



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.
Posgrado en Ciencias Biológicas

CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PENÍNSULA DE
YUCATÁN Y SU EFECTO EN POBLACIONES DE
BROMELIÁCEAS EPÍFITAS (BROMELIACEAE)

Tesis que presenta

DAVID A. PÉREZ AGUILAR

En opción al título de

MAESTRO EN CIENCIAS

(Ciencias Biológicas: Opción Recursos Naturales)

Mérida, Yucatán, México, agosto, 2019

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C.
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS



RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis del Lic. en Agroecología **David Abelardo Pérez Aguilar** titulado “**CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN Y SU EFECTO EN POBLACIONES DE BROMELIÁCEAS EPÍFITAS (BROMELIACEAE)**” fue realizado en el laboratorio de Fisiología Ambiental de Plantas de la Unidad de Recursos Naturales, en la línea Servicios Ambientales de la Biodiversidad, del **Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.** bajo la dirección de la **Dra. Casandra Reyes García**, perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias Biológicas dentro de la opción de Recursos Naturales de este Centro.

Atentamente.



Directora de Docencia

Mérida, Yucatán, México, a 20 de agosto de 2019

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos Experimentales, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de experimentación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se regirán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.



David A. Pérez Aguilar

Agradecimientos

Debo agradecer a las siguientes personas por su contribución para realizar el presente trabajo:

A la Dra. Casandra Reyes García, por guiarme a lo largo de la maestría.

Dr. Richard Evan Feldman, por toda su ayuda en los análisis de datos realizados en la presente.

Dr. Roger Orellana, por todas sus observaciones y ayuda con el análisis de datos climáticos.

Dr. José Luis Andrade Torres, por todas sus observaciones.

Dr. Jorge Armando Argáez Sosa, por su ayuda para realizar los análisis de datos.

Dra. Celene Marisol Espadas Manrique, quien facilitó obtener los datos que se requirieron en la presente y colaboró en su depuración y análisis.

M. en C. Manuela Tamayo Chim, quien elaboró las bases de datos de los censos de las plantas aquí analizadas.

Agradezco a CONACyT por la beca otorgada con numero de apoyo 462855 para realizar la maestría y a CICY por facilitar las actividades relacionadas con esta.

Así como a los proyectos Ciencia Básica SEP-CONACYT 221490 e INEGI-CONACYT 290916 que proporcionaron los fondos para la investigación.

ÍNDICE DE FIGURAS-----	iii
ÍNDICE DE CUADROS -----	v
RESUMEN -----	vii
ABSTRACT-----	ix
CAPÍTULO I-----	1
1.1 INTRODUCCIÓN -----	1
1.2 ANTECEDENTES -----	3
1.2.1 <i>Clima</i> -----	3
1.2.2 <i>Cambio climático</i> -----	4
1.2.4 <i>Epífitas</i> -----	7
1.2.5 <i>Distribución de las epífitas</i> -----	9
1.2.7 <i>bioindicadores</i> -----	11
1.2.8 <i>comunidades vegetales de la península de yucatán</i> -----	12
1.3 JUSTIFICACIÓN -----	14
1.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN-----	15
1.5 HIPÓTESIS-----	15
1.6 OBJETIVOS GENERALES-----	16
1.7 ESTRATEGIA EXPERIMENTAL-----	16
IMPACTO DEL AUMENTO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO ATMOSFÉRICOS EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN -----	19
2.1 INTRODUCCIÓN-----	19
2.1.1 <i>Cambio climático</i> -----	19
2.1.2 <i>Clima de la península de yucatán</i> -----	19
2.1.3 <i>Cambio climático en la península de yucatán</i> -----	21
2.1.4 <i>Registros climáticos en la península de yucatán</i> -----	22
2.1.5 <i>Proyecciones climáticas</i> -----	23
2.1.6 <i>Auto-correlación temporal</i> -----	24
2.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN-----	25
2.3 HIPÓTESIS: -----	25
2.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:-----	25
2.5 MATERIALES Y MÉTODOS -----	26
2.5.1 <i>Obtención de datos</i> -----	26
2.5.2 <i>elección de escenario RCP</i> -----	28
2.5.3 <i>análisis estadístico</i> -----	29
2.6 RESULTADOS-----	30
2.6.1 <i>precipitación anual</i> -----	30
2.6.2 <i>Promedio anual de temperatura máxima extrema mensual</i> -----	33
2.6.3 <i>temperatura media anual</i> -----	36
2.6.4 <i>promedio anual de temperatura mínima extrema mensual</i> -----	39
2.7 COMPARACIÓN DE CAMBIO OBSERVADO CON RCP 8.5-----	41
2.7.1 <i>precipitación</i> -----	41
2.7.2 <i>Temperatura máxima extrema</i> -----	42
2.7.3 <i>Temperatura media</i> -----	44
2.7.4 <i>Temperatura mínima extrema</i> -----	45

2.8 DISCUSIÓN-----	46
CAPÍTULO III -----	51
EVALUACIÓN DE LAS BROMELIÁCEAS EPÍFITAS (BROMELIACEAE) COMO BIOINDICADORES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN SELVAS TROPICALES-----	51
3.1 INTRODUCCIÓN-----	51
3.1.1 efecto del tipo de vegetación en abundancia y composición de especies de bromeliáceas epífitas-----	51
3.1.2 dinámica poblacional de las tillandsias-----	52
3.1.3 estratificación microambiental en el dosel-----	53
3.1.4 diferencia en el microambiente debida a características de la especie de hospedero y estacionalidad-----	54
3.1.5 especies de bromeliáceas epífitas presentes en la península de yucatán-----	54
3.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN-----	55
3.3 HIPÓTESIS-----	55
3.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS-----	56
3.5 MATERIALES Y MÉTODOS-----	56
3.5.1 censos-----	42
3.5.2 datos climáticos-----	56
3.5.3 consideraciones previas al análisis de datos-----	57
3.5.4 modelación-----	59
3.6 RESULTADOS-----	60
3.6.1 especies de bromeliáceas epífitas más abundantes en los sitios de estudio-----	61
3.6.2. Relación entre área de cobertura las especies arbóreas y número de bromeliáceas epífitas que hospedan-----	62
3.6.3.1 Matorral de duna costera-----	62
3.6.3.2 Manglar chaparro-----	65
3.6.3.3 Selva baja caducifolia-----	68
3.6.3.4 Selva mediana subcaducifolia-----	71
3.6.3.5 Selva mediana subperennifolia-----	74
3.7 DISCUSIÓN-----	78
CAPÍTULO IV -----	87
CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS-----	87
4.1 CONCLUSIONES-----	87
4.2 PERSPECTIVAS-----	89
REFERENCIAS-----	93
APÉNDICES-----	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.7 Esquema de la metodología seguida en la investigación-----18

Figura 2.5 Ubicación de estaciones a lo largo del gradiente de precipitación de la península de Yucatán-----28

Figura 2.5.2 Concentración de CO₂ atmosférico (ppm) de escenarios RCPs y registros históricos-----29

Figura 2.6.1 Precipitación registrada en los sitios de estudio-----31

Figura 2.6.2 Promedio anual de la temperatura máxima extrema mensual registrada en los sitios de estudio-----34

Figura 2.6.3 Temperatura media anual registrada en los sitios de estudio-----37

Figura 2.6.4 Promedio anual de la temperatura mínima extrema mensual registrada en los sitios de estudio-----39

Figura 2.8.1 Mapas de los cambios proyectados en el clima para 2020 en el escenario A1FI para precipitación y temperatura-----49

Figura 3.6.1 Total del número de observaciones de bromeliáceas epífitas del género Tillandsia por especie (individuos/hectárea) en los sitios de estudio, entre 2009 y 2018--62

Figura 3.6.2 Observaciones anuales de bromeliáceas epífitas en el matorral de duna costera y precipitación y temperatura máxima extrema de los años correspondientes a los censos-----63

Figura 3.6.3 Relación del índice poblacional con la temperatura máxima extrema, precipitación en estación lluviosa y estación seca en San-Benito-----65

Figura 3.6.4 Observaciones anuales de bromeliáceas epífitas en manglar chaparro y precipitación y temperatura máxima extrema de años correspondientes a los censos-----66

Figura 3.6.5 Relación entre índice poblacional y Temperatura máxima extrema promedio, precipitación en estación lluviosa y estación seca en Celestún-----68

Figura 3.6.6 Observaciones anuales de bromeliáceas epífitas en la selva baja caducifolia y precipitación y temperatura máxima extrema de los años anteriores a los censos-----69

Figura 3.6.7 Relación entre índice poblacional y temperatura máxima, precipitación en la estación lluviosa y estación seca en Dzibilchaltún-----71

Figura 3.6.8 Observaciones anuales de bromeliáceas epífitas en la selva mediana subcaducifolia y precipitación y temperatura máxima extrema de los años anteriores a los censos-----72

Figura 3.6.9 Relación entre índice poblacional y temperatura máxima extrema, precipitación en estación seca y estación lluviosa en la selva mediana subcaducifolia----73

Figura 3.6.10 Observaciones anuales de bromeliáceas epífitas en la selva mediana subperennifolia y precipitación y temperatura máxima extrema de los años anteriores a los censos-----74

Figura 3.6.11 Relación entre índice poblacional de las especies de bromeliáceas más abundantes de la selva mediana subperennifolia y precipitación en estación lluviosa en Calakmul dividido por estrato-----76

Figura 3.6.12 Relación entre índice poblacional de las especies de bromeliáceas más abundantes de la selva mediana subperennifolia y precipitación en estación seca en Calakmul dividido por estrato-----77

Figura 3.6.13 Relación entre índice poblacional de las especies de bromeliáceas más abundantes de la selva mediana subperennifolia y temperatura máxima extrema en Calakmul dividido por estrato-----78

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.5 Estaciones de los sitios de estudio-----27

Cuadro 2.6.1 Período de registro, media, pendiente y valor *d* de los cambios en la precipitación de los diferentes sitios de estudio-----32

Cuadro 2.6.2 Período de registro, media, pendiente y valor *d* de los cambios en la precipitación de los diferentes sitios de estudio-----35

Cuadro 2.6.3 Período de registro, media, pendiente y valor *d* de los cambios en la precipitación de los diferentes sitios de estudio-----38

Cuadro 2.6.4 Período de registro, media, pendiente y valor *d* de los cambios en la precipitación de los diferentes sitios de estudio-----40

Cuadro 2.7.1 Comparación entre proyecciones para precipitación de IPCC (2013) y datos de las estaciones-----41

Cuadro 2.7.2 Comparación entre proyecciones de IPCC (2013) y datos de las estaciones-----44

Cuadro 2.7.3 Comparación entre proyecciones de IPCC (2013) y datos de las estaciones-----45

Cuadro 2.7.4 Comparación entre proyecciones de IPCC (2013) y datos de las estaciones-----46

Cuadro 3.1 Estaciones climáticas analizadas-----56

Cuadro 3.5.4 Modelación de los sitios de estudio-----59

Cuadro 3.6.2 Análisis de cambio en poblaciones de bromeliáceas epífitas en matorral de duna costera-----63

Cuadro 3.6.3 Análisis de cambio en poblaciones de Bromeliáceas epífitas en manglar chaparro-----66

Cuadro 3.6.4 Análisis de cambio en poblaciones de Bromeliáceas epífitas en selva baja caducifolia-----69

Cuadro 3.6.5 Análisis de cambio en poblaciones de Bromeliáceas epífitas en selva mediana subcaducifolia-----72

Cuadro 3.6.6 Análisis de cambio en la población de *T. fasciculata* en selva mediana subperennifolia-----75

Cuadro 3.6.7 Análisis de cambio en la población de *T. juncea* en selva mediana subperennifolia-----75

Cuadro 3.6.8 Análisis de cambio en la población de *T. schiedeana* en selva mediana subperennifolia-----75

RESUMEN

El cambio climático en la península de Yucatán ha sido poco estudiado, lo cual impide conocer cómo afectará este fenómeno a la región. Los modelos de circulación general funcionan a una escala muy grande que hace poco precisas sus proyecciones a pequeña escala. Esto impide que se puedan tomar medidas de adaptación a este fenómeno. En el presente estudio se analizaron los datos de varias estaciones, de norte a sur de la península, a lo largo del gradiente de precipitación, y fueron contrastados con las proyecciones del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés, 2013) para 2020. De esta forma se logró visualizar si el clima local corresponde con lo proyectado.

Por otra parte, se estudió los cambios de 2008 a 2017 en las poblaciones de bromeliáceas epífitas, buscando una respuesta de estas plantas a la variación climática anual, con el propósito de conocer si es viable el uso de estas plantas como bioindicadores de cambio climático y cómo responden sus poblaciones a un gradiente de condiciones climáticas.

Las proyecciones de IPCC (2013) para la península de Yucatán no corresponden con los registros de las estaciones meteorológicas, que muestran una gran variabilidad en las tendencias en las variables climáticas, incluso opuestas a lo esperado en las proyecciones. Por su parte, se encontró una respuesta a las variaciones climáticas anuales en las bromeliáceas epífitas, con una reducción en sus poblaciones a condiciones climáticas causantes de estrés hídrico en las selvas más secas y una respuesta positiva a estas condiciones en la selva más húmeda, mientras en los ecosistemas costeros (manglar y matorral) no hubo una relación entre las poblaciones de epífitas y las variables climáticas medidas.

