local. En el caso de considerar escenarios de cambio climático se espera que estas variables se vean significativamente impactadas, ya que las proyecciones climáticas consideran un aumento en la temperatura del aire hasta de 2°C/100 años. Lo que afectaría la dinámica de la circulación atmosférica no sólo en una escala local sino a una escala regional.

De acuerdo a la validación de las simulaciones numéricas realizadas con el WRF y considerando el mapa de uso de suelo actualizado al 2016, en general se representó

adecuadamente la variabilidad de las principales variables de estudio, ya que de acuerdo al análisis estadístico, éstas se encontraron dentro de los rangos aceptables. Por lo anterior, se puede decir que los resultados obtenidos en este trabajo, ofrecen información estimada de lo que ha ocurrido y podría ocurrir en los procesos locales de la atmósfera en las zonas urbanizadas más importantes de la PY. Con los resultados obtenidos en este trabajo se puede decir que en un futuro, no muy lejano, si se continúa con la misma tasa de cambio en la modificación del US por urbanización, las condiciones atmosféricas locales podrían resultar impactadas significativamente.

Cabe señalar que para este estudio únicamente se consideró el CUS ocasionado por el crecimiento poblacional, sin embargo, falta mucha investigación acerca del CUS asociado a otras actividades económicas en al PY, como lo es la agricultura, ganadería, deforestación, entre otros. Otra limitación, fue que en este análisis solo se realizaron simulaciones de un año, por cada caso de estudio. Por lo anterior, para tener un análisis integral de los impactos en la dinámica atmosférica es necesario considerar un mayor número de escenarios de CUS, más años de simulaciones numéricas y el análisis de otras variables que puedan servir como indicadores de cambio. De acuerdo a lo observado en este estudio se sugiere el análisis de flujos de calor (onda larga y onda corta), la capa límite (interacción superficie atmósfera, flujo turbulento), efecto de la rugosidad en superficie, patrones de precipitación, así como la composición atmosférica, ya que todas estas variables podrían tener un efecto o verse modificadas o impactadas por un cambio de US.

Debido a que cinco de las ciudades de estudio se encuentran en la zona costera, el manejo costero integrado (MCI) es indispensable para asegurar el bienestar socio-ecológico y un desarrollo sostenible en la zona costera tanto local como regional. Con base en ello, estudiar estos impactos es una necesidad socioeconómica, política y ambiental, puesto que al reconocer los riesgos que podrían ocurrir en un futuro en la dinámica de la atmósfera y las consecuencias ambientales asociadas, hace imprescindible tomar acciones, gestionando y planificando adecuadamente el US en la PY. Es necesario que los tomadores de decisiones tengan en cuenta los impactos del CUS en las variables atmosféricas, de tal forma que la propia dinámica del sistema pueda responder de manera adecuada a estos cambios y no como eventos extremos que tengan consecuencias negativas al socioecosistema.

Este trabajo puede ayudar a futuras investigaciones sobre los cambios que sufrirán las variables atmosféricas por un CUS, así como ayudar a la planeación urbana en las seis localidades de estudio, mediante planes de ordenamiento territorial que consideren y estimen los posibles impactos en las variables atmosféricas frente a una rápida urbanización.

## 6. REFERENCIAS

1. Acevedo Rojas, I. R. (2017). Cambio de usos de suelo en la selva húmeda de Los Tuxtlas y su efecto en el microclima y propiedades físico-químicas del suelo. UNAM. Tesis de Licenciatura.
2. Alanis Anaya, R. M. (2018). Influencia del cambio de uso de suelo en la inestabilidad de ladera en la subcuenca del río Chiquito-Barranca del Muerto, Volcán Pico de Orizaba. UNAM. Tesis de Doctorado.
3. Alomar Garau, G. (2013). Las brisas marinas y su significación geográfica. El caso de Mallorca. SEMATA, Ciencias Sociais e Humanidades, ISSN 1137-9669, vol. 25: 7-28.
4. Alonso Velasco, I. & Velásquez Torres, D. (2019). El contexto geopolítico de la explotación forestal en la Península de Yucatán, México. *Perspectiva Geográfica*, 24(1). 10.19053/01233769.8427
5. Andrade, R. D., Torres, R., Montes, E. J., Pérez, O. A., Restan, L. E. y Peña, R. E. (2009). Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa de níspero (*Achras sapota* L.). *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*. 26: 591-604.
6. Aquino-Martínez, L.P.; Quintanar, A.I.; Ochoa-Moya, C.A.; López-Espinoza, E.D.; Adams, D.K.; Jazcilevich-Diamant, A. (2021). Urban-Induced Changes on Local Circulation in Complex Terrain: Central Mexico Basin. *Atmosphere*. 12: 904. <https://doi.org/10.3390/atmos12070904>
7. Ballester Díez, F., Tenías, J. M. y Pérez-Hoyos, S. (1999). Efectos sobre la salud de la contaminación del aire: una introducción. *Revista Española de Salud Pública*, 73 (2), 109-121.
8. Bautista F. y Palacio G., y colaboradores. (2012). Parte III. Regionalización edáfica del territorio de México. Capítulo 24. Península de Yucatán.
9. Barrales Hassan, R. G. (2017). Impacto del cambio de uso de suelo y cobertura vegetal en el pronóstico numérico del tiempo. UNAM. Tesis de Licenciatura.
10. Beljaars, A. C. M. (1995). The parametrization of surface fluxes in large-scale models under free convection. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 121, 255-270. <https://doi.org/10.1002/qj.49712152203>
11. Biología y Geología. (s/a). Ciencias de la naturaleza. La energía externa. Página web. Recuperado a partir de: <http://biogeo.esy.es/BG2ESO/repartodesigual.htm>
12. Bueno-Hurtado, P., López-Santos, A., Sánchez-Cohen, I., Velásquez-Valle, M. A. y González-Barrios, J. L. (2015). Cambios de uso de suelo y sus efectos sobre la dinámica de GEI en el estado de Durango, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(4), 75-84.
13. Buffo, F. y Verdiell, A. (2004). La descomposición en valores singulares: un enfoque geométrico y aplicaciones. Departamento de Matemática, Universidad Nacional del Sur, Argentina.
14. Capurro, L. (2002). Huracanes, tifones, baguíos, willy-willies y ciclones *Revista del Centro de Investigación*. Universidad La Salle. Universidad La Salle Distrito Federal, México. 5:13-22.
15. Caballero, M., Lozano, S. y Ortega, B. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista digital Universitaria*. 8(10). ISSN: 1067-6079.

16. Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M. y Silva-Santos, C. (2014). Sensitivity of the WRF model wind simulation and wind energy production estimates to planetary boundary layer parameterizations for onshore and offshore areas in the Iberian Peninsula. *Elsevier Applied Energy* 135 234-246.
17. Castillo Sierra, O. C. (2018). Dinámica atmosférica de los precursores del smog fotoquímico en la zona metropolitana de la Ciudad de México. UNAM. Tesis de licenciatura.
18. CCPY. (s/a). Agenda de la Península de Yucatán. Página web. Recuperado en agosto 2021, de: <http://www.ccpy.gob.mx/agenda-regional/>
19. Chiappa Carrara, X. y Guadarrama Chávez, P. (2013). La investigación a la orilla del mar, la UNAM llega a Sisal. *Revista Ciencias* 107-108.
20. Chimot, J. (2018). Global mapping of atmospheric composition from space – Retrieving aerosol height and tropospheric NO<sub>2</sub> from OMI, PhD book, Delft University of Technology (TU Delft), The Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI). DOI 10.4233/uuid:80c62d6f-0a60-4e96-9554-841ddcd506c0
21. CONAGUA. (s/a). Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS) versión 2014 – 2017. Recuperado en agosto 2020, de: <https://smn.conagua.gob.mx/es/estaciones-meteorologicas-automaticas>
22. CONAGUA (2017). Meteorología en Yucatán. Antecedentes históricos de la meteorología. Recuperado en marzo 2020, de: <https://www.gob.mx/Kaconagua/acciones-y-programas/clima>
23. Cuevas, M. L., Garrido, A., Pérez, D. J. L. e Iura Gonzales, D. (2010). Procesos de cambio de uso de suelo y degradación de la vegetación natural. *Las cuencas hidrográficas de México*. 96-103.
24. CUAED-UNAM (2014) Capas de la atmósfera y composición del aire. Página Web. Recuperado a partir de: [http://dione.cuaed.unam.mx/maquetacion/baunamAsignatura/modulo1\\_plantilla/asignatura/unidad2/estructura.html](http://dione.cuaed.unam.mx/maquetacion/baunamAsignatura/modulo1_plantilla/asignatura/unidad2/estructura.html)
25. Duarte, C. M., Alonso, S., Benito, G., Dachs, J., Montes, C., Pardo, M., Ríos, A. F., Simó, R. y Valladares, F. (2006). Cambio Global: Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra. Colección divulgación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Madrid, España. ISBN: 978-84-00-08452-3 NIPO: 653-06-073-7.
26. Dudhia, J. (1989). Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon experiment using a mesoscale Two-dimensional model. *Journal of the Atmospheric Sciences*. Vol. 46, No 20.
27. Durán R. y M. Méndez (Eds). (2010). Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA.
28. Dyer, A. J. y Hicks, B. B. (1970). Flux-gradient relationships in the constant flux layer. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 96: 715–721. <https://doi.org/10.1002/qj.49709641012>
29. ECMWF. (2006). ERA-Interim, Daily. Recuperado en agosto 2020, de: <https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>

30. Ellis, E. A., Hernández-Gómez, I. U. y Romero-Montero, J. A. (2017). Los procesos y causas del cambio en la cobertura forestal de la Península de Yucatán. *Ecosistemas* 26(1): 101-111. Doi.: 10.7818/ECOS.2017.26-1.16
31. Fonseca, R., Tieh-Yong Koh y Chee-Kiat Teo. (2019). Multi-scale interactions in a high-resolution tropical-belt experiment and observations. *Climate Dynamics* 52:3503-3532 <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4332-y>
32. Galicia, L., García Romero, A., Gómez Mendoza, A. y Ramírez, M. I. (2007). Cambio de uso de suelo y degradación ambiental. *Revista Ciencia: Académica Mexicana de Ciencias*. 58 (4).
33. García Benítez, M., Adame Martínez, S. y Alvarado Granados, A. (2017). Urbanización e impacto de los ciclones tropicales en la ciudad de Progreso de Castro, Yucatán. *Nova scientia*, 9(19): 819-849. <https://doi.org/10.21640/ns.v9i19.1133>
34. George Chacon, S. P., Reyes Palomeque, G., Huechacona Ruiz, A., Villanueva Pérez, I., Solórzano Robredo, N., Virgilio Hernández, M., Andrés Mauricio, J., Ramírez Medina, M., Tun-Dzul, F. y Hernández Stefanoni, J. L. (2019). El tiempo pasa y el cambio en las ciudades es notable. Caso de estudio en dos fraccionamientos de la Ciudad de Mérida, Yucatán. *Herbario CICY 11*: 244-250. ISSN: 2395-8790.
35. Gobierno del municipio de Campeche (2012). Programa de ordenamiento ecológico del territorio del municipio de Campeche.
36. Gobierno de Yucatán. (s/a). Cambio climático en la Península de Yucatán. Página web. Recuperado en agosto 2021, de: <https://sds.yucatan.gob.mx/cambio-climatico/index.php>
37. Google Earth Pro (2019). Aplicación web.
38. Gunwani, P. y Mohan, M. (2017). Sensitivity of WRF model estimates to various PBL parameterizations in different climatic zones over India. *Atmos. Res.* 194:43-65.
39. Hartmann, D. L. (2015). *Global physical climatology*. 2da edición. ELSEVIER. ISBN: 978-0-12-328531-7
40. Hernández Martínez, A. (2009). Dinámica de metales pesados y corrosión atmosférica en la zona metropolitana de la Ciudad de México. UNAM. Tesis de licenciatura.
41. Herrera Serna, P. (2018). Análisis del desarrollo y crecimiento del sector turismo como forma de desarrollo en la región Caribe de Quintana Roo, caso de estudio Playa del Carmen 1999- 2015. UNAM. Tesis de licenciatura.
42. Herrera Silveria, J. A., Comín S., F. A. y Capurro F., L. (2005). Manejo Costero en México. Caso de estudio: Acciones de manejo costero Golfo de México. Los usos y abusos de la Zona Costera en la Península de Yucatán.
43. Hong, S.-Y., Dudhia, J., Chen, S.-H. (2004). A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation. *Mon. Weather Rev.* 132: 103-120. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0103:aratim>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0103:aratim>2.0.co;2)
44. Hong, S.-Y., Noh, Y., Dudhia, J. (2006). A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Mon. Weather Rev.* 134: 2318-2341. <https://doi.org/10.1175/mwr3199.1>

45. Ibarra Marinas, D. y Belmonte Serrato, F. (2017). Comprendiendo el litoral: Dinámica y procesos. Figura obtenida de Coastal Engineering Research Center (1994).
46. INEGI. (2015). México en cifras. Recuperado a partir de: <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/default.aspx>
47. INEGI. (2016). Mapas: Conjunto de datos vectoriales de Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI. Capa Unión. Recuperado a partir de: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463173359>
48. INEGI. (2017). Carta del uso de suelo y vegetación Serie VI. Recuperado a partir de: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2017/especiales/especiales2017\\_12\\_01.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2017/especiales/especiales2017_12_01.pdf)
49. INEGI. (2019). Cuéntame INEGI. Recuperado a partir de: <http://cuentame.inegi.org.mx/#>.
50. INEGI (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. Recuperado a partir de: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
51. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2017). Escenarios de cambio climático. Recuperado a partir de: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/escenarios-de-cambio-climatico-80126>
52. IPCC. (2001). TAR Cambio Climático 2001. 3er Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
53. IPCC. (2013). Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo Ial Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F.,D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
54. IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis, resumen para responsables de políticas. Quinto informe de la evaluación del IPCC.
55. IPCC. (2018). Resumen para responsables de políticas. En: Calentamiento global de 1.5°C. Un Informe Especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1.5°C por encima de los niveles preindustriales y las vías globales relacionadas con las emisiones de gases de efecto invernadero, en el contexto del fortalecimiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos para erradicar la pobreza. Sexto informe de la evaluación del IPCC.
56. Kain, J. S. (2004). The Kain-Fritsch convective parametrization: An unupdate. *Journal of Applied Meteorology*. Vol. 43, 170-181.
57. Llamas, R. M., y Colditz, R. R. (2017). Análisis del cambio de cobertura de suelo en la Península de Yucatán de 1995 a 2010. *UD Y La geomática*, (10): 37-44.
58. Llerena, C. A. (1991). Contaminación atmosférica, efectos invernadero y cambios climáticos: sus impactos forestales. *REVISTA FORESTAL DEL PERÚ*: 18(2): 101-135.

59. López-Espinoza, E.D.; Zavala-Hidalgo, J.; Mahmood, R.; Gómez-Ramos, O. (2020). Assessing the Impact of Land Use and Land Cover Data Representation on Weather Forecast Quality: A Case Study in Central Mexico. *Atmosphere*. 11: 1242. <https://doi.org/10.3390/atmos1111242>
60. López-Jiménez, L. N., Durán-García, R. y Dupuy-Rada, J. M. (2019). Recuperación de la estructura, diversidad y composición de una selva mediana subperennifolia en Yucatán, México. *Madera y bosques*, 25(1): e2511587. <https://dx.doi.org/10.21829/myb.2019.2511587>
61. López Méndez, J. V. (2009). Análisis del evento meteorológico del 2007 relacionado con la inundación de Tabasco. UNAM. Tesis de Maestría.
62. Lozano, L. F. (2020) ¿Se arruino tu cumple? Cancún festeja 50 años en cuarentena. *Revista Forbes México*. Página web. Recuperado a partir de <https://www.forbes.com.mx/noticias-cancun-cumpleanos-50-aniversario-covid19/>
63. Mc Coy Cador, C. E. y Sosa Ferreira, A. P. (2016). Causas y efectos de un destino no sustentable: Caso playas públicas de Cancún, Quintana Roo. *El periplo sustentable*, (31): 00006.
64. Meza Carreto, J. (2018). Evaluación del desempeño del modelo WRF para reproducir las variaciones de la temperatura en México durante la década de los 80. UNAM. Tesis de Maestría.
65. Morales Rayo, J. (2018). Predicción de inundaciones en zonas urbanas basada en información del modelo WRF. UNAM. Tesis de Maestría.
66. Navarro Tec, S., Orozco del Castillo, M. G., Valdiviezo Navarro J. C., Ordaz Bencomo, D. R., Moreno Sabido, M. R. y Bermejo Sabbagh, C. (2018). Análisis del crecimiento urbano y su relación con el incremento de temperaturas en la ciudad de Mérida utilizando imágenes satelitales. *Research in Computing Science* 147(7): 285–294 ISSN 1870-4069.
67. NOAA glossary. (1999). Glosario de Introducción a las mareas oceánica. Página web. Recuperado a partir de: [https://www.meted.ucar.edu/glossaries/tidesgloss\\_es.htm](https://www.meted.ucar.edu/glossaries/tidesgloss_es.htm)
68. Ochoa Jiménez, C., Camacho Sanabria, J., Chávez Alvarado, R., Juan Pérez, J. I. y Servón, P. (2020). Expansión urbana y cambios de cobertura/uso del suelo en playa del Carmen, Quintana Roo, México (1985-2015). *Geografía y Sistemas de Información Geográfica*. 1-18.
69. OEA. (1993). Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado. Organización de los Estados Americanos (OEA). Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente Secretaría Ejecutiva para Asuntos Económicos y Sociales Organización de Estados Americanos. Con el Apoyo de la Oficina de Asistencia para Desastres en el Extranjero Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional. Recuperado a partir de: <https://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea65s/begin.htm#Contents>
70. Orellana Lanza, R., Espadas Manrique, C., Conde Álvarez, C. y Gay García, C. (2009). Atlas: Escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán. ISBN 978-607-7823-01-8. Recuperado a partir de: <http://www.ccpy.gob.mx/agenda-regional/escenarios-cambio-climatico/atlas/>
71. Palacios Hernández, E., Carrillo, L., Meza Romero, S. I. y Ávalos Cueva, D. (2017). Variabilidad espacio temporal de la temperatura superficial del mar, en el Mar Caribe. *Ra Ximhai*. Universidad Autónoma Indígena de México El Fuerte, México. 13(3): 243-265.

72. Pardo Buendía, M. (2007). El impacto social del cambio climático. Universidad Carlos III de Madrid. Editorial Fundación de las Cajas de Ahorros (FUNCAS). ISSN: 1699-6852. URI: <http://hdl.handle.net/10016/10448>
73. Piccolo, M. C. y Campo, A. M. (1994). Modificación de la morfología urbana en Bahía Blanca y su efecto sobre el viento. CONICET, Universidad Nacional del Sur.
74. PNUD México INECC. (2016). Elementos para una estrategia regional de adaptación al cambio climático en la Península de Yucatán. Proyecto 86487 "Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México". Zorrilla Ramos, M. Recuperado a partir de: [http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/publicaciones/291/904\\_2016\\_Estrategia\\_Adaptacion\\_CC\\_Yuc.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/publicaciones/291/904_2016_Estrategia_Adaptacion_CC_Yuc.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
75. Primo Salazar, A. (2015). Variabilidad de la temperatura y de la precipitación, en la ciudad de Toluca, Estado de México. Periodo 1970-2013. Universidad Autónoma del Estado de México. Tesis de Licenciatura.
76. Programa de Desarrollo Urbano de Cancún (2014). Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población Cancún, Municipio Benito Juárez, Quintana Roo (2014-2030). 281 pp.
77. Programa Municipal de Desarrollo Urbano (2010). Programa Municipal de Desarrollo Urbano de Solidaridad 2010-2050.
78. Rey W, Martínez-Amador M, Salles P, et al (2020). Assessing different flood risk and damage approaches: a case of study in Progreso, Yucatan. Mexico J Mar Sci Eng 8:137. <https://doi.org/10.3390/jmse802013>
79. Reyes Aquino, J. J. (2013). Potencial eólico del litoral superior de la Península de Yucatán. Universidad de Quintana Roo. División de Ciencias e Ingeniería. Tesis de Ingeniería.
80. Rivera Arriaga E. y colaboradores. (2004). Lineamientos para el desarrollo de una estrategia Nacional para la implementación de planes de manejo de la zona costera y marina en los ámbitos nacional, regional, estatal, y municipal. SEMARNAT y Centro EPOMEX-Universidad Autónoma de Campeche. Clave: DGRMIS-DAC-103/2004
81. Rivera Martínez, S. L. (2018). Análisis del uso de suelo y vegetación en México entre 1968 y 2011 para su uso en un modelo de pronóstico meteorológico. UNAM. Tesis de Ingeniería. Ciudad de México, México.
82. Rodríguez Eraso, N., Pabón Caicedo, J. D., Bernal Suárez, N. R. y Martínez Collantes, J. (2010). Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Universidad Nacional de Colombia y Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación. Bogotá, D. C., Colombia. ISBN: 978-958-8343-42-6.
83. Romero, H. y Vinagre, J. (1985). Topoclimatología de la cuenca del río Mapocho. Inform. geogr. Chile 32: 3- 30.
84. Rosete Vergés, F. A., Pérez Damián, J. L. y Bocco, G. (2008). Cambio de uso del suelo y vegetación en la Península de Baja California, México. Invest. Geog[online]. (67): 39-58. ISSN 2448-7279.

85. Rutllant, J., Fuenzalida, H., Torres, R., y Figueroa, D. (1998). Interacción océano-atmósfera-tierra en la Región de Antofagasta (Chile, 23 o S): Experimento DICLIMA. *Revista Chilena de Historia Natural*. 71: 405-427.
86. Sánchez Santillán, N., Signoret Poillon, M. y Garduño López, R. (2005). La Oscilación del Atlántico Norte: un fenómeno que incide en la variabilidad climática de México. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 7(2): 85-95.
87. Santillán, M. L. (2017). Alterar el suelo contribuye al cambio climático. *Ciencia UNAM, DGDC*. Página web. Recuperado a partir de: <http://ciencia.unam.mx/leer/633/alterar-el-suelo-contribuye-al-cambio-climatico>
88. SEMARNAT. (2013). Informe sobre la situación del medio ambiente en México: Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave y desempeño ambiental. Edición 2012. ISBN 978-607-8246-61-8.
89. SEMARNAT (s/a). Biodiversidad. Indicador básico. IC 6.3-5 Crecimiento Poblacional en la zona costera. Recuperado en noviembre 2019, de: [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores17/conjuntob/indicador/o6\\_biodiversidad/o3\\_oceanicos/6\\_3\\_5.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores17/conjuntob/indicador/o6_biodiversidad/o3_oceanicos/6_3_5.html)
90. Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Baker, D. M., Duda, M. G., Huang, X. Y., Wang, W. y Powers, J. G. (2008). A description of the advanced research WRF version 3. Nota técnica de NCAR NCAR / TN-475 + STR, doi: 10.5065 / D68S4MVH
91. Sotelo, L. S. (2000). La población en la región costera de México en la segunda mitad del siglo XX. *Investigaciones geográficas*, (41): 81-95. ISSN 2448-7279.
92. Taubman, S.J., Clough, S.A., Iacono, M.J., Brown, P.D. y Mlawer, E.J. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res. Atmos.* 102: 16663-16682. <https://doi.org/10.1029/97jd00237>
93. Taylor Espinosa, N. E. (2009). Análisis y visualización de la componente diurna de los vientos en el sur del Golfo de México. UNAM. Tesis de Licenciatura.
94. Taylor Espinosa, N. E. (2014). Estudio de la variabilidad diurna de los vientos en el sur del Golfo de México. UNAM. Tesis de Maestría.
95. Tewari, M., Chen, F., Wang, W., Dudhia, J., LeMone, M.A., Mitchell, K., Ek, M., Gayno, G., Wegiel, J. y Cuenca, R.H. (2004). Implementation and verification of the unified NOAH land surface model in the WRF model (Formerly Paper Number 17.5), in: 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction. 11-15.
96. topographic-map.com (s/a). Página web. Recuperado en agosto 2019, de: <https://es-py.topographic-map.com/maps/56bg/%Do%AE%Do%BA%Do%Bo%D1%82%Do%Bo%Do%BD/>
97. Torales Ayala, G. J. (2019). Cambios históricos en el paisaje costero de Sisal, Yucatán. Estudio comparativo de tres periodos: puerto de altura (1807-1871), puerto de cabotaje (1871-1931) y periodo ejidal (1931-1990). IPN. Tesis de maestría.

98. Torres Drego, A. (2011). Tasas de crecimiento poblacional (r): Una mirada desde el modelo matemático lineal, geométrico y exponencial. *CIDE digital*, 2(1): 143-162.
99. Torres Puente V. M. (2019). Tiempo, clima y los fenómenos atmosféricos: desde torbellinos hasta cambio climático. *Revista Digital Universitaria (RDU)*. 20(1). <http://doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2019.v20n1.a3>
100. Universidad de la República de Uruguay (2011). Circulación General de la Atmósfera. Elementos de meteorología y clima. Componente de circulación del clima. Facultad de Ciencias. Departamento de ciencias de la atmósfera. Página web. Recuperado en julio 2020, de: <https://www.rua.unam.mx/portal/recursos/ficha/2815/circulacion-general-de-la-atmosfera>
101. Uppala, S. M., Healy, S. B., Balmaseda, M. A., de Rosnay, P., Isaksen, L., van de Berg, L., Geer, A. J., McNally, A. P., Matricardi, M., Haimberger, L., Dee, D. P., Dragani, R., Bormann, N., Hersbach, H., Vitart, F., Kobayashi, S., Andrae, U., Beljaars, A. C. M., Poli, P., Monge-Sanz, B. M., Peubey, C., Thépaut, J.-N., Delsol, C., Hólm, E. V., Simmons, A. J., Köhler, M., Bechtold, P., Berrisford, P., Balsamo, G., Park, B.-K., Fuentes, M., Bidlot, J., Bauer, P., Tavolato, C., Kållberg, P. y Morcrette, J.-J. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system [WWW Document]. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* <https://doi.org/10.1002/qj.828>
102. Urrea Mariño, U. (2016). Sisal caso paradigmático de estudio: Practicas de vida y “basura”. *Revista Antropologías del Sur* N°5, 157-171 pp.
103. Villanueva-Solis, J., Ranfla, A. y Quintanilla-Montoya, A. L. (2013). Isla de Calor Urbana: Modelación Dinámica y Evaluación de medidas de Mitigación en Ciudades de Clima árido Extremo. *Información tecnológica*, 24(1): 15-24.
104. Webb, E.K. (1970). Profile relationships: The log-linear range, and extension to strong stability. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 96, 67-90. <https://doi.org/10.1002/qj.49709640708>
105. Wilks, D. (2011). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Vol. 3. 3ra edición. Academic Press. ISBN:9780123850225.
106. WRF. (s/a). WRF-ARW online tutorial. Página web. Recuperado a partir de: <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/index.php>
107. Zaballa, I. (s/a). Valores singulares. ¿Qué son? ¿Para qué sirven? Departamento de Matemática Aplicada y EIO Universidad del País Vasco.
108. Zhang, D. y Anthes, R. A. (1982). A High-Resolution Model of the Planetary Boundary Layer—Sensitivity Tests and Comparisons with SESAME-79 Data. *J. Appl. Meteorol.* 21: 1594-1609. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1982\)021<1594:ahrmot>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1982)021<1594:ahrmot>2.0.co;2)

## ANEXOS

### ANEXO 1 – ESCALA DE HURACANES SAFFIR-SIMPSON (SSH)

Tabla A-1. Escala de Huracanes Saffir-Simson (SSH). Fuente: OEA 1993. Capítulo 12. Peligros de huracanes. Figura 12-3 Adaptado de Oliver, J. y Fairbridge, R. The Encyclopedia of Climatology (New York: Van Nostrand Reinhold Co., Inc., 1987).

|                    |   |  |
|--------------------|---|--|
| <b>Categoría 1</b> | Daños mínimos<br>Vientos: 119 a 153 km/h        | Presión barométrica mínima, igual o superior a 980 milibares.<br>Marejadas de 1.5 m sobre lo normal. Caminos y carreteras en costas bajas, inundados.  |
| <b>Categoría 2</b> | Daños moderados<br>Vientos: 154 a 177 km/h      | Presión barométrica de 965 a 979 milibares.<br>Marejadas de 2 a 2.5 m sobre lo normal. Carreteras y caminos inundados cerca de las costas. Las rutas de escape en terrenos bajos se interrumpen de dos a cuatro horas antes de la llegada del centro del huracán.  |
| <b>Categoría 3</b> | Daños extensos<br>Vientos: 178 a 209 km/h       | Presión barométrica mínima de 945 a 964 milibares.<br>Marejadas de 2.6 a 3.7 m sobre lo normal, inundando extensas áreas de zonas costeras con amplia destrucción de edificaciones cercanas al litoral. Las grandes estructuras cerca de las costas son seriamente dañadas por el embate de las olas y escombros flotantes.<br>Las vías de escape en terrenos bajos se interrumpen tres a cinco horas antes de la llegada del centro del huracán, debido a la subida de las aguas. Los terrenos llanos de 1.65 m o menos sobre el nivel del mar son inundados más de 13 km tierra adentro. |
| <b>Categoría 4</b> | Daños extremos<br>Vientos: 210 a 249 km/h       | Presión barométrica mínima de 920 a 944 milibares.<br>Marejadas de 4.5 a 5.5 m sobre lo normal. Los terrenos llanos de 3.30 m o menos sobre el nivel del mar son inundados hasta 10 km tierra adentro.<br>Las rutas de escape son interrumpidas por la subida de las aguas tres a cinco horas antes de la llegada del centro del huracán.  |
| <b>Categoría 5</b> | Daños catastróficos<br>Vientos: más de 250 km/h | Presión barométrica mínima por debajo de 920 milibares.<br>Marejadas de más de 5.5 m sobre lo normal. Los terrenos llanos de 3.30 m o menos sobre el nivel del mar son inundados hasta 6 millas tierra adentro. Hay grandes daños a los pisos bajos de las estructuras cerca de las costas debido al influjo de las inundaciones y el batir de las olas llevando escombros. Las rutas de escape son interrumpidas por la subida de las aguas tres a cinco horas antes de la llegada del centro del huracán.  |

Tabla A-2. Escala de Huracanes. Fuente: Pozo, C., Armijo Canto, N. y Calmé, S. (editoras). 2011. Capítulo 1. Peligros de huracanes. Del Sistema Estatal de Protección Civil [en línea], Gobierno del Estado de Quintana Roo.

| Categoría del huracán | Vientos sostenidos |            | Presión atmosférica en el ojo (milibares) | Maretazo de la tormenta |            | Nivel de daño |
|-----------------------|--------------------|------------|---|-------------------------|------------|---------------|
|                       | (km/h)             | (millas/h) |   | (metros)                | (pies)     |               |
| 1                     | 119 - 153          | 74 - 95    | 980                                       | 1.2 – 1.5               | 4.0 – 4.9  | Bajo          |
| 2                     | 154 - 177          | 96 - 110   | 965 - 979                                 | 1.8 – 2.4               | 5.9- 7.9   | Moderado      |
| 3                     | 179 - 209          | 111 - 130  | 945 - 964                                 | 2.7 – 3.7               | 8.9- 12.2  | Extenso       |
| 4                     | 211 - 249          | 131 - 155  | 920 - 944                                 | 4.0 – 5.5               | 13.0- 18.0 | Extremo       |
| 5                     | < 249              | <920       | < 920                                     | > 5,5                   | > 18.0     | Catastrófico  |

## ANEXO 2 – PRUEBAS DE SIGNIFICANCIA

Tabla A-3. Prueba de significancia (T-Student) para muestras pareadas de 2 colas para la temperatura del aire. Resultado de la hipótesis ( $H_0=0$  se aprueba), probabilidad (P), intervalo de confianza (CI), valor estadístico de la prueba T (Tstat), grados de libertad (df) y desviación estándar (SD). UB\_FECHA corresponde a la ubicación (localidad) y a los años que se utilizaron en cada prueba.

$H_0: T_i = T_f$

| UB_FECHA       | H | P          | CI      | Tstat   | df      | SD    |        |
|----------------|---|------------|---------|---------|---------|-------|--------|
| CAMPECHE 96-16 | 0 | 0.3339     | -0.0446 | 0.1313  | 0.9664  | 17566 | 2.9728 |
| CAMPECHE 96-36 | 0 | 0.2006     | -0.1486 | 0.0312  | -1.2799 | 17566 | 3.0399 |
| CAMPECHE 16-36 | 1 | 0.0261     | -0.0121 | -0.192  | -2.225  | 17566 | 3.0399 |
| MERIDA 96-16   | 1 | 0.011      | -0.2394 | -0.0309 | -2.5415 | 17566 | 3.5249 |
| MERIDA 96-36   | 1 | 0.0266     | -0.2214 | -0.0137 | -2.218  | 17566 | 3.5126 |
| MERIDA 16-36   | 0 | 0.7442     | -0.0882 | 0.1235  | 0.3263  | 17566 | 3.5796 |
| PROGRESO 96-16 | 1 | 2.3061E-06 | 0.0987  | 0.2385  | 4.7261  | 17566 | 2.3644 |
| PROGRESO 96-36 | 1 | 2.7243E-06 | 0.0979  | 0.2385  | 4.6921  | 17566 | 2.3757 |
| PROGRESO 16-36 | 0 | 0.9896     | -0.0621 | 0.0613  | -0.0131 | 17566 | 2.0866 |
| CANCUN 96-16   | 0 | 0.8808     | -0.0758 | 0.0651  | -0.1499 | 17566 | 2.3818 |
| CANCUN 96-36   | 0 | 0.3796     | -0.0405 | 0.1062  | 0.8786  | 17566 | 2.4803 |
| CANCUN 16-36   | 0 | 0.3094     | -0.0355 | 0.1121  | 1.0164  | 17566 | 2.4954 |
| PLAYA 96-16    | 0 | 0.0608     | -0.0029 | 0.1294  | 1.8753  | 17566 | 2.236  |
| PLAYA 96-36    | 0 | 0.7833     | -0.0808 | 0.0609  | -0.275  | 17566 | 2.3964 |
| PLAYA 16-36    | 0 | 0.0539     | -0.1476 | 0.0012  | -1.9281 | 17566 | 2.5164 |

Tabla A-4. Prueba de significancia (T-Student) para muestras pareadas de 2 colas para la magnitud del viento. Resultado de la hipótesis ( $H_0=0$  se aprueba), probabilidad (P), intervalo de confianza (CI), valor estadístico de la prueba T (Tstat), grados de libertad (df) y desviación estándar (SD). UB\_FECHA corresponde a la ubicación (localidad) y a los años que se utilizaron en cada prueba.