ABSTRACT

There are very few studies regarding climate change in the Yucatan peninsula. The lack of information makes it difficult to visualize and prepare for the effects on the region. General circulations models, used as mathematical representations for the Earth's climate, are effective at simulating climate change effects in large scales, however, the model precision declines as the scale is focused to describe local climate. Thus it is difficult to assess the future situation and come up with adaptation measures in order to reduce negative effects of climate change.

The current study analyses data from ground meteorological stations, distributed among a transect from north to south of Yucatan peninsula, following the regional precipitation gradient in representative ecosystems. Data was compared to IPCC (2013) projections for the Yucatan peninsula local climate in order to contrast the precision of the models.

These study also tested the relationship between vegetation change and environmental conditions using with the population index of epiphytic bromeliads as a response variable and temperature and precipitation recorded by nearby meteorological stations as independent variables.

The IPCCs (2013) projections for the Yucatan peninsula didn't match with the recorded data from local stations. In contrast, data shows high variability and a diverse range of slopes, even opposed to IPCC (2013) projections. For example, some meteorological stations showed increased precipitation, while projections predicted reduction in rainfall. At the same time, the epiphytic bromeliads have a response to annual climatic variability with population reduction related to dry and hot conditions and population growth in more humid weather, in deciduous and semi-deciduous forests. However these response varies between different ecosystems. With little influence on temperature and precipitation in coastal environments (mangrove and sand dune srib), and higher population growth under hot and dry conditions in the sub-perennial forest.

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático, causado por las emisiones de gases de efecto invernadero de origen antrópico, ha sido un tema que ha despertado gran interés. Se han realizado gran cantidad de investigaciones al respecto, debido a las implicaciones que puede tener este fenómeno para las actividades humanas (Mintzer *et al.*, 1992; Imbach *et al.* 2017) y la biodiversidad (Parmesan, 2006). Una modificación en la vegetación causada por el clima tendrá un impacto en el entorno humano y en las actividades económicas, ya que la vegetación provee diversos servicios ambientales como el reciclaje de nutrientes, la protección contra la erosión y la captación de agua, entre otros (Macip-Ríos *et al.*, 2013), dentro de estos servicios, destacan los procesos de la biosfera como la fijación de carbono, liberación de oxígeno y la transformación del nitrógeno mineral a orgánico (Townsend *et al.*, 2002). Por lo tanto, es de gran importancia conocer la forma en la que afectará un aumento de gases de efecto invernadero al clima y cuál podría ser el efecto de este cambio en la vegetación. Conocer estos impactos permitirá tomar medidas de adaptación previas a que se den estos cambios.

Para prever cuales podrían ser las consecuencias del cambio climático sobre las distintas variables del clima, se han realizado proyecciones del futuro clima de la Tierra bajo distintos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero y modelos de circulación general. En sus resultados, una constante es que el clima se torna más cálido conforme aumenta la concentración de gases de efecto invernadero, sin embargo, estos modelos no siempre se aproximan a los valores del clima actual de la Tierra (Carbon, 2017). Esta variación se debe a diversas causas: conocimiento incompleto de los factores que influyen en el clima, como las posibles concentraciones de gases de efecto invernadero, cambios en las características de la superficie terrestre, entre otros, adicional a la incertidumbre que genera el propio modelo (Deser *et al.*, 2012) y cambios en los patrones de la circulación atmosférica.

En la península de Yucatán, el efecto del cambio climático ha sido estudiado con poca profundidad; las proyecciones de los posibles cambios que ocasionará una atmósfera con mayor concentración de gases de efecto invernadero en el clima de la región son poco precisas debido a que el clima es regulado por diversos fenómenos atmosféricos y oceánicos que interactúan de forma compleja, siendo muy variables las proyecciones

obtenidas (Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC), 2014). Los posibles efectos del aumento de gases de efecto invernadero en el clima de Yucatán fueron estimados por Orellana, *et al.* (2009). Estos autores elaboraron adecuaciones de los posibles escenarios para la región, publicadas en el tercer informe del IPCC (2001). Para integrar los datos a la península de Yucatán, se seleccionaron los modelos de circulación general que mejor reflejan el clima actual de la península y se aumentó la resolución de sus salidas con base a datos climáticos locales del período 1960-1990, provenientes de las estaciones meteorológicas operadas por CONAGUA (Orellana *et al.* 2009). Como resultado, estos autores obtuvieron una mayor resolución de los diversos escenarios SRES (Special Report on Emissions Scenarios) (IPCC, 2001), con diferentes modelos de circulación general. Este tipo de adecuaciones que aumentan la resolución permiten establecer hipótesis más precisas acerca de cómo se espera que el clima cambie en determinado punto de la región (Burkhardt, 1995). Otros autores que han estudiado los escenarios de cambio climático son Cavazos *et al.* (2013) quienes trabajaron evaluando los modelos en todas las regiones de México. Encontraron que en la península de Yucatán los modelos de circulación general disponibles no logran representar de forma precisa el clima actual de la región.

Las proyecciones hechas por el IPCC (2013) para la región que comprende la península de Yucatán, indican un aumento de temperatura y una pequeña reducción en la precipitación. Con objeto de conocer si el comportamiento de las variables climáticas en la península de Yucatán se ajusta a estas proyecciones se contrastarán con los registros de diversas estaciones meteorológicas a lo largo del gradiente de climas de la península. Se espera que esto contribuya a conocer los cambios en el clima a lo largo del tiempo y si estos corresponden a las hipótesis planteadas para regiones tropicales bajo el escenario de mayor concentración de gases de efecto invernadero (RCP 8.5) de IPCC (2013).

Un cambio de características climáticas tendrá una respuesta en la vegetación arbórea. No obstante, esta puede verse retardada debido a que los árboles son organismos que pueden sobrevivir años con condiciones de sequía, ya que cuentan con medios para sortearla (Bertrand *et al.*, 2011; Ash *et al.*, 2016; Alexander *et al.*, 2017). Por lo anterior puede esperarse que los efectos de un cambio en el clima se vean reflejados en la vegetación arbórea varios años después de que este ocurra.

Para estudiar los efectos de los cambios en el clima sobre la vegetación en el corto y mediano plazo se necesitan especies que puedan ser más sensibles a los cambios ambientales. Se propone el uso de bromeliáceas epífitas como bioindicadores de las

fluctuaciones climáticas, dado que se trata de pequeñas plantas sin raíces funcionales que crecen en el dosel sin entrar en contacto con el suelo. Las epífitas obtienen toda el agua y nutrientes que requieren de la atmósfera, lo cual las hace más sensibles que los árboles a cambios en el clima. Su ciclo de vida es relativamente corto, tienen gran capacidad de dispersión y se distribuyen a lo largo de los diferentes climas de la península de Yucatán. Actualmente se cuenta con información sobre su fisiología y respuestas a los cambios ambientales proveniente de trabajos realizados en la península de Yucatán y en ecosistemas afines. Igualmente, las especies de epífitas presentan una distribución bien definida a lo largo de la península, respondiendo a las características del clima.

Debido a lo anterior, se espera que el cambio de número de individuos en poblaciones de bromeliáceas epífitas estén asociados a los cambios en el clima, de forma que esta interacción ayude a indicar la clase de vegetación arbórea que habrá, de mantenerse este cambio en el clima, en la vegetación y por lo tanto la alteración de servicios ambientales del ecosistema. Lo que permitiría tomar mejores medidas de adaptación al cambio climático.

1.2 ANTECEDENTES

1.2.1 Clima

El clima se define como el estado promedio o predominante de las capas más cercanas a la superficie terrestre u oceánica de la atmósfera sobre variables como temperatura, precipitación, dirección y velocidad del viento, etc. medido por cierto período de tiempo que puede variar de horas a miles de años (World Meteorological Organization (WMO), 2018). Usualmente para definir el clima de un sitio, se usa el promedio de las observaciones por un mínimo de 30 años (WMO, 2015). El clima varía de un lugar a otro y tiene una gran variabilidad temporal (Orellana *et al.*, 1999). Es influenciado por diversos factores, entre ellos latitud, altitud, orografía, continentalidad, circulación atmosférica y corrientes marinas. La interacción de estos factores da lugar a los elementos del clima: radiación solar, temperatura, humedad, precipitación, presión, vientos, nubosidad y visibilidad, de estos, los más usados para caracterizar el clima de un sitio son temperatura media y precipitación, de las cuales derivan la clasificación de climas y mapas climáticos (Orellana *et al.*, 2009).

El principal factor que regula el clima es la intensidad de la radiación electromagnética solar incidente en la superficie terrestre, la cual depende del ángulo de la superficie respecto a la luz solar (Oliver y Hidore, 2002; Lomolino, *et al.*, 2010). Lo que se observa en el gradiente de temperaturas del trópico a los polos (Miller, 1975). La altura de igual manera es relevante en las características del clima, ya que, de esta depende la densidad del aire y por lo tanto su capacidad para retener energía, y la circulación oceánica y atmosférica que tienden a distribuir homogéneamente el calor y humedad en la Tierra trasladando el calor a las zonas más frías (Henderson-Sellers y Robinson, 1986; Marshall y Plumb, 2008), esta circulación se ve modificada por los continentes, que interrumpen a las corrientes atmosféricas y marinas, lo cual torna irregular la distribución latitudinal de las características del clima (Marshall y Plumb, 2008). Adicionalmente, al interior de estas grandes superficies terrestres el clima tiende a ser más seco, debido a que es más difícil que llegue la humedad proveniente del océano (Lomolino *et al.*, 2010). A diferencia del océano, la superficie terrestre acumula gran cantidad de calor en unos pocos centímetros de su superficie y lo disipa rápidamente, enfriándose ante la falta de luz (mismo autor), por lo cual las temperaturas suelen ser más extremas al interior de los continentes que en el océano. Estos y muchos otros factores deben ser modelados para obtener las proyecciones climáticas con base a los modelos de circulación general, lo cual dificulta una modelación precisa del clima.

1.2.2 Cambio climático

Un cambio climático se refiere a una modificación del clima, identificable por métodos estadísticos, que altera el clima de forma que estos cambios puedan observarse en la media y la variabilidad de las distintas variables climáticas (IPCC, 2013). Existen diversos factores que pueden conducir a un cambio en el clima, desde la órbita y la rotación de la Tierra (Milanković, 1920; citado por Petrović, 2009), hasta la regulación de la composición de gases atmosféricos por la biota (Semenov, 2008) y el factor antrópico que ha tenido la mayor importancia recientemente (IPCC, 2014). El clima de la Tierra ha sido cambiante a lo largo de toda su historia, alternando entre períodos cálidos y fríos (Dergachev, 2017). No obstante, la aparición del hombre en la Tierra y el surgimiento de la revolución industrial han sido de gran importancia para el clima debido a que ocasionaron un incremento de emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de la actividad humana.

Se espera que el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera desencadenen cambios en el clima de la tierra que provocarán deshielos, cambios en la fenología de las plantas, elevación del nivel del mar y un mayor número de fenómenos climáticos extremos como sequías y huracanes (Shaftel *et al.*, 2018). Muchos de los cambios en climas locales se deberán, más que al aumento global de la temperatura, a los cambios que esto ocasione en la circulación atmosférica y oceánica (Brönnimann, 2015).

1.2.3 Gases de efecto invernadero

La Tierra tiene una temperatura característica, llamada efectiva, consecuencia de la interacción entre la distancia al sol y la capacidad para reflejar la luz que recibe de este, es decir, el equilibrio entre la radiación absorbida por la Tierra y la radiación que es emitida por esta al espacio (Toharia, 1984, citado por Garduño, 2004). A este factor se le añade el del efecto invernadero, el cual incrementa la temperatura del planeta en gran medida, ya que la atmósfera actúa como filtro de ondas electromagnéticas. Los gases compuestos por moléculas de tres átomos o más, son atravesados fácilmente por la radiación de onda corta proveniente del sol, mientras retienen la radiación de onda larga que emite la superficie terrestre calentada por el sol (Garduño, 2004; Lomolino *et al.*, 2010). Al existir una gran cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera la radiación proveniente de la superficie terrestre, no logra atravesar la atmósfera con facilidad, convirtiéndose en calor en esta. Este fenómeno es la principal fuente calor de la atmósfera, cerca del 77%, mientras solo el 13% proviene directamente de la radiación solar (Oliver y Hidore, 2002).

El efecto invernadero es de gran importancia para la vida en la Tierra. De no existir, la temperatura del planeta sería mucho más baja cambiando completamente las condiciones en las que se desarrolla la vida (Garduño, 2004). Sin embargo, debido a factores como la industrialización y el crecimiento económico, se ha dado un incremento en emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente debido a la quema de combustibles fósiles y remoción de vegetación natural (IPCC, 2014). Estas actividades liberan el carbono capturado por la biomasa a lo largo del tiempo y lo devuelven a un estado gaseoso (CO₂) que pasa a formar parte de la atmósfera, aumentando su capacidad para retener la energía del Sol. Si esto llegara a afectar al clima de forma que distintas regiones

presentaran un clima diferente al actual y este cambio no se revirtiera con el tiempo, se podrá considerar que los gases de efecto invernadero provocaron un cambio climático.

Cuando por causas naturales o antrópicas se cambia la energía radiante absorbida por la atmósfera, el sistema climático responde a varias escalas de tiempo y espacio. Por ejemplo, afecta las corrientes marinas y atmosféricas que regulan el ciclo hidrológico y por lo tanto a los parámetros climáticos.

El efecto invernadero ha sido muy estudiado debido a los evidentes cambios sufridos por el clima de la Tierra a partir del incremento de la industrialización y sus efectos en la biosfera. Todas las proyecciones de IPCC (2013) que intentan predecir los cambios del clima, muestran que este se hará más cálido conforme aumente la concentración de CO₂ con el tiempo, no obstante, este aumento en la temperatura no será uniforme, como tampoco se espera que lo sean los cambios de la precipitación, por lo que es importante contar con información sobre las posibles características del clima futuro. Debe considerarse que una anomalía en el clima puede ser ocasionada por varios factores, por ejemplo, inestabilidad atmosférica y oceánica, intensidad de la radiación solar o cambio del uso de suelo, adicionales al efecto invernadero (Magaña-Rueda, 2004), lo que puede dificultar la modelación del clima.

Para proyectar las características probables del clima futuro bajo ciertas condiciones atmosféricas se utilizan los modelos de circulación atmosférica, que son representaciones matemáticas de los procesos más importantes para en las características del clima (radiación solar, capas de la atmósfera, corrientes marinas y atmosféricas, coloides atmosféricos, nubosidad, presión atmosférica, evaporación, etc.), en los que se simula temperaturas más altas, causadas por una mayor concentración de gases de efecto invernadero (Orellana *et al.*, 2009). Este procedimiento ha generado gran cantidad de proyecciones de las características del clima que difieren entre sí dependiendo del modelo de circulación general de la atmósfera y concentración de gases de efecto invernadero en las que se simule el clima.

El clima es un sistema muy complejo y difícil representar, regulado por diversos fenómenos que no se comprenden del todo, por lo cual existe cierta imprecisión en las proyecciones en base al aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera IPCC (2013), visible en la varianza de los datos generados. Sin embargo, estos modelos muestran un consenso en que el aumento de la concentración de gases de

efecto invernadero lleva a un aumento de temperaturas, que será más intenso en altas latitudes del hemisferio norte, junto con un aumento en la precipitación; mientras en el ecuador se espera un menor aumento de temperatura y mayor precipitación, y para latitudes tropicales un aumento de la temperatura y reducción de la precipitación (IPCC, 2013). Esta perspectiva global se verá modificada por la complejidad del clima a mediana y pequeña escala, debido a que, si bien los modelos de IPCC (2013) pueden predecir de forma confiable la temperatura global con base en la radiación absorbida por distintas concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, la forma en que este aumento de temperatura afectará a los fenómenos como corrientes oceánicas y atmosféricas, o la ocurrencia de diversos fenómenos atmosféricos no se conoce con exactitud, lo que dificulta estimar los efectos de una mayor temperatura global, en especial si se trabaja a pequeña escala, ya que, adicionalmente a los factores de variación en base a los que se elaboran los diferentes modelos para el cambio climático, se espera que se modifiquen los fenómenos que regulan a los climas locales los cuales son difíciles de proyectar (IPCC, 2013).

La distribución de los diferentes tipos de vegetación en el planeta se encuentra fuertemente influida por el clima, siendo los factores más importantes la temperatura y precipitación, dependiendo de estos la biomasa del ecosistema (Walter, 1977). En menor medida, la vegetación tiene la capacidad de regular el clima, puesto que esta facilita la infiltración y retención de agua en el suelo, que posteriormente se evapora a través de la vegetación, lo que absorbe grandes cantidades de calor y eleva la humedad de la atmósfera, esto último es un precursor importante de los eventos de precipitación (Orellana y Espadas-Manrique, 2017), siendo un factor de gran importancia para la península de Yucatán. Por lo que es importante conocer las características de los ecosistemas para estimar los efectos de un eventual cambio en el clima.

1.2.3 Epífitas

Las plantas de hábito epífito pueden definirse, de manera muy general, como las que utilizan a otras como soporte estructural sin tener contacto con el suelo ni desarrollar parasitismo (Benzing, 1990; Steel y Wilson, 2003; Zotz, 2016). Estas plantas crecen adheridas a troncos y ramas de árboles o arbustos, sin embargo, existe una gran flexibilidad en sus hábitos de crecimiento, llegando a establecerse en diversas superficies como rocas o líneas de energía eléctrica e incluso en el suelo, lo que da lugar a varias

definiciones de este gremio de plantas. Se desarrollan en un ambiente muy adverso y cambiante, en el cual los factores limitantes son la sombra, falta de agua y un sustrato con escasos nutrientes; pues estos recursos suelen presentarse por pulsos durante las precipitaciones (Benzing, 1990; Granados-Sánchez *et al.*, 2004).

Se ha propuesto que el epifitismo surgió como una forma de acceder a la luz sin la necesidad de desarrollar largos tallos (Granados-Sánchez *et al.*, 2004), evitando competencia a cambio de enfrentar un hábitat muy riguroso, en especial en lo referente a la disponibilidad de agua (Benzing, 1986). Sin embargo, también se atribuye la aparición del epifitismo simplemente a la disponibilidad de espacio, dadas las variadas condiciones microclimáticas y de iluminación de los microhábitats que ocupan las plantas epífitas (Lüttge, 2008).

En las plantas vasculares, el epifitismo ha surgido de forma independiente dentro de diversos órdenes, sobre todo en helechos. Se estima que el 16% de las familias de plantas vasculares tienen especies epífitas. En las plantas con semillas destacan las orquídeas de las cuales 70% de sus especies son epífitas, le siguen Araceae y Bromeliaceae, de esta última familia con cerca de la mitad de sus especies epífitas (Benzing, 1987).

Si bien las epífitas son un gremio muy diverso, sus especies tienen ciertas características en común: en la mayoría de las familias vegetales los géneros que desarrollaron hábito epífito tienen especies más pequeñas que las familias terrestres, crecimiento simpodial, raíces adventicias, hojas con capacidad de almacenar agua, baja densidad estomática y tricomas con función absorbente (Zotz, 2016). En muchos casos las epífitas no poseen un sistema radical funcional, en la familia Bromeliaceae este puede encontrarse suberizado funcionando únicamente como sistema de soporte o ser inexistente. En cambio, sus hojas suelen realizar gran cantidad de funciones incluyendo de absorción de agua y nutrientes a través de tricomas especializados (Benzing, 1990).

Las plantas epífitas representan gran parte de la biodiversidad de las zonas tropicales, en selvas húmedas pueden representar cerca del 50% de la diversidad florística y componer una importante parte de la biomasa y capacidad fotosintética de los ecosistemas (Benzing, 1990) así como jugar un papel importante en la captura de carbono, regulación hídrica (Zotz, 2016) y el ciclaje de los nutrientes (Coxon y Nadkarni, 1995). Igualmente, en ellas habita fauna como mosquitos, escarabajos (Lira, 2007), hormigas (Benzing, 2012),

escorpiones (Mondragón y Cruz-Ruiz, 2009), anfibios y reptiles (Aranda-Coello *et al.*, 2012).

1.2.4 Distribución de las epífitas

Existe poca información sobre los patrones biogeográficos que siguen las epífitas vasculares (Cardelús *et al.*, 2006), sin embargo, al igual que otros gremios de plantas, los principales factores abióticos que limitan su generación de biomasa son la energía lumínica y la humedad (Francis y Currie, 2003). Se ha observado que su diversidad, biomasa y composición de especies se ven fuertemente influidos por estos factores, si bien, debe considerarse la distribución histórica de estas especies y a las barreras que limitan su distribución, ya que más de la mitad de las especies epífitas se encuentran en América y las familias Bromeliaceae y Cactaceae se encuentran casi únicamente en este continente (Benzing, 2012).

Las plantas epífitas se encuentran en un amplio rango de ecosistemas, en selvas húmedas tropicales, en las cuales suelen encontrarse grandes ramas cubiertas por una gruesa capa de humus que recibe agua constantemente (Granados-Sánchez *et al.*, 2004) y en donde se encuentra la mayor riqueza de especies de este gremio (Benzing, 1990; Cardelús *et al.*, 2006; Zotz, 2016). Igualmente habitan en climas secos, en los cuales las plantas epífitas deben lidiar con un medio más adverso, donde se encuentra menor riqueza de especies (Zotz, 2016), si bien pueden ser muy abundantes (Benzing, 1990). Cabe mencionar que la proporción especies pertenecientes a la familia Bromeliaceae en la flora epífita, aumenta conforme los ecosistemas aumentan su grado de aridez (Ibisch *et al.*, 1996, citado por Kessler, 2002). Las epífitas con semillas no han logrado adaptarse a climas templados y casi únicamente se encuentran en los trópicos donde la temperatura no desciende por debajo de 0°C (Benzing, 1990; Zotz, 2016), en cambio, en zonas frías la vegetación epífita se compone en su mayor parte de briofitas y helechos (Zotz, 2016). Por último, la altura respecto al nivel del mar es un factor que influye en la distribución de especies epífitas. En los ecosistemas tropicales húmedos se reporta mayor diversidad de epífitas a elevaciones medias debido al solapamiento de los rangos de tolerancia de las especies (Cardelús *et al.*, 2006), en especial en las partes bajas de las pendientes (Cascante-Marín y Nivia-Ruiz, 2013). En la Península de Yucatán Cach-Pérez (2013), indica que la distribución de especies epífitas de la familia Bromeliaceae epífitas tiene un patrón de distribución similar al reportado en la literatura ya que el aumento de la

densidad de especies se logró relacionar con la precipitación y el déficit de presión de vapor por este autor, donde la mayor riqueza de especies se encuentra en los sitios más húmedos, mientras los más secos tienen menos especies.

1.2.5 Bromeliáceas epífitas

Las Bromeliáceas son una familia de plantas tropicales en forma de roseta con una gran proporción de especies epífitas, se cree que estas provienen de plantas terrestres con altos requerimientos de luz y adaptadas a condiciones de sequía, características que facilitaron que adoptaran un hábito epífita (Pittendrigh, 1948). Las bromeliáceas epífitas presentan ciertas adaptaciones como tricomas especializados en sus hojas que utilizan para la absorción de agua y nutrientes. Para sobrevivir en condiciones donde el agua se obtiene en pulsos de precipitación, muchas bromeliáceas poseen hojas gruesas con una baja relación superficie-volumen, una gruesa capa de cutícula y bajos niveles de transpiración. Una característica muy frecuente en la familia Bromeliaceae es la presencia de CAM (Crasulacean Acid Metabolism), comúnmente encontrado en diversas familias de plantas que habitan en climas áridos. Esta vía de captura de carbono permite disminuir la pérdida de agua durante la fotosíntesis, debido a que el intercambio gaseoso por las estomas, necesario para obtener carbono, es al mismo tiempo una vía por donde las plantas pierden agua. Si el agua perdida no puede ser repuesta para mantener la homeostasis de la planta, esta muere. La característica más importante del metabolismo CAM es la capacidad de capturar y almacenar carbono durante la noche, cuando la humedad del ambiente es más elevada. Durante la noche la captura de carbono ocurre mediante fosfoenolpiruvato carboxilasa (PEP) que pasa a ser ácido málico el cual es acumulado en las vacuolas y es descarboxilado durante el día para proveer dióxido de carbono al ciclo de Calvin (Salisbury y Ross, 1992).

La diversidad de adaptaciones de las epífitas a su medio dificulta identificar un factor que explique la aparición de este nicho, dadas las variadas condiciones microclimáticas en las que se establecen las epífitas. Si bien, características que tienen en común estas plantas es la resistencia a períodos de sequía, baja competitividad, dadas sus bajas tasas de crecimiento, y escasa altura, entre otras características dependiendo de la especie, que les impiden establecerse en el medio cercano al suelo (Zotz, 2016).

Por otra parte, las condiciones ambientales bajo las que se desarrolla una especie pueden causar cambios en su fenología. De esta plasticidad tanto fisiológica como morfológica

existen diversos ejemplos en las bromeliáceas epífitas (Scarano *et al.*, 2002; Brave *et al.*, 2015) incluyendo en la península de Yucatán (Cach-Pérez *et al.*, 2018).

Dependiendo de la especie, el tamaño del individuo puede tener mayor o menor importancia en la pérdida de agua, ya que se reportan diferentes respuestas a la sequía en individuos de diferentes especies con una relación volumen-superficie similar (Zotz y Andrade, 1998). No obstante, se ha reportado que la humedad relativa es de especial importancia para las epífitas vasculares en etapas juveniles, ya que tienen menor capacidad para almacenar agua (Toivonen *et al.*, 2017).

La familia Bromeliaceae tiene algunas de las especies de epífitas más abundantes en la península de Yucatán. Dentro de la familia la mayoría de las especies pertenecen al género *Tillandsia*, uno de los más estudiados a dentro de esta región. Por lo que su estudio poblacional ha resultado atractivo para estudiar la relación de las plantas con el clima.