$H_0: T_i = T_f$

| UB_FECHA       | H | P          | CI      | Tstat   | df       | SD    |        |
|----------------|---|------------|---------|---------|----------|-------|--------|
| CAMPECHE 96-16 | 0 | 0.6068     | -0.0238 | 0.0407  | 0.5147   | 17566 | 1.0891 |
| CAMPECHE 96-36 | 0 | 0.6344     | -0.0243 | 0.0398  | 0.4755   | 17566 | 1.0838 |
| CAMPECHE 16-36 | 0 | 0.9664     | -0.0324 | 0.0311  | -0.0421  | 17566 | 1.0729 |
| MERIDA 96-16   | 1 | 1.9232e-13 | 0.0938  | 0.1618  | 7.3598   | 17566 | 1.1507 |
| MERIDA 96-36   | 1 | 1.9139e-09 | 0.0689  | 0.1357  | 6.0081   | 17566 | 1.1286 |
| MERIDA 16-36   | 0 | 0.1372     | -0.0591 | 0.0081  | -1.4862  | 17566 | 1.1356 |
| PROGRESO 96-16 | 1 | 0          | -0.9821 | -0.8966 | -43.0831 | 17566 | 1.4450 |
| PROGRESO 96-36 | 1 | 0          | -1.0385 | -0.9516 | -44.9077 | 17566 | 1.4684 |
| PROGRESO 16-36 | 1 | 0.0155     | -0.1007 | -0.0106 | -2.4217  | 17566 | 1.5236 |

|              |   |             |         |         |         |       |        |
|--------------|---|-------------|---------|---------|---------|-------|--------|
| CANCUN 96-16 | 1 | 5.9499e-06  | -0.1239 | -0.0491 | -4.5295 | 17566 | 1.2657 |
| CANCUN 96-36 | 0 | 0.7048      | -0.0301 | 0.0445  | 0.3789  | 17566 | 1.2595 |
| CANCUN 16-36 | 1 | 5.9498e-07  | 0.0569  | 0.1305  | 4.9947  | 17566 | 1.2433 |
| PLAYA 96-16  | 1 | 1.6827e-161 | 0.4839  | 0.5586  | 27.3658 | 17566 | 1.2623 |
| PLAYA 96-36  | 1 | 8.3726e-263 | 0.6325  | 0.7070  | 35.2320 | 17566 | 1.2598 |
| PLAYA 16-36  | 1 | 1.5771e-15  | 0.1120  | 0.1850  | 7.9781  | 17566 | 1.2334 |

Tabla A-5. Prueba de significancia (T-Student) para muestras pareadas de 1 cola para la temperatura del aire. Resultado de la hipótesis ( $H_0=0$  se aprueba), probabilidad (P), intervalo de confianza (CI), valor estadístico de la prueba T (Tstat), grados de libertad (df) y desviación estándar (SD). UB\_FECHA corresponde a la ubicación (localidad) y a los años que se utilizaron en cada prueba.

$H_0: T_i > T_f$

| UB_FECH        | H | P      | CI      | Tstat   | df    | SD     |
|----------------|---|--------|---------|---------|-------|--------|
| CAMPECHE 96-16 | 0 | 0.8331 | 0.1171  | 0.9664  | 17566 | 2.9728 |
| CAMPECHE 96-36 | 0 | 0.1003 | 0.0167  | -1.2799 | 17566 | 3.0399 |
| CAMPECHE 16-36 | 1 | 0.0130 | -0.0266 | -2.2250 | 17566 | 3.0399 |
| MERIDA 96-16   | 1 | 0.0055 | -0.0477 | -2.5415 | 17566 | 3.5249 |
| MERIDA 96-36   | 1 | 0.0133 | -0.0304 | -2.2180 | 17566 | 3.5126 |
| MERIDA 16-36   | 0 | 0.6279 | 0.1065  | 0.3263  | 17566 | 3.5796 |
| PROGRESO 96-16 | 0 | 1      | 0.2273  | 4.7261  | 17566 | 2.3644 |
| PROGRESO 96-36 | 0 | 1      | 0.2272  | 4.6921  | 17566 | 2.3757 |
| PROGRESO 16-36 | 0 | 0.4948 | 0.0514  | -0.0131 | 17566 | 2.0866 |
| CANCUN 96-16   | 0 | 0.4404 | 0.0537  | -0.1499 | 17566 | 2.3818 |
| CANCUN 96-36   | 0 | 0.8102 | 0.0944  | 0.8786  | 17566 | 2.4803 |
| CANCUN 16-36   | 0 | 0.8453 | 0.1002  | 1.0164  | 17566 | 2.4954 |
| PLAYA 96-16    | 0 | 0.9696 | 0.1188  | 1.8753  | 17566 | 2.2360 |
| PLAYA 96-36    | 0 | 0.3917 | 0.0495  | -0.2750 | 17566 | 2.3964 |
| PLAYA 16-36    | 1 | 0.0269 | -0.0108 | -1.9281 | 17566 | 2.5164 |

Tabla A-6. Prueba de significancia (T-Student) para muestras pareadas de 1 cola para la magnitud del viento. Resultado de la hipótesis ( $H_0=0$  se aprueba), probabilidad (P), intervalo de confianza (CI), valor estadístico de la prueba T (Tstat), grados de libertad (df) y desviación estándar (SD). UB\_FECHA corresponde a la ubicación (localidad) y a los años que se utilizaron en cada prueba.  
 $H_0: T_i > T_f$

| UB_FECH        | H | P          | CI      | Tstat    | df    | SD     |
|----------------|---|------------|---------|----------|-------|--------|
| CAMPECHE 96-16 | 0 | 0.6966     | 0.0355  | 0.5147   | 17566 | 1.0891 |
| CAMPECHE 96-36 | 0 | 0.6828     | 0.0347  | 0.4755   | 17566 | 1.0838 |
| CAMPECHE 16-36 | 0 | 0.4832     | 0.0259  | -0.0421  | 17566 | 1.0729 |
| MERIDA 96-16   | 0 | 1          | 0.1563  | 7.3598   | 17566 | 1.1507 |
| MERIDA 96-36   | 0 | 1          | 0.1303  | 6.0081   | 17566 | 1.1286 |
| MERIDA 16-36   | 0 | 0.0686     | 0.0027  | -1.4862  | 17566 | 1.1356 |
| PROGRESO 96-16 | 1 | 0          | -0.9035 | -43.0831 | 17566 | 1.4450 |
| PROGRESO 96-36 | 1 | 0          | -0.9586 | -44.9077 | 17566 | 1.4684 |
| PROGRESO 16-36 | 1 | 0.0077     | -0.0179 | -2.4217  | 17566 | 1.5236 |
| CANCUN 96-16   | 1 | 2.9749e-06 | -0.0551 | -4.5295  | 17566 | 1.2657 |
| CANCUN 96-36   | 0 | 0.6476     | 0.0385  | 0.3789   | 17566 | 1.2595 |
| CANCUN 16-36   | 0 | 1          | 0.1246  | 4.9947   | 17566 | 1.2433 |
| PLAYA 96-16    | 0 | 1          | 0.5526  | 27.3658  | 17566 | 1.2623 |
| PLAYA 96-36    | 0 | 1          | 0.7010  | 35.2320  | 17566 | 1.2598 |
| PLAYA 16-36    | 0 | 1          | 0.1791  | 7.9781   | 17566 | 1.2334 |

## ANEXO 3 – RESULTADOS

### Península de Yucatán

#### Variabilidad Anual

Figura A-1. Promedio anual de la temperatura del aire a 2 m (°C) para 1996. Los asteriscos morados indican la ubicación de las localidades de estudio.

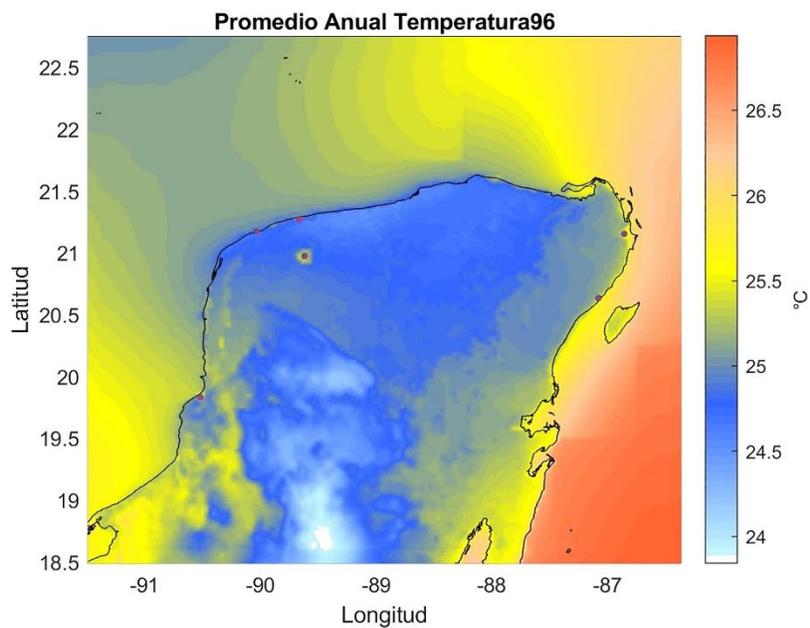


Figura A-2. Promedio anual de la temperatura del aire a 2 m (°C) para 2016. Los asteriscos morados indican la ubicación de las localidades de estudio.

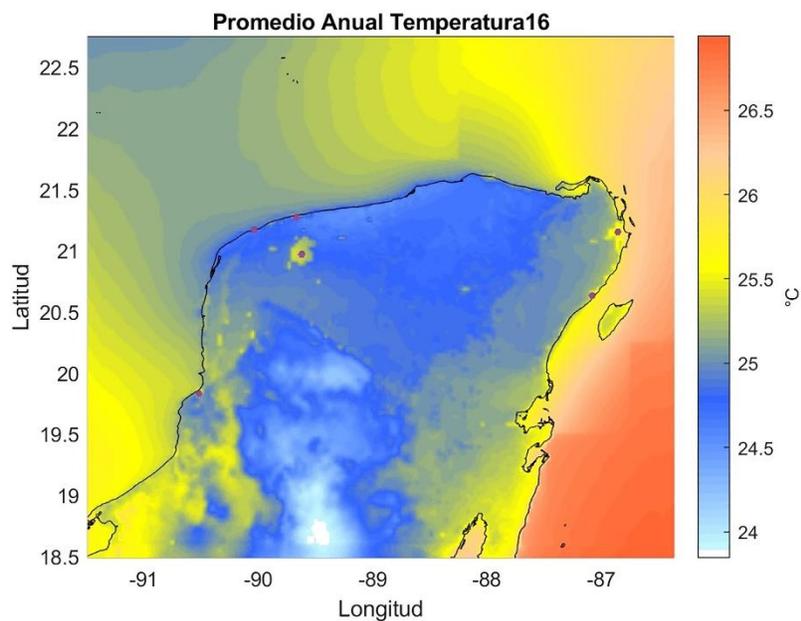


Figura A-3. Promedio anual de la temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) para 2036. Los asteriscos morados indican la ubicación de las localidades de estudio.

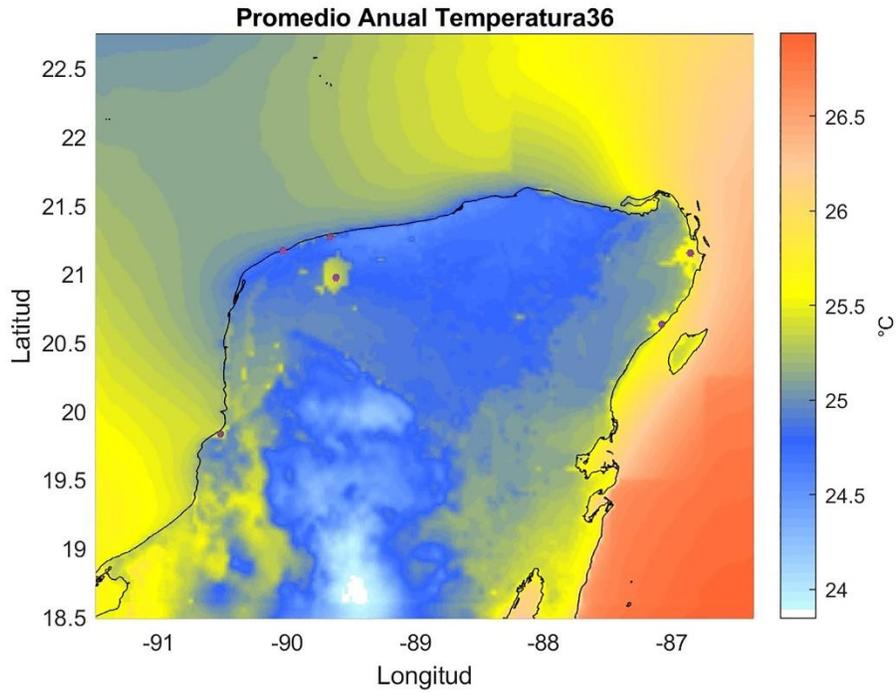


Figura A-4. Promedio anual de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 1996. Los asteriscos morados indican la ubicación de las localidades de estudio.

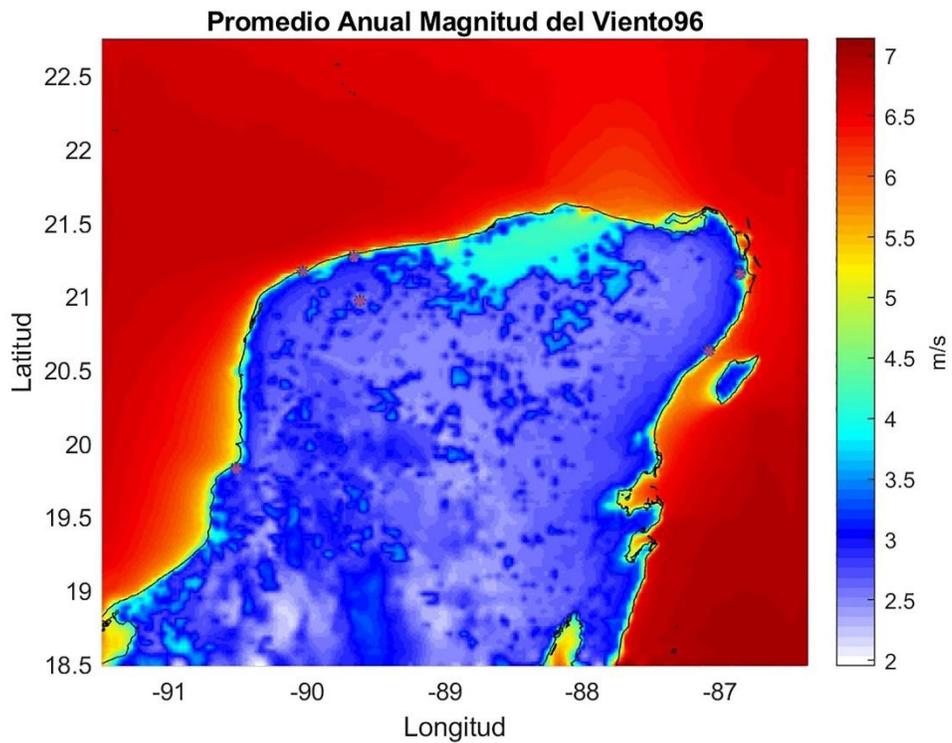


Figura A-5. Promedio anual de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 2016. Los asteriscos morados indican la ubicación de las localidades de estudio.

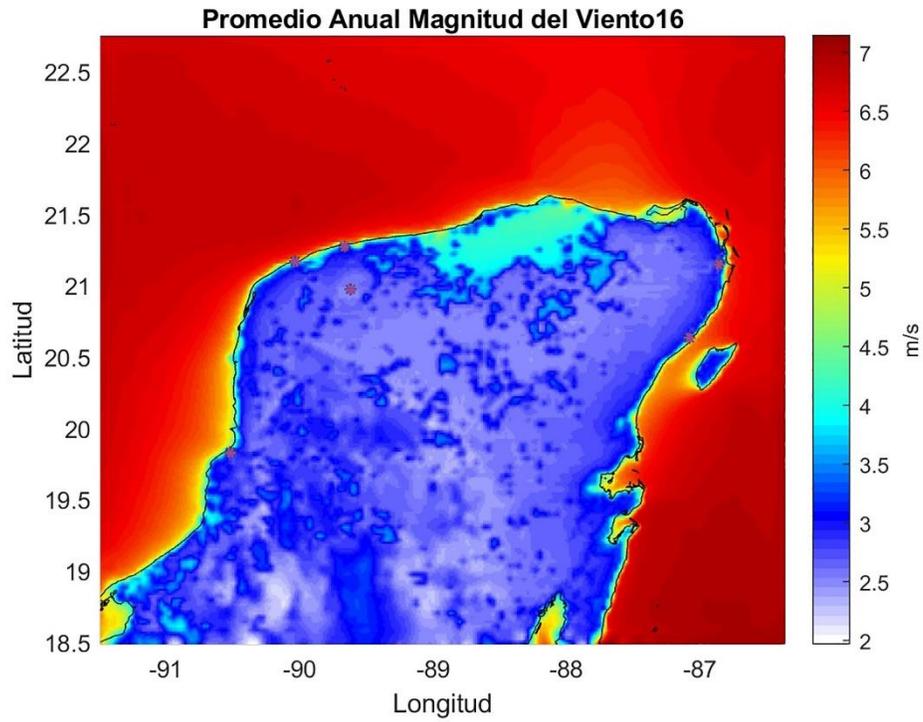
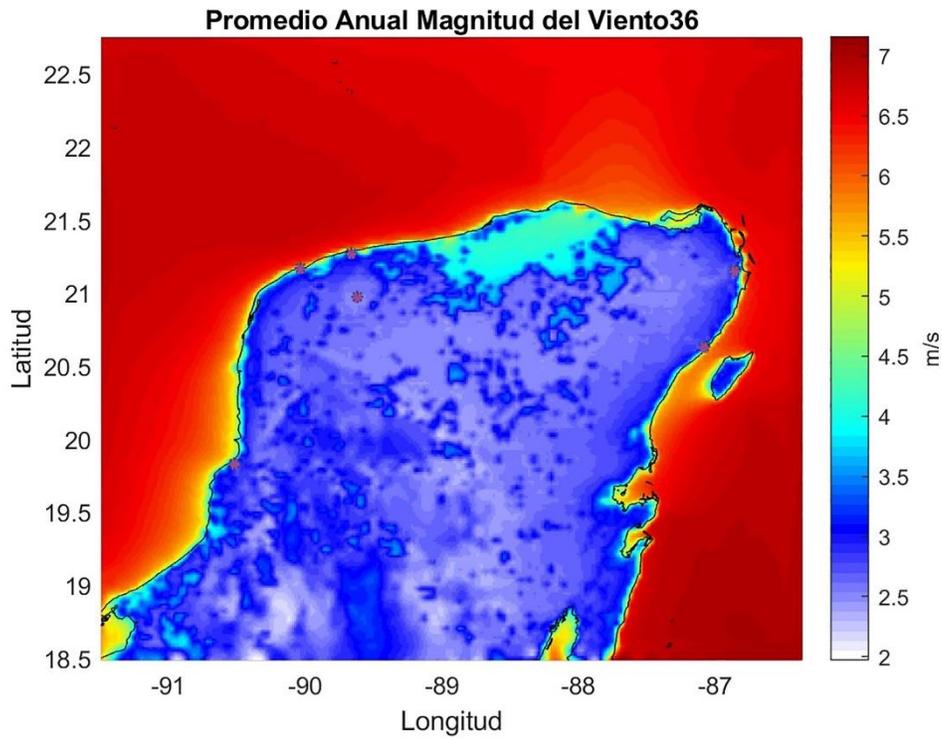


Figura A-6. Promedio anual de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 2036. Los asteriscos grises indican la ubicación de las localidades de estudio.



## Variabilidad Estacional

Figura A-7. Promedios estacionales de la (a) temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la (b) magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 1996.

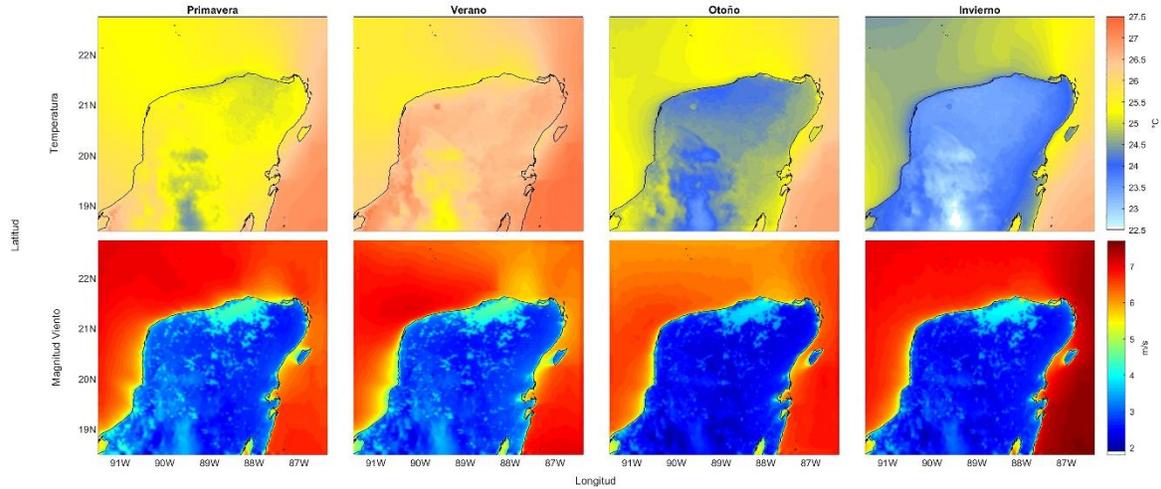


Figura A-8. Promedios estacionales de la (a) temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la (b) magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 2016.

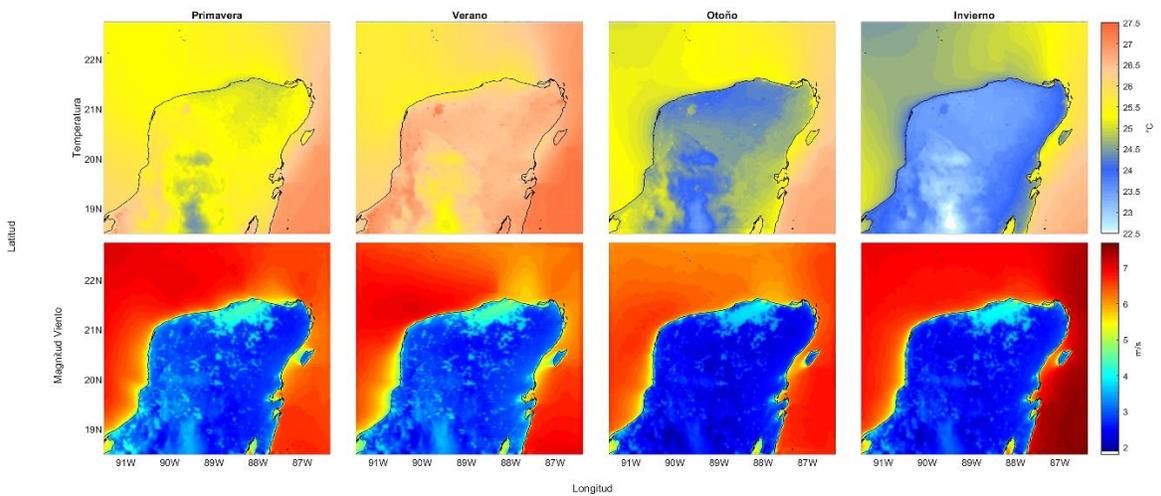
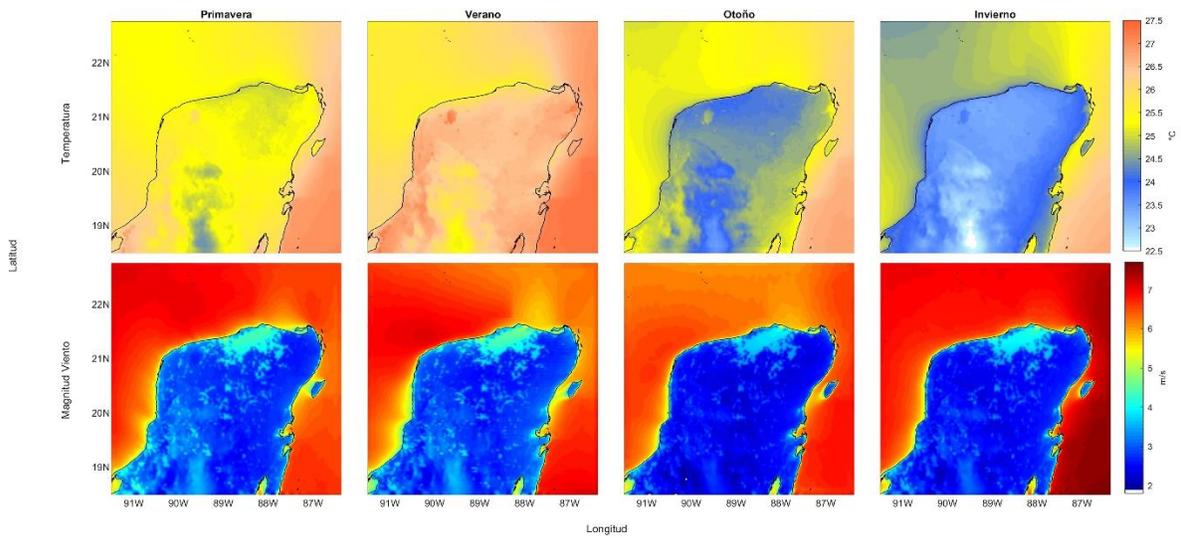


Figura A-9. Promedios estacionales de la (a) temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la (b) magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 2036.



### Diferencias de la variabilidad estacional

Figura A-10. Diferencias espaciales de la temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ), promediada estacionalmente.

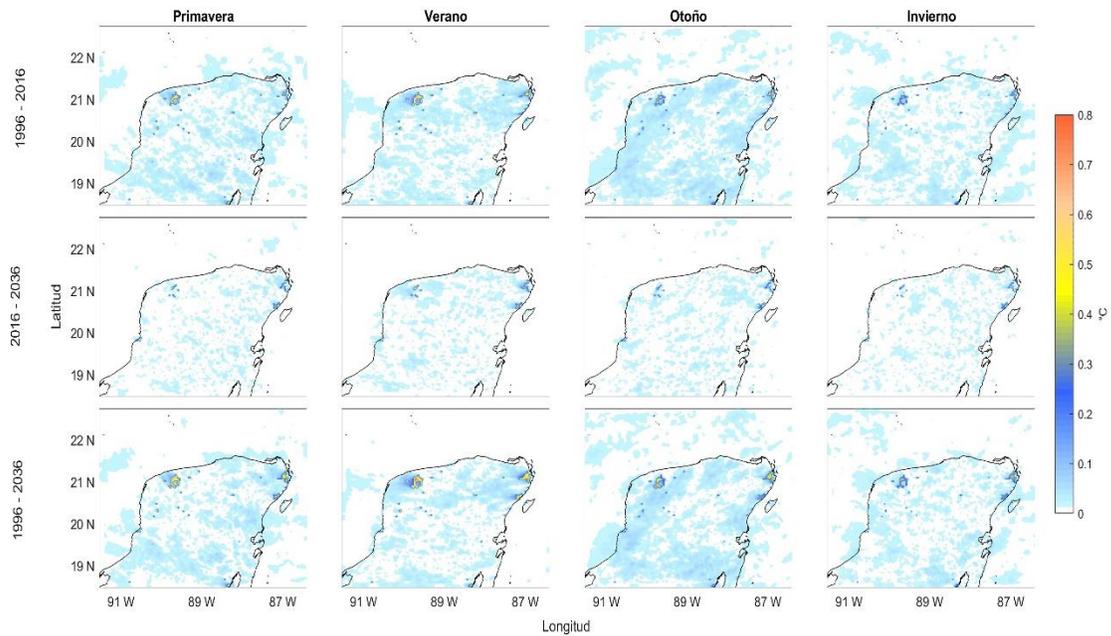
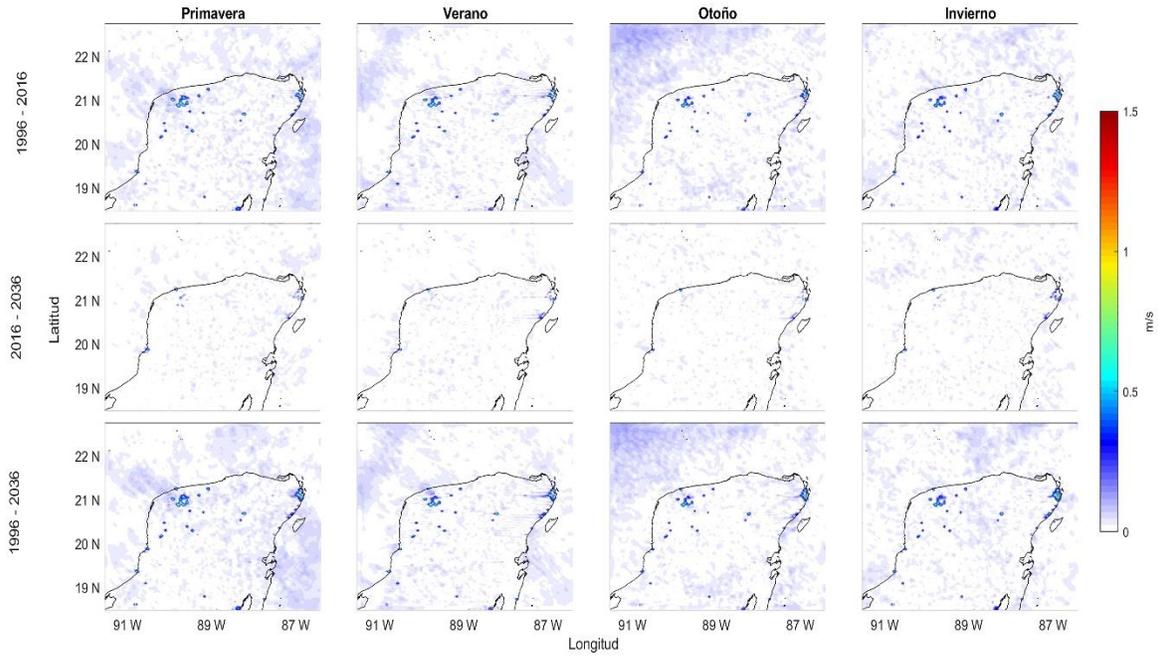


Figura A-11. Diferencias espaciales de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ), promediada estacionalmente.



## Sisal

### Variables Atmosféricas

Figura A-12. Variables atmosféricas: series de tiempo para 1996 de la dirección del viento ( $^{\circ}$ ), velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), la temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ), la humedad relativa (%) y la presión atmosférica (hPa). Las gráficas muestran los datos cada 24 hrs.

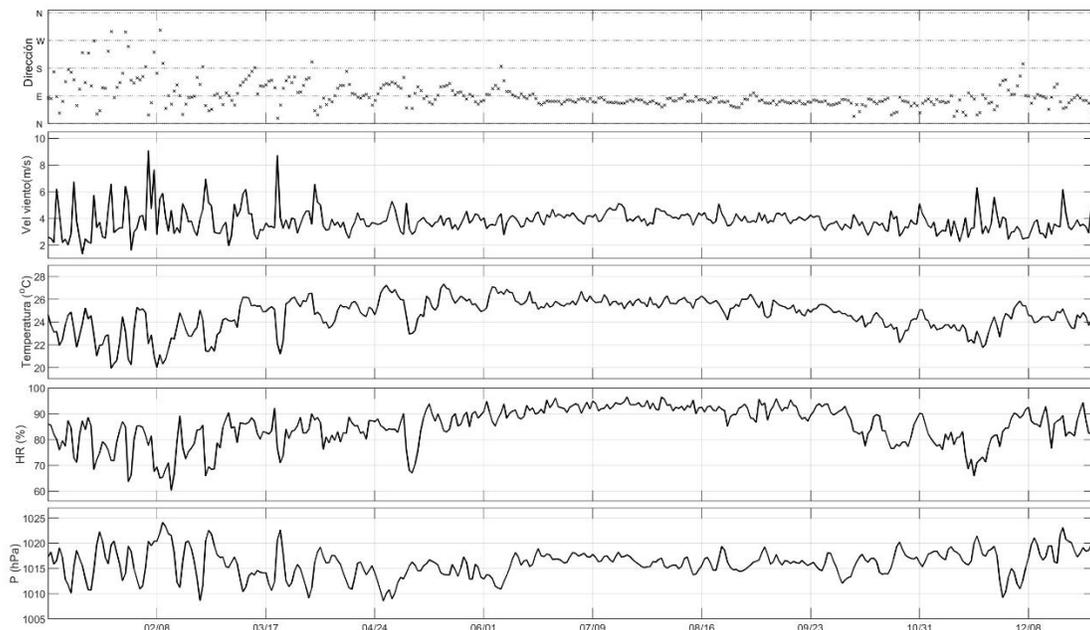


Figura A-13. Variables atmosféricas: series de tiempo para 2016 de la dirección del viento ( $^{\circ}$ ), velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), la temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ), la humedad relativa (%) y la presión atmosférica (hPa). Las gráficas muestran los datos cada 24 hrs.

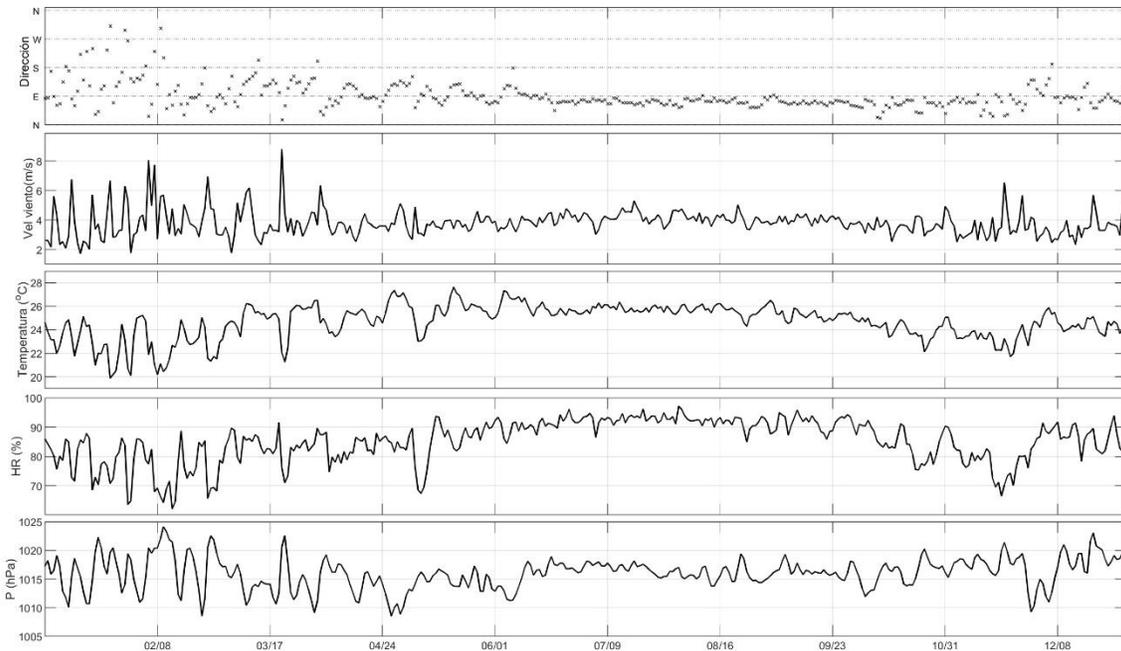


Figura A-14. Variables atmosféricas: series de tiempo para 2036 de la dirección del viento ( $^{\circ}$ ), velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), la temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ), la humedad relativa (%) y la presión atmosférica (hPa). Las gráficas muestran los datos cada 24 hrs.