1.2.6 bioindicadores

Los bioindicadores son grupos biológicos de referencia, cuyas poblaciones pueden ser afectadas por los cambios en su hábitat, organismos que se relacionan directa o indirectamente a cierto factor o factores que se desean evaluar. El valor como bioindicador de una especie depende de la susceptibilidad de esta a ser afectada por el factor de interés (Calles, 2007). Van-Straalen (1998) menciona varias razones para usar bioindicadores, entre ellas se encuentran la dificultad de medir el factor de interés y cuando este puede ser fácilmente medido, pero no puede ser evaluado sin la ayuda de bioindicadores. Se ha planteado que las características que debe poseer un bioindicador son: solidez taxonómica, fácil reconocimiento, amplia distribución, abundancia, poca variabilidad genética o ecológica, tallas grandes, movilidad limitada, longevidad y facilidad para ser usada en bioensayos (Resch, 1979; Johnson *et al.*, 1993, citados por Llanes-Baeza y González, 2002). Las epífitas han sido ampliamente utilizadas como bioindicadores. En la mayoría de los casos para detectar contaminación debida a compuestos transportados por aire (Kularatne y De Freitas, 2013; Rola y Osyczka, 2014; Barre *et al.*, 2015; Root *et al.*, 2015; Donovan *et al.*, 2016; Díaz-Álvarez *et al.*, 2018), siendo las especies más usadas briofitas y helechos de zonas templadas.

Se ha planteado el uso de plantas epífitas como bioindicadores del cambio climático dada su alta sensibilidad a los cambios causados por el clima y los antropogénicos, su ciclo de vida relativamente corto y su alta capacidad de dispersión, ya que estas características permiten observar los efectos de cambios en el clima de forma más inmediata en las poblaciones de epífitas que en la vegetación establecida en el suelo cuyo medio es más estable (Zotz y Bader, 2009; Hsu y Wolf, 2013).

Las familias de epífitas que han sido más estudiadas en México son orquídeas y bromeliáceas (Aguirre-León, 1992), de estas, las bromeliáceas han sido estudiadas de forma más extensa, por lo que existe mayor información sobre su fisiología, comparada con otras familias, facilitando su uso como bioindicadores. Dada la diversidad de adaptaciones, gran cantidad de información sobre su fisiología, marcada estratificación vertical (Krömer *et al.*, 2006), dependencia hacia el microclima generado por la vegetación arbórea (Benzing, 1990) y amplia distribución (Zots, 2016); las bromeliáceas epífitas son un grupo muy interesante para evaluar los cambios sufridos por el clima y la vegetación. Sin embargo, los pocos estudios que se han hecho sobre las respuestas de las bromeliáceas al clima, se tratan de experimentos bajo condiciones controladas enfocados en predecir cómo cambiarán las poblaciones bajo ciertas condiciones climáticas (Ceusters *et al.*, 2008; Zotz *et al.*, 2010). Pese a esto, se espera que los cambios en sus poblaciones puedan dar información sobre los cambios climáticos experimentados recientemente por el ecosistema, e indicar cuáles serán los cambios que experimentarán las especies arbóreas en el futuro.

1.2.7 comunidades vegetales de la península de yucatán

La Península de Yucatán presenta un gradiente de precipitación que va en aumento del noroeste al sureste. A lo largo de este gradiente se distribuyen diversos tipos de vegetación, todos con una alta estacionalidad en la precipitación. Los tipos de vegetación incluidos en la presente investigación fueron los siguientes:

Manglar

Esta asociación vegetal presente en el litoral costero de la Península de Yucatán, se caracteriza por su componente arbóreo con un complejo sistema de raíces que se desarrollan en suelos inundados. Tolerancia condiciones de elevada salinidad y se encuentra en cuerpos de agua con diferentes concentraciones de sal, incluso en lagunas

hipersalinas. Se encuentran en los climas cálidos secos (BS_0 y BS_1) y la variante más seca de los cálidos subhúmedos con lluvias en verano (Aw_0) (Flores-Guido *et al.*, 2010; Zaldívar-Jiménez, 2010).

Matorral de duna costera

La vegetación de duna costera se encuentra a lo largo del litoral, se trata de una angosta franja de vegetación cuyo ancho alcanza hasta 300 m. Se desarrolla sobre suelos arenosos o calcáreos y tienen un clima muy seco, con una precipitación anual de 400 a 800 mm en el norte de Yucatán y la temperatura media anual es de 30°C. Las especies que habitan en esta zona están adaptadas a condiciones de sequía y tiene una baja altura (Flores-Guido *et al.*, 2010).

Selva baja caducifolia

Es una de las comunidades más extensas de la península de Yucatán ubicándose al noroeste del estado de Yucatán. El clima que predomina en esta comunidad es Aw_0 y Aw_1 (el más seco de los cálidos sub-húmedos con lluvias en verano y cálido sub-húmedo con lluvias en verano, respectivamente), con una temperatura media anual de 26-27.6°C y precipitación de 730-1000mm (Flores-Guido *et al.*, 2010). Esta clase de vegetación se caracteriza por una marcada estacionalidad en la época de lluvias, las cuales se presentan en un período cercano a seis meses en el verano, siendo muy baja la precipitación el resto del año, donde los árboles tienden a deshacerse de sus hojas (Rzedowski, 2006).

Selva mediana subcaducifolia

Ocupa una gran porción de la superficie de la Península de Yucatán, se extiende en una franja amplia que abarca desde el nororiente del estado de Yucatán, hasta el norte del estado de Campeche pasando por el sur de Yucatán. Se encuentra en climas Aw_0 y Aw_1 con una precipitación de 1078-1220 mm al año, la altura de sus árboles se encuentra entre 10 y 15 m (Flores-Guido *et al.*, 2010).

Selva mediana subperennifolia

Ocupa la mayor parte de la superficie de la Península de Yucatán ubicándose en una pequeña porción al sur y al este del estado de Yucatán, es la comunidad con mayor humedad de la península y la altura de sus árboles varía de 15 a 20 metros y únicamente el 25% de los árboles pierden las hojas en la época seca (Flores-Guido *et al.*, 2010).

1.3 JUSTIFICACIÓN

Un cambio en el clima de la región implica una afectación a todos los servicios ambientales que satisfacen necesidades humanas. Al no tomar medidas de adaptación a estos cambios, muy posiblemente se presenten consecuencias negativas para el bienestar de la población, como menor disponibilidad de agua, menor grado de confort térmico y fracaso de actividades agrícolas, entre otros. Por lo cual es de gran importancia conocer las características del clima futuro.

La modelación de los posibles climas futuros ha sido hecha a gran escala por el IPCC y adecuado a las variaciones del clima de la península de Yucatán por Orellana *et al.* (2009). No obstante, existe incertidumbre en estas proyecciones del clima futuro, por lo que sería muy interesante observar cual ha sido el comportamiento de distintas variables climáticas a lo largo del tiempo de forma que su comportamiento pueda contrastarse con las hipótesis sobre el clima en un escenario de mayor concentración de gases de efecto invernadero.

Por otra parte, el clima es de gran importancia determinando las características de la vegetación, también ésta tiene la capacidad de influir en el clima. Los árboles son capaces de ayudar al suelo retener agua que se infiltraría al subsuelo y con ella disipar grandes cantidades de calor y aumentar la humedad atmosférica al transpirar agua, lo cual favorece la formación de nubes y la precipitación. Por esto es muy importante conocer cómo afectará el cambio en el clima al tipo de vegetación, lo cual puede lograrse observando el recambio de especies vegetales. Se propone el uso de las Bromeliáceas epífitas como bioindicadores climáticos. Estas especies, a diferencia de los árboles, se espera que muestren respuestas a los cambios del clima a corto plazo. Al tratarse de especies ampliamente distribuidas y su composición de especies estar fuertemente vinculada al clima (Cach-Pérez, 2013), en corto y mediano plazo el número de individuos de sus poblaciones puede ayudar a estimar el grado de afectación que sufrirán las comunidades vegetales de mantenerse el cambio en las condiciones del clima.

1.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1.1- ¿Se han dado cambios en la temperatura y la precipitación de los distintos puntos a lo largo del gradiente climático de la Península de Yucatán, con relación al aumento en la concentración de gases de efecto invernadero y la temperatura media global?

1.2- ¿Este cambio, de existir, se manifiesta de igual forma en el clima de todas las zonas de la península de Yucatán?

2.1- ¿Se ha dado un cambio sostenido en el número de individuos de las poblaciones de bromeliáceas epífitas a lo largo del tiempo del estudio?

2.2- ¿Cómo responde el número de individuos de las poblaciones de bromeliáceas epífitas a las variaciones de estrés hídrico a lo largo de varios años?

2.3- ¿Influyen las diferencias en las condiciones microambientales causadas por las características de los estratos del dosel y especies de árboles hospederos de bromeliáceas epífitas en la respuesta de estas plantas al clima?

1.5 HIPÓTESIS

1.1-Dadas las proyecciones de cambio climático para la Península de Yucatán en el escenario RCP 8.5, hechas por IPCC (2013), se espera observar una tendencia positiva en las temperaturas máximas, medias y mínimas, y una negativa en la precipitación en las estaciones meteorológicas de los cinco sitios de estudio.

1.2-En el escenario de cambio climático RCP 8.5 de IPCC (2013) se espera que a lo largo de la península de Yucatán, ocurra de manera muy uniforme una reducción de la precipitación y un aumento en las temperaturas máxima, media y mínima, conforme transcurre el tiempo; por lo que se espera que la tendencia de los datos de todas las estaciones sea la similar.

2.1- Si el cambio climático se manifiesta en la península de Yucatán como aumento en la temperatura y reducción de la precipitación, se espera que las poblaciones de bromeliáceas epífitas de la Península hayan visto reducido sus números de individuos en respuesta a las condiciones climáticas adversas del 2009-2017.

2.2- Dada la sensibilidad de las bromeliáceas epífitas al clima, se espera que muestren un aumento en su población en los años con mayor humedad y menor temperatura, mientras que en los años secos y cálidos se produzca una reducción en sus poblaciones.

2.3- Los efectos de las variaciones climáticas en las poblaciones de bromeliáceas epífitas difieren entre distintos estratos del dosel debido a las variaciones que existen en el microclima entre estos. Se espera que, en los estratos altos y por lo tanto más expuestos, las poblaciones de bromeliáceas epífitas presenten las mayores variaciones de número de individuos en respuesta a las variaciones del clima anual.

1.6 OBJETIVOS GENERALES

1.1- Evaluar si las observaciones climáticas de los puntos estudiados de la Península de Yucatán han seguido el comportamiento proyectado por IPCC (2013) para esta región, que establece una reducción en la precipitación y un aumento en la temperatura conforme transcurre el tiempo y aumenta la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Así mismo analizar si existe o no similitud en las tendencias de las series de datos para las variables climáticas en los diferentes puntos de la península de Yucatán.

2.1- Evaluar el cambio anual de las poblaciones de bromeliáceas epífitas en distintos estratos del dosel, especies de árboles hospederos y ecosistemas de la Península de Yucatán del 2009 al 2018, así como su correlación con el comportamiento del clima en los diferentes años del estudio (precipitación en la estación lluviosa y estación seca y temperatura máxima extrema) con el cambio de número de individuos de las bromeliáceas epífitas (variable dependiente).

1.7 ESTRATEGIA EXPERIMENTAL

Para evaluar las variaciones del clima se recurrió a un análisis de regresión lineal de los registros de temperatura y precipitación de distintos puntos de la península de Yucatán, con el objetivo de cuantificar los cambios que ha sufrido el clima a lo largo del tiempo. Previo a este análisis, los datos de las series de tiempo se ajustaron con modelos ARIMA (Srivastava, 2015) (figura 1.7).

La evaluación de la respuesta de las bromeliáceas epífitas al clima se realizó analizando el cambio anual en el número de individuos de las poblaciones de bromeliáceas epífitas

en distintos ecosistemas representativos de la región y su crecimiento poblacional, bajo distintas condiciones climáticas a lo largo de diez años, lo cual mostró el comportamiento de las poblaciones de bromeliáceas en un amplio rango de condiciones. Los datos fueron obtenidos de las matrices de poblaciones de bromeliáceas que han sido monitoreadas en cuadrantes permanentes, en cinco sitios a lo largo de la península de Yucatán (figura 7.1).

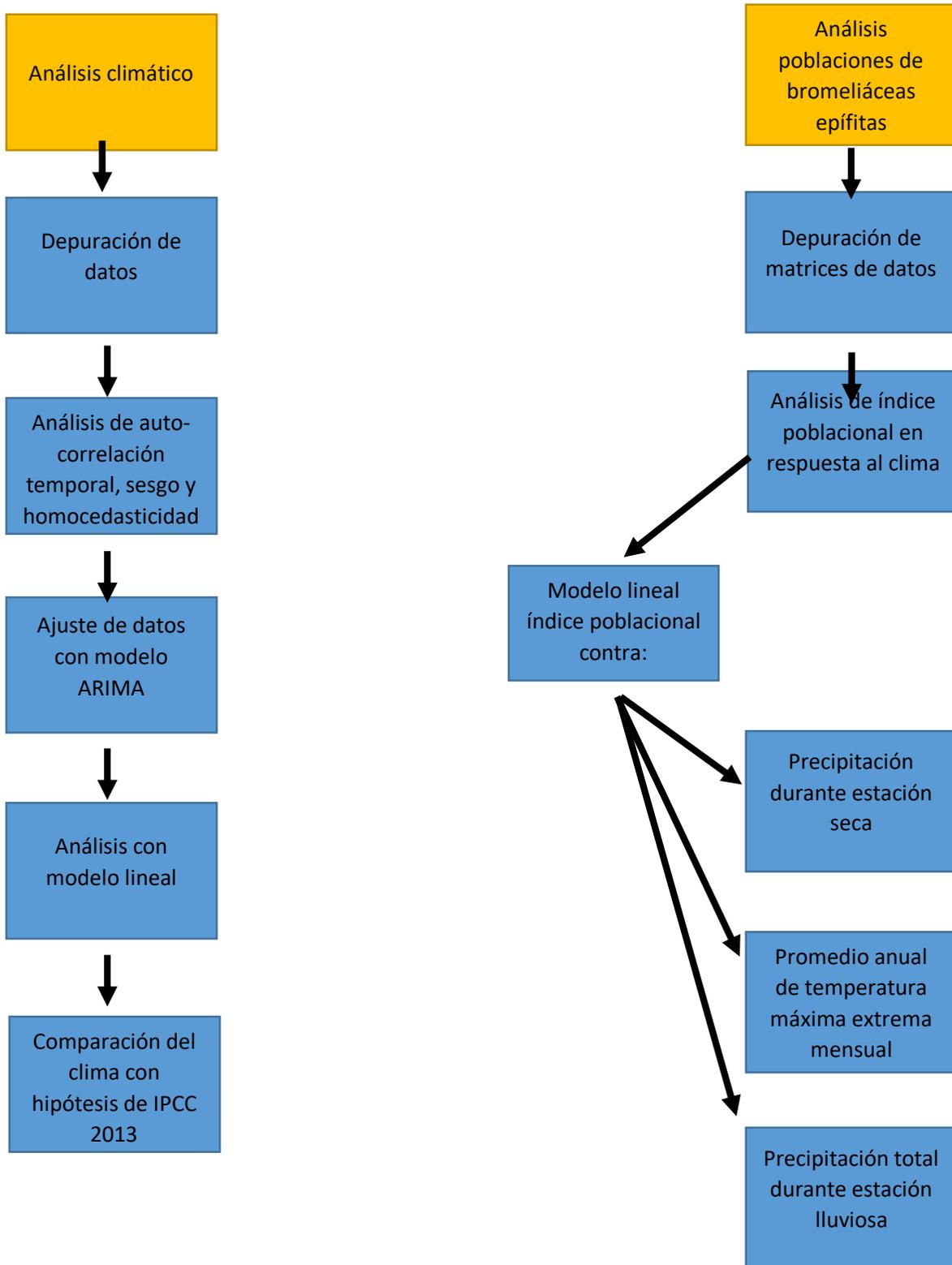


Figura 1.7. Esquema de la metodología seguida en la investigación.

CAPÍTULO II

IMPACTO DEL AUMENTO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

2.1 INTRODUCCIÓN

2.1.1 Cambio climático

A pesar de que el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, ha sido un fenómeno ampliamente estudiado, no es claro cómo sus efectos se han visto reflejados en el clima de la Península de Yucatán. El IPCC (2013) indica que se espera un clima más cálido y seco en zonas tropicales excepto en el ecuador, donde se esperan más lluvias, sin embargo, no se ha logrado obtener evidencias claras de este cambio para la Península de Yucatán (Orellana *et al.*, 1999), si bien, de forma más reciente se encontró que existe un aumento en los años con precipitación por debajo del promedio y una tendencia a un clima más árido respecto a años anteriores (Márdero *et al.*, 2012). El último trabajo respecto al cambio climático para la región, realizado por Orellana *et al.* (2009), considera múltiples escenarios climáticos para PY, los cambios planteados por estos autores fueron proyectados para 2020, de forma que llegada este año podrán descartarse los escenarios que no se ajusten a las condiciones climáticas de ese momento.

2.1.2 Clima de la península de Yucatán

Para estudiar cuáles serán los efectos del aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la península de Yucatán, deben considerarse algunas cuestiones. Una de ellas es que conforme se reduce la escala en las proyecciones acerca los posibles cambios en el clima, aumenta el grado de incertidumbre de estas, entre otras cosas debido a que se aumenta la complejidad del clima (Conde *et al.*, 2009), lo cual se puede ligar a distintos fenómenos atmosféricos y oceánicos.

Debido a las particulares interacciones de factores atmosféricos se considera a la Península de Yucatán como una entidad regional con sus propias características (Orellana *et al.*, 1999). El clima de la región es regulado por múltiples fenómenos climáticos: la zona

intertropical de convergencia, monzones norteamericanos, El niño-ENSO, ciclones tropicales, frentes fríos, ondas tropicales y oscilaciones térmicas inter-decadales en los océanos (IPCC, 2013). La confluencia de estos fenómenos causa incertidumbre en el comportamiento futuro del clima en la región, que se ve reflejado en la varianza de las estimaciones de precipitación futuras de IPCC (2013).

A lo largo de la península existe un gradiente de humedad, grado de desarrollo edáfico y altura de los árboles que va incrementándose del noroeste al sureste (Duch, 1988; Orellana *et al.*, 2010). Esto se debe a la historia geológica de la región, donde las zonas que emergieron del océano más recientemente poseen los suelos menos desarrollados, reduciéndose el grado de desarrollo edáfico conforme se avanza hacia el norte, que cuenta con suelos más jóvenes y menor elevación respecto al nivel del mar (Duch, 1988). Por otra parte, el gradiente de precipitación descendente de sur a norte, es regulado por las de masas de aire que logran penetrar en la península trayendo con ellas nubosidad del Mar Caribe y Océano Atlántico, proceso regulado por vientos alisios, depresiones tropicales, sistemas de alta y baja presión en el Atlántico y masas de aire polar (Orellana *et al.*, 1999).

El relieve plano de la región ocasiona que la humedad del aire no se precipite de forma frontal, sino por calentamiento, ascenso y posterior enfriamiento adiabático y precipitación de la humedad, en el proceso de lluvia convectiva (Orellana *et al.*, 1999). Las características del relieve de la región contribuyen a este gradiente, dado que, al aumentar la altura de norte a sur, las masas de aire son forzadas a ascender sufriendo enfriamiento adiabático, siendo más probable que la humedad que contienen se precipite (mismos autores).

Orellana *et al.* (1999) mencionan que los fenómenos climáticos más importantes de la Península de Yucatán son los siguientes:

Zona inter-tropical de convergencia: es un cinturón ecuatorial de baja presión, fuerte convección y precipitación, donde los vientos alisios del noreste y sureste convergen. Se encuentra sobre el atlántico y la mitad del este del pacífico, debido a las interacciones de la atmósfera con el océano se ubica al norte del ecuador (IPCC, 2013).

Oscilación sureste-el niño: es un fenómeno que involucra interacciones entre el océano y la atmósfera que ocurre a una escala interanual produciendo variaciones en los climas

locales y regionales (Birk *et al.*, 2010). Se trata de oscilaciones en la temperatura del agua en el Pacífico ecuatorial del este, que tienen un efecto en gran parte del clima del planeta. En la Península de Yucatán este fenómeno corresponde con una mayor precipitación en la estación seca en etapas maduras del fenómeno y una disminución de las lluvias en la misma estación previo al fenómeno (Giannini *et al.*, 1998).

Lluvias de verano: estas lluvias provienen de los vientos alisios producidos por la celda Bermuda-Azores que arrastran grandes cantidades de agua provenientes del Atlántico y Mar Caribe. En verano la evaporación del agua oceánica, causada por las altas temperaturas ocasionan que estos vientos se saturen de humedad, la cual se precipita cuando estas masas de aire entran en el continente y se enfrían, lo cual ocurre entre mayo y octubre.

Sequía intraestival: la interrupción de las lluvias de verano es causada por “vaguadas polares” que interrumpen los vientos alisios. Esta condición suele durar unos 3 meses, si bien, es muy variable entre años.

Nortes: se trata de masas de aire frío provenientes de Canadá y Estados Unidos que chocan frontalmente con aire caliente sobre México, estos, al pasar por el Golfo de México y Mar Caribe se saturan de humedad que posteriormente se precipita.

Niebla y rocío: un factor característico del clima de la península de Yucatán, que puede tener gran importancia para la vegetación epífita, es el aire que contiene grandes cantidades de humedad que no se precipita sino hasta salir de la región, sin embargo, esta humedad puede precipitarse en forma de niebla y rocío en las primeras horas del día lo cual ha sido reportado para las selvas bajas caducifolias de Dzibilchaltún y de Celestún (Andrade, 2003; De la Rosa-Manzano *et al.*, 2014).

2.1.3 Cambio climático en la península de Yucatán

La Tierra ha experimentado diversos cambios en el clima a lo largo de su existencia, lo que ha influido en las características de su biota (Lomolino *et al.*, 2010), esto se ha visto reflejado en la Península de Yucatán, que ha experimentado grandes cambios climáticos a lo largo de su historia, los cuales han modificado las características de su vegetación (Aragón-Moreno *et al.*, 2012) y población humana (Kennett *et al.*, 2012).

El cambio de composición de especies de plantas puede observarse en el polen de núcleos lacustres, que permite inferir las características del paleoclima (Aragón-Moreno *et al.*, 2012; Correa-Metrio *et al.*, 2012). Reconstrucciones de climas antiguos de la región indican que el período clásico de la cultura maya (300-900 d.C.) surge debido a un período de gran humedad en la región y termina con una reducción de las lluvias que causó varias décadas de sequía (Kennett *et al.*, 2012). Debe considerarse que estos cambios en una escala de miles de años muestran diferencias mucho más evidentes en la vegetación que si se trabaja con escalas mucho más cortas de tiempo.

2.1.4 Registros climáticos en la península de Yucatán

A una escala de tiempo más cercana, actualmente se cuenta con los datos climáticos de CONAGUA. La península de Yucatán cuenta con 177 estaciones meteorológicas operando en los estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo. En su mayor parte sus registros son series cortas, ya que muchas estaciones comenzaron a operar a partir de 1960. Adicionalmente las estaciones han sufrido interrupciones en su operación y muchos datos no tienen la calidad adecuada, siendo necesarios depurarlos. Esto dificulta observar si el clima ha sufrido cambios a lo largo del tiempo, o si existe una tendencia definida hacia un cambio en las características de las variables climáticas de la región. No obstante, existen estaciones que iniciaron sus registros cerca de 1920, las cuales son las de mayor interés para observar las modificaciones sufridas por el clima, y algunas otras cuentan con registros cercanos a 1950 o 1960.

Con estas series de datos, se espera obtener las tendencias de cambio que puedan contrastarse con las hipótesis del IPCC (2013) sobre los efectos del cambio climático debido a emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, que apuntan a un clima más cálido y seco en la Península de Yucatán.

En la región existen puntos en los que los datos de las estaciones meteorológicas son muy breves, tienen interrupciones o sus datos muestran valores muy alejados del rango usual de las observaciones, por lo que no se pueden usar para observar el comportamiento pasado del clima, no obstante, los datos del clima para estos puntos en particular pueden obtenerse de las observaciones hechas con satélites, si bien debe considerarse que la forma en la que se obtuvieron los datos fue diferente. Otra consideración que puede tenerse es la extensión sobre el área en que abarca cada punto de los datos satelitales, que es mucho mayor a la que representan los datos de las

estaciones meteorológicas, por lo que estos datos suelen ser más estables. Sin embargo, salvo si se desea realizar una comparación, los datos satelitales pueden ser útiles para observar el clima de estos sitios.

Los cambios en el clima ocasionados por los gases de efecto invernadero suelen ser visualizados como anomalías en una serie de datos temporales. Es decir, que tan alejados se encuentran los datos de la media (IPCC, 2013). Entonces los cambios en el clima se ven en un cambio sostenido en las variables del clima como precipitación y temperatura media, como se ha observado en la temperatura media global.

2.1.5 Proyecciones climáticas

Ante la incertidumbre que produce en el clima futuro de la tierra la concentración de gases de efecto invernadero se han planteado diversos escenarios por IPCC en 2013 llamados RCPs (Trayectorias de Concentración Representativas por sus siglas en inglés). Estos escenarios estiman la temperatura de la Tierra con base en la radiación retenida por la atmósfera (W/m^2) con distintas concentraciones de gases de efecto invernadero. En 2013 IPCC planteó cuatro escenarios RCP que estiman la concentración de gases de efecto invernadero hasta 2100: RCP 2.5, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5. Estos escenarios han sido probados en distintos modelos de circulación atmosférica para obtener posibles escenarios del clima de la Tierra en el futuro.

Se trata de representaciones matemáticas del sistema climático, en las que se simulan los efectos de los gases de efecto invernadero. Sin embargo, todas las proyecciones climáticas tienen cierto grado de incertidumbre que, en gran parte, depende del desempeño de determinado modelo para el mesoclima de una región (Cavazos *et al.*, 2013). A corto plazo (una década), el factor de incertidumbre de mayor importancia es la variabilidad inherente al clima, mientras a largo plazo la mayor parte de la incertidumbre se debe a la imprecisión de los modelos (Hawkins y Sutton, 2010, citado por Dessler *et al.*, 2012). Para el sureste de México se ha encontrado que todos los modelos usados por IPCC (2013) subestiman la precipitación actual de esta región (Cavazos *et al.*, 2013), lo que suma gran incertidumbre a estas proyecciones para la península de Yucatán. Por su parte, la temperatura actual es recreada de forma más certera, dando mayor certeza a las proyecciones de esta variable (mismos autores).