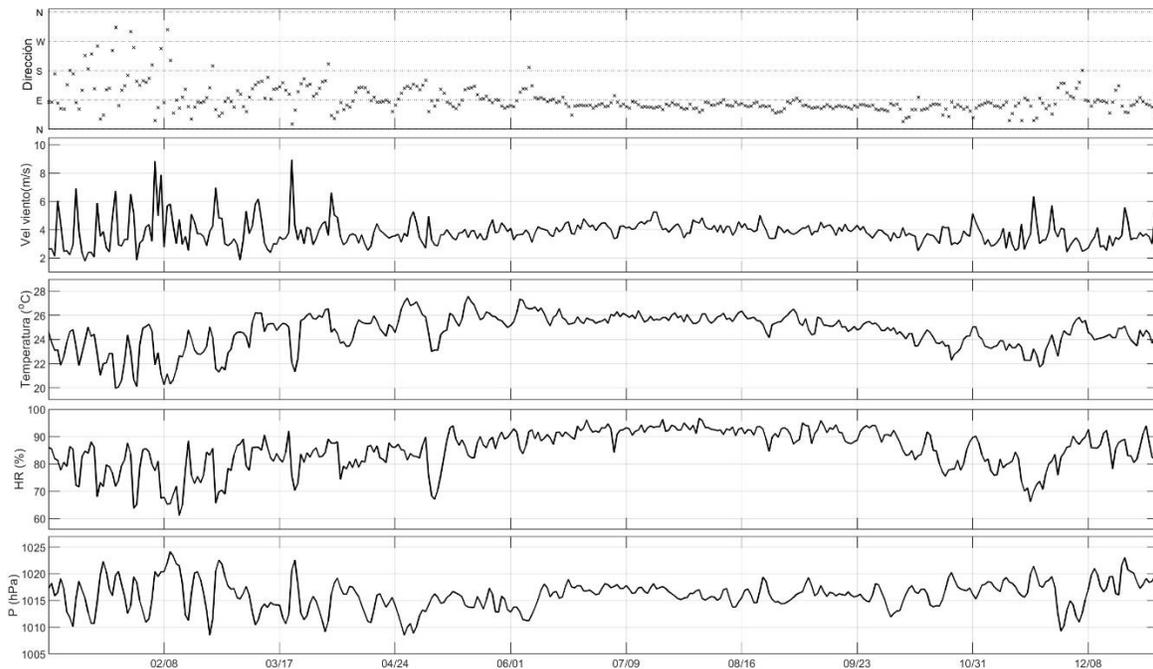
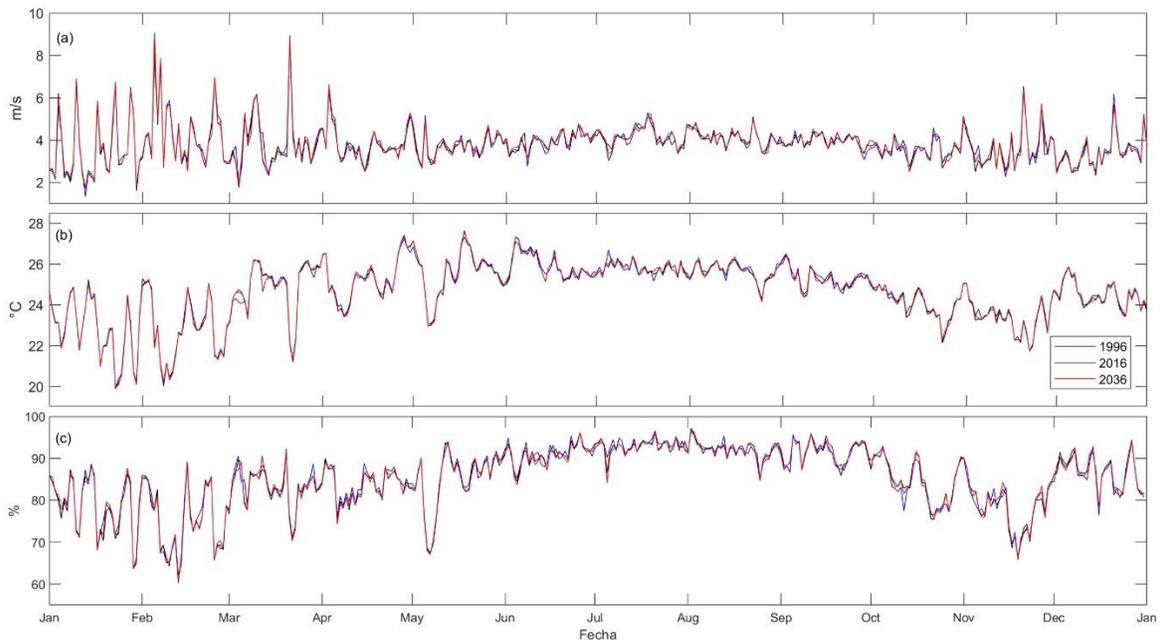


Figura A-15. Variables atmosféricas. (a) Magnitud de la velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), (b) temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ) y (c) humedad relativa (%). Las series de tiempo muestran los datos cada 24 hrs, para 1996 (azul), 2016 (negro) y 2036 (rojo).



### Rosa de los vientos

Figura A-16. Rosa de vientos para 1996. Los colores indican la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ), la orientación de los conos su dirección ( $^{\circ}$ ) y los círculos concéntricos el porcentaje de ocurrencia (%).

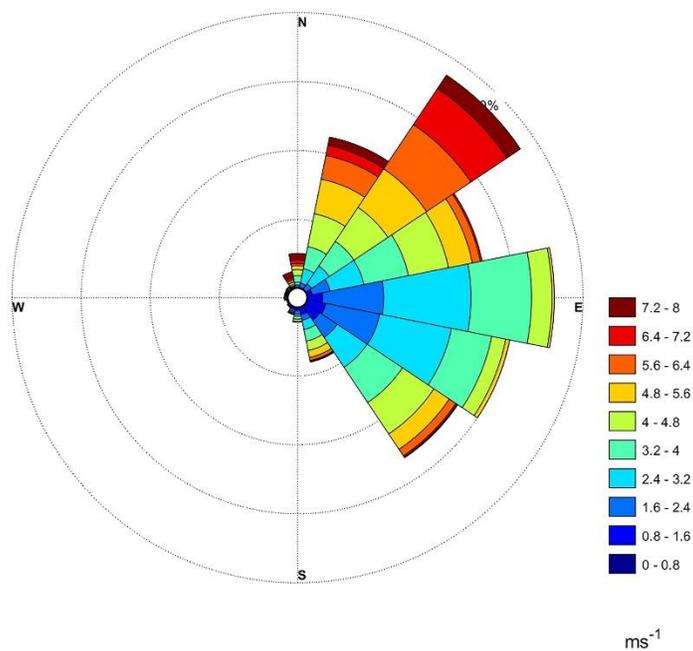


Figura A-17. Rosa de vientos para 2016. Los colores indican la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ), la orientación de los conos su dirección ( $^{\circ}$ ) y los círculos concéntricos el porcentaje de ocurrencia (%).

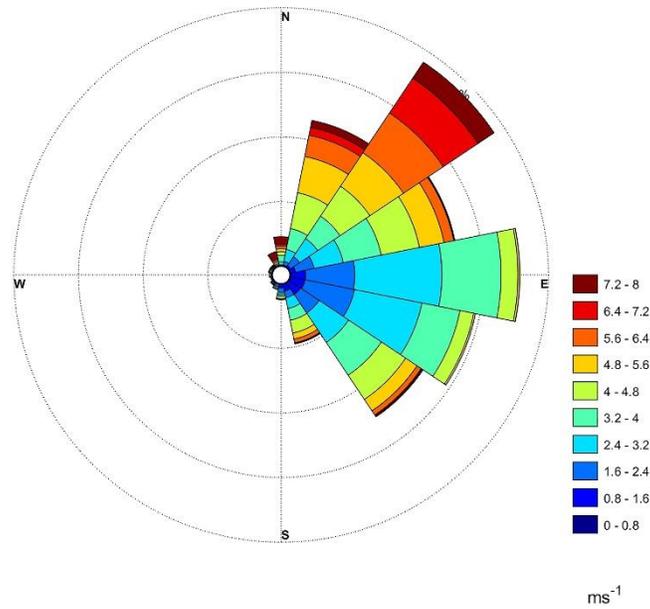
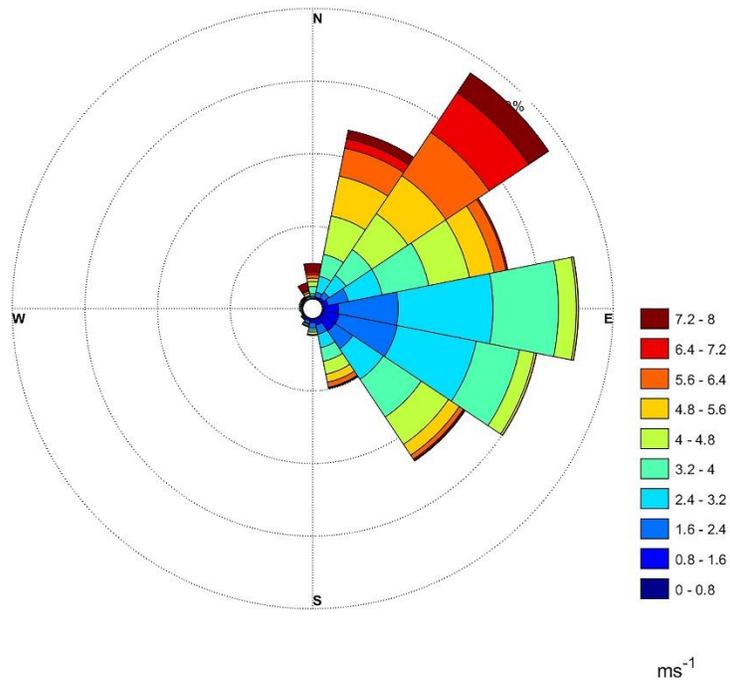


Figura A-18. Rosa de vientos para 2036. Los colores indican la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ), la orientación de los conos su dirección ( $^{\circ}$ ) y los círculos concéntricos el porcentaje de ocurrencia (%).



## Diferencias de las series de tiempo

Figura A-19. Diferencias de las series de tiempo de 1996-2016 para la temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) (línea roja) y la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ) (línea verde).

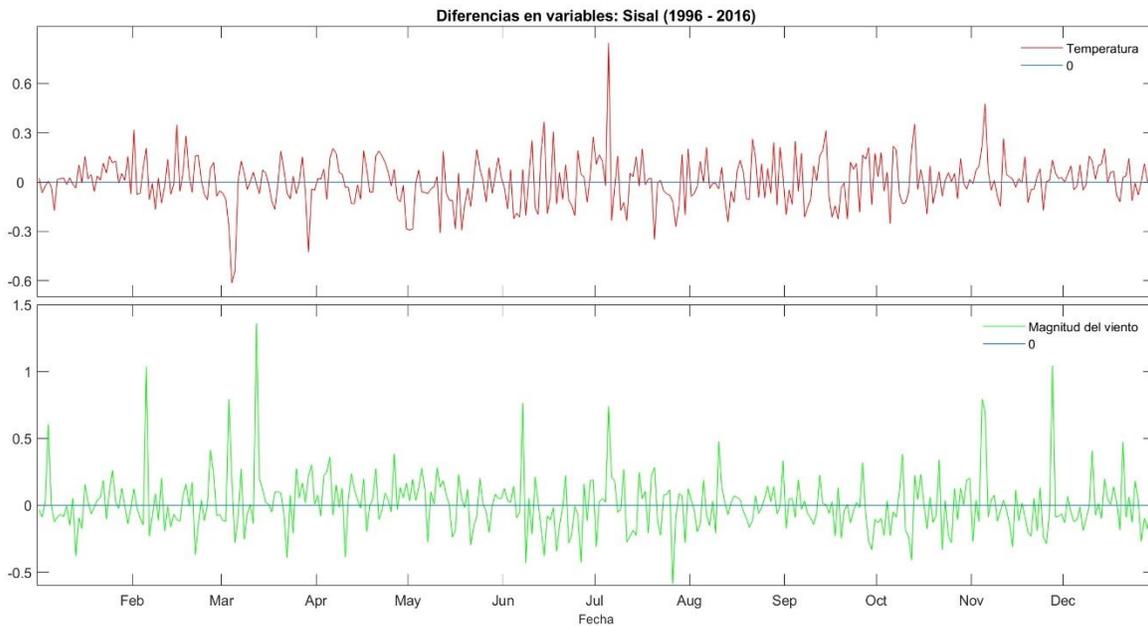


Figura A-20. Diferencias de las series de tiempo de 2016-2036 para la temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) (línea roja) y la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ) (línea verde).

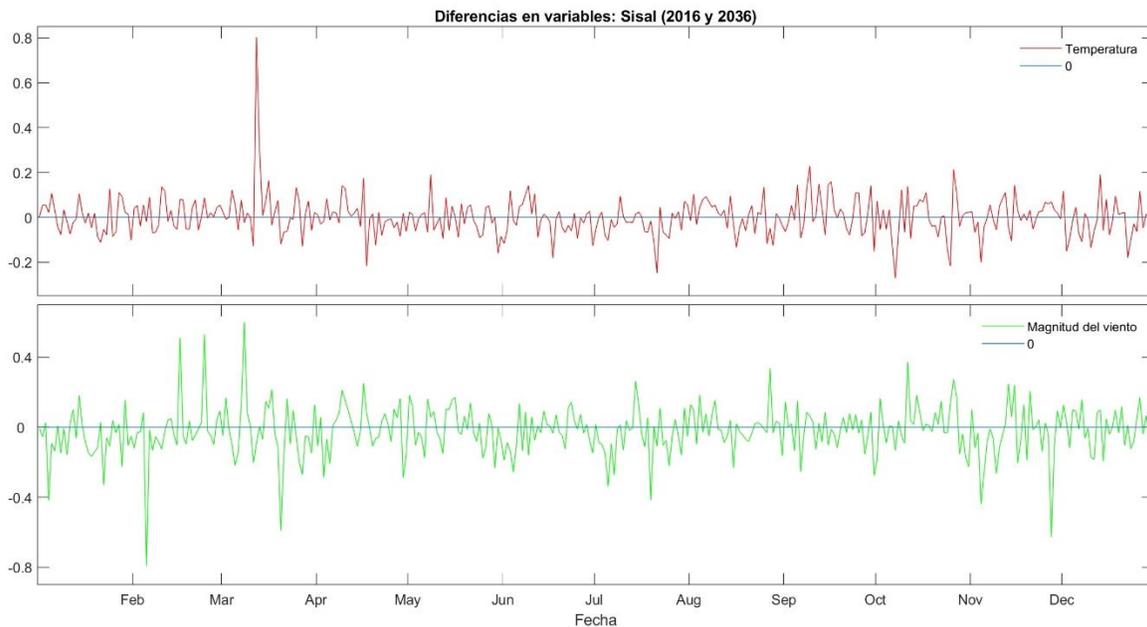
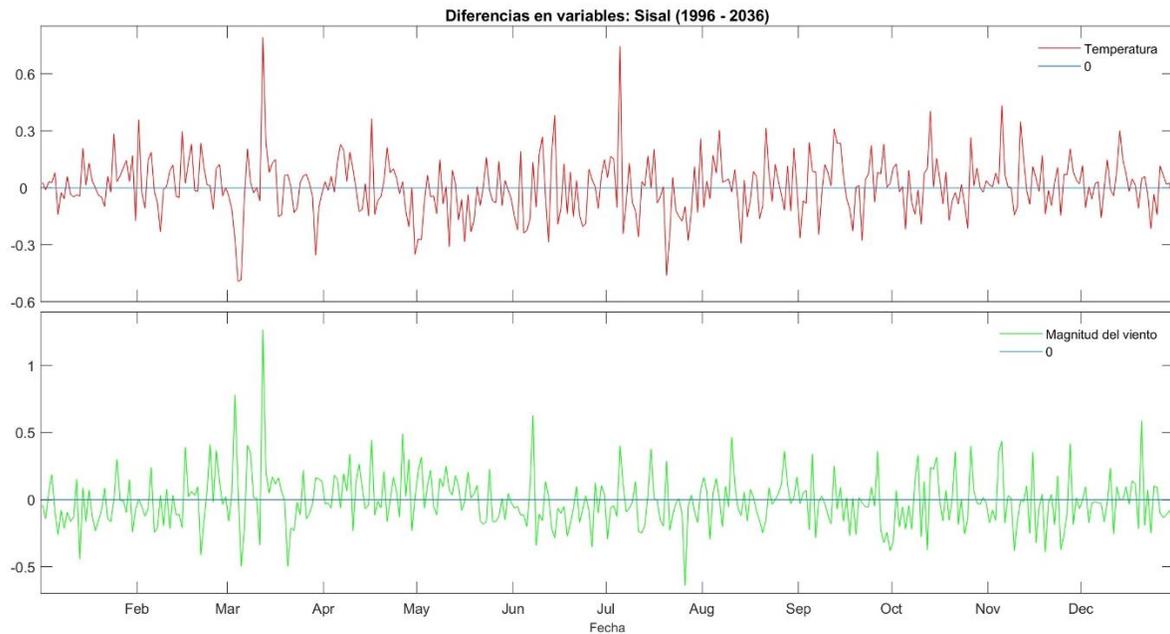


Figura A-21. Diferencias de las series de tiempo de 1996-2036 para la temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) (línea roja) y la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ) (línea verde).



### Variabilidad Estacional

Figura A-22. Promedios estacionales de la (a) temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la (b) magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 1996. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Sisal en la Península de Yucatán.

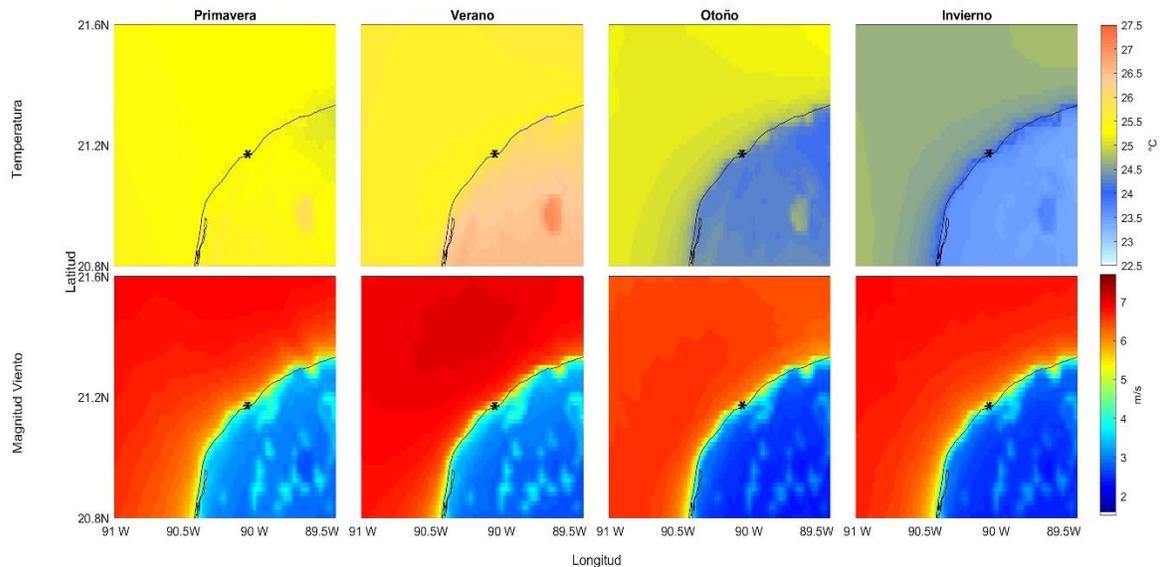


Figura A-23. Promedios estacionales de la (a) temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la (b) magnitud del viento a 10 m ( $\text{m s}^{-1}$ ) para 2016. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Sisal en la Península de Yucatán.

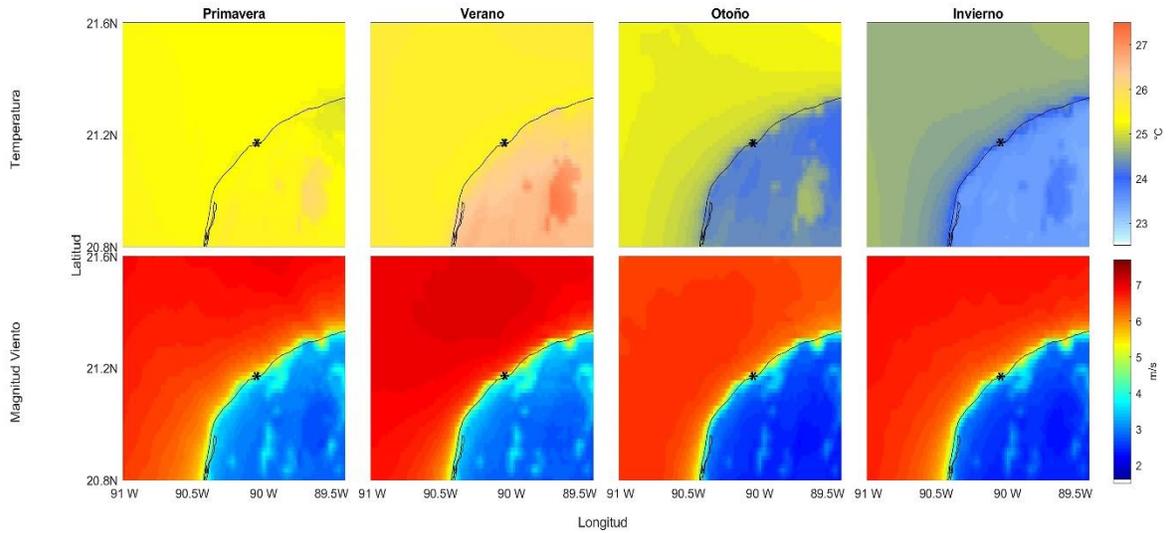
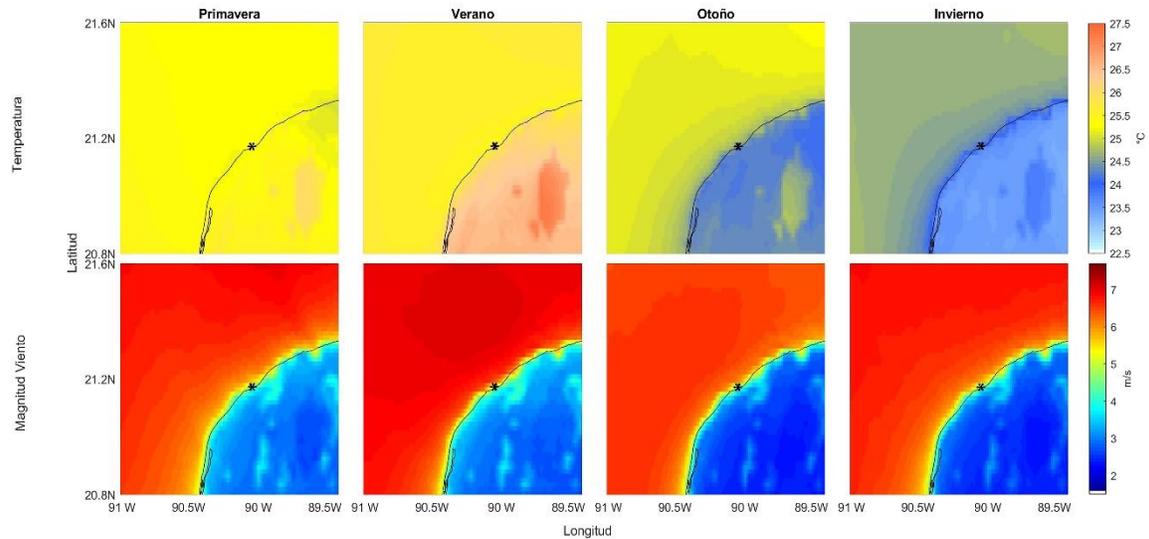


Figura A-24. Promedios estacionales de la (a) temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la (b) magnitud del viento a 10 m ( $\text{m s}^{-1}$ ) para 2036. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Sisal en la Península de Yucatán.



## Diferencias de la variabilidad estacional

Figura A-25. Diferencias espaciales de la temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ), promediada estacionalmente. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Sisal en la Península de Yucatán.

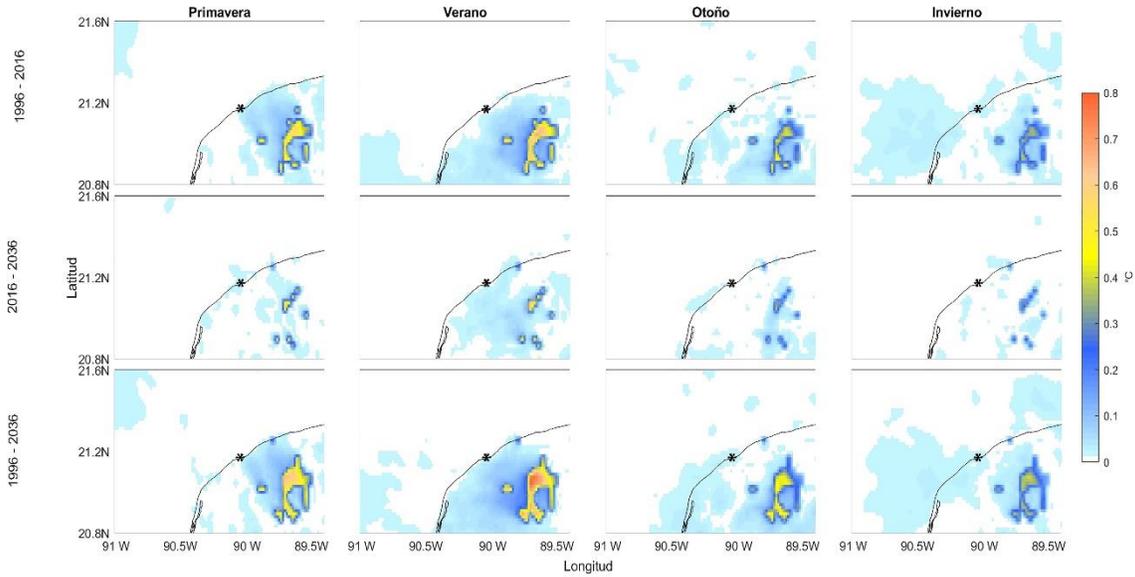
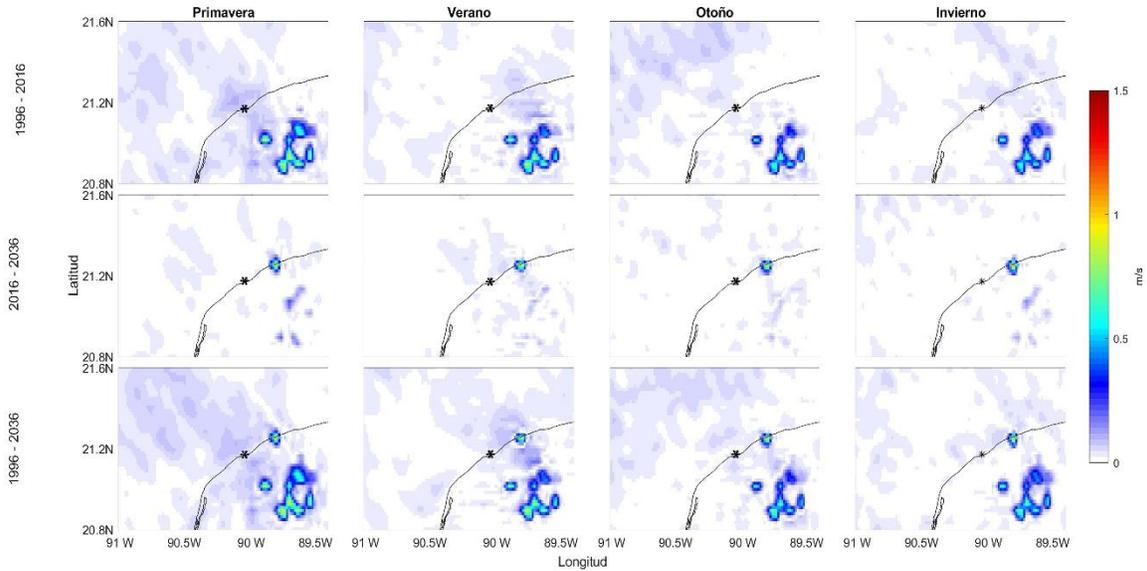


Figura A-26. Diferencias espaciales de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ), promediada estacionalmente. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Sisal en la Península de Yucatán.



## Progreso

### Variables Atmosféricas

Figura A-27. Variables atmosféricas: series de tiempo para 1996 de la dirección del viento ( $^{\circ}$ ), velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), la temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ), la humedad relativa (%) y la presión atmosférica (hPa). Las gráficas muestran los datos cada 24 hrs.

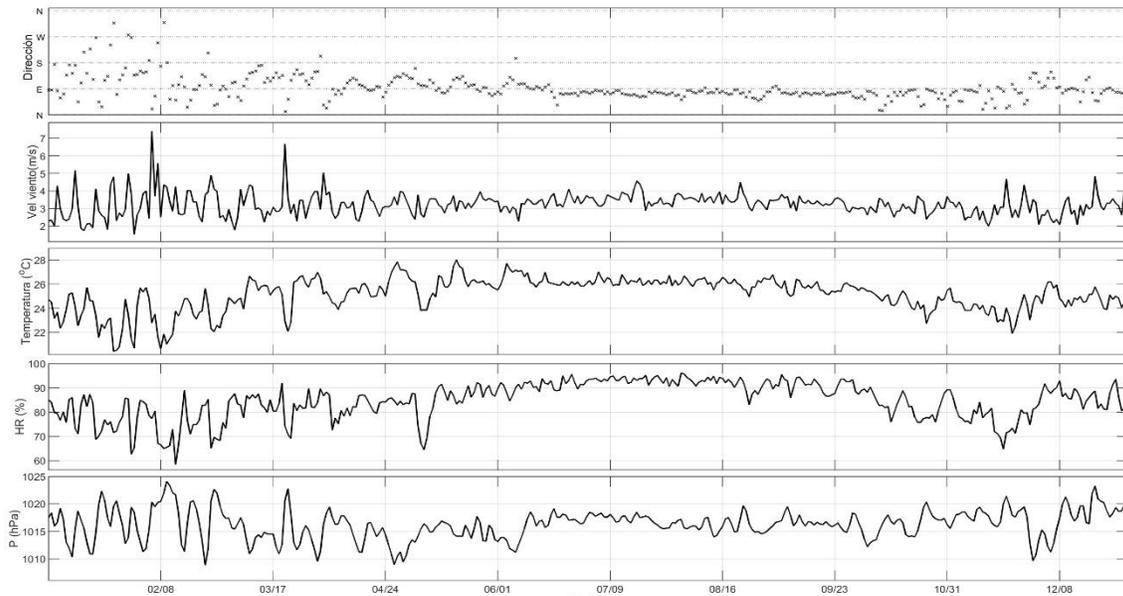


Figura A-28. Variables atmosféricas: series de tiempo para 2016 de la dirección del viento ( $^{\circ}$ ), velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), la temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ), la humedad relativa (%) y la presión atmosférica (hPa). Las gráficas muestran los datos cada 24 hrs.

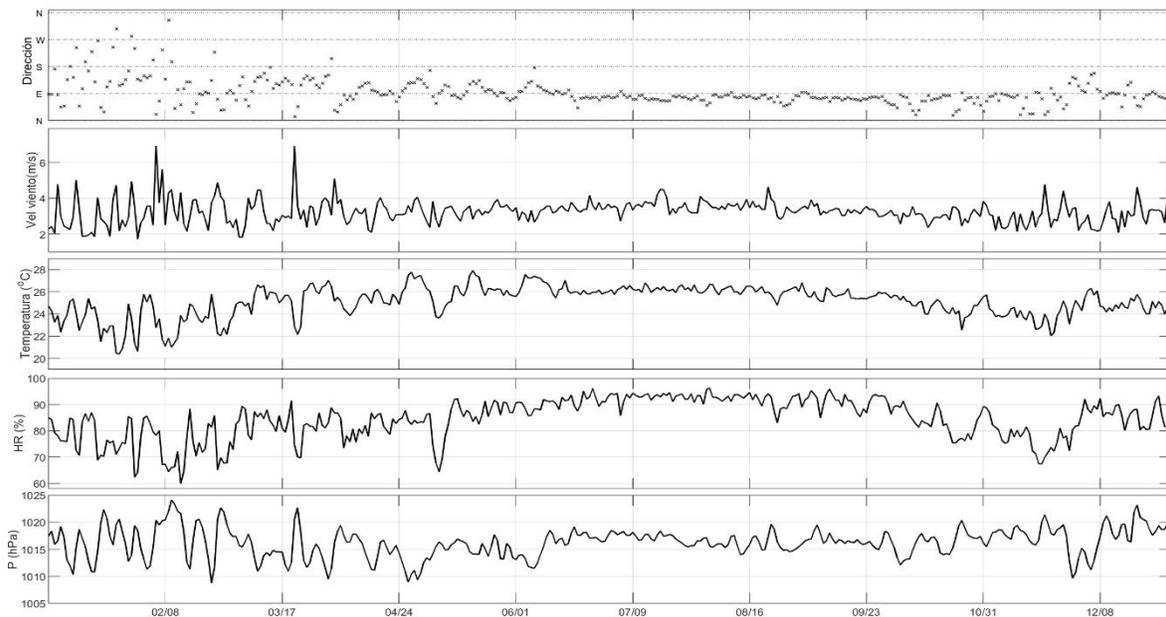


Figura A-29. Variables atmosféricas: series de tiempo para 2036 de la dirección del viento ( $^{\circ}$ ), velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), la temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ), la humedad relativa (%) y la presión atmosférica (hPa). Las gráficas muestran los datos cada 24 hrs.

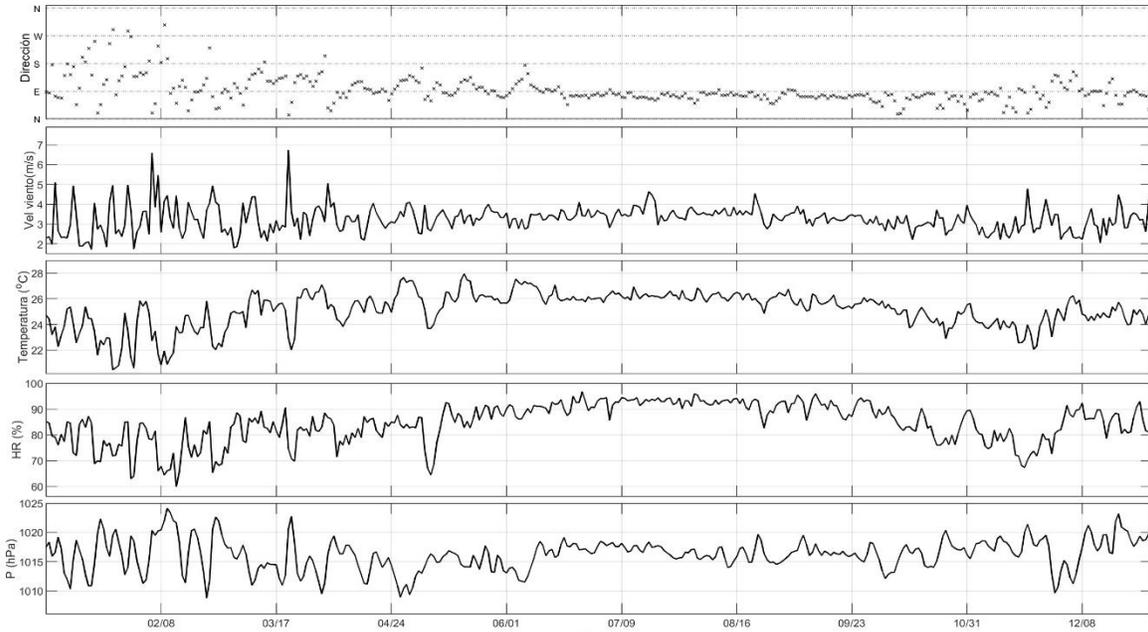
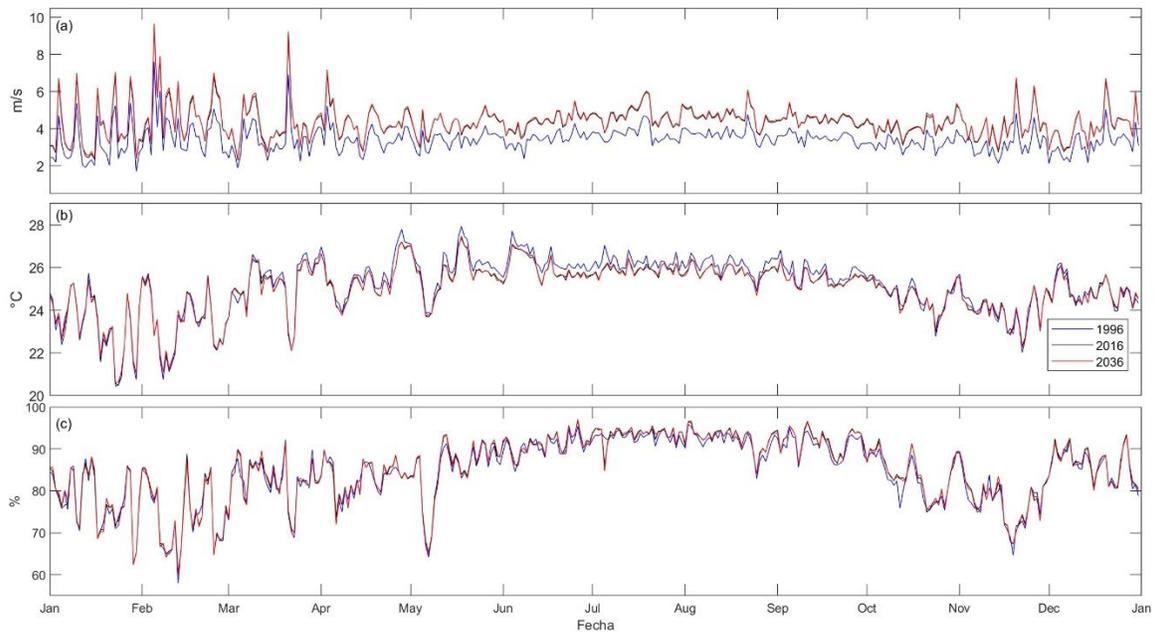


Figura A-30. Variables atmosféricas. (a) Magnitud de la velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), (b) temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ) y (c) humedad relativa (%) promediadas dentro de los polígonos. Las series de tiempo muestran los datos cada 24 hrs, para 1996 (azul), 2016 (negro) y 2036 (rojo).