2.1.6 Auto-correlación temporal

La auto-correlación temporal es la tendencia de los datos a ser más similares entre sí mientras más cercanos estén uno de otros en el tiempo, lo cual no necesariamente se relaciona con los gases de efecto invernadero. En cambio, esta similitud puede deberse diversos fenómenos, con un efecto sobre el clima que puede permanecer durante más de un año, como ciclos en las corrientes marinas o atmosféricas que pueden durar décadas (Wise, 2015) o la similitud de las temperaturas en años posteriores a uno con temperatura inusual debido a la inercia térmica oceánica (Cecco y Gouhier, 2018), así como fenómenos irregulares como el niño-ENSO.

En los datos climáticos se reporta que la auto-correlación temporal suele ocurrir de forma más intensa cerca del océano debido a la inercia que este produce en las variaciones del clima ya que la transferencia de calor ocurre durante períodos más largos en el océano (Cecco y Gouhier, 2018). Por lo cual es importante contemplar el efecto de la auto-correlación en los modelos que evalúan los cambios en el clima.

El denominado modelo ARIMA (Auto-regresivo, Integrated Moving Average) se trata de un modelo que considera el factor de auto-regresión, es decir, la similitud de las distintas observaciones (y) a lo largo del eje x (que en series de temporales representa el tiempo), de forma que pueda estimarse la correlación de mediciones de la serie con mediciones realizadas en tiempos anteriores, igualmente llamada "lag" o "retraso"; el modelo igualmente considera al promedio móvil, que se refiere a la estimación de un promedio en cada punto con base a un conjunto limitado de puntos anteriores a la observación (Srivastava, 2015). De esta forma la auto-correlación temporal queda representada en el modelo.

Los modelos ARIMA constan de tres partes: la autorregresiva o de rezago la cual se modela con el parámetro " p ", la cual se mide con la correlación que existe entre el valor de y en un punto y los valores y de puntos anteriores, permitiendo inferir el intervalo en el cual los valores anteriores y se ven influidos por el valor actual; la media móvil o auto-correlación parcial moldeada con el parámetro " q ", que estima una media en cada punto a partir del comportamiento de observaciones anteriores, y tendencia (d) que permite establecer si los datos tienen una pendiente (De la Fuente-Fernández, sf). Los valores p y q se obtienen observando la similitud de los valores de la serie de tiempo conforme aumenta la distancia entre las observaciones, mientras a mayor distancia se encuentren

los valores, se diferenciarán más, el punto donde se detiene la similitud es tomado como referencia para indicar en el modelo los valores de p y q (Srivastava, 2015).

2.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1.1- ¿Se han dado cambios en la temperatura y precipitación de los distintos puntos a lo largo del gradiente climático de la Península de Yucatán, en relación al aumento en la concentración de gases de efecto invernadero y la temperatura media global?

1.2- ¿Este cambio, de existir, se manifiesta de igual forma en el clima de todas las regiones de la península de Yucatán?

2.3 HIPÓTESIS:

1.1-Dadas las proyecciones de cambio climático para la Península de Yucatán en el escenario RCP 8.5, hechas por IPCC (2013), se espera observar una tendencia positiva en la temperatura promedio y una tendencia negativa en la precipitación en las estaciones meteorológicas de los cinco sitios de estudio.

1.2-En el escenario de cambio climático RCP 8.5 de IPCC (2013) se espera que a lo largo de la península de Yucatán, ocurra de manera muy uniforme una reducción de la precipitación y un aumento en las temperaturas máxima, media y mínima, conforme transcurre el tiempo; por lo que se espera que la tendencia de los datos de todas las estaciones sea la similar.

2.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1.1- Analizar los registros meteorológicos de temperatura media, máxima extrema, mínima extrema y precipitación de estaciones a lo largo de la península de Yucatán para estimar las tendencias de cambio en las variables climáticas y comparar estas tendencias con las proyectadas con los escenarios base de worldClim 2 (Fick y Hijmans, 2017) y RCP 8.5 (IPCC, 2013).

1.2- Comparar las tendencias de las variables climáticas de las distintas estaciones climáticas estudiadas.

2.5 MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizó el comportamiento de la tendencia de modelos lineales de las diferentes variables climáticas: precipitación, temperatura media, máxima extrema mensual promedio y mínima extrema mensual promedio con la finalidad de observar posibles tendencias de cambio y fluctuaciones interanuales de estas variables.

2.5.1 Obtención de datos

Los datos del clima en los que se realizó el análisis de regresión lineal fueron obtenidos de la red de estaciones meteorológicas de CONAGUA, ubicadas a lo largo del gradiente de precipitación de la península de Yucatán (figura 2.5). Se eligieron las estaciones que mantuvieran continuidad en la captura de datos y tuvieran los registros más antiguos disponibles (cuadro 2.5).

Para la elección del modelo RCP con el cual comparar los datos de las estaciones, se comparó el aumento de los gases de efecto invernadero en la atmosfera registrado por el observatorio Mauna-Loa (National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA), 2018), con el aumento en la concentración de estos gases estimado por los modelos RCP's, eligiendo al RCP que mejor representara tasa de aumento de concentración de gases de efecto invernadero.

Cuadro 2.5. Estaciones de los sitios de estudio.

Estación	Latitud	Longitud	Vegetación	Período de registros
Progreso	21°16'32.88"N	89°39'14.04"W	Manglar y Matorral de duna costera	1919-2008
Celestún	20°51'33.12"N	90°24'0.00"W	Manglar chaparro	1951-2017
Telchac	21°20'16.08"N	89°15'56.88"W	Matorral duna costera	1951-2017
Observatorio de Mérida	20°56'60.00"N	89°39'0.00"W	Selva baja caducifolia	1920-2017
Akil	20°14'39.12"N	89°19'28.92"W	Selva mediana subcaducifolia	1977-2017
Oxkutzcab	20°17'27.96"N	89°23'40.92"W	Selva mediana subcaducifolia	1977-2017
Tabi	20°13'39.00"N	89°31'54.84"W	Selva mediana subcaducifolia	1977-2017
Tekax	20°12'18.00"N	89°17'27.96"W	Selva mediana subcaducifolia	1949-2008
Zoh-Laguna	18°35'31.92"N	89°25'1.92"W	Selva mediana subperennifolia	1951-2017

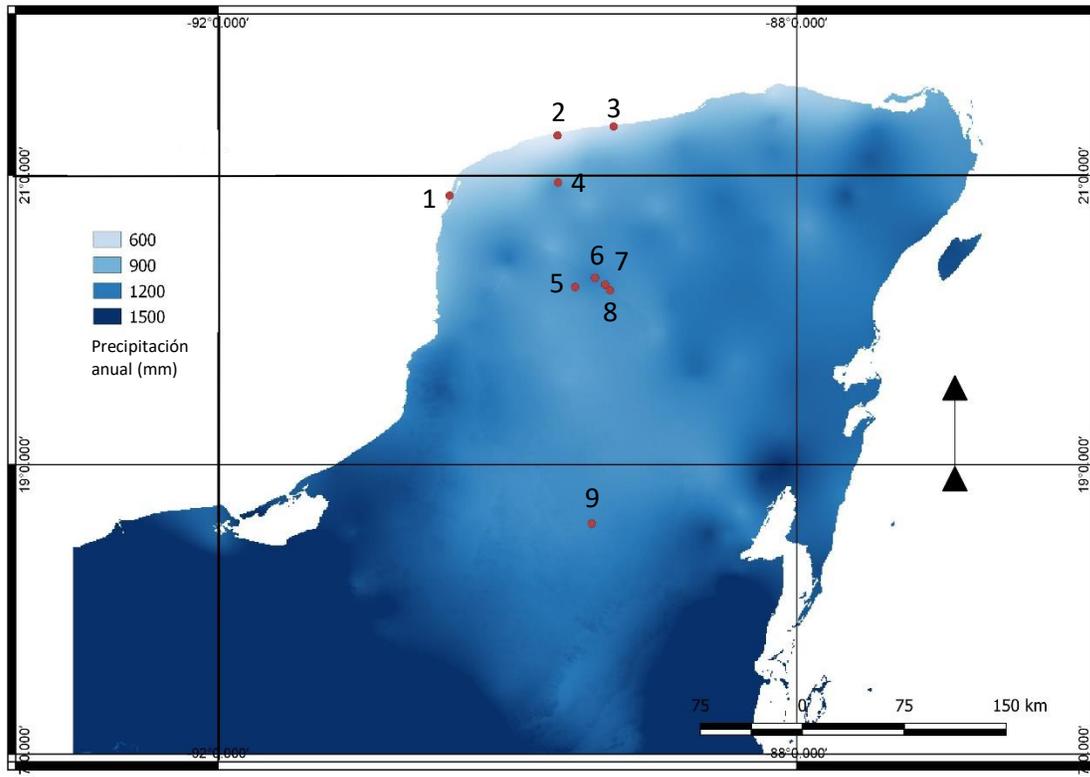


Figura 2.5. Ubicación de estaciones a lo largo del gradiente de precipitación de la península de Yucatán. 1-Celestún, 2-Progreso, 3-San-Benito, 4-Mérida, 5-Tabi, 6-Oxkutzcab, 7-Akil, 8-Tekax, 9-Zoh-Laguna.

2.5.2 elección de escenario RCP

Para estimar las características del clima en un escenario de mayor concentración de gases de efecto invernadero se han propuesto cuatro escenarios: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5. Se seleccionó el escenario que más se aproxima a la concentración actual de gases de efecto invernadero de forma que se comparara el clima histórico con las estimaciones hechas con los modelos bajo este escenario. Para elegir el escenario más cercano a los valores de gases de efecto invernadero actuales, se graficaron estos valores, tomados del observatorio Mauna-Loa (NOAA, 2018) y los valores estimados en los escenarios de IPCC (2013) donde se ve que a partir de 2012 solo el RCP 8.5, comparte valores de concentración de CO_2 con los medidos en el observatorio, mientras los otros escenarios contemplan valores atmosféricos de CO_2 bajos (figura 2.5.2).

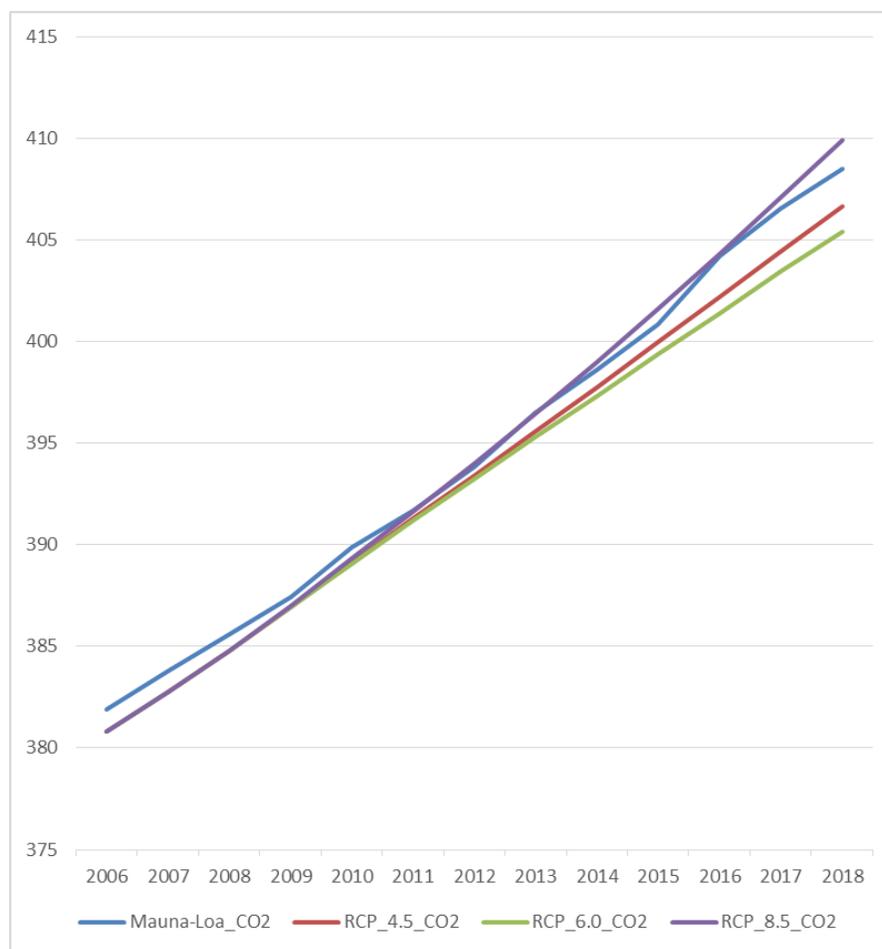


Figura 2.5.2. Concentración de CO₂ atmosférico (ppm) de escenarios RCPs y registros históricos (observatorio Mauna-Loa).

2.5.3 análisis estadístico

Para cuantificar los cambios que se han dado en el clima a lo largo de la región, se recurrió a un análisis de regresión lineal, seleccionando las variables precipitación total anual, temperatura media mensual, promedio anual de temperatura máxima extrema mensual y promedio anual de temperatura mínima extrema mensual, como variables dependientes, mientras el tiempo fue la variable independiente.