## Rosa de los vientos

Figura A-31. Rosa de vientos para 1996. Los colores indican la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ), la orientación de los conos su dirección ( $^{\circ}$ ) y los círculos concéntricos el porcentaje de ocurrencia (%).

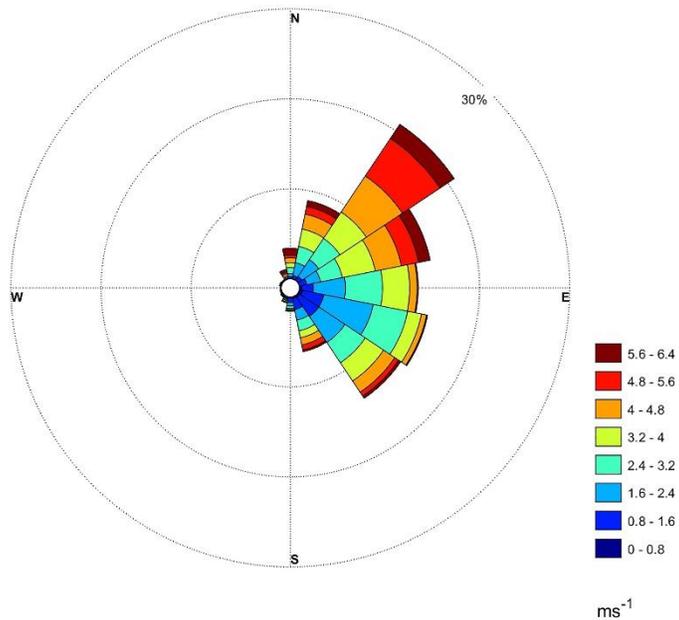


Figura A-32. Rosa de vientos para 2016. Los colores indican la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ), la orientación de los conos su dirección ( $^{\circ}$ ) y los círculos concéntricos el porcentaje de ocurrencia (%).

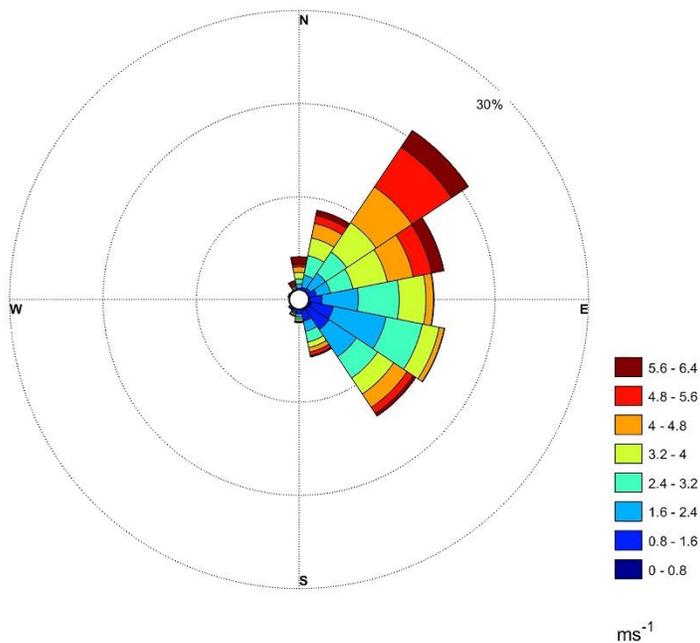
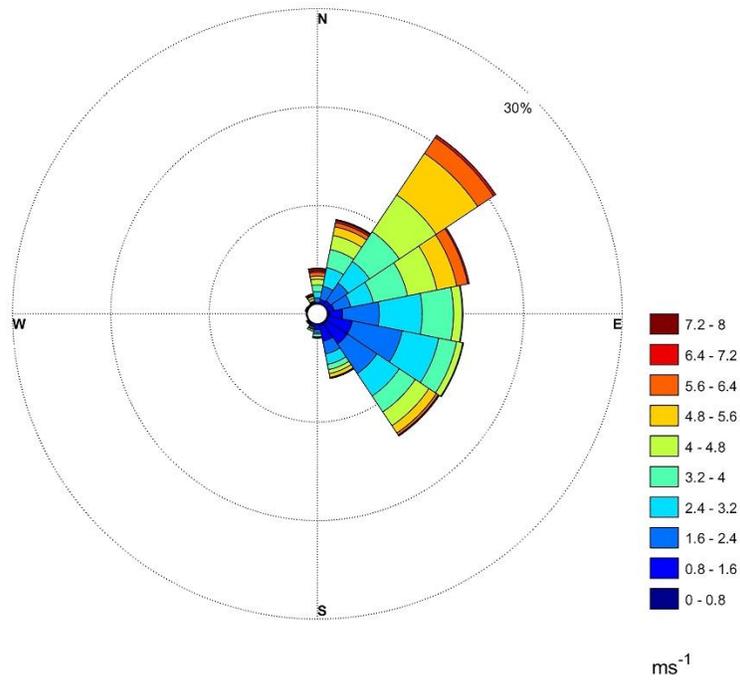


Figura A-33. Rosa de vientos para 2036. Los colores indican la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ), la orientación de los conos su dirección ( $^{\circ}$ ) y los círculos concéntricos el porcentaje de ocurrencia (%).



### Diferencias de las series de tiempo

Figura A-34. Diferencias de las series de tiempo de 1996-2016 para la temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) (línea roja) y la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ) (línea verde).

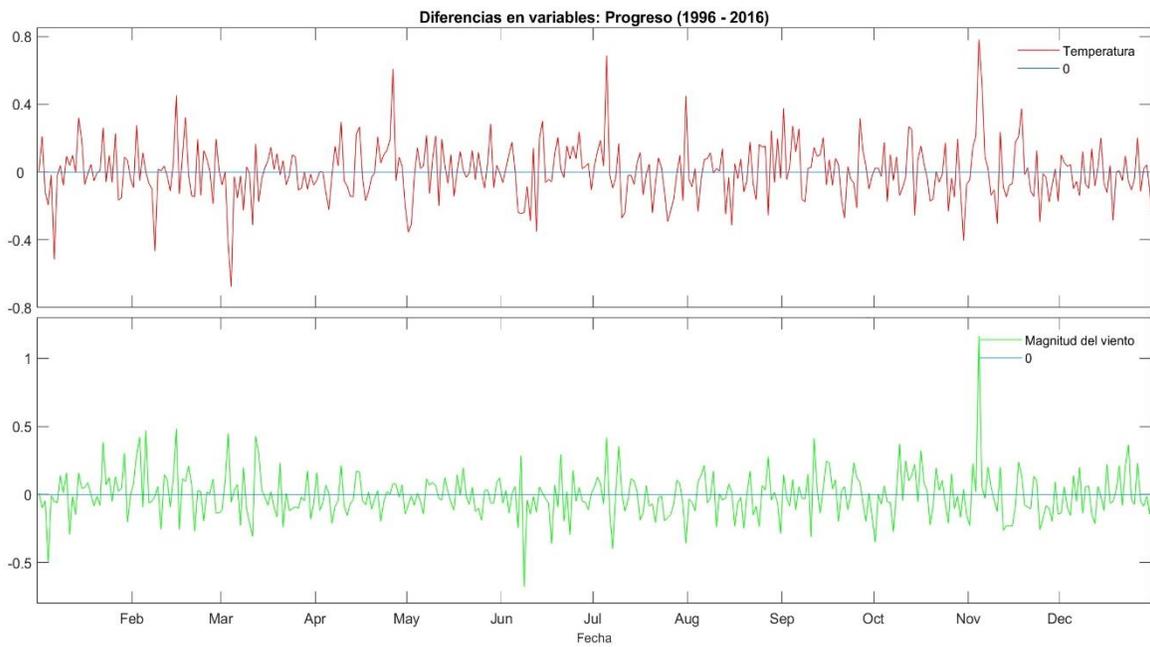


Figura A-35. Diferencias de las series de tiempo de 2016-2036 para la temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) (línea roja) y la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ) (línea verde).

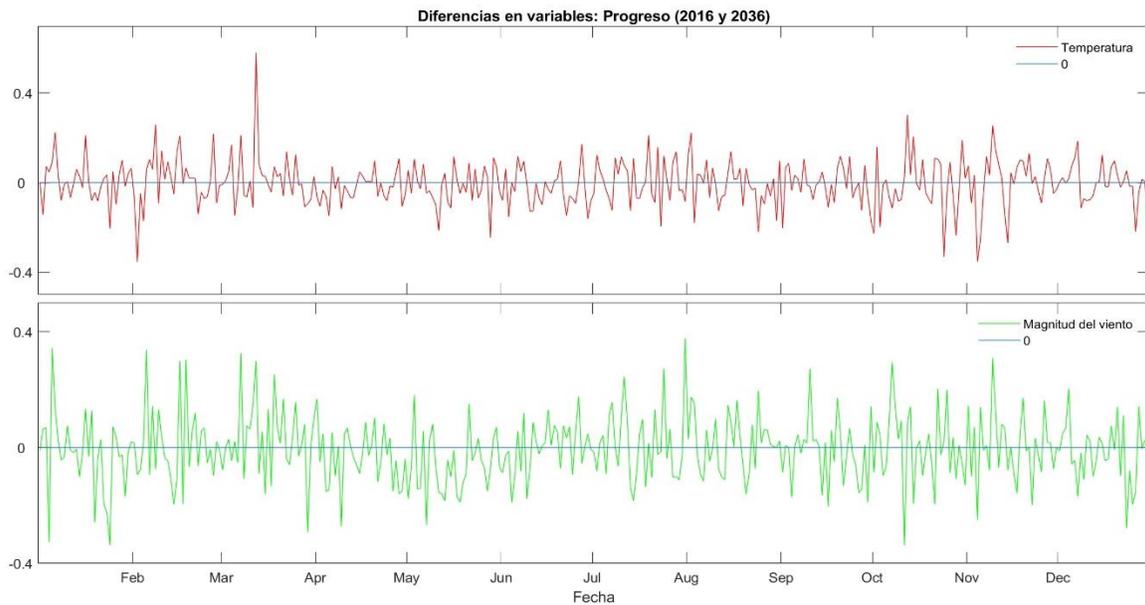
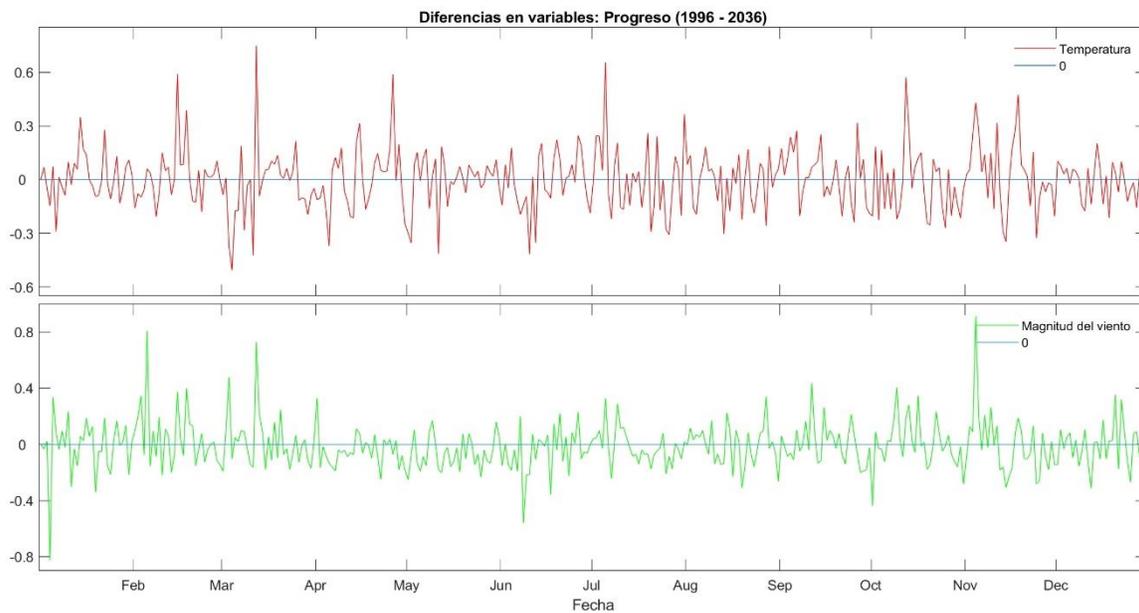


Figura A-36. Diferencias de las series de tiempo de 1996-2036 para la temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) (línea roja) y la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ) (línea verde).



## Diferencias de las variables de los polígonos

Figura A- 37. (a) Series de tiempo de la temperatura del aire a 2 m (°C) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años. Se indican los promedios y las desviaciones estándar para cada diferencia.

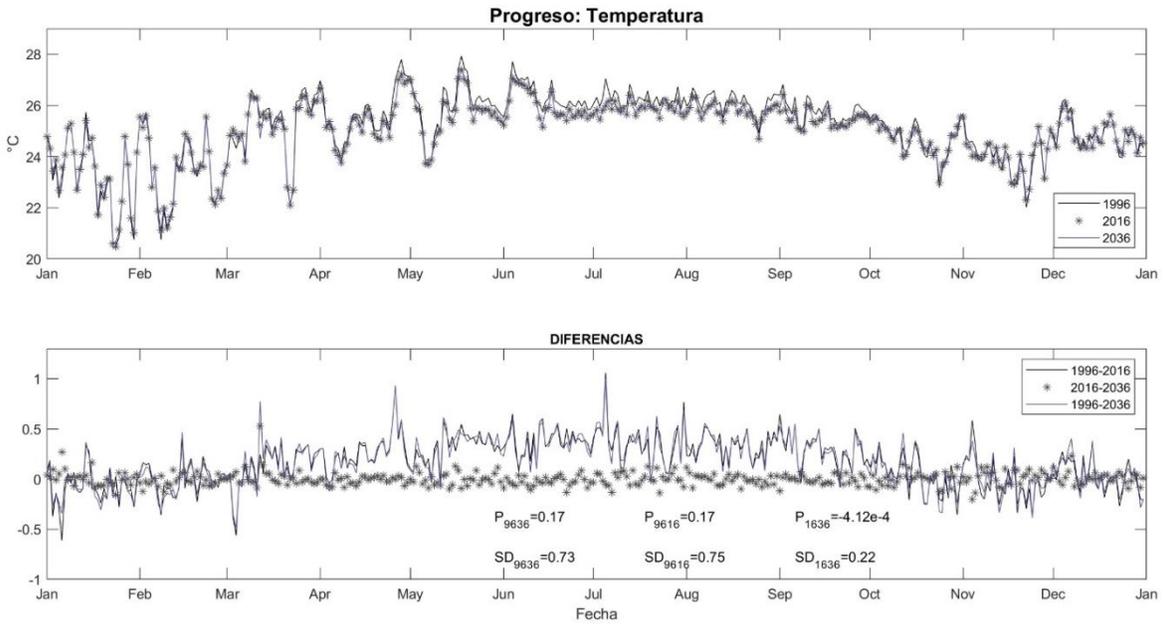
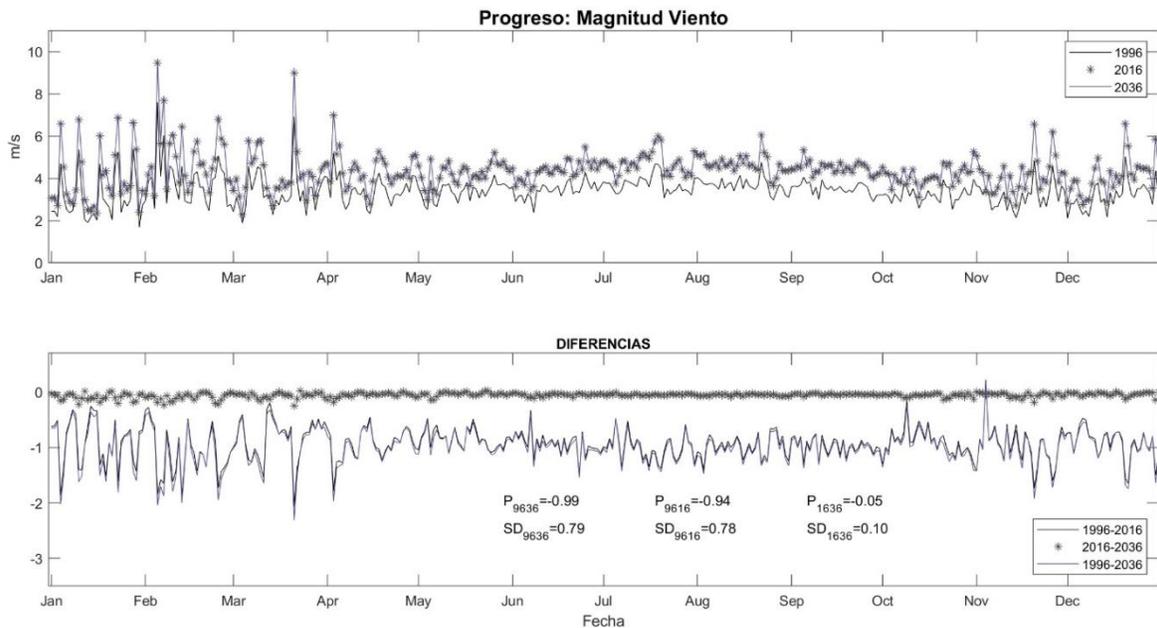


Figura A- 38. (a) Series de tiempo de la magnitud del viento a 10 m ( $ms^{-1}$ ) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años. Se indican los promedios y las desviaciones estándar para cada diferencia.



## Variabilidad Estacional

Figura A-39. Promedios estacionales de la (a) temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la (b) magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 1996. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Progreso en la Península de Yucatán.

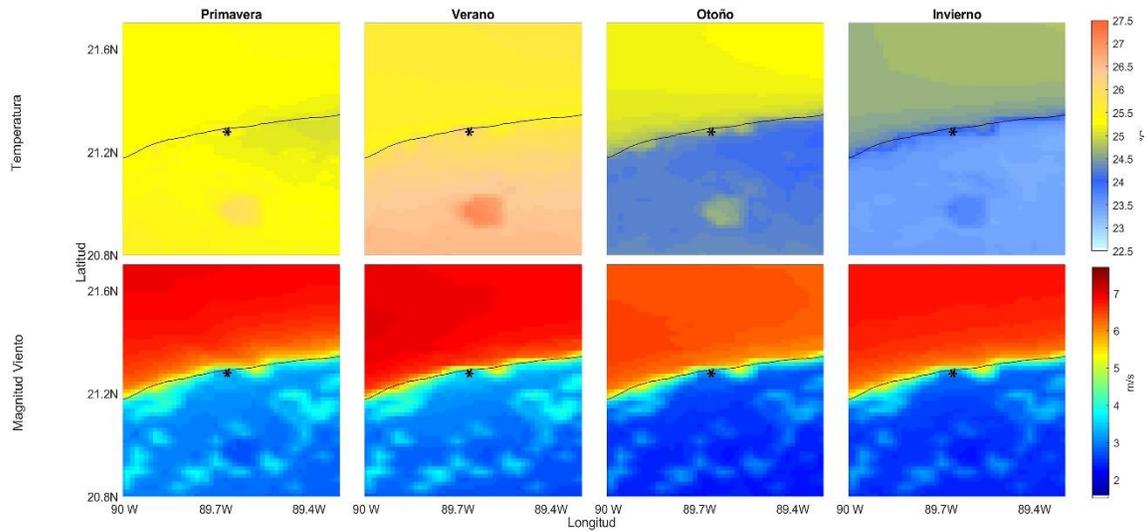


Figura A-40. Promedios estacionales de la (a) temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la (b) magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 2016. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Progreso en la Península de Yucatán.

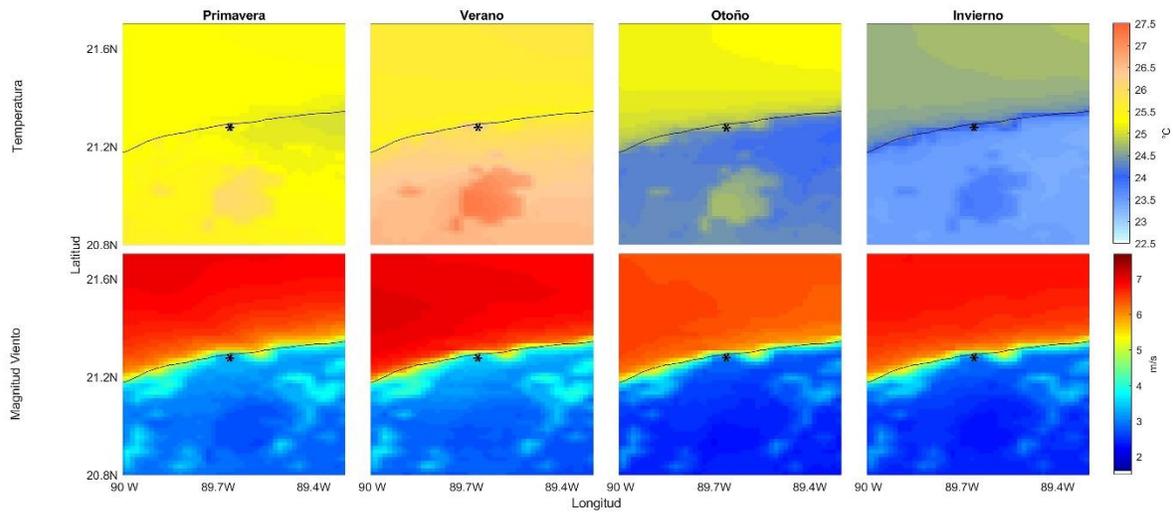
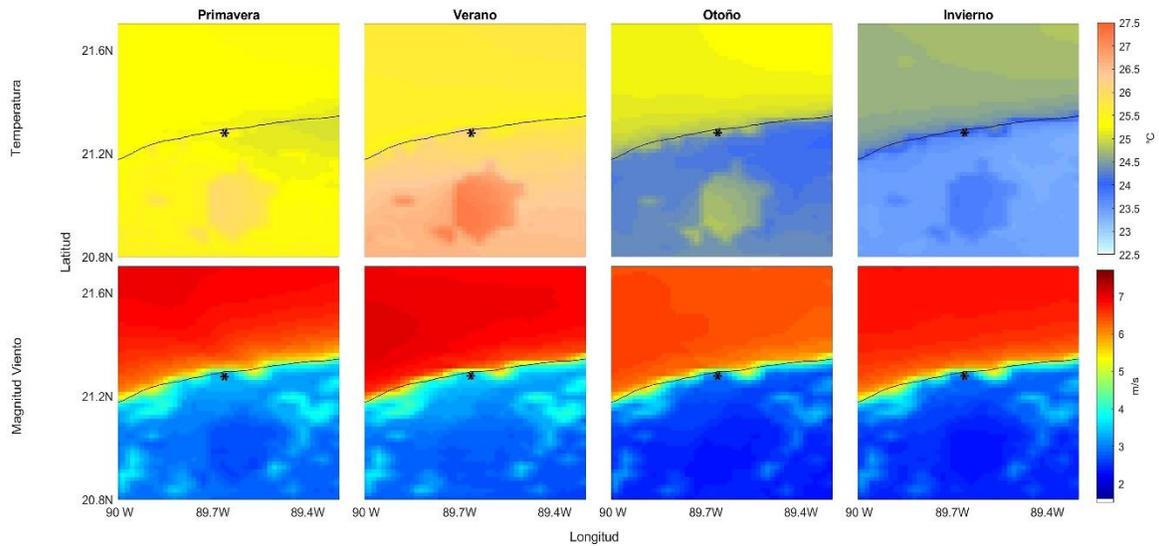


Figura A-41. Promedios estacionales de la (a) temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la (b) magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 2036. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Progreso en la Península de Yucatán.



### Diferencias de la variabilidad estacional

Figura A-42. Diferencias espaciales de la temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ), promediada estacionalmente. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Progreso en la Península de Yucatán.

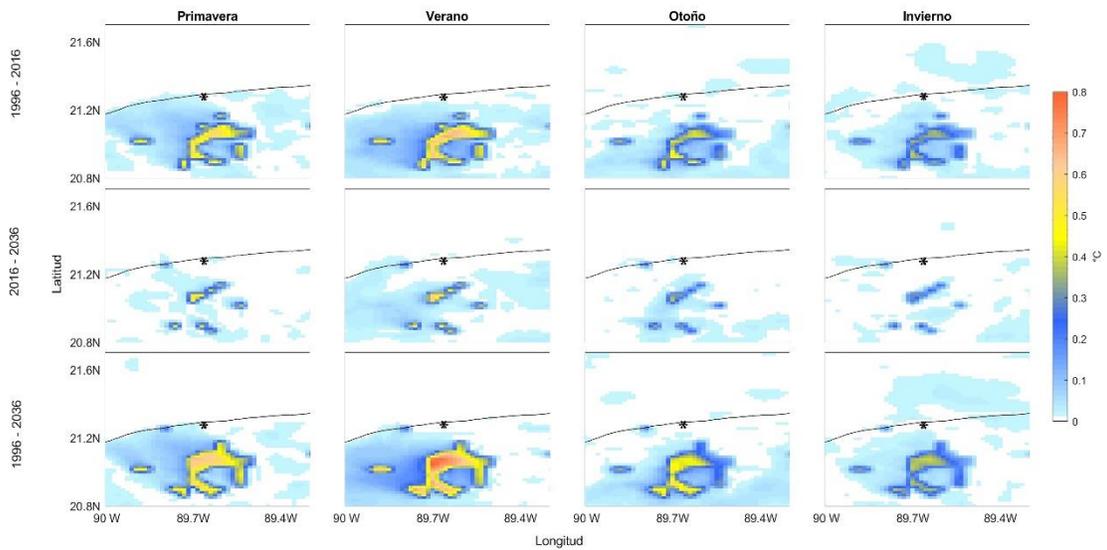
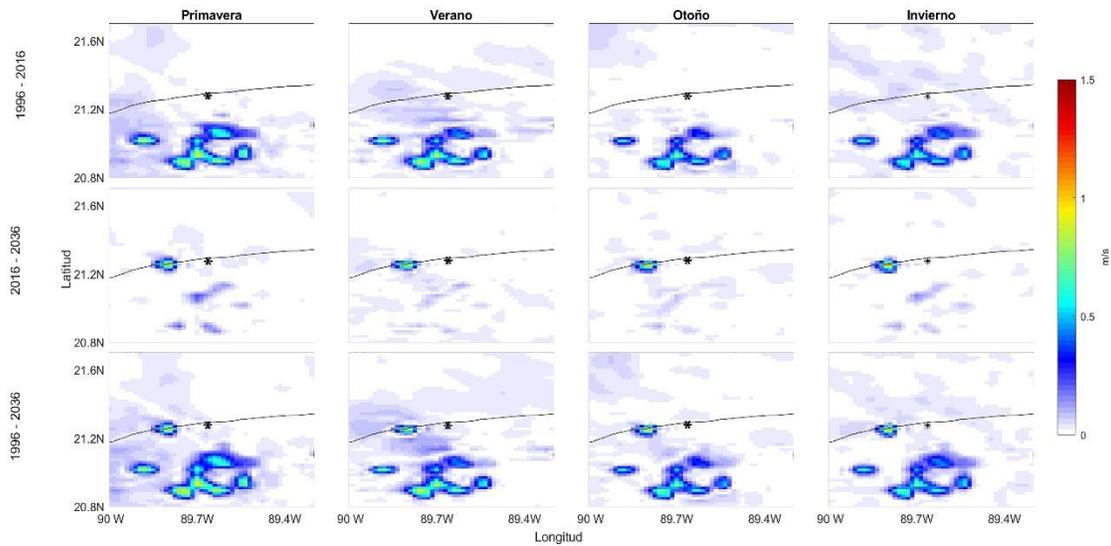


Figura A-43. Diferencias espaciales de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ), promediada estacionalmente. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Progreso en la Península de Yucatán.



## Campeche

### Variables Atmosféricas

Figura A-44. Variables atmosféricas: series de tiempo para 1996 de la dirección del viento ( $^{\circ}$ ), velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), la temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ), la humedad relativa (%) y la presión atmosférica (hPa). Las gráficas muestran los datos cada 24 hrs.

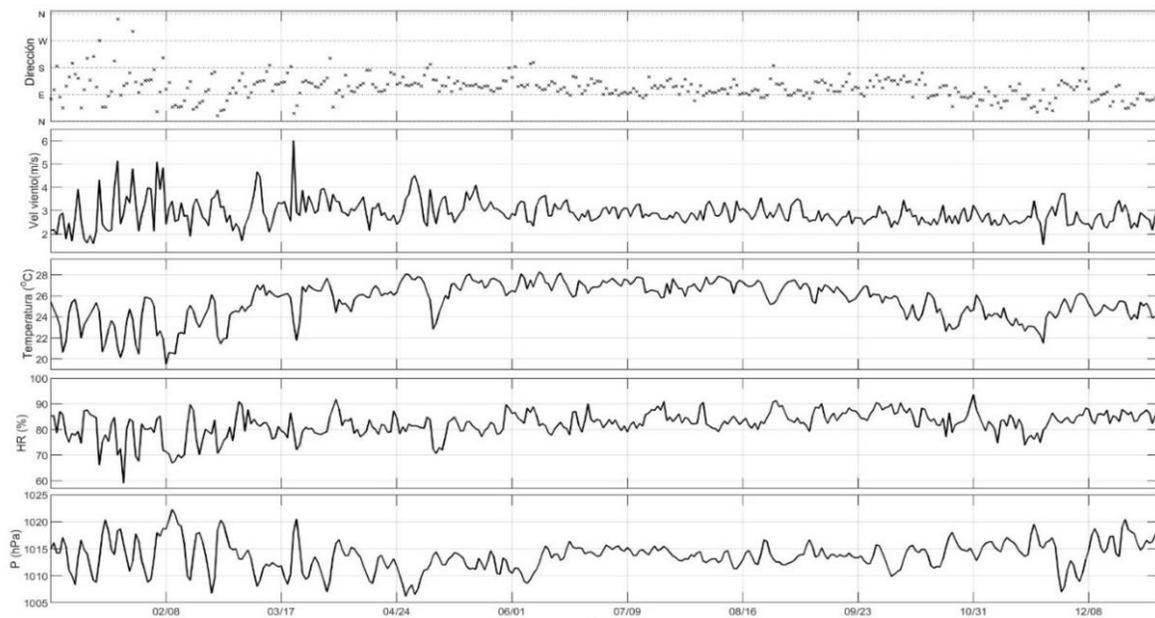


Figura A-45. Variables atmosféricas: series de tiempo para 2016 de la dirección del viento ( $^{\circ}$ ), velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), la temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ), la humedad relativa (%) y la presión atmosférica (hPa). Las gráficas muestran los datos cada 24 hrs.

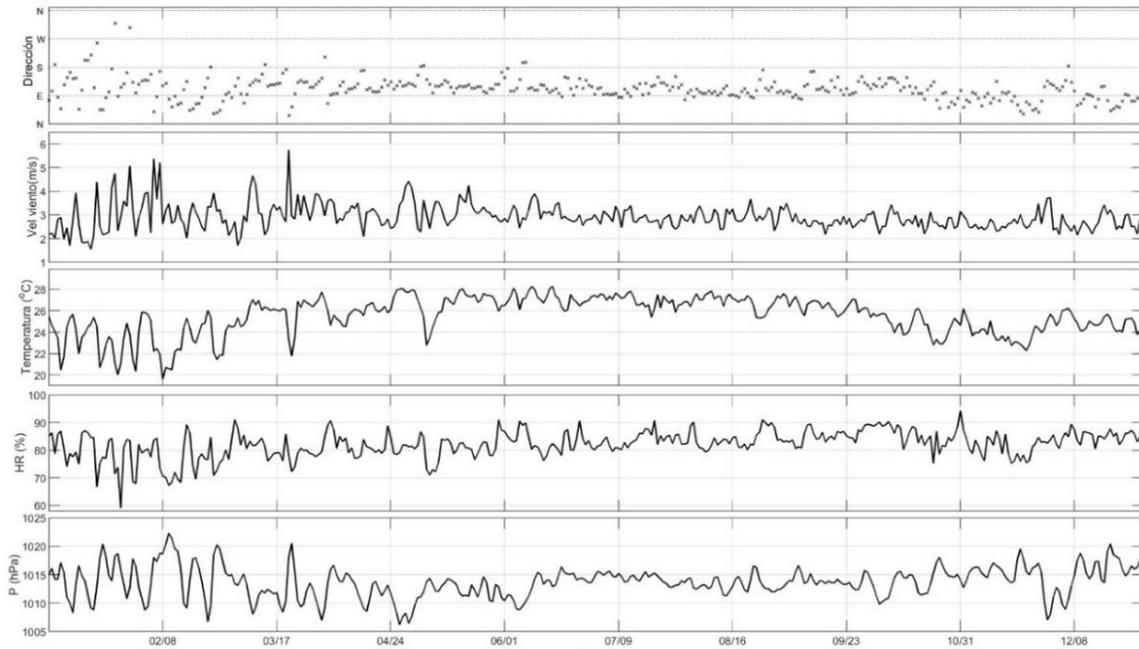


Figura A-46. Variables atmosféricas: series de tiempo para 2036 de la dirección del viento ( $^{\circ}$ ), velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), la temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ), la humedad relativa (%) y la presión atmosférica (hPa). Las gráficas muestran los datos cada 24 hrs.