Previo al análisis de los datos, se procedió a su depuración, ya que existían valores faltantes o fuera del rango posible, en cuyo caso se determinó que estaban mal anotados. En estos casos se redujo la influencia de estos cambiando el valor extremo por el

promedio de los valores cinco años anteriores y posteriores a este (Orellana-Lanza., Hernández-Cerda y Espadas-Manrique, 2011).

Los datos de las estaciones presentaron patrones en los residuos de los modelos (apéndice 1) y auto-correlación temporal (observada en la mayor similitud de los valores cercanos entre sí respecto al tiempo), más que un orden aleatorio (apéndice 2.1). Por lo que, en primer lugar, se redujo este factor con modelos ARIMA (autorregresive integrated moving average) (apéndices 2.1, 2.2 y 2.3), suavizando las series de tiempo con estos modelos. Este análisis se realizó con paquetería “Forecast” (Hyndman *et al.*, 2019) para R (R core team 2017). Recurriendo a la función “auto.arima”, la cual elabora diferentes modelos con diversos valores de p , q y d y compara su AIC (Akaike Information Criterion) que calcula el ajuste de diversos modelos a los datos penalizando la falta de ajuste. Según el AIC, la función elige el modelo más adecuado. Algunos sitios tuvieron variables que en el modelo ARIMA arrojaron una secuencia de datos con el mismo valor de y a lo largo de x , con valores de cero en p , d y q . En estos casos se realizó el análisis de regresión lineal directamente con los datos de la estación, únicamente con el propósito de visualizar estos datos. Por su parte un valor de $d = 1$ indicó a una tendencia en el modelo lineal. Únicamente se consideró a las series de datos con $d = 1$ como las que presentaron tendencia de cambio, independientemente del valor de sus pendientes.

Estas pendientes obtenidas de los datos de las estaciones fueron comparadas con las pendientes estimadas a partir del escenario base y las proyecciones de IPCC (2013) bajo el escenario el RPC 8.5 para 2020. El escenario base fue obtenido de las bases de datos de WordClim 2 (Fick y Hijmans, 2017) con los valores promedio de las variables climáticas de 1970-2000, en la misma ubicación de las estaciones climáticas analizadas. De esta misma manera se obtuvieron los datos del escenario RCP en todas las estaciones. Con estos dos valores se logró establecer la pendiente esperada en los datos, logrando comparar los cambios esperados en el escenario de IPCC (2013) con los registros de las estaciones de CONAGUA en el clima de la región.

2.6 RESULTADOS

2.6.1 precipitación anual

La precipitación se ha mantenido estable en todas las estaciones excepto las de Calakmul, Mérida y Progreso ($d = 1$). La precipitación disminuye en la Calakmul, mientras aumenta en Mérida y Progreso. Debe considerarse que en Calakmul se registra un

aumento abrupto de precipitación entre 1951 y 1957 y en años posteriores la pendiente se mantiene negativa. En Mérida se registra un incremento sostenido de precipitación a lo largo del tiempo, que pasó de 875 a 1000 mm de precipitación anual (figura 2.6.1) (cuadro 2.6.1). Por último, Progreso registra un aumento en la precipitación de 410 a 594 mm. Los análisis ARIMA en los sitios restantes: manglar chaparro, matorral de duna costera y selva mediana sub-caducifolia no logra establecer la existencia de una pendiente ($d = 0$).

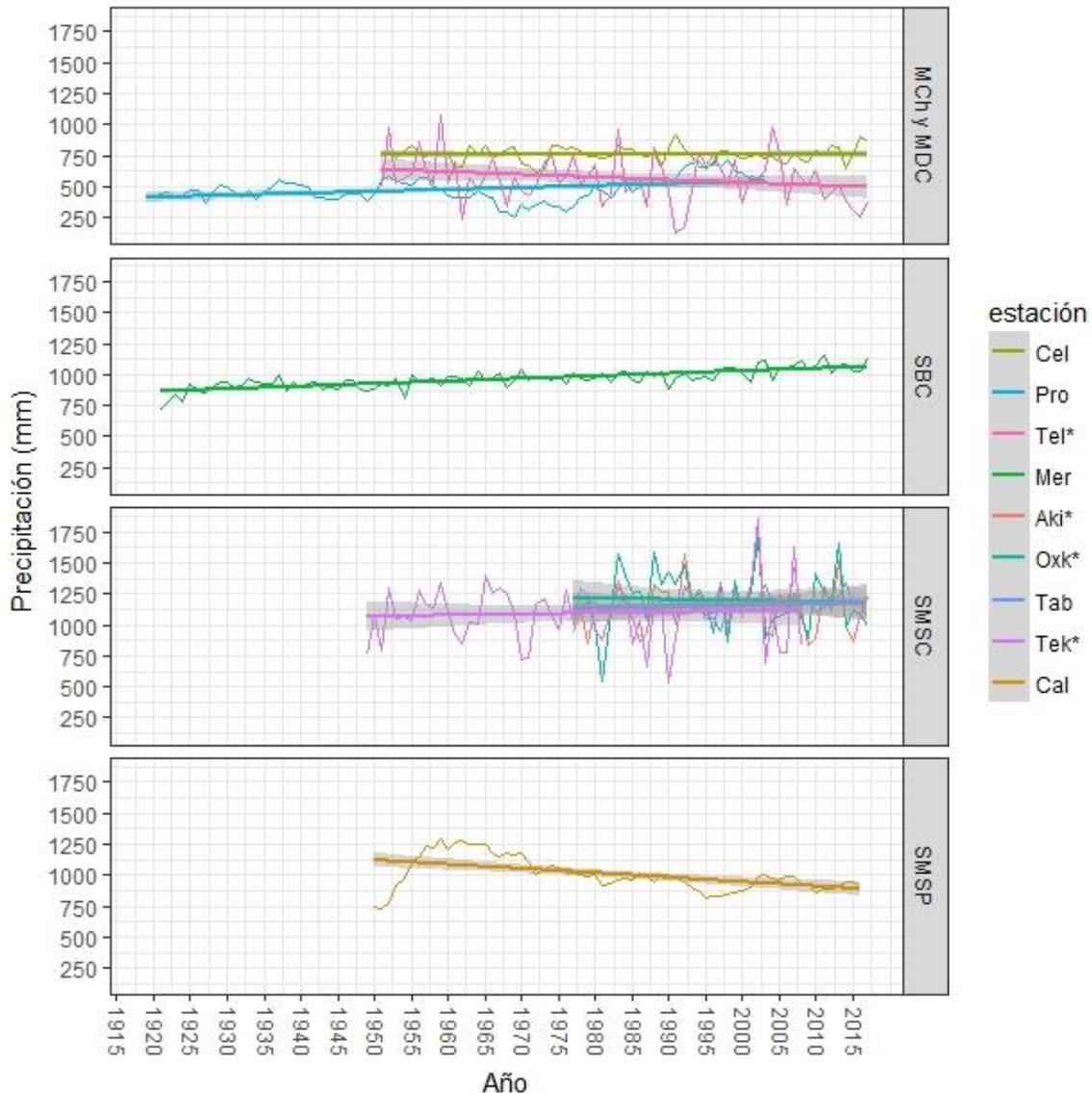


Figura 2.6.1. Precipitación registrada en los sitios de estudio. Línea delgada: datos del modelo ARIMA, línea gruesa: modelo lineal. Manglar y Matorral de duna costera (MCh y MDC): Celestún (Cel) y San-Benito (SB), selva baja caducifolia (SBC): Mérida (Mer), selva mediana sub-caducifolia (SMSC): Akil (Aki), Tabi (Tab) y Oxkutzcab (Oxx), selva mediana sub-perennifolia (SMSP): Calakmul (Cal). * Datos originales.

Cuadro 2.6.1. Período de registro, media, pendiente y valor *d* de los cambios en la precipitación de los diferentes sitios de estudio.

Vegetación	Duración registros	Media (mm)	Pendiente (mm/año)	Valor d
Manglar y matorral de duna costera (Celestún)	1951-2017	756.6 ± 2.11	0.04	0
Manglar y matorral de duna costera (Progreso)	1919-2003	472.7 ± 2.01	1.52	1
Manglar y matorral de duna costera (Telchac)	1951-2017	562.0 ± 2.11	-2.17	0
Selva baja caducifolia (Mérida)	1921-2017	964.4 ± 1.97	2.08	1
Selva mediana subcaducifolia (Akil)	1977-2017	1153.0 ± 1.9	1.16	0
Selva mediana subcaducifolia (Oxkutzcab)	1977-2017	1197.1 ± 2.7	-0.90	0
Selva mediana subcaducifolia (Tabi)	1977-2017	1156.7 ± 2.7	1.25	0
Selva mediana subcaducifolia (Tekax)	1949-2008	1091.4 ± 2.2	0.82	0
Selva mediana subperennifolia (Calakmul)	1950-2016	1005.5 ± 2.1	-3.53	1

2.6.2 Promedio anual de temperatura máxima extrema mensual

Las estaciones que presentaron un cambio significativo ($d = 1$) en la temperatura máxima extrema fueron Progreso, Mérida, Tabi, con una tendencia positiva, y Celestún y Calakmul con tendencia negativa (figura 2.6.2) (cuadro 2.6.2).

Respecto a la similitud de las pendientes en esta variable entre estaciones, se observa que en cuatro de los sitios no se registran cambios, tres ubicados al centro de la península de Yucatán en la selva mediana subcaducifolia (Akil, Oxkutzcab, Tekax) y uno al norte (Telchac). Los descensos ocurren al sur de la península en la selva mediana subperenifolia y en Celestún. Mientras en Mérida, Progreso y Tabi, se registran aumentos. Por lo que no se encontró similitud en los cambios de la temperatura máxima extrema a lo largo de la península.

Debe señalarse que se observa un aumento abrupto en la temperatura máxima extrema registrada por la estación de Mérida, ocurriendo en 1967, sin que hasta 2017 se haya reestablecido a los valores previos a este año. Lo mismo ocurre en Tabi, donde se observa una pendiente mayormente debida a un aumento repentino en 1993 sin regresar a los valores anteriores. Las estaciones de Oxkutzcab, Tekax y, en menor medida, Akil, en la selva mediana subcaducifolia, registran un aumento de la temperatura máxima extrema que inicia en 1992 y finaliza regresando a los valores previos en 2002. En Telchac se observa un súbito descenso que inicia en 1990, regresando nuevamente valores cercanos a la media en 2000. En Zoh-Laguna se observa un descenso en la temperatura máxima extrema (figura 2.6.2) (cuadro 2.6.2).

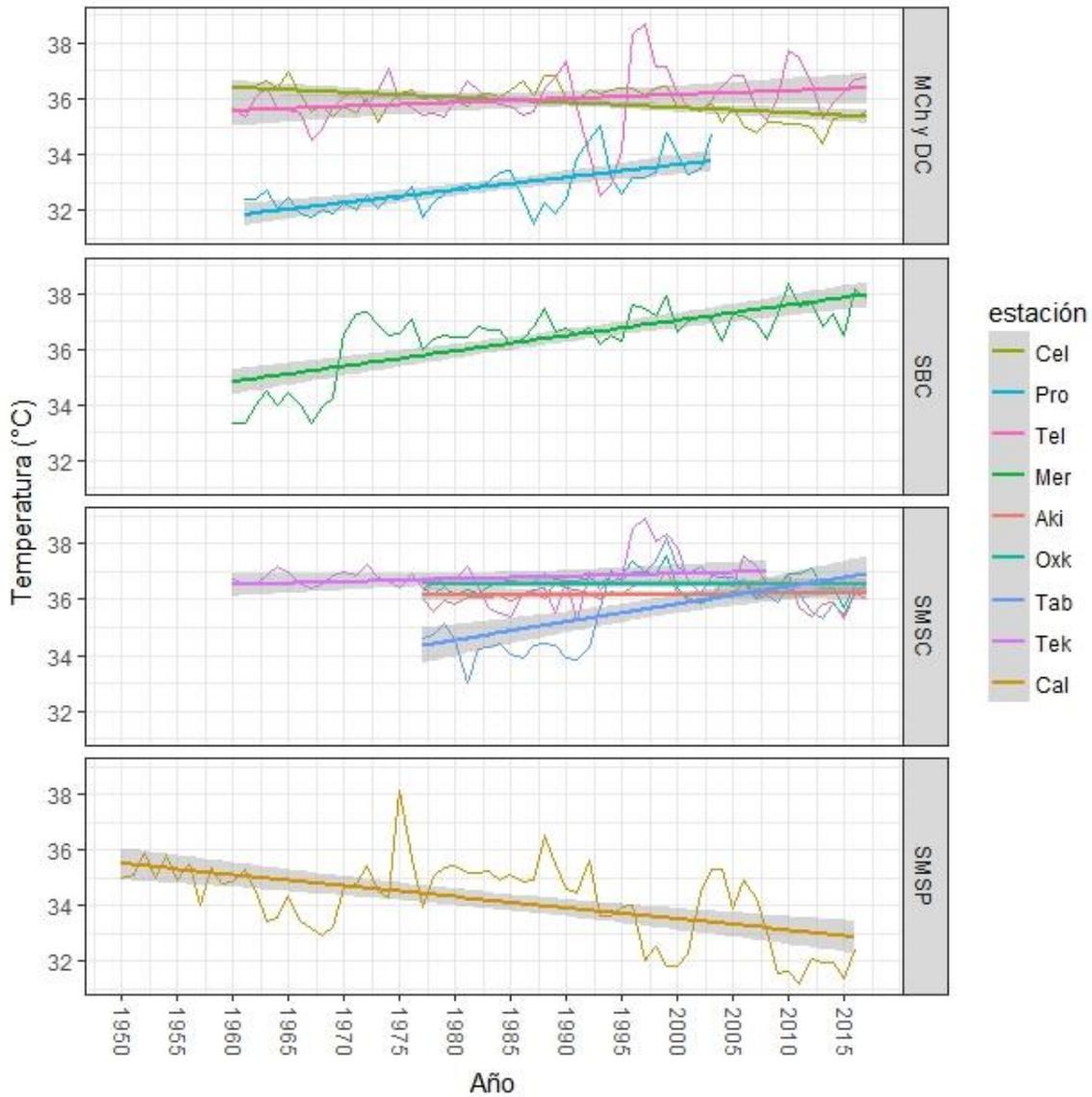


Figura 2.6.2. Promedio anual de la temperatura máxima extrema mensual registrada en los sitios de estudio. Línea delgada datos del modelo ARIMA, línea gruesa modelo lineal. Manglar y Matorral de una costera (MyD): Celestún (Cel) y San-Benito (SB), selva baja caducifolia (SBC): Mérida (Mer), selva mediana sub-caducifolia (SMSC): Akil (Aki), Tabi (Tab) y Oxkutzcab (Oxx), selva mediana sub-perennifolia (SMSP): Calakmul (Cal). *Datos originales.