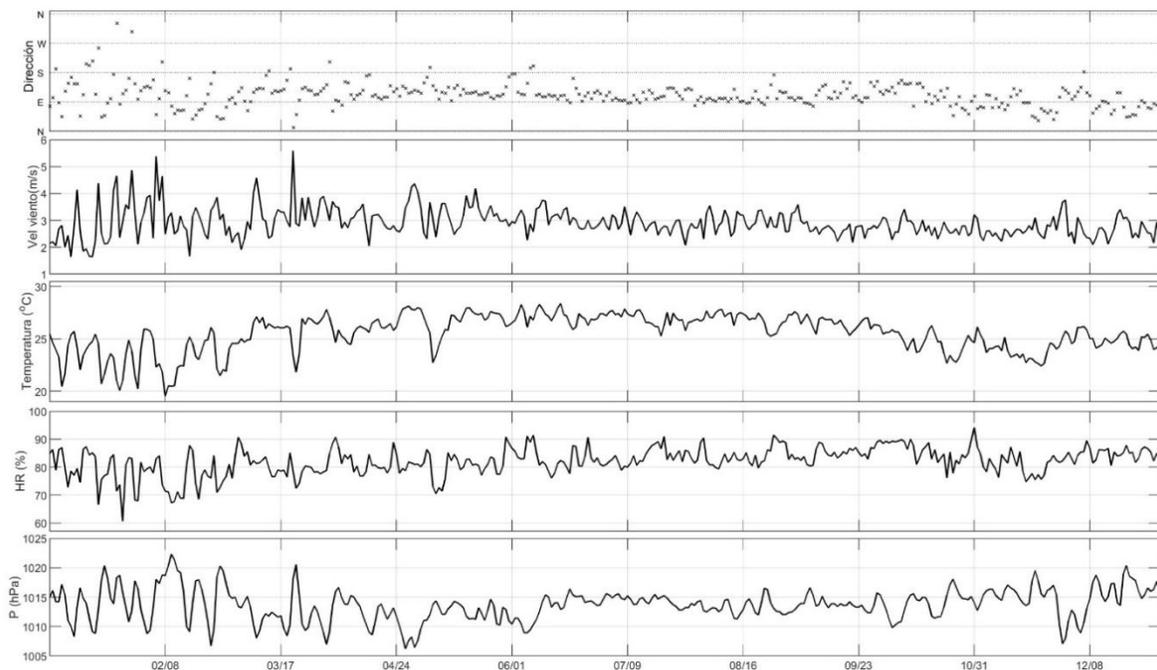
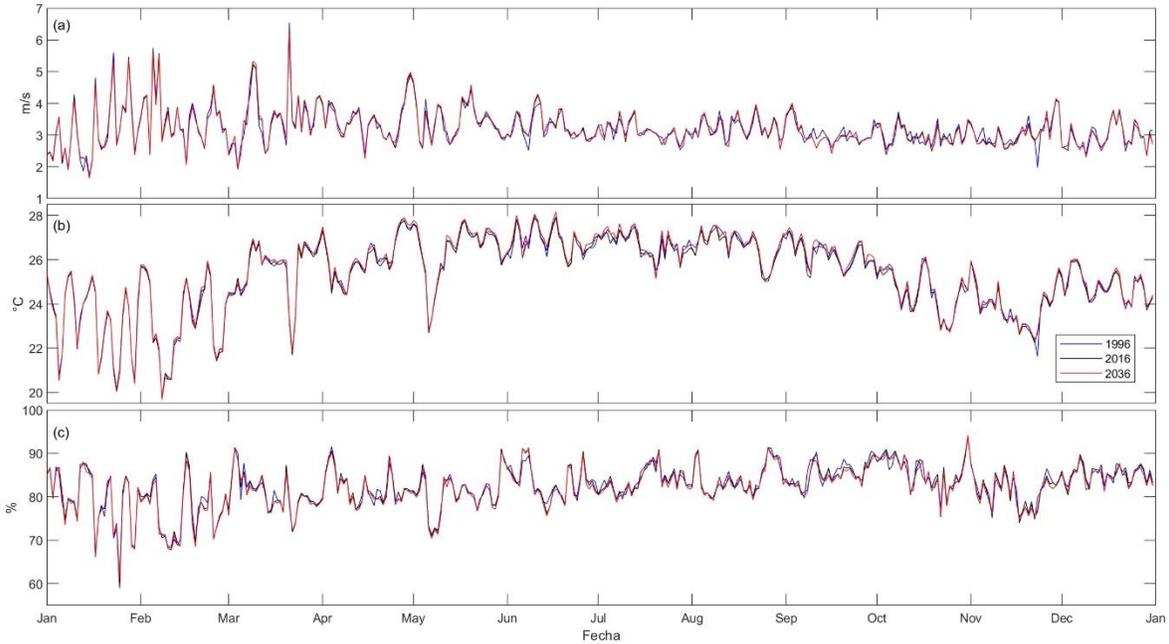


Figura A-47. Variables atmosféricas. (a) Magnitud de la velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), (b) temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ) y (c) humedad relativa (%) promediadas dentro de los polígonos. Las series de tiempo muestran los datos cada 24 hrs, para 1996 (azul), 2016 (negro) y 2036 (rojo).



### Rosa de los vientos

Figura A-48. Rosa de vientos para 1996. Los colores indican la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ), la orientación de los conos su dirección ( $^{\circ}$ ) y los círculos concéntricos el porcentaje de ocurrencia (%).

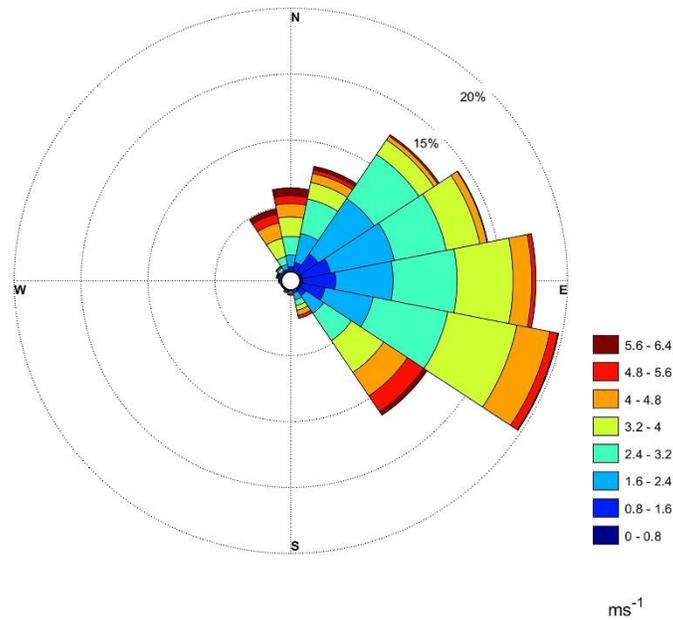


Figura A-49. Rosa de vientos para 2016. Los colores indican la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ), la orientación de los conos su dirección ( $^{\circ}$ ) y los círculos concéntricos el porcentaje de ocurrencia (%).

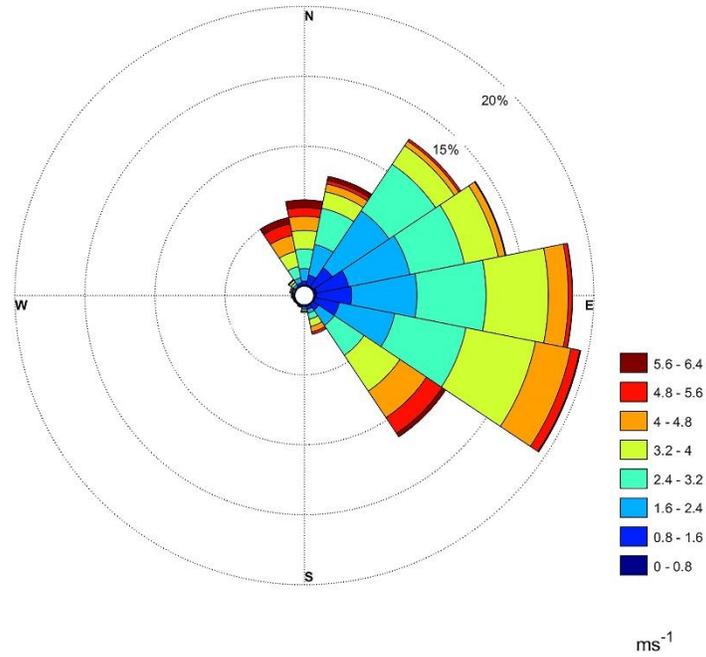
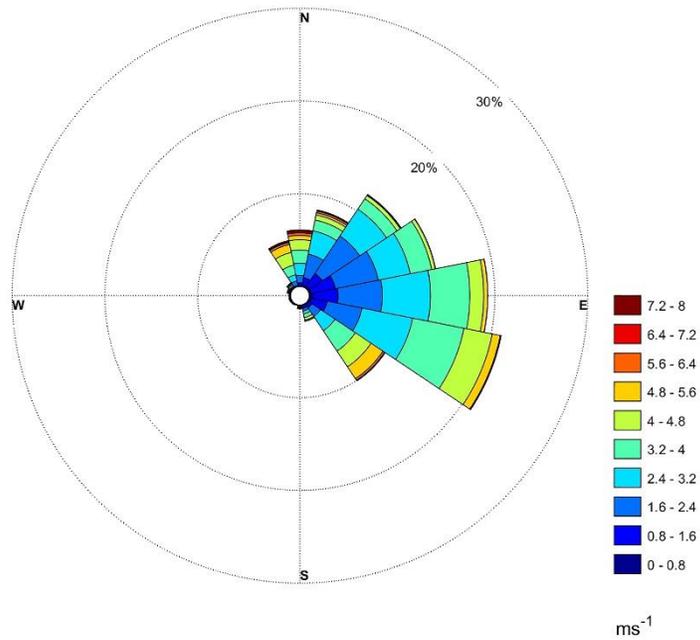


Figura A-50. Rosa de vientos para 2036. Los colores indican la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ), la orientación de los conos su dirección ( $^{\circ}$ ) y los círculos concéntricos el porcentaje de ocurrencia (%).



## Diferencias de las series de tiempo

Figura A-51. Diferencias de las series de tiempo de 1996-2016 para la temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) (línea roja) y la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ) (línea verde).

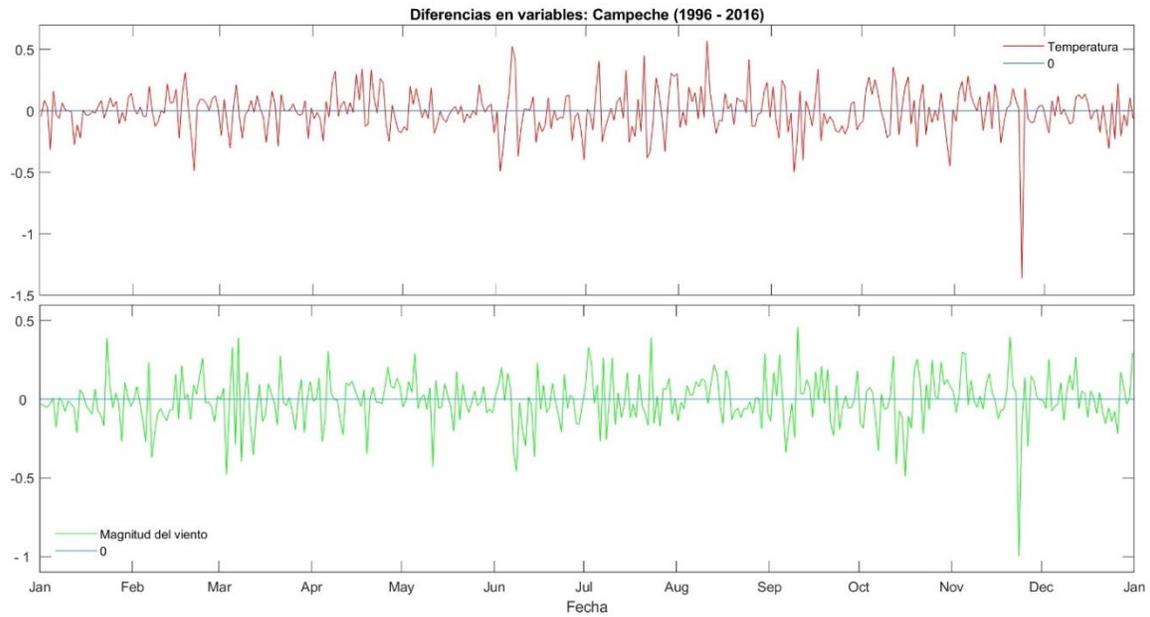


Figura A-52. Diferencias de las series de tiempo de 2016-2036 para la temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) (línea roja) y la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ) (línea verde).

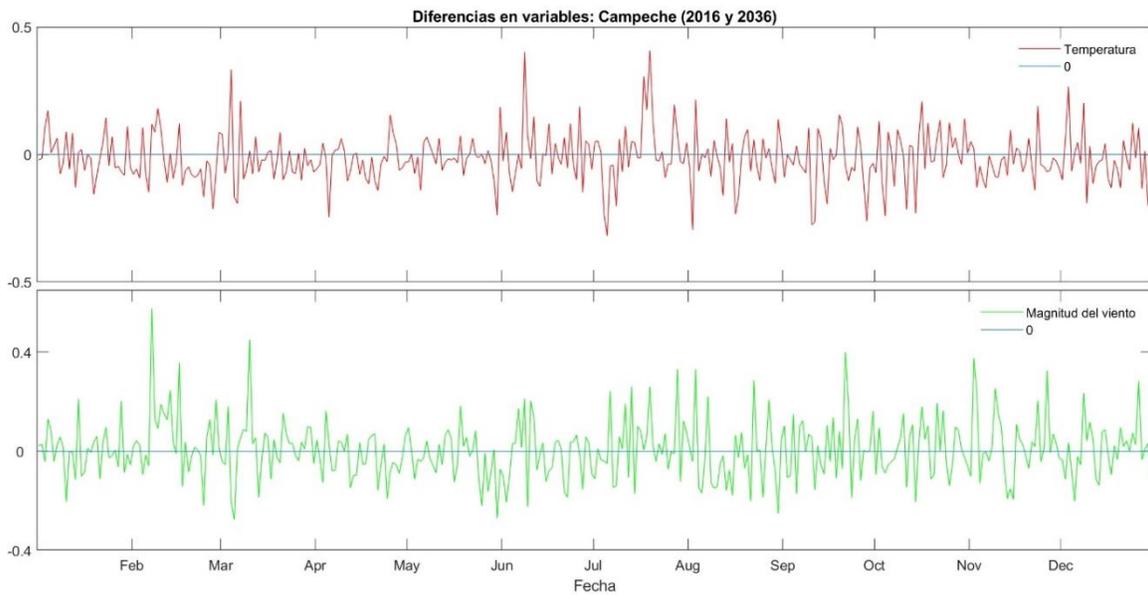
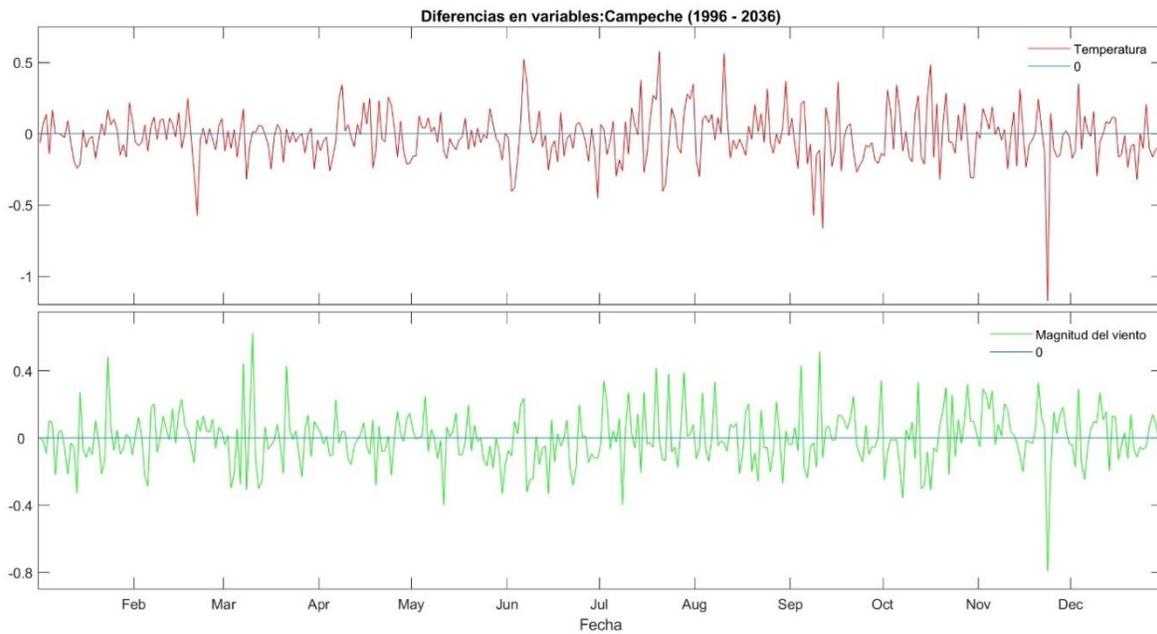


Figura A-53. Diferencias de las series de tiempo de 1996-2036 para la temperatura del aire (°C) (línea roja) y la magnitud del viento (ms<sup>-1</sup>) (línea verde).



### Diferencias de las variables de los polígonos

Figura A- 54. (a) Series de tiempo de la temperatura del aire a 2 m (°C) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años. Se indican los promedios y las desviaciones estándar para cada diferencia.

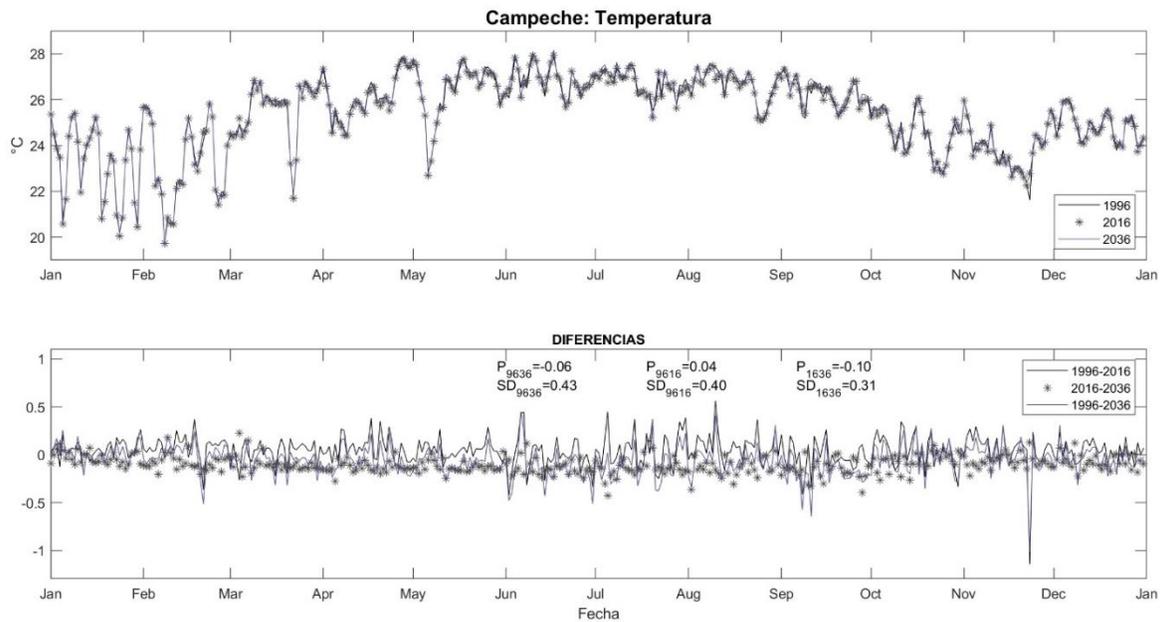
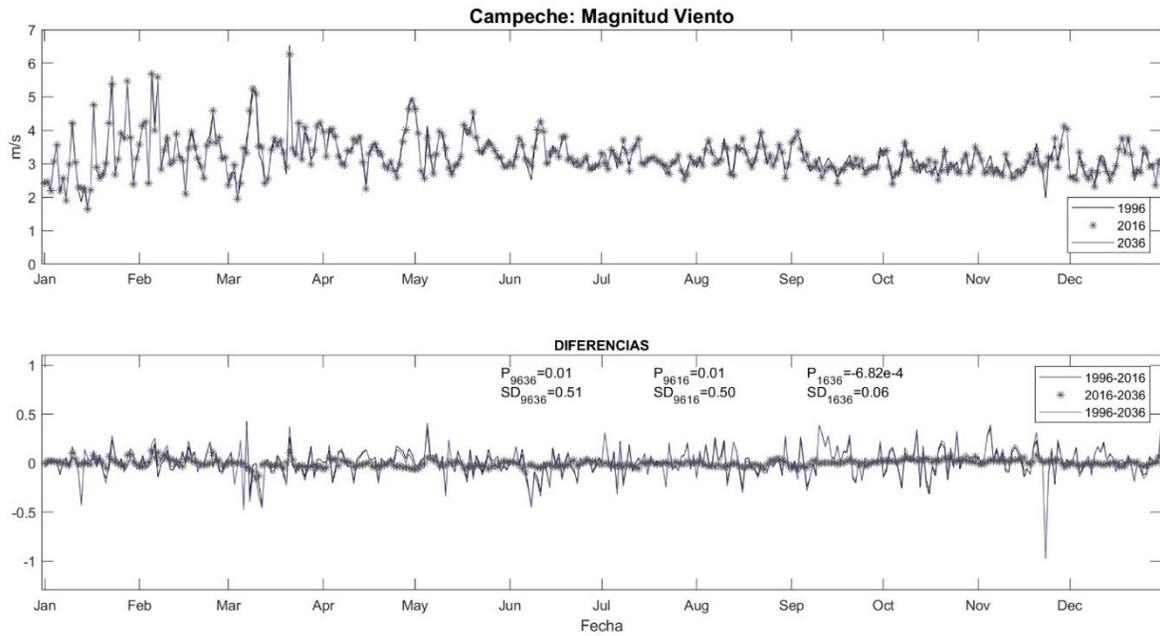


Figura A- 55. (a) Series de tiempo de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años. Se indican los promedios y las desviaciones estándar para cada diferencia.



### Variabilidad Estacional

Figura A-56. Promedios estacionales de la (a) temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la (b) magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 1996. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Campeche en la Península de Yucatán.

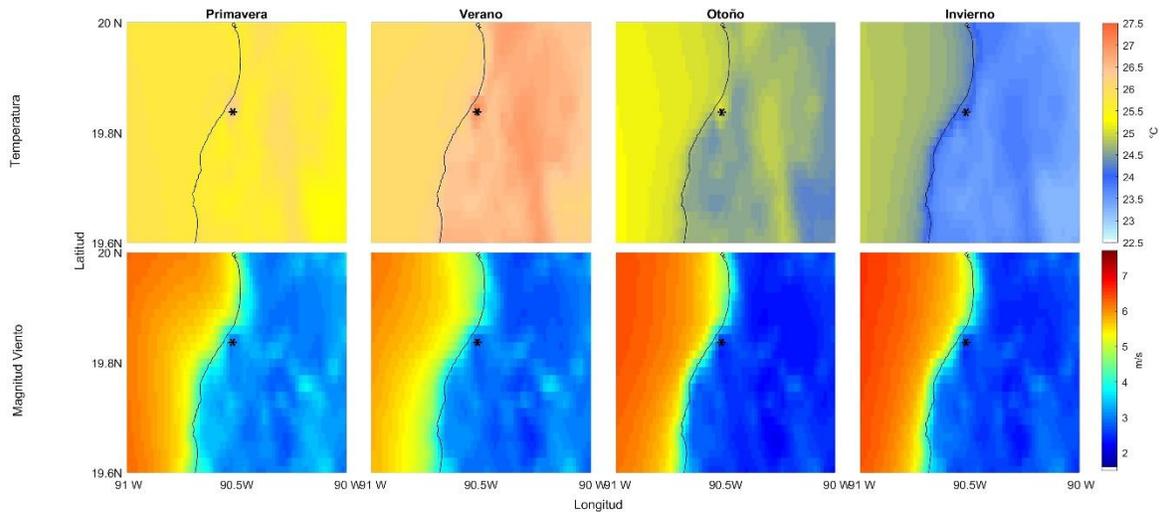


Figura A-57. Promedios estacionales de la (a) temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la (b) magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 2016. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Campeche en la Península de Yucatán.

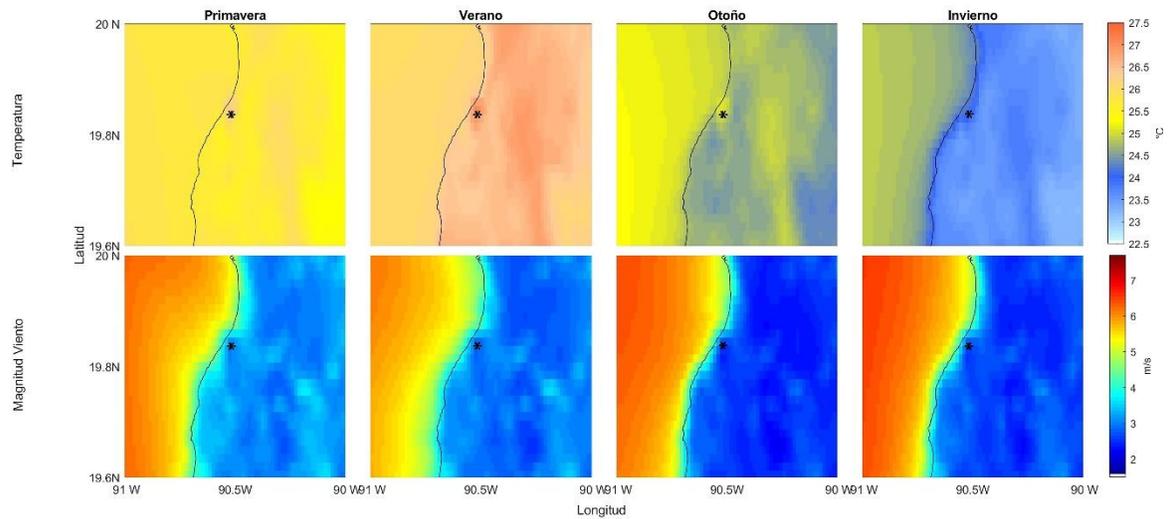
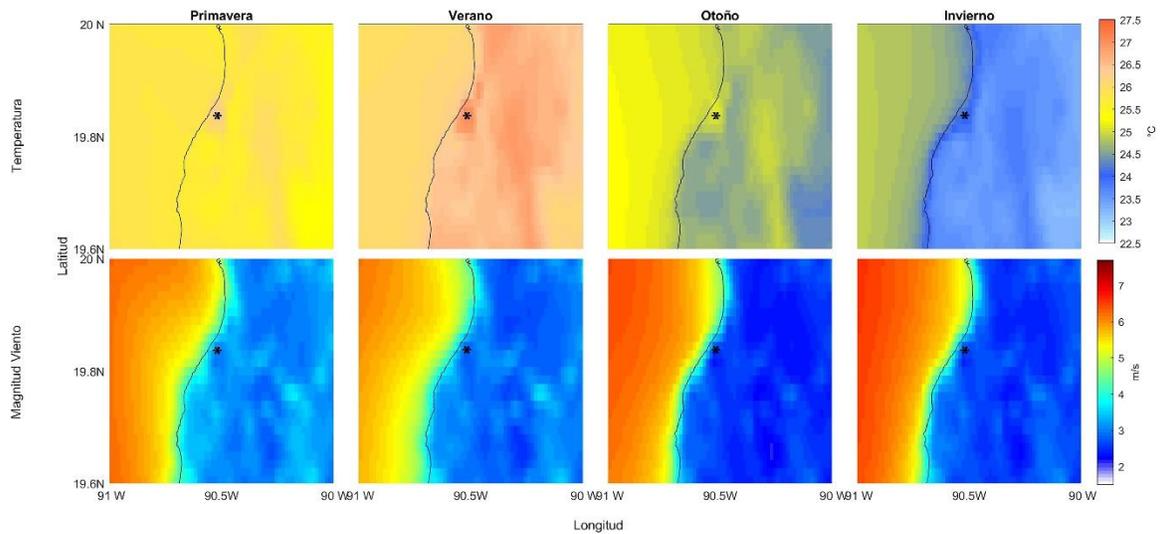


Figura A-58. Promedios estacionales de la (a) temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la (b) magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 2036. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Campeche en la Península de Yucatán.



## Diferencias de la variabilidad estacional

Figura A-59. Diferencias espaciales de la temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ), promediada estacionalmente. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Campeche en la Península de Yucatán.

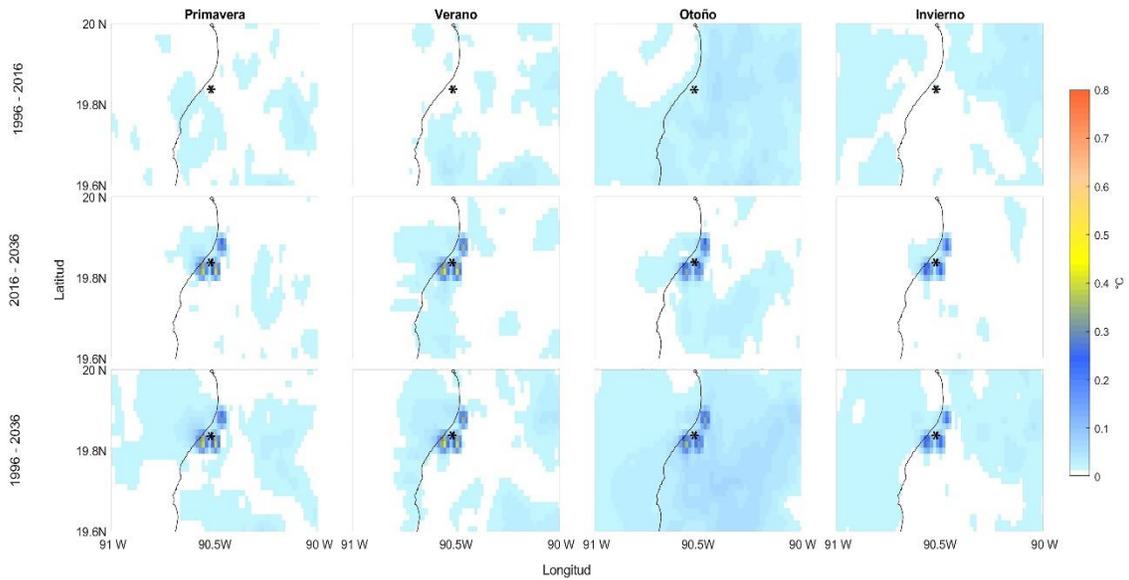
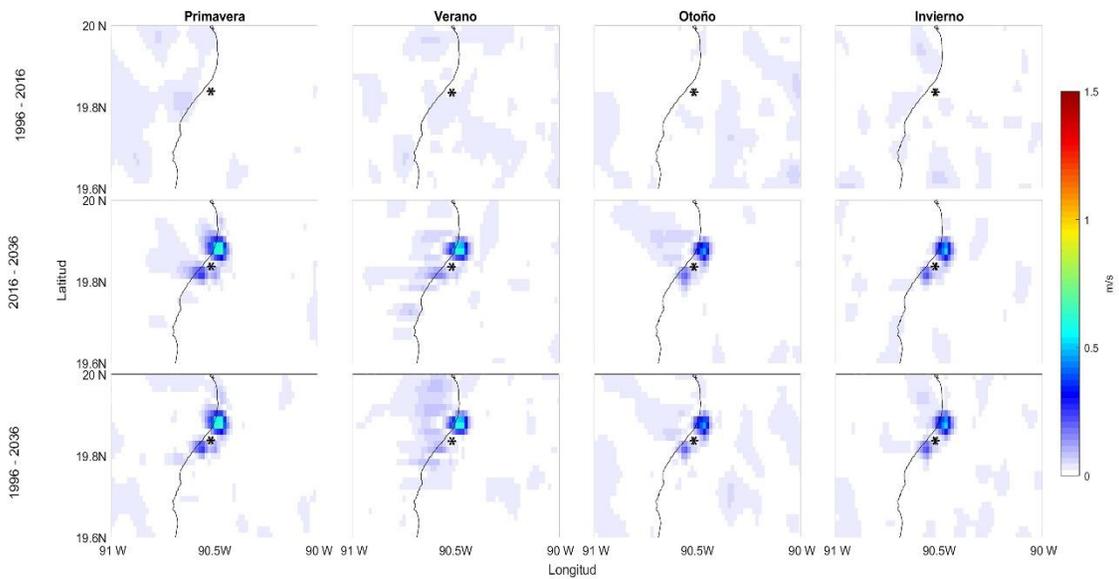


Figura A-60. Diferencias espaciales de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ), promediada estacionalmente. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Campeche en la Península de Yucatán.



## Playa del Carmen

### Variables Atmosféricas

Figura A-61. Variables atmosféricas: series de tiempo para 1996 de la dirección del viento ( $^{\circ}$ ), velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), la temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ), la humedad relativa (%) y la presión atmosférica (hPa). Las gráficas muestran los datos cada 24 hrs.

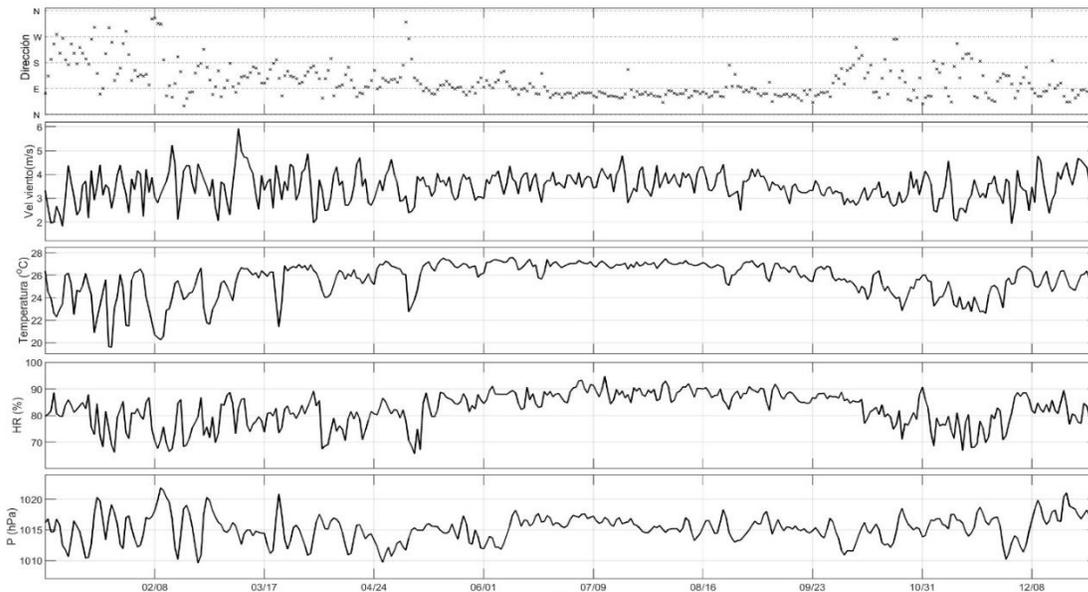


Figura A-62. Variables atmosféricas: series de tiempo para 2016 de la dirección del viento ( $^{\circ}$ ), velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), la temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ), la humedad relativa (%) y la presión atmosférica (hPa). Las gráficas muestran los datos cada 24 hrs.

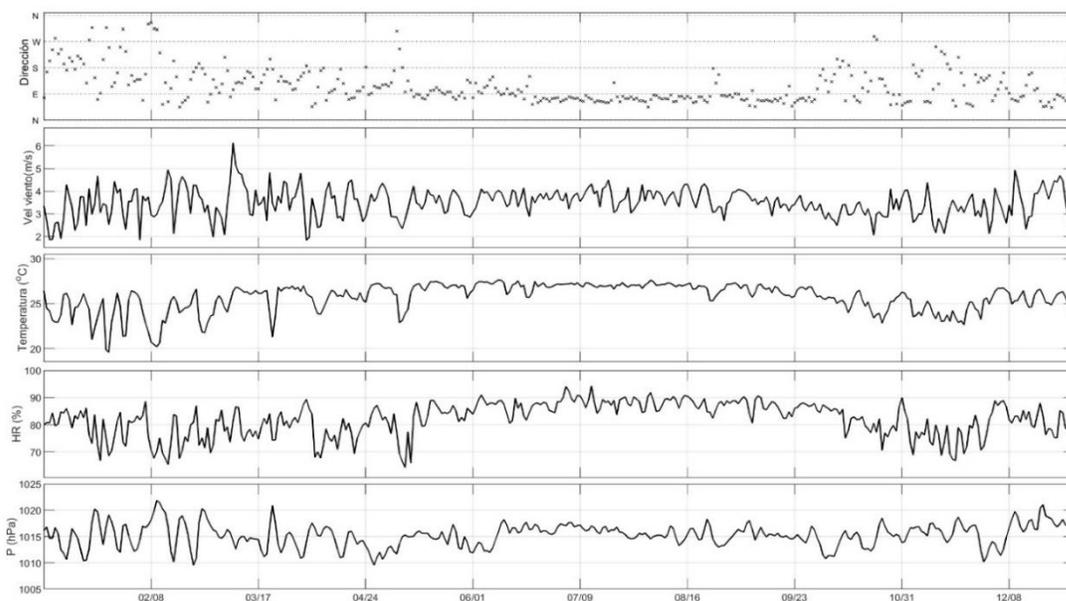


Figura A-63. Variables atmosféricas: series de tiempo para 2036 de la dirección del viento ( $^{\circ}$ ), velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), la temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ), la humedad relativa (%) y la presión atmosférica (hPa). Las gráficas muestran los datos cada 24 hrs.

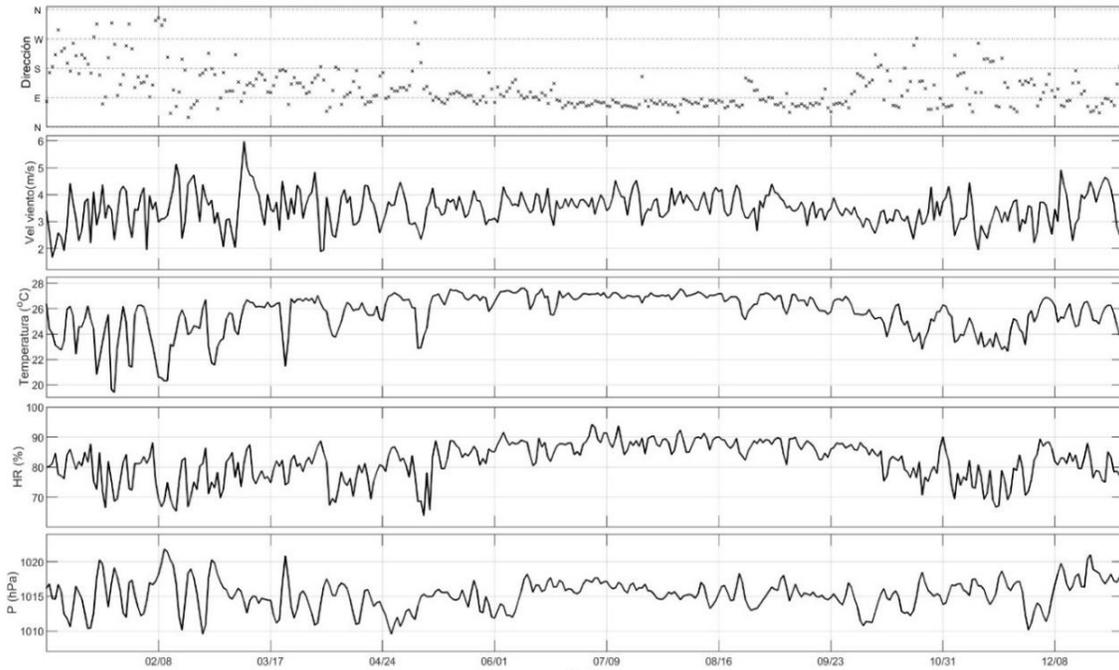
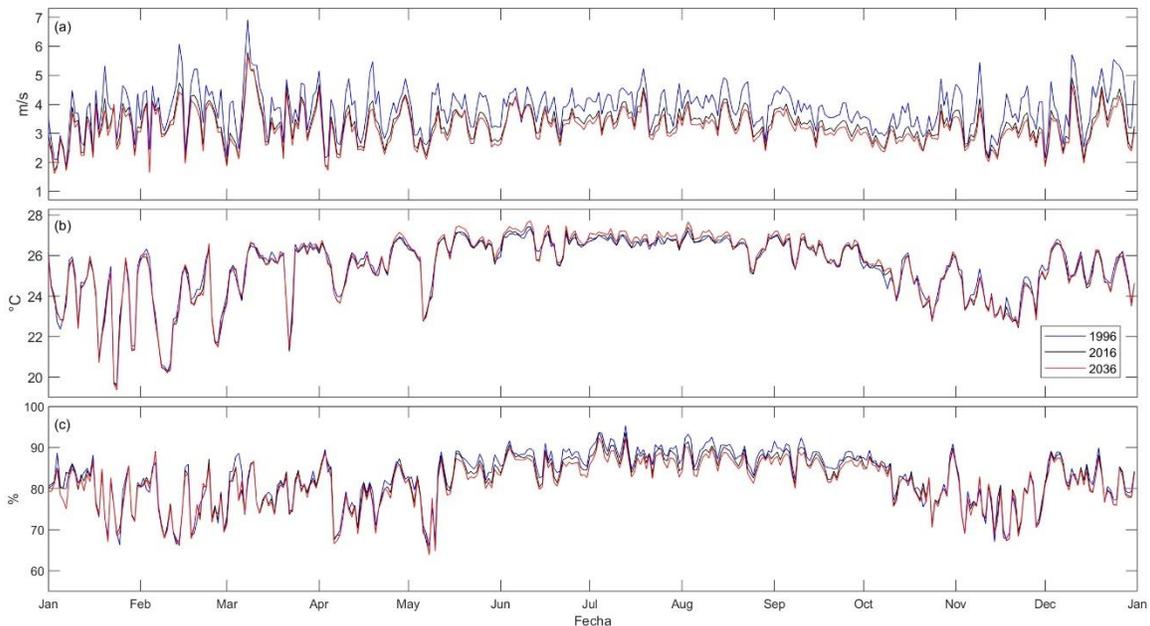


Figura A-64. Variables atmosféricas. (a) Magnitud de la velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), (b) temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ) y (c) humedad relativa (%) promediadas dentro de los polígonos. Las series de tiempo muestran los datos cada 24 hrs, para 1996 (azul), 2016 (negro) y 2036 (rojo).



## Rosa de los vientos

Figura A-65. Rosa de vientos para 1996. Los colores indican la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ), la orientación de los conos su dirección ( $^{\circ}$ ) y los círculos concéntricos el porcentaje de ocurrencia (%).

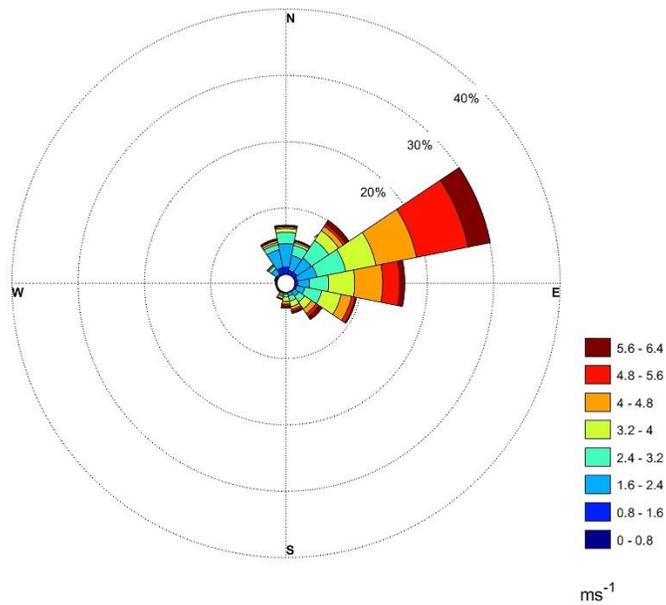


Figura A-66. Rosa de vientos para 2016. Los colores indican la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ), la orientación de los conos su dirección ( $^{\circ}$ ) y los círculos concéntricos el porcentaje de ocurrencia (%).

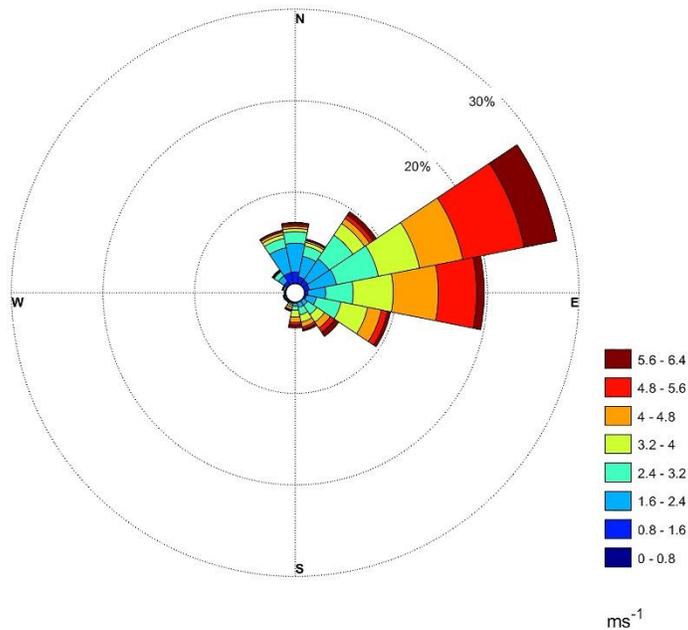
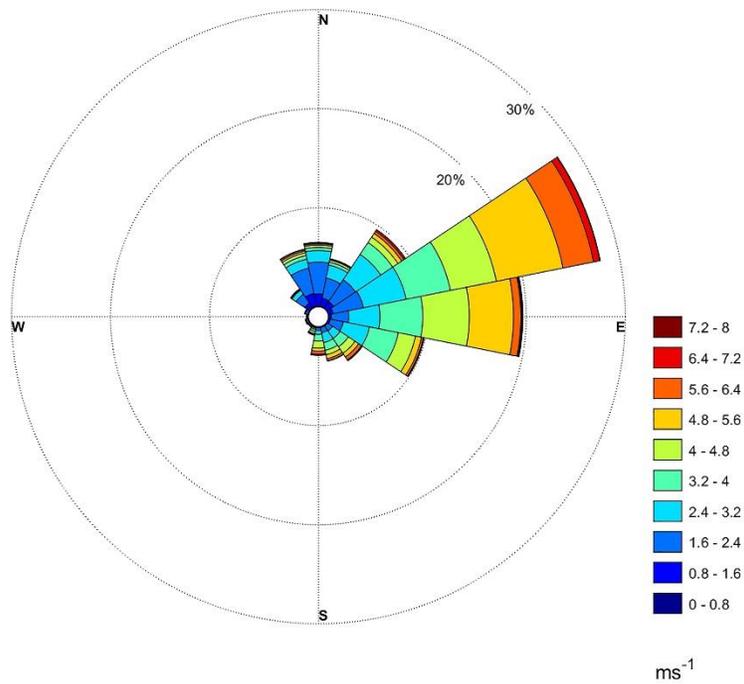


Figura A-67. Rosa de vientos para 2036. Los colores indican la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ), la orientación de los conos su dirección ( $^{\circ}$ ) y los círculos concéntricos el porcentaje de ocurrencia (%).



### Diferencias de las series de tiempo

Figura A-68. Diferencias de las series de tiempo de 1996-2016 para la temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) (línea roja) y la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ) (línea verde).

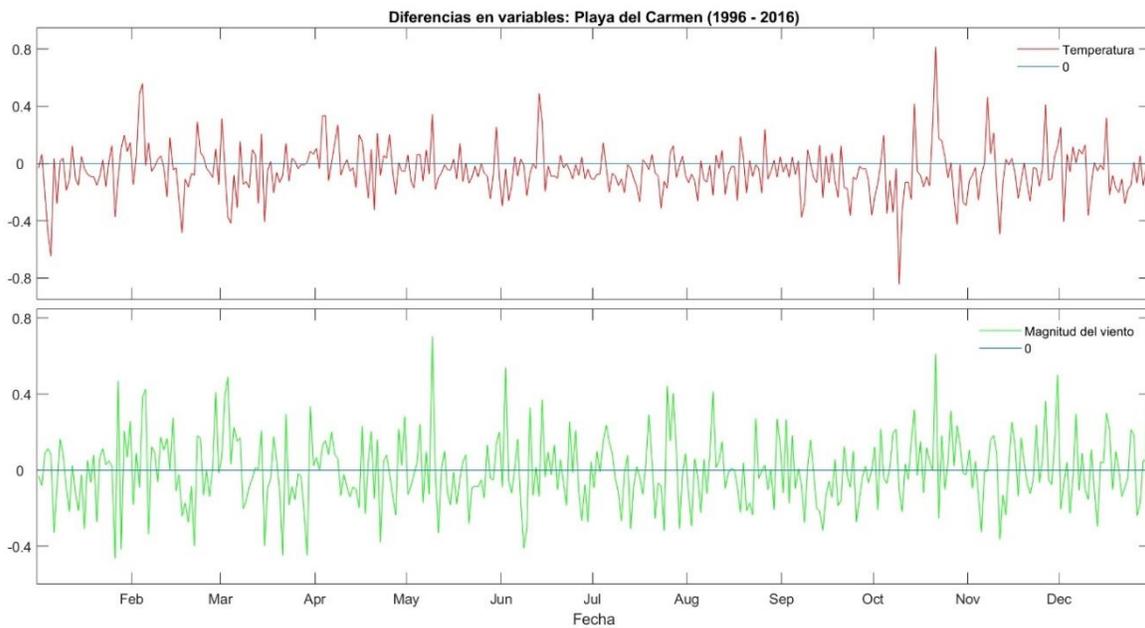


Figura A-69. Diferencias de las series de tiempo de 2016-2036 para la temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) (línea roja) y la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ) (línea verde).

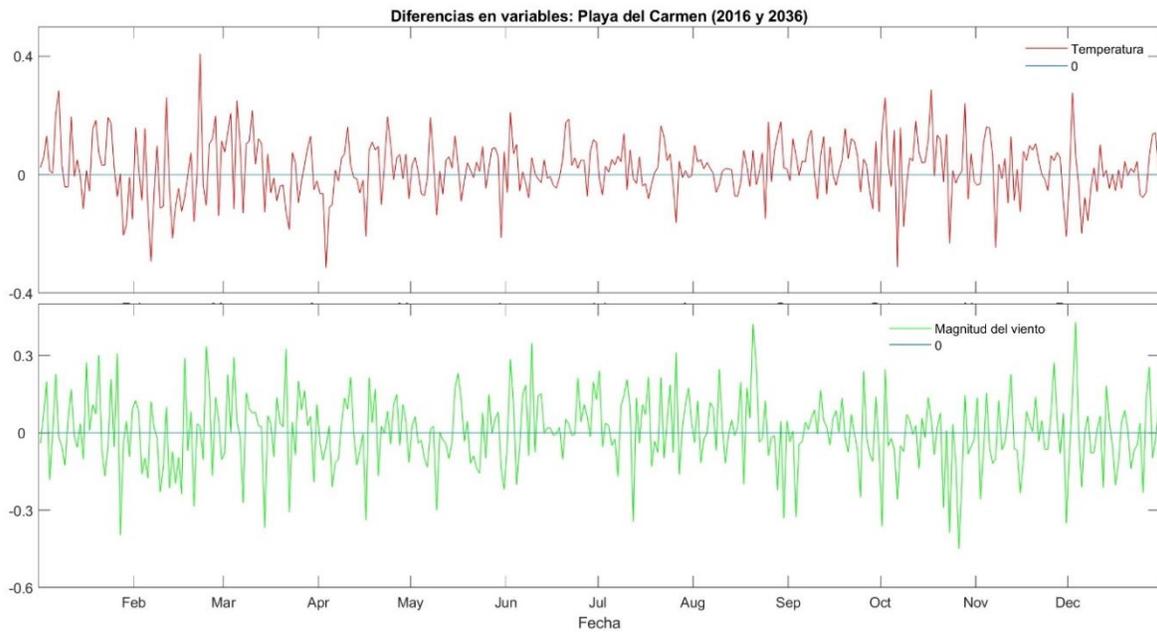
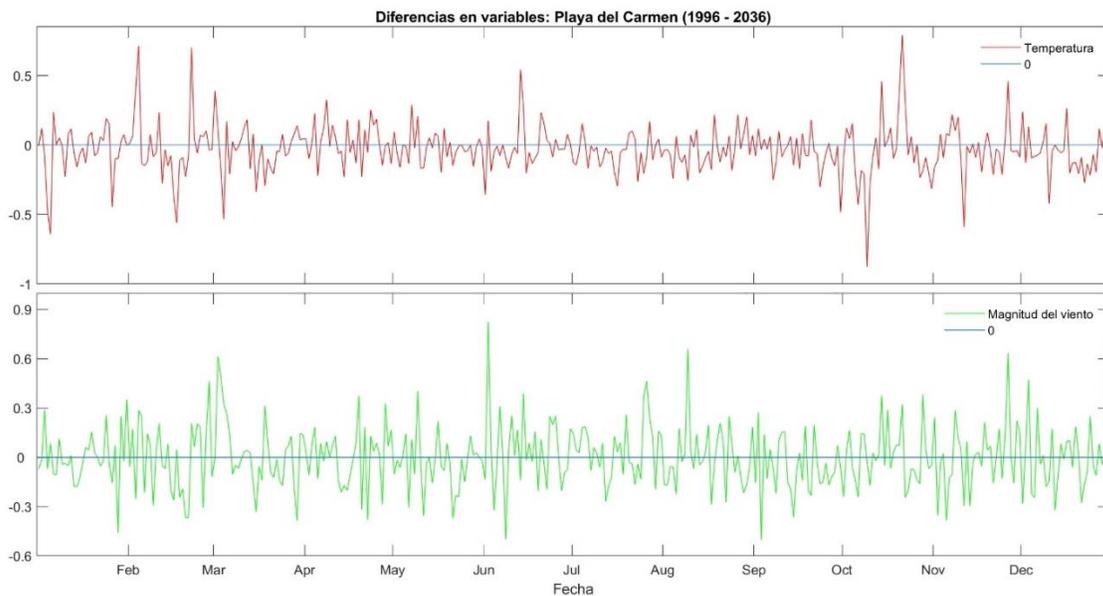
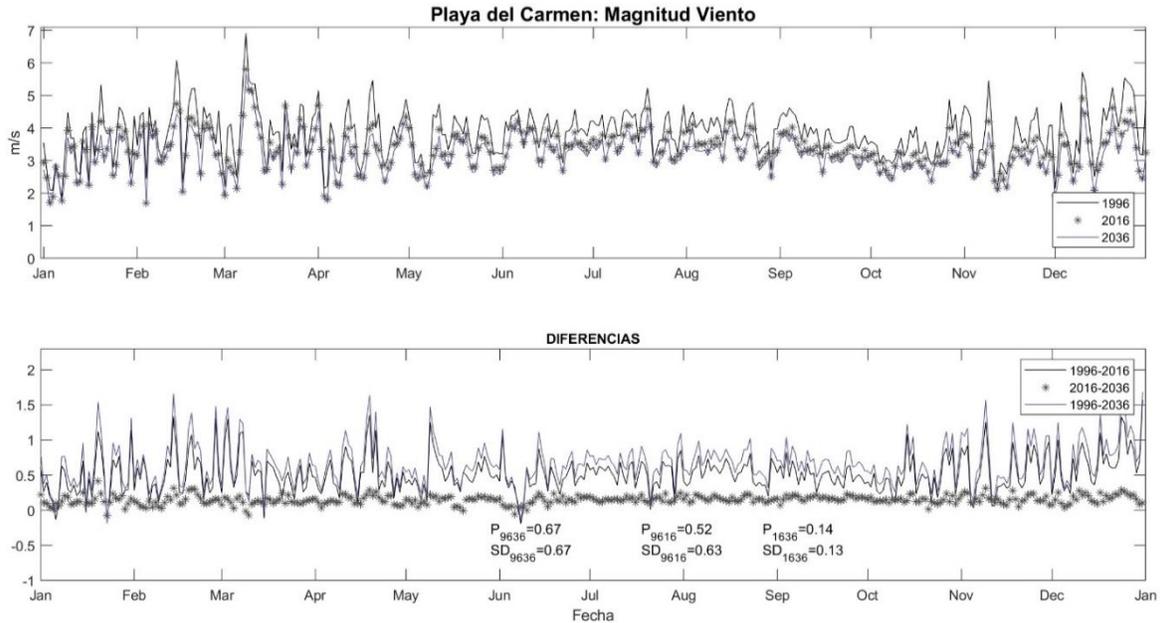


Figura A-70. Diferencias de las series de tiempo de 1996-2036 para la temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) (línea roja) y la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ) (línea verde).



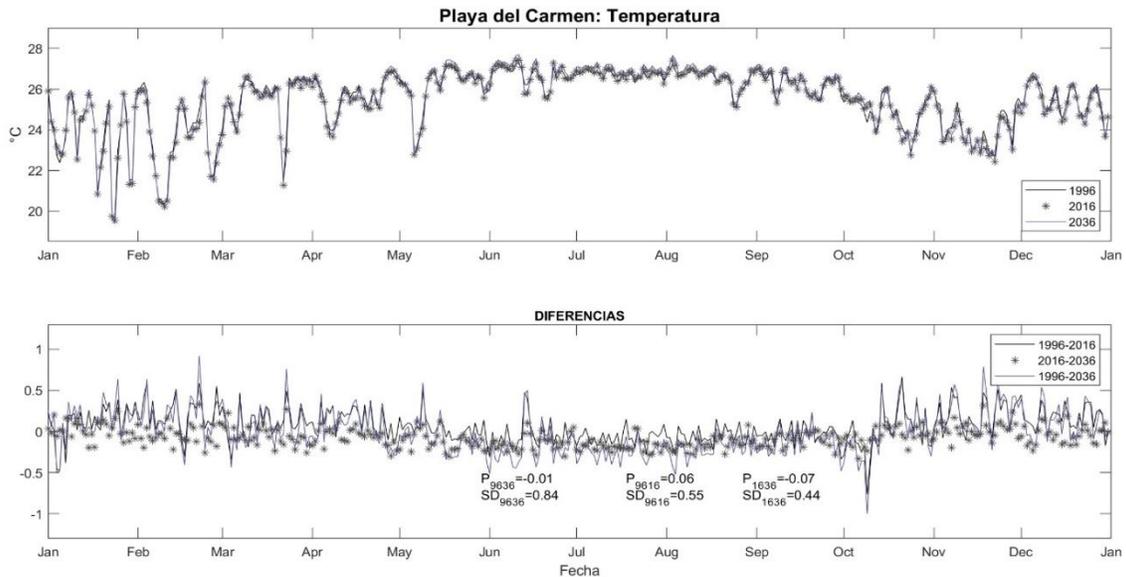
## Diferencias de las variables de los polígonos

Figura A-71. (a) Series de tiempo de la temperatura del aire a 2 m (°C) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años. Se indican los promedios y las desviaciones



estándar para cada diferencia.

Figura A-72. (a) Series de tiempo de la magnitud del viento a 10 m ( $ms^{-1}$ ) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años. Se indican los promedios y las desviaciones estándar para cada diferencia.



## Variabilidad Estacional

Figura A-73. Promedios estacionales de la (a) temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la (b) magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 1996. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Playa del Carmen en la Península de Yucatán.

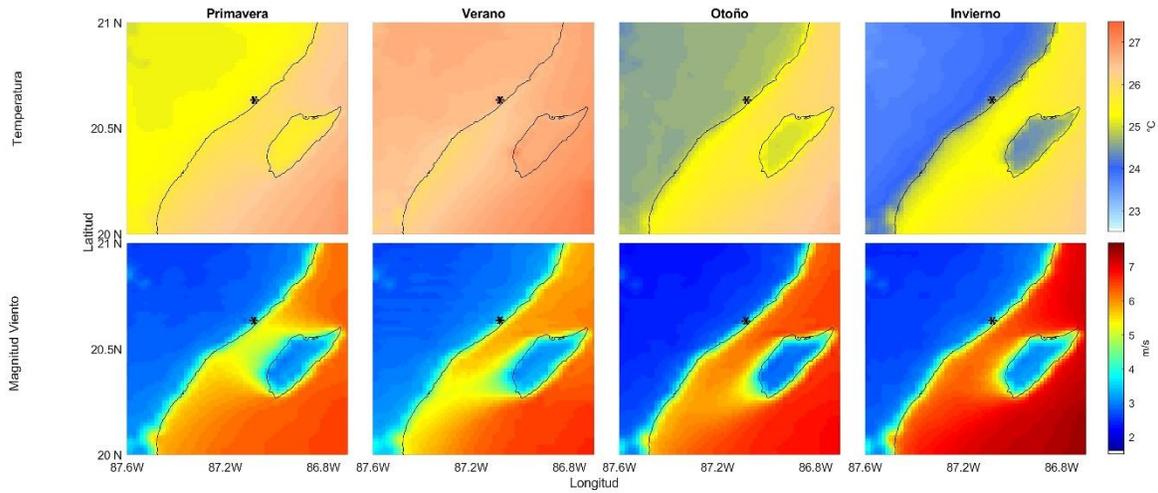


Figura A-74. Promedios estacionales de la (a) temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la (b) magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 2016. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Playa del Carmen en la Península de Yucatán.

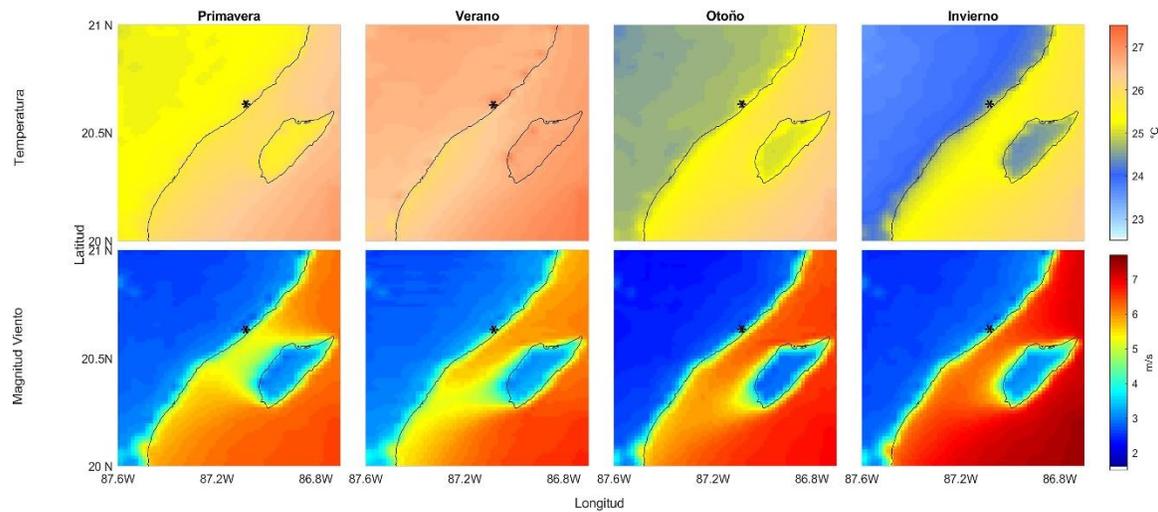
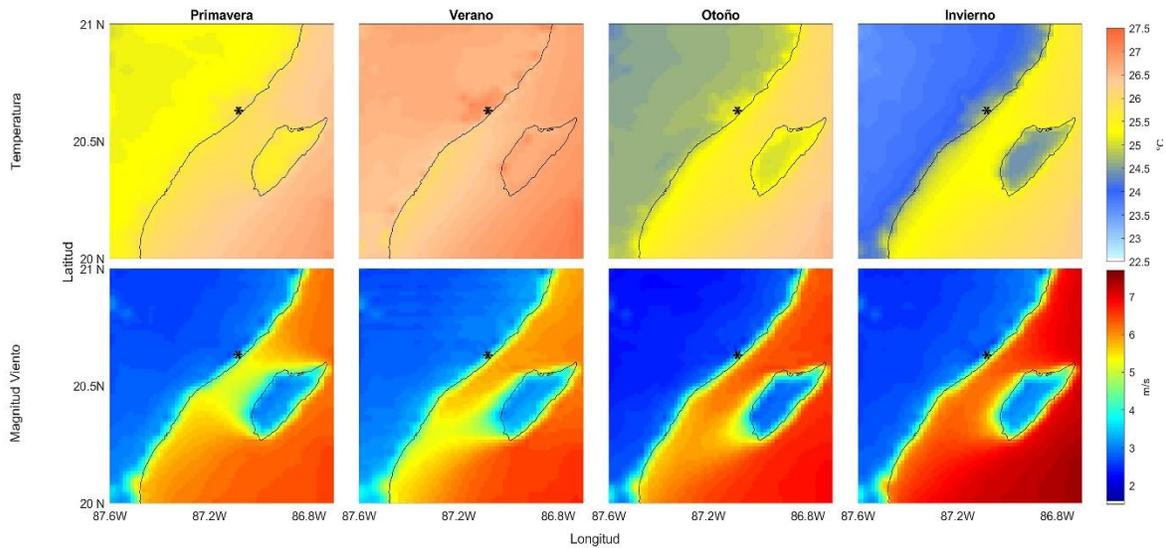


Figura A-75. Promedios estacionales de la (a) temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la (b) magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 2036. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Playa del Carmen en la Península de Yucatán.



### Diferencias de la variabilidad estacional

Figura A-76. Diferencias espaciales de la temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ), promediada estacionalmente. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Playa del Carmen en la Península de Yucatán.

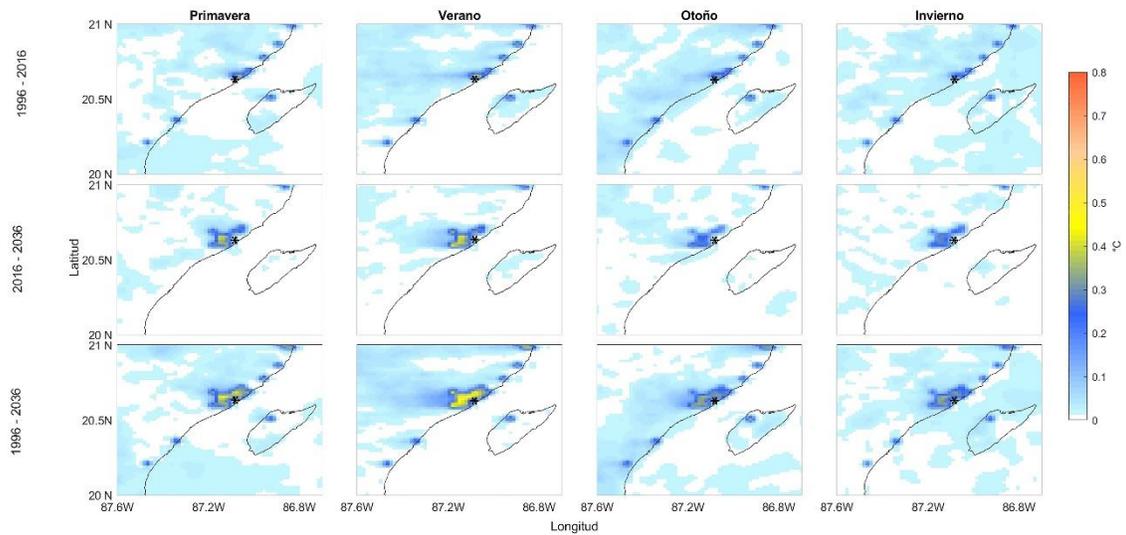
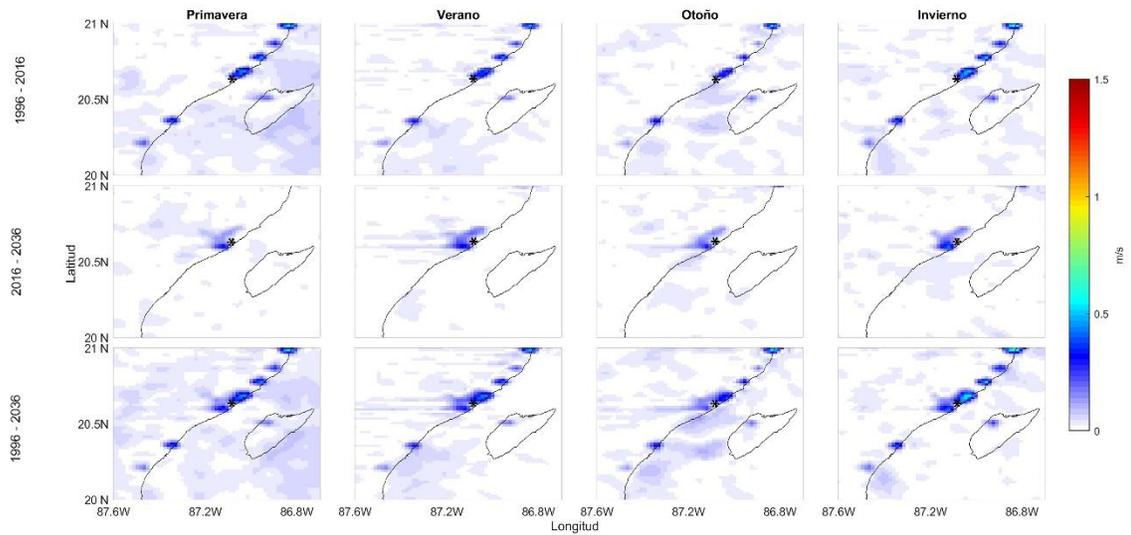


Figura A-77. Diferencias espaciales de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ), promediada estacionalmente. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Playa del Carmen en la Península de Yucatán.



## Cancún

### Variables Atmosféricas

Figura A-78. Variables atmosféricas: series de tiempo para 1996 de la dirección del viento ( $^{\circ}$ ), velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), la temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ), la humedad relativa (%) y la presión atmosférica (hPa). Las gráficas muestran los datos cada 24 hrs.

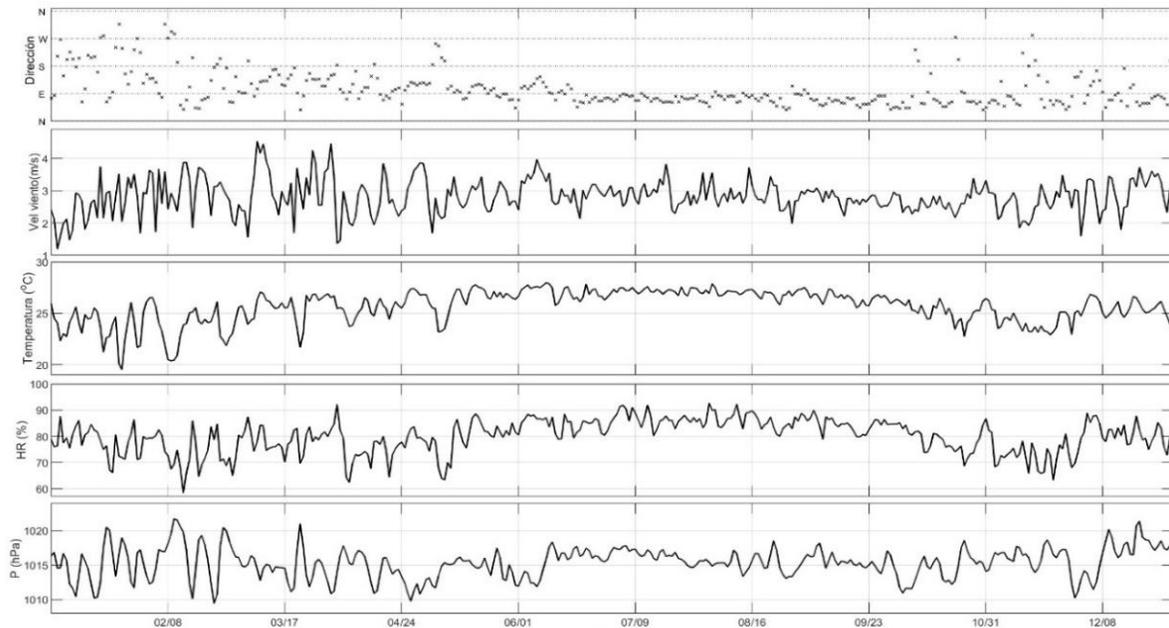


Figura A-79. Variables atmosféricas: series de tiempo para 2016 de la dirección del viento ( $^{\circ}$ ), velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), la temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ), la humedad relativa (%) y la presión atmosférica (hPa). Las gráficas muestran los datos cada 24 hrs.

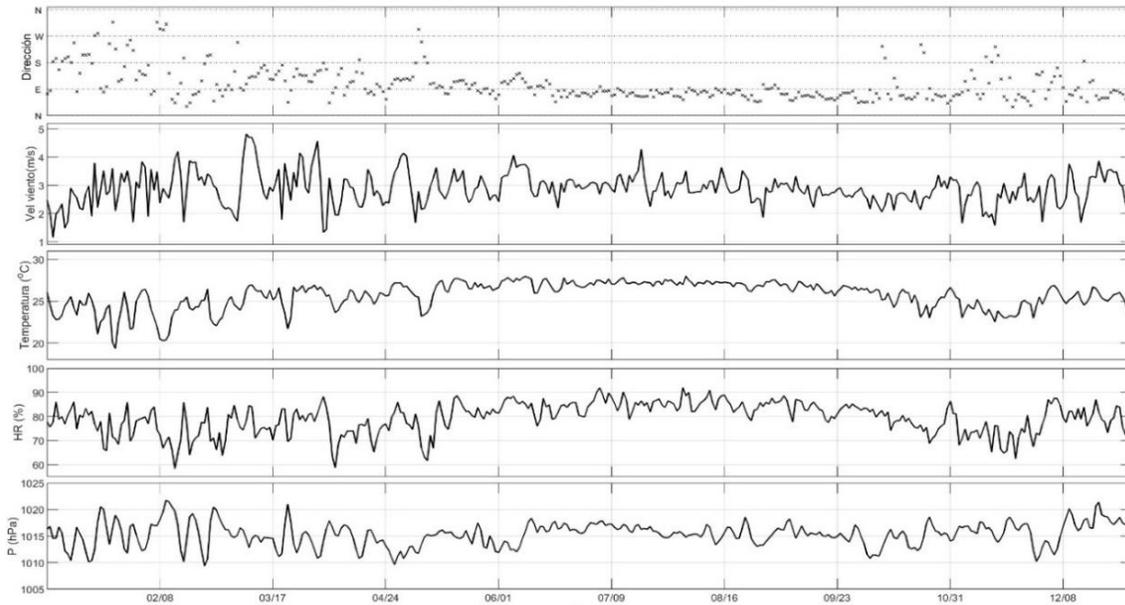


Figura A-80. Variables atmosféricas: series de tiempo para 2036 de la dirección del viento ( $^{\circ}$ ), velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), la temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ), la humedad relativa (%) y la presión atmosférica (hPa). Las gráficas muestran los datos cada 24 hrs.

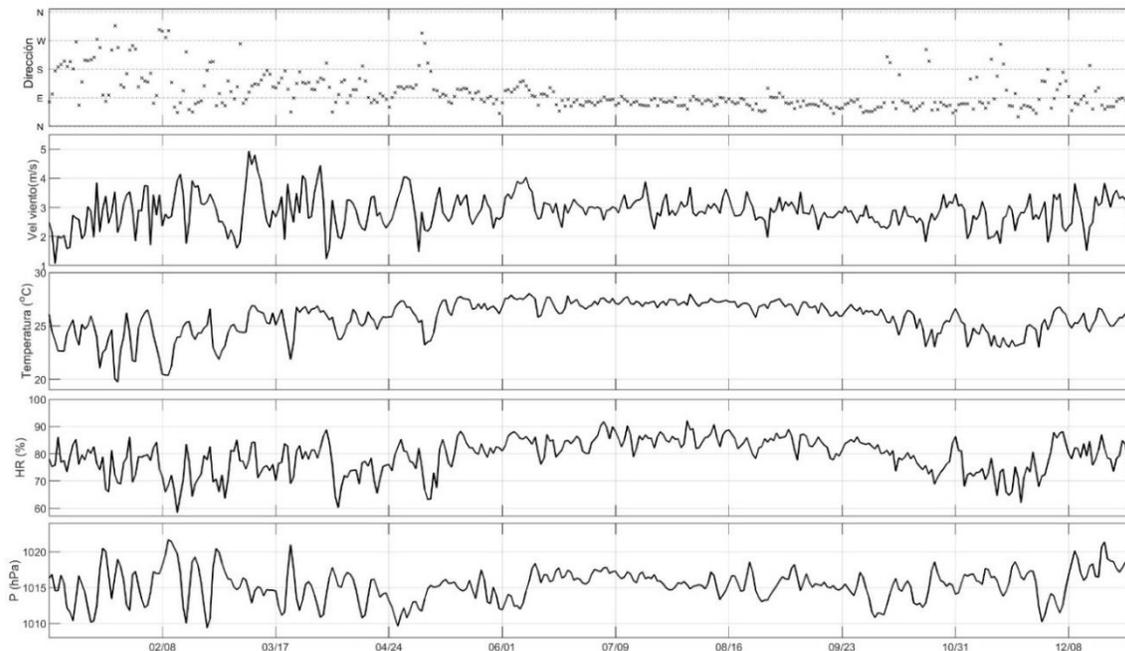
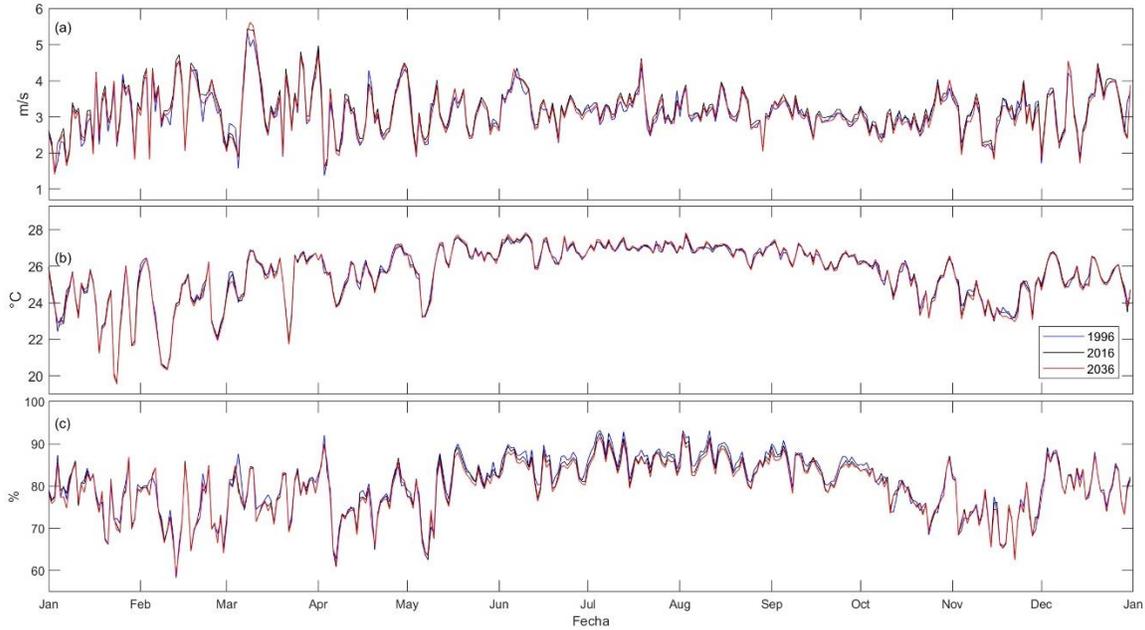


Figura A-81. Variables atmosféricas. (a) Magnitud de la velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), (b) temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ) y (c) humedad relativa (%) promediadas dentro de los polígonos. Las series de tiempo muestran los datos cada 24 hrs, para 1996 (azul), 2016 (negro) y 2036 (rojo).



### Rosa de los vientos

Figura A-82. Rosa de vientos para 1996. Los colores indican la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ), la orientación de los conos su dirección ( $^{\circ}$ ) y los círculos concéntricos el porcentaje de ocurrencia (%).

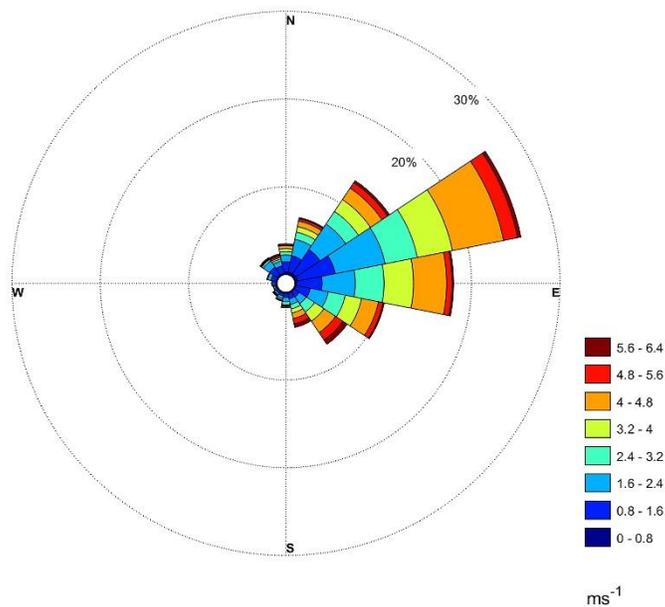


Figura A-83. Rosa de vientos para 2016. Los colores indican la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ), la orientación de los conos su dirección ( $^{\circ}$ ) y los círculos concéntricos el porcentaje de ocurrencia (%).

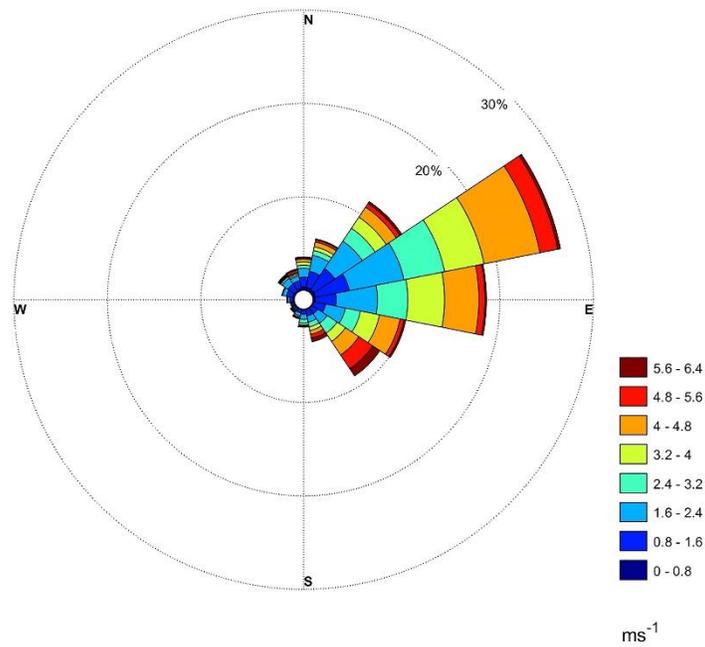
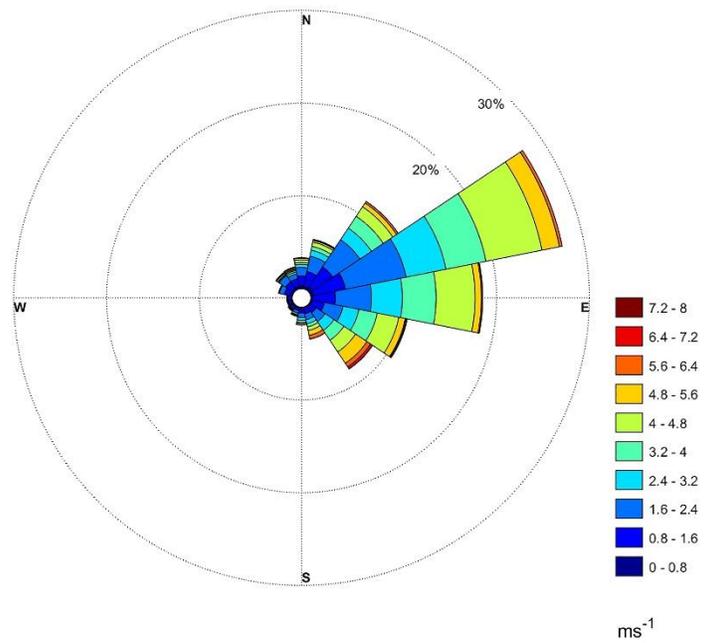


Figura A-84. Rosa de vientos para 2036. Los colores indican la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ), la orientación de los conos su dirección ( $^{\circ}$ ) y los círculos concéntricos el porcentaje de ocurrencia (%).



## Diferencias de las series de tiempo

Figura A-85. Diferencias de las series de tiempo de 1996-2016 para la temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) (línea roja) y la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ) (línea verde).

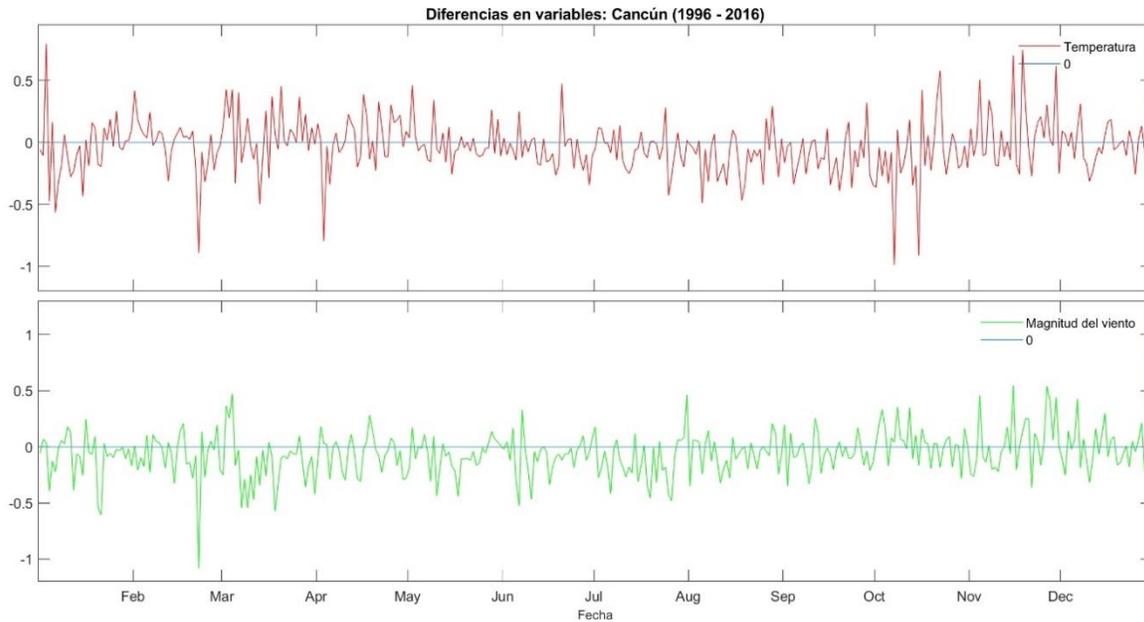


Figura A-86. Diferencias de las series de tiempo de 2016-2036 para la temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) (línea roja) y la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ) (línea verde).

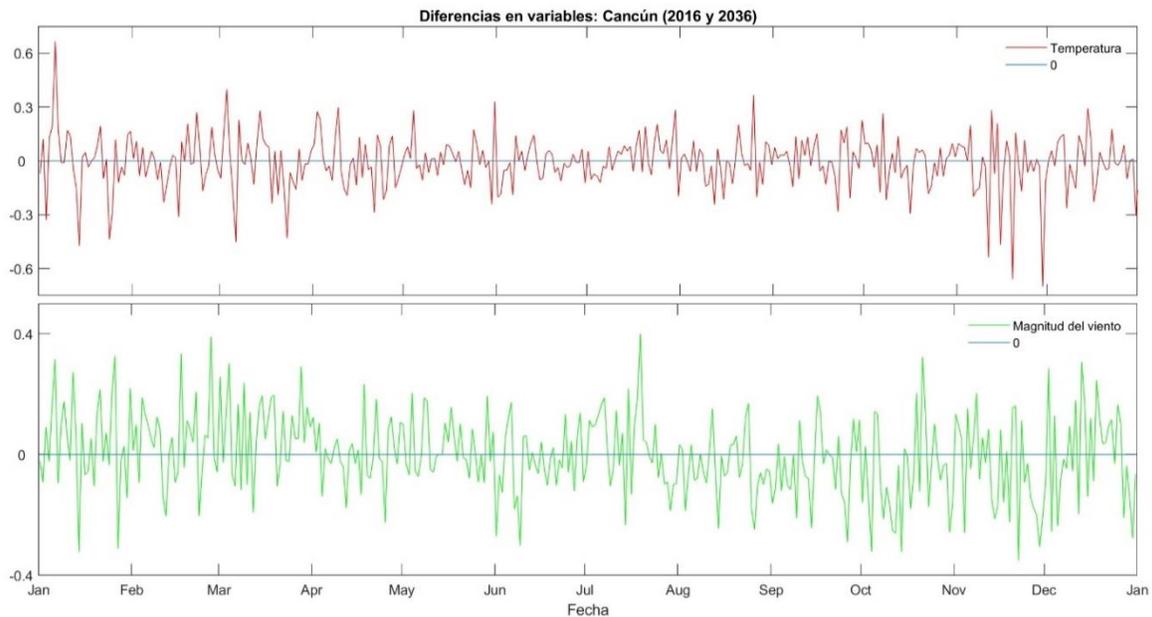
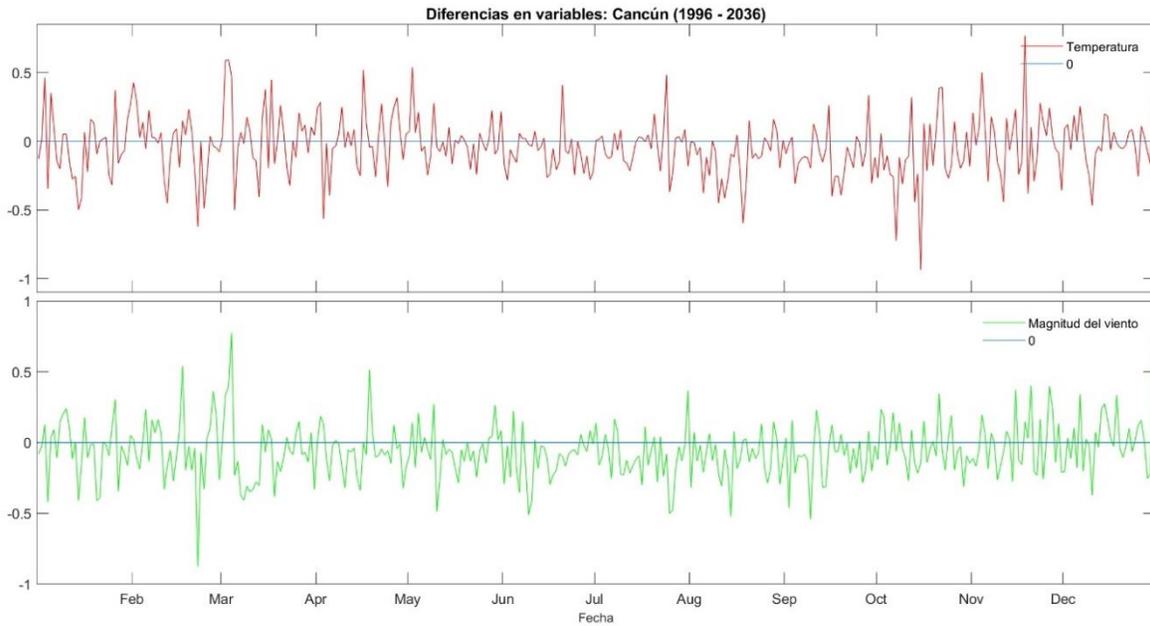


Figura A-87. Diferencias de las series de tiempo de 1996-2036 para la temperatura del aire (°C) (línea roja) y la magnitud del viento (ms<sup>-1</sup>) (línea verde).



### Diferencias de las variables de los polígonos

Figura A- 88. (a) Series de tiempo de la temperatura del aire a 2 m (°C) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años. Se indican los promedios y las desviaciones estándar para cada diferencia.

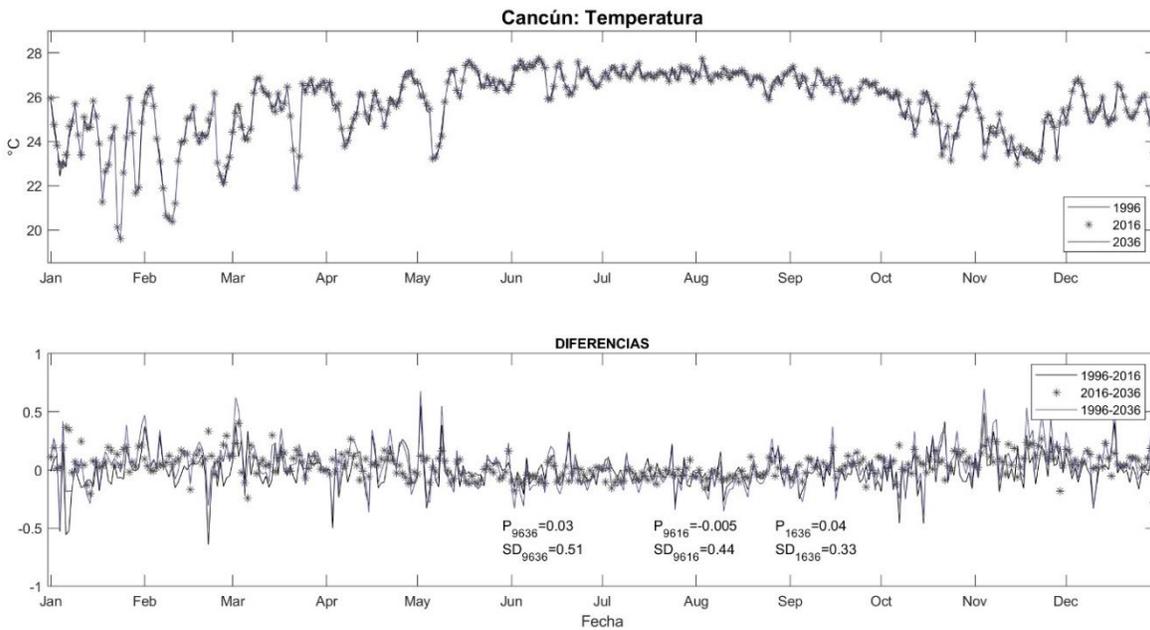
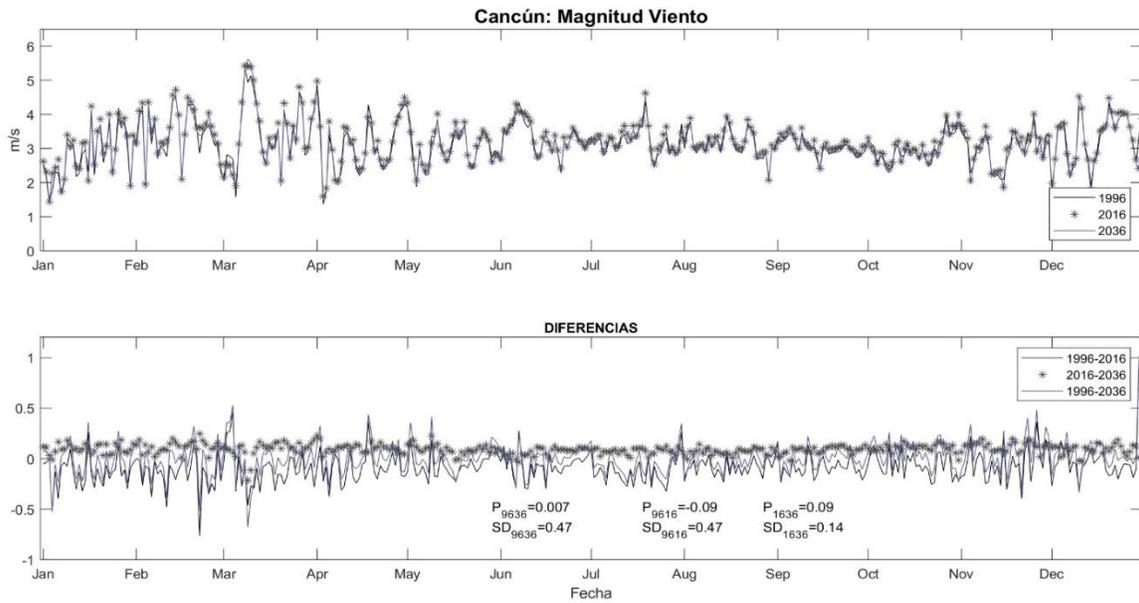


Figura A- 89. (a) Series de tiempo de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años. Se indican los promedios y las desviaciones estándar para cada diferencia.



### Variabilidad Estacional

Figura A-90. Promedios estacionales de la (a) temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la (b) magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 1996. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Cancún en la Península de Yucatán.

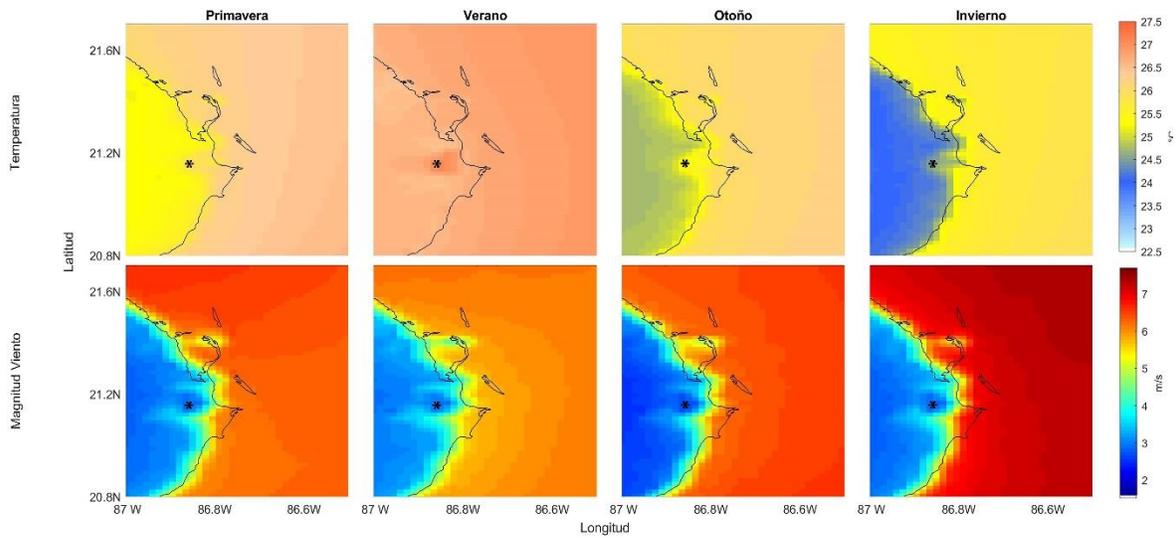


Figura A-91. Promedios estacionales de la (a) temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la (b) magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 2016. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Cancún en la Península de Yucatán.

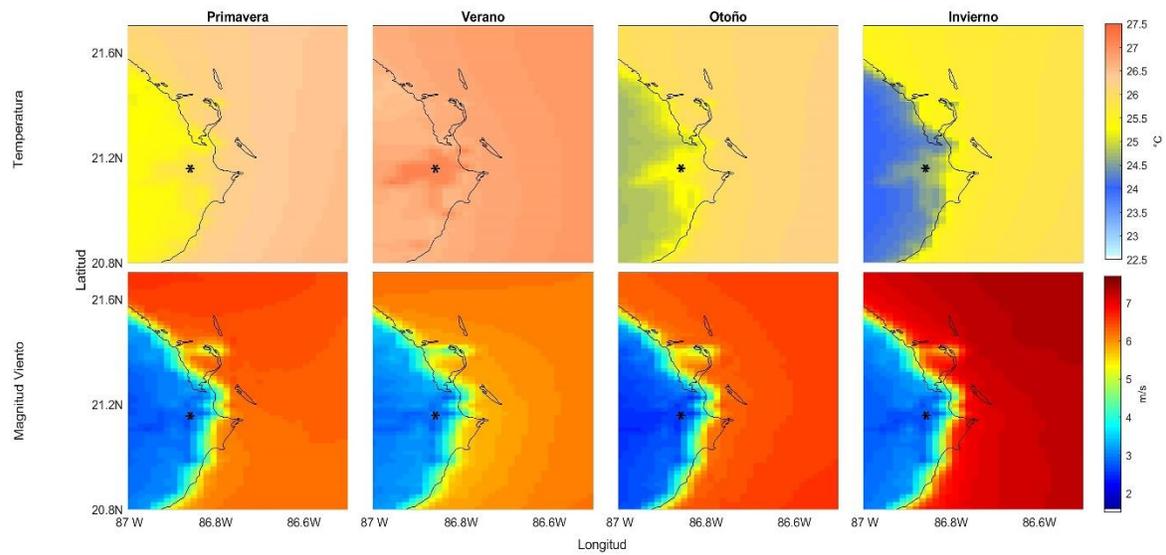
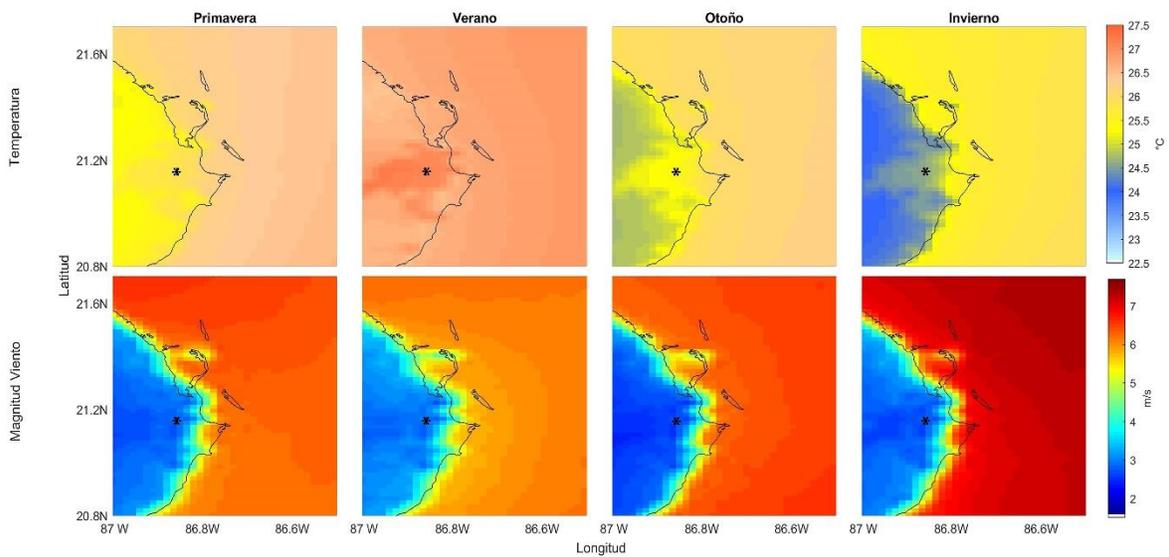


Figura A-92. Promedios estacionales de la (a) temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la (b) magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 2036. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Cancún en la Península de Yucatán.



## Diferencias de la variabilidad estacional

Figura A-93. Diferencias espaciales de la temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ), promediada estacionalmente. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Cancún en la Península de Yucatán.

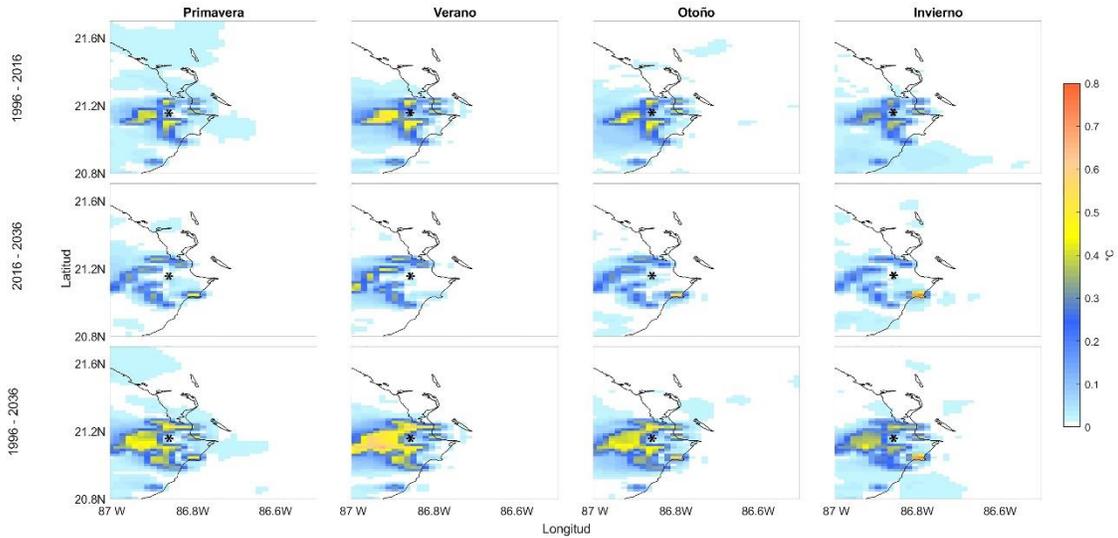
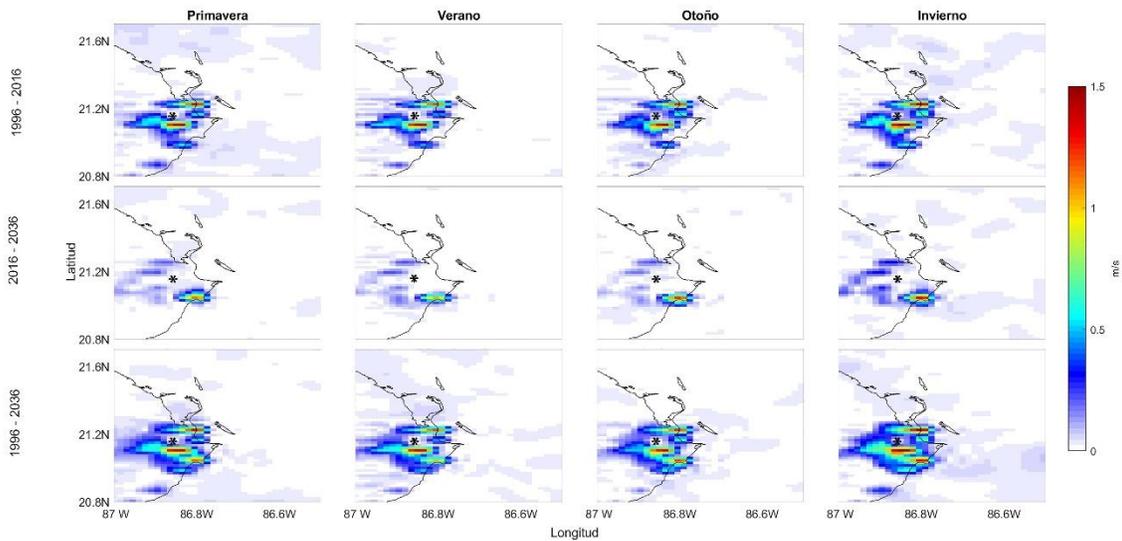


Figura A-94. Diferencias espaciales de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ), promediada estacionalmente. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Cancún en la Península de Yucatán.



## Mérida

### Variables Atmosféricas

Figura A-95. Variables atmosféricas: series de tiempo para 1996 de la dirección del viento ( $^{\circ}$ ), velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), la temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ), la humedad relativa (%) y la presión atmosférica (hPa). Las gráficas muestran los datos cada 24 hrs.

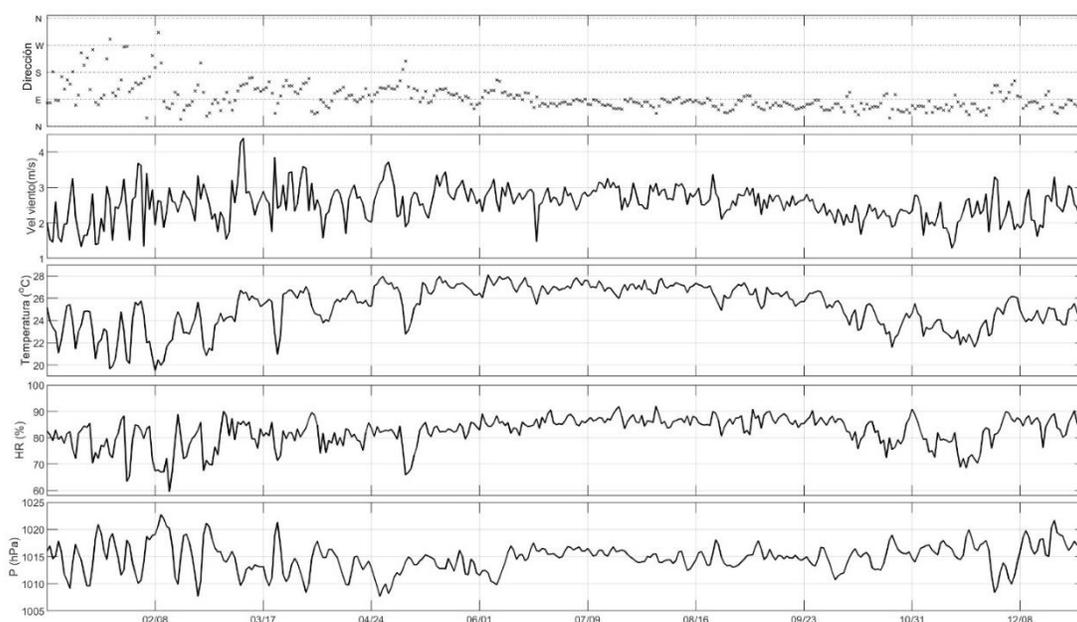


Figura A-96. Variables atmosféricas: series de tiempo para 2016 de la dirección del viento ( $^{\circ}$ ), velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), la temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ), la humedad relativa (%) y la presión atmosférica (hPa). Las gráficas muestran los datos cada 24 hrs.

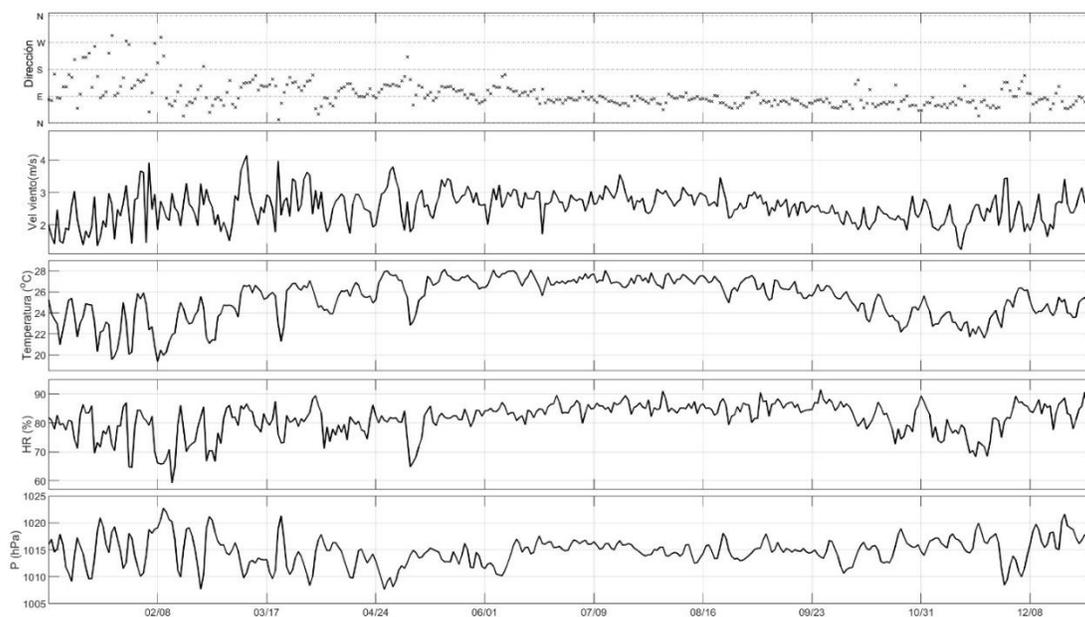


Figura A-97. Variables atmosféricas: series de tiempo para 2036 de la dirección del viento ( $^{\circ}$ ), velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), la temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ), la humedad relativa (%) y la presión atmosférica (hPa). Las gráficas muestran los datos cada 24 hrs.

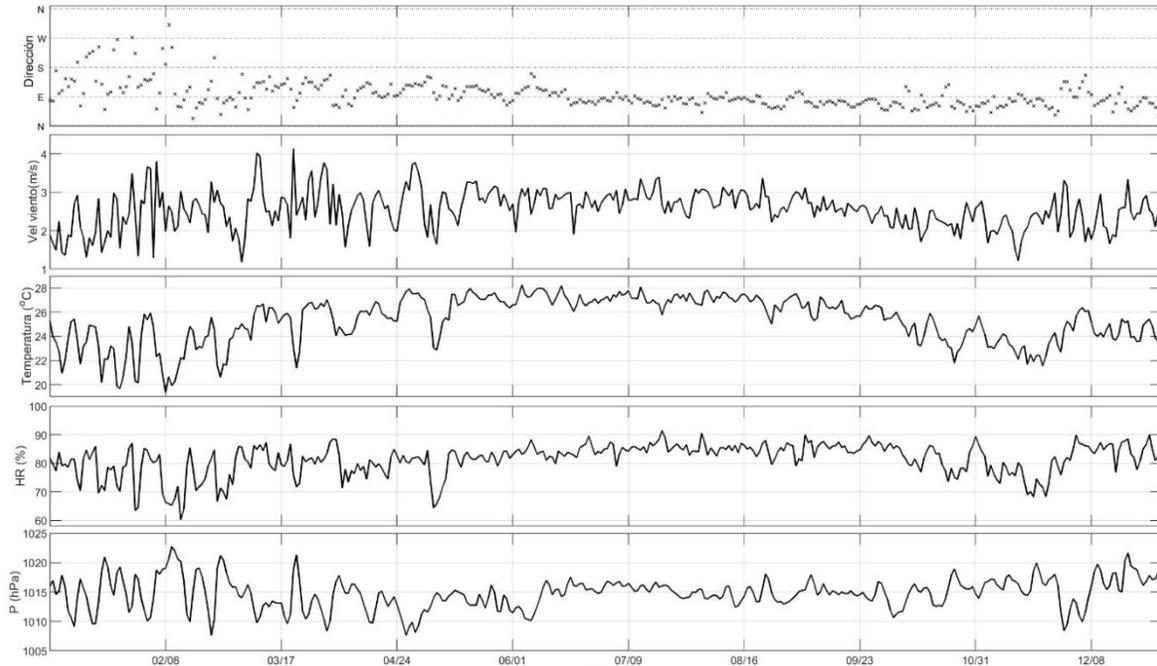
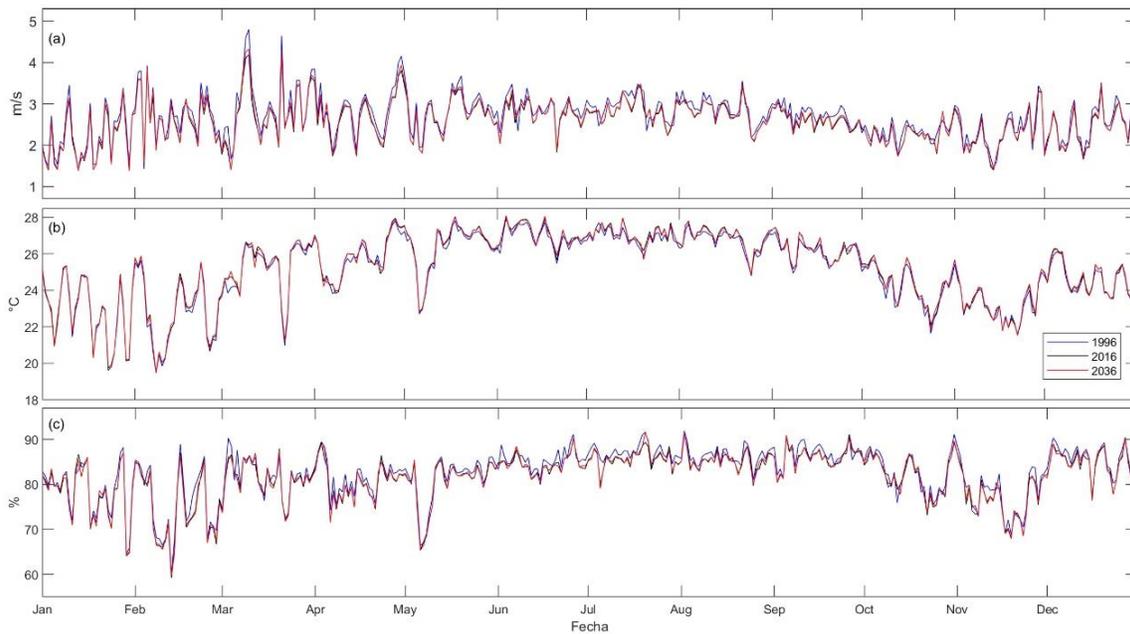


Figura A-98. Variables atmosféricas. (a) Magnitud de la velocidad del viento a 10 m de altura ( $\text{ms}^{-1}$ ), (b) temperatura del aire a 2 m sobre la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ) y (c) humedad relativa (%) promediadas dentro de los polígonos. Las series de tiempo muestran los datos cada 24 hrs, para 1996 (azul), 2016 (negro) y 2036 (rojo).



## Rosa de los vientos

Figura A-99. Rosa de vientos para 1996. Los colores indican la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ), la orientación de los conos su dirección ( $^{\circ}$ ) y los círculos concéntricos el porcentaje de ocurrencia (%).

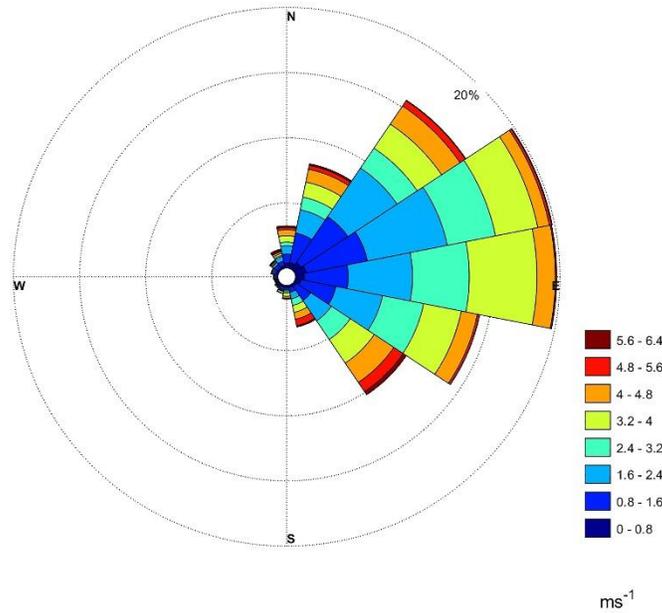


Figura A-100. Rosa de vientos para 2016. Los colores indican la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ), la orientación de los conos su dirección ( $^{\circ}$ ) y los círculos concéntricos el porcentaje de ocurrencia (%).

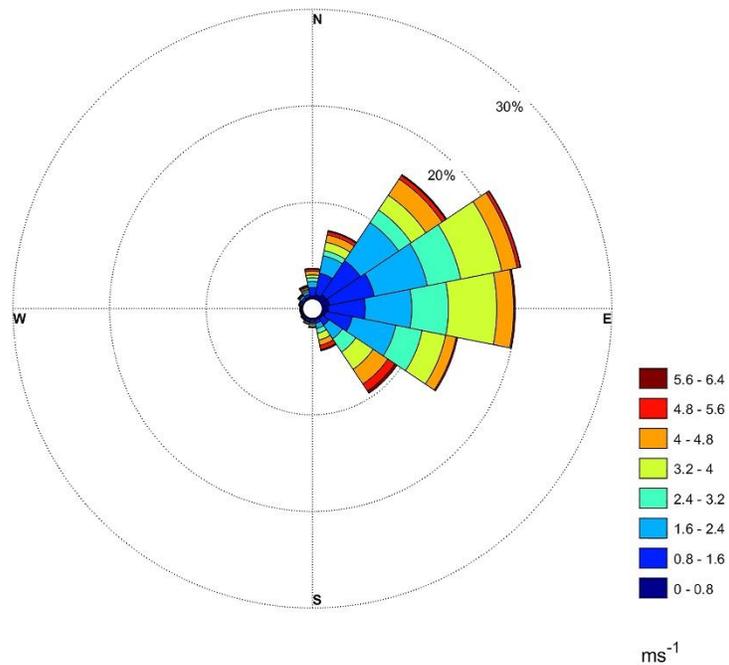
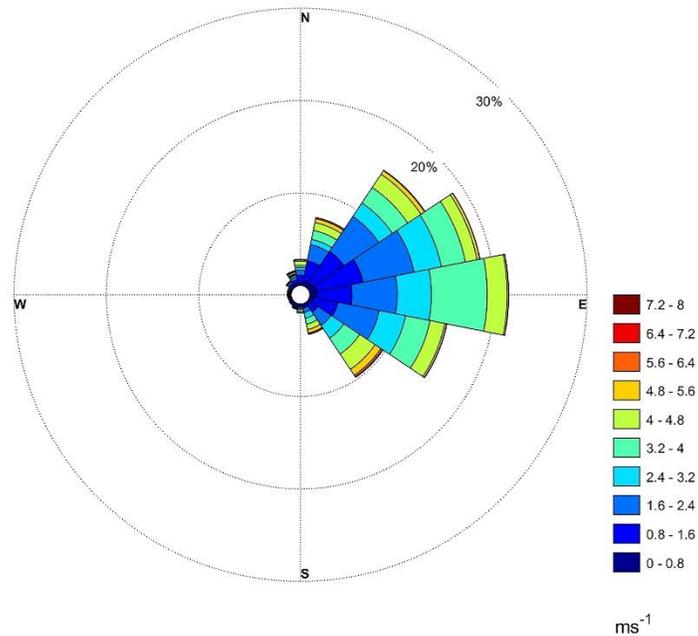


Figura A-101. Rosa de vientos para 2036. Los colores indican la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ), la orientación de los conos su dirección ( $^{\circ}$ ) y los círculos concéntricos el porcentaje de ocurrencia (%).



### Diferencias de las series de tiempo

Figura A-102. Diferencias de las series de tiempo de 1996-2016 para la temperatura de aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) (línea roja) y la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ) (línea verde).

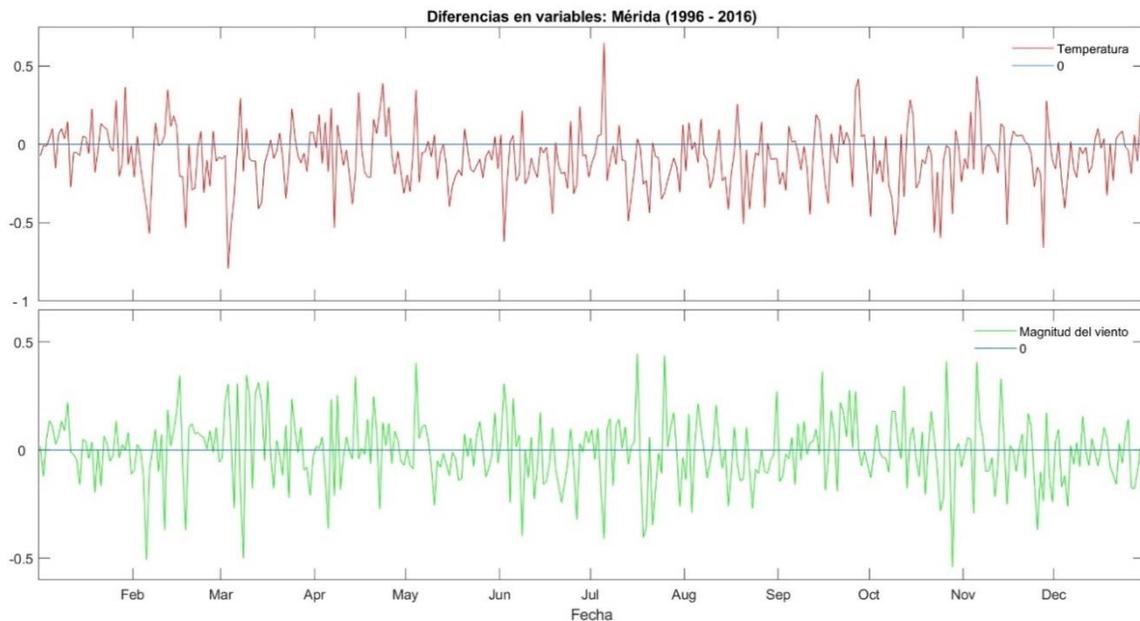


Figura A-103. Diferencias de las series de tiempo de 2016-2036 para la temperatura del aire (°C) (línea roja) y la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ) (línea verde).

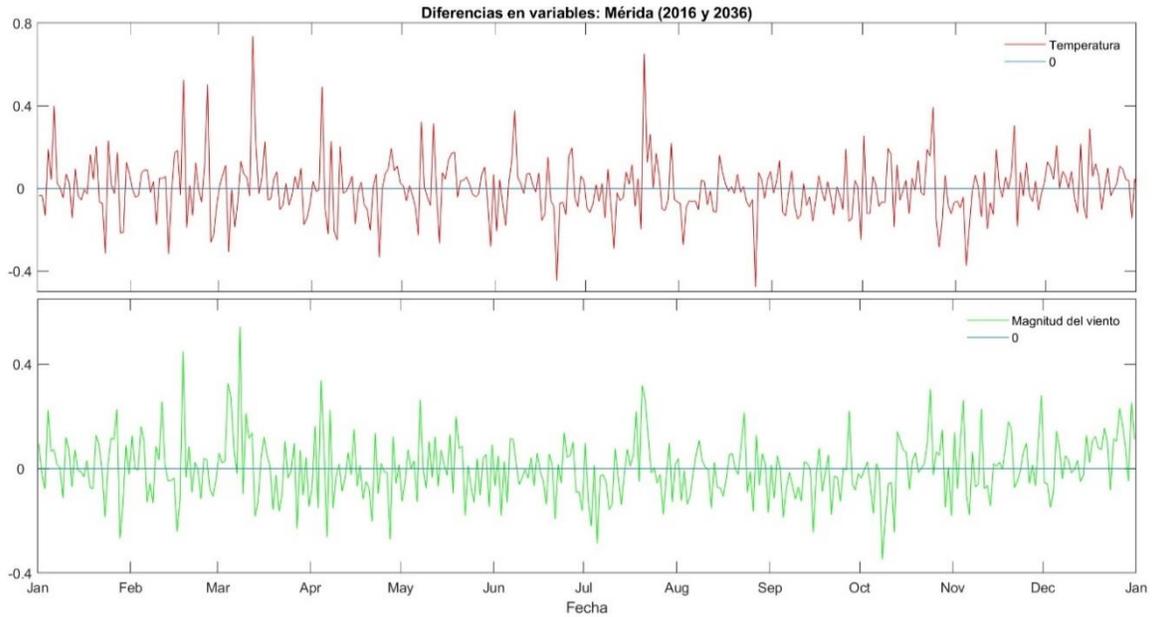
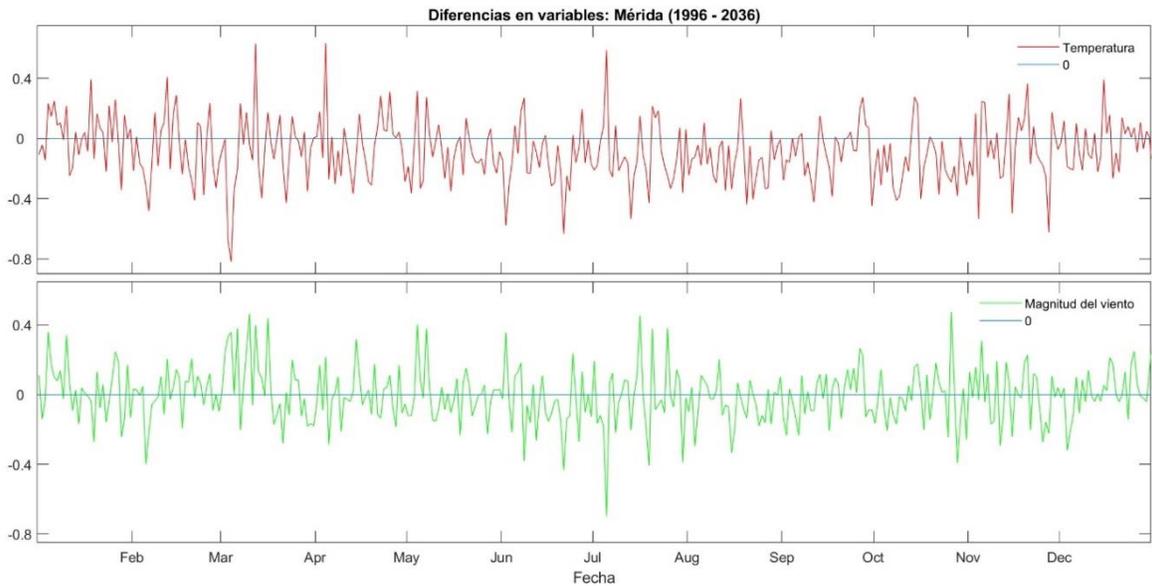


Figura A-104. Diferencias de las series de tiempo de 1996-2036 para la temperatura del aire (°C) (línea roja) y la magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ) (línea verde).



## Series de tiempo y diferencias de las variables de los polígonos

Figura A- 105. (a) Series de tiempo de la temperatura del aire a 2 m (°C) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años. Se indican los promedios y las desviaciones estándar para cada diferencia.

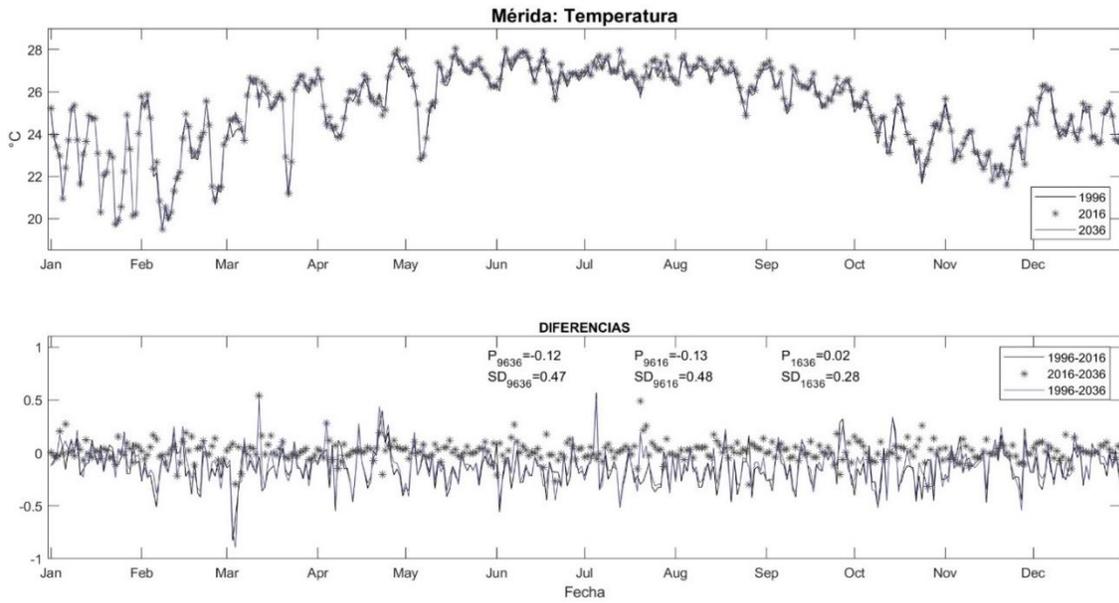
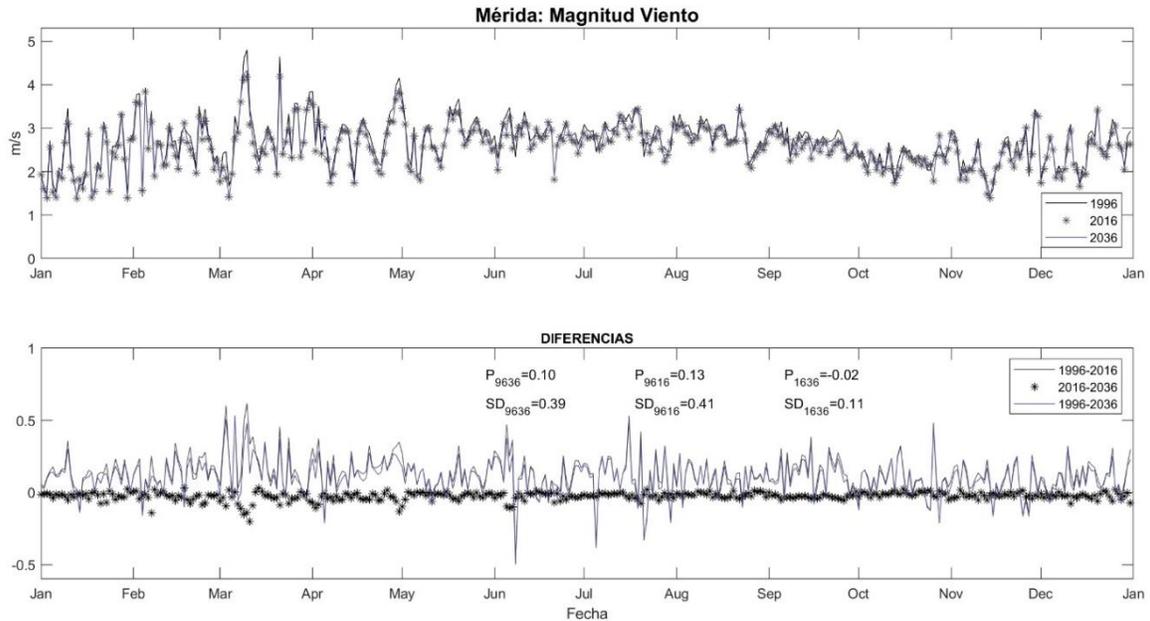


Figura A- 106. (a) Series de tiempo de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 1996, 2016 y 2036. (b) Diferencias de las series de tiempo de cada 20 años. Se indican los promedios y las desviaciones estándar para cada diferencia.



## Variabilidad Estacional

Figura A-107. Promedios estacionales de la (a) temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la (b) magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 1996. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Mérida en la Península de Yucatán.

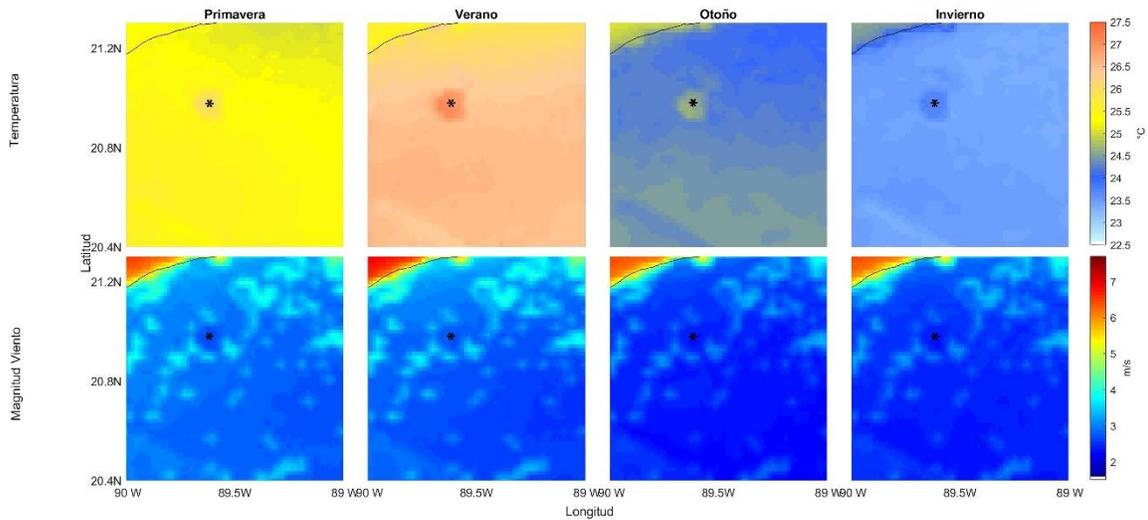


Figura A-108. Promedios estacionales de la (a) temperatura del aire a 2 m ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la (b) magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ) para 2016. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Mérida en la Península de Yucatán.

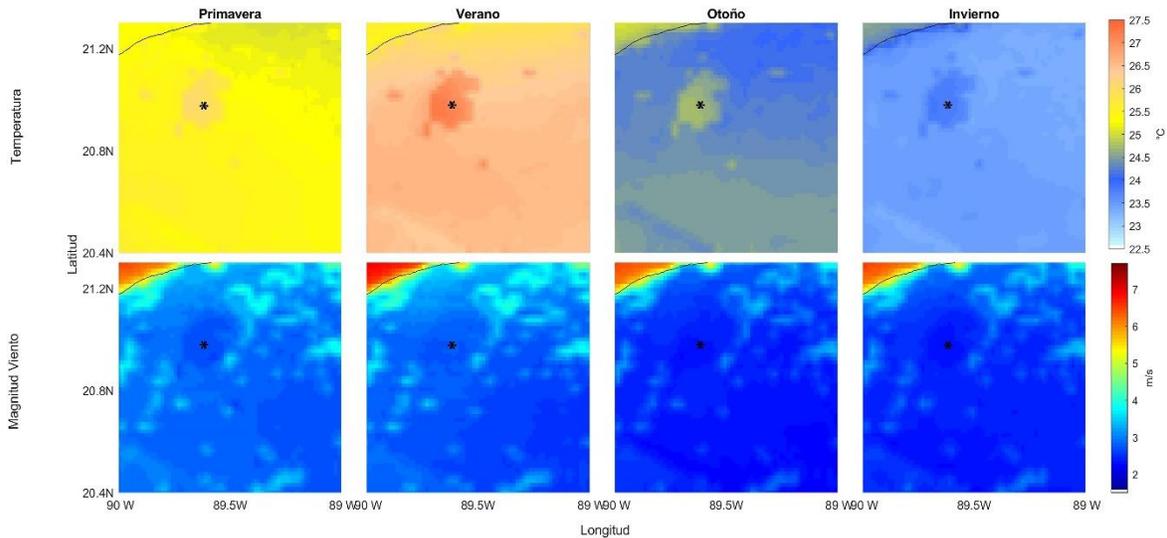
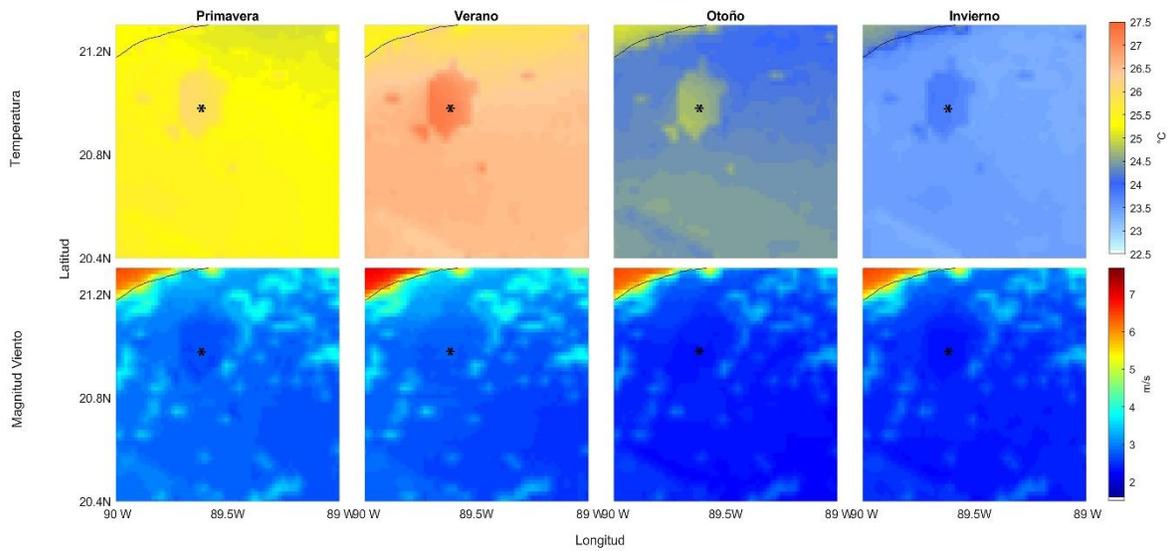


Figura A-109. Promedios estacionales de la (a) temperatura del aire a 2 m (°C) y la (b) magnitud del viento a 10 m (ms<sup>-1</sup>) para 2036. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Mérida en la Península de Yucatán.



### Diferencias de la variabilidad estacional

Figura A-110. Diferencias espaciales de la temperatura del aire a 2 m (°C), promediada estacionalmente. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Mérida en la Península de Yucatán.

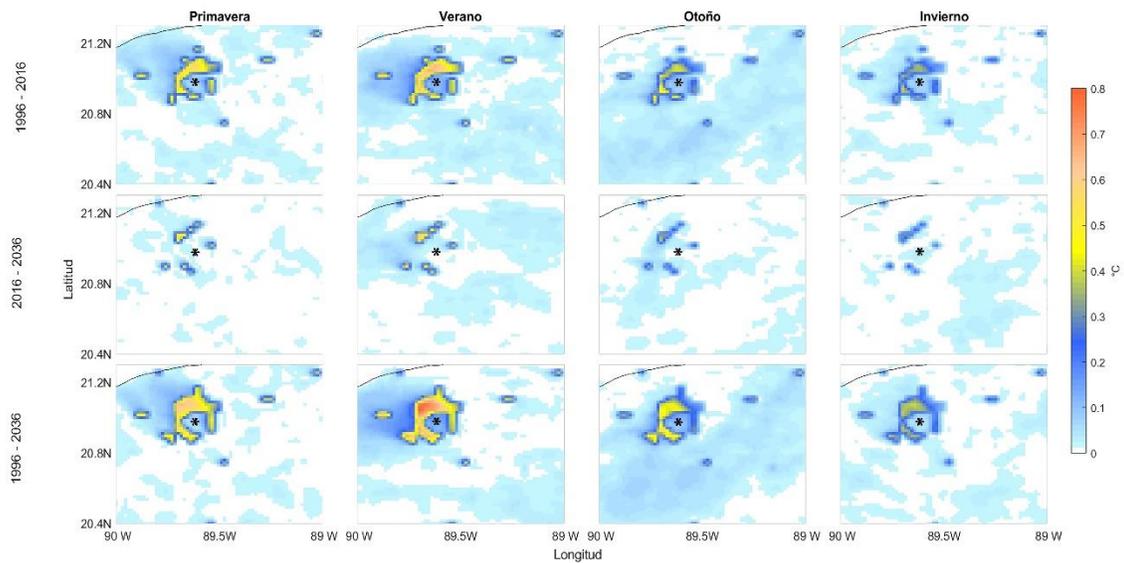


Figura A-111. Diferencias espaciales de la magnitud del viento a 10 m ( $\text{ms}^{-1}$ ), promediada estacionalmente. El asterisco negro indica la ubicación de la localidad de Mérida en la Península de Yucatán.