Cuadro 2.6.2. Período de registro, media, pendiente y valor *d* de los cambios en la precipitación de los diferentes sitios de estudio.

Vegetación	Duración registros	Media (°C)	Pendiente (°C/año)	Valor d
Manglar y matorral de duna costera (Celestún)	1960-2017	35.88 ± 0.013	-0.02	1
Manglar y matorral de duna costera (Progreso)	1961-2003	32.81 ± 0.003	0.04	1
Manglar y matorral de duna costera (Telchac)	1960-2017	35.97 ± 0.013	0.014	0
Selva baja caducifolia (Mérida)	1960-2017	36.40 ± 0.013	0.055	1
Selva mediana subcaducifolia (Akil)	1977-2017	36.18 ± 0.01	0.0007	0
Selva mediana subcaducifolia (Oxkutzcab)	1977-2017	36.55 ± 0.015	-0.001	0
Selva mediana subcaducifolia (Tabi)	1977-2017	35.64 ± 0.015	0.064	1
Selva mediana subcaducifolia (Tekax)	1960-2008	36.76 ± 0.014	0.01	0
Selva mediana subperennifolia (Calakmul)	1950-2016	34.19 ± 0.012	-0.04	1

2.6.3 temperatura media anual

Las estaciones de Mérida, Progreso y Telchac presentan un incremento sostenido de temperatura ($d = 1$) a lo largo de toda la serie de tiempo, con un incremento cercano a 1°C . Mientras las estaciones de Tekax y Calakmul presenta una reducción de temperatura media (figura 2.6.3) (cuadro 2.6.3). Celestún, Akil, Oxkutzcab y Tabi no presentaron cambios ($d = 0$). Cabe destacar que en la selva mediana subcaducifolia (estaciones Tabi y Akil), se observa un gran aumento en la temperatura media que en años siguientes regresa a valores cercanos a la media, manteniendo una tendencia estacionaria.

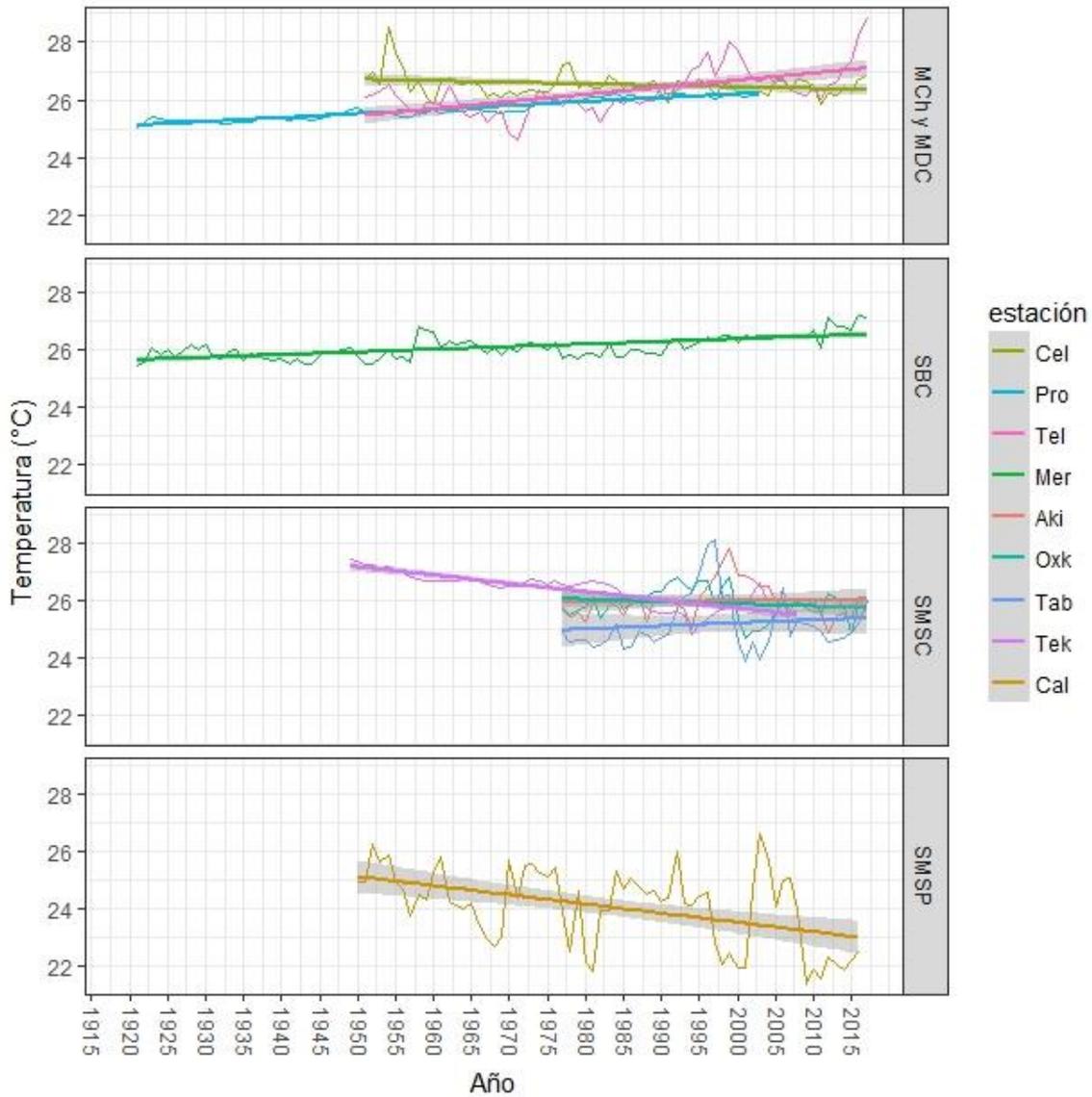


Figura 2.6.3. Temperatura media anual registrada en los sitios de estudio. Línea delgada datos del modelo ARIMA, línea gruesa modelo lineal. Manglar y Duna costera (MyD): Celestún (Cel) y San-Benito (SB), selva baja caducifolia (SBC): Mérida (Mer), selva mediana sub-caducifolia (SMSC): Akil (Aki), Tabi (Tab) y Oxkutzcab (Oxx), selva mediana sub-perennifolia (SMSP): Calakmul (Cal), Calakmul satélite (Cal.sat). * Datos originales.

Cuadro 2.6.3. Período de registro, media, pendiente y valor *d* de los cambios en la temperatura media anual de los diferentes sitios de estudio.

Vegetación	Duración registros	Media (°C)	Pendiente (°C/año)	Valor d
Manglar y matorral de duna costera (Celestún)	1951-2017	26.51 ± 0.30	-0.005	0
Manglar y matorral de duna costera (Progreso)	1921-2003	25.67 ± 0.01	0.014	1
Manglar y matorral de duna costera (Telchac)	1951-2017	26.27 ± 0.01	0.025	1
Selva baja caducifolia (Mérida)	1921-2017	26.09 ± 0.01	0.009	1
Selva mediana subcaducifolia (Akil)	1977-2017	25.98 ± 0.01	0.004	0
Selva mediana subcaducifolia (Oxkutzcab)	1977-2017	25.89 ± 0.01	-0.008	0
Selva mediana subcaducifolia (Tabi)	1977-2017	25.17 ± 0.01	0.01	0
Selva mediana subcaducifolia (Tekax)	1949-2008	26.34 ± 0.01	-0.03	1
Selva mediana subperennifolia (Calakmul)	1950-2016	24.04 ± 0.01	-0.03	1

2.6.4 promedio anual de temperatura mínima extrema mensual

Los sitios que presentaron una reducción en la temperatura mínima extrema fueron Progreso, Mérida y Tekax ($p = 1$), en todos los casos con un cambio negativo. Cabe destacar el gran aumento que observado en la temperatura mínima extrema de Akil y Tabi, ocurrido entre 1992 y 2005, no obstante, esto no logra modificar la tendencia negativa (figura 2.6.4).

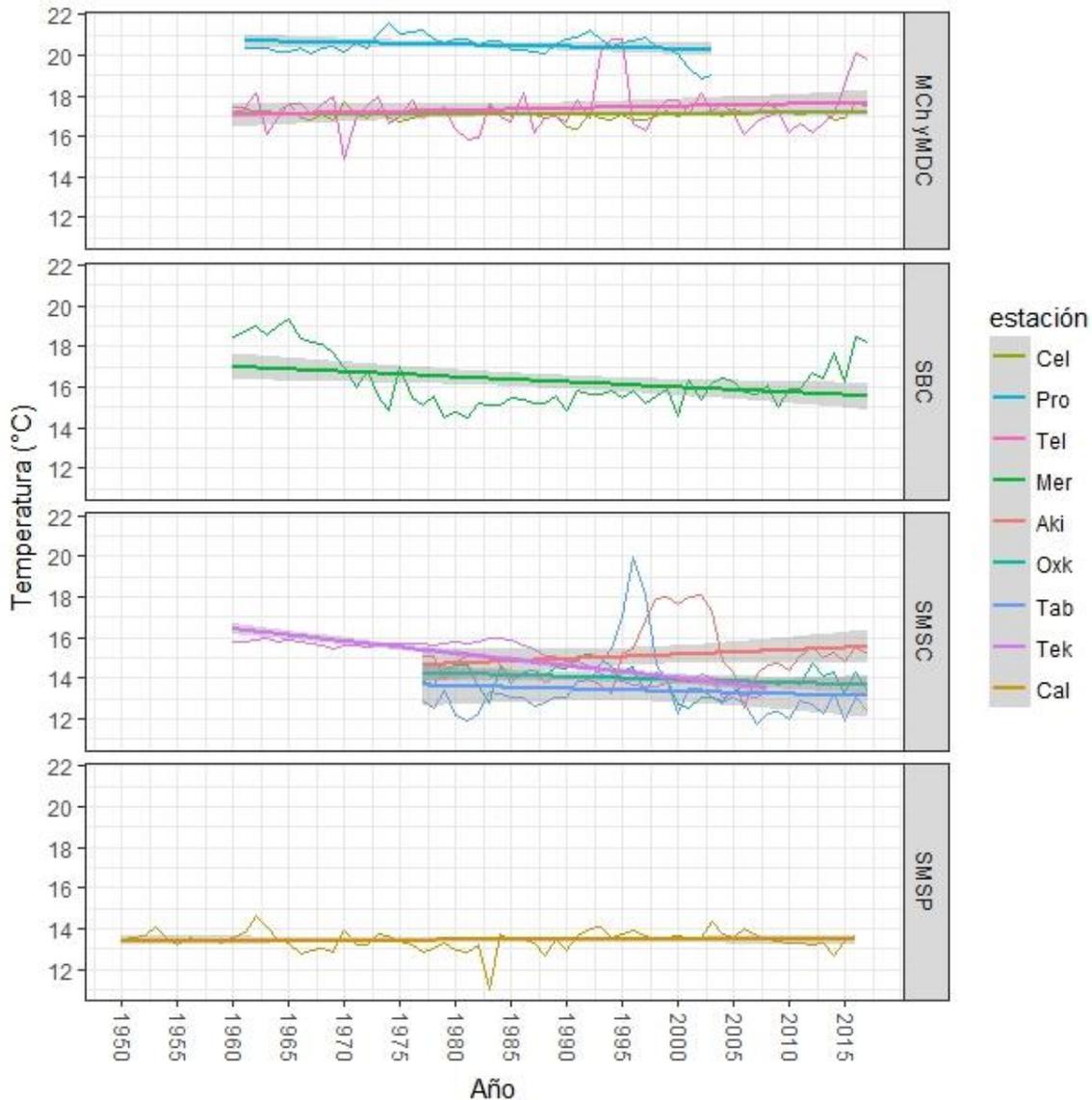


Figura 2.6.4. Promedio anual de la temperatura mínima extrema mensual registrada en los sitios de estudio. Línea delgada datos del modelo ARIMA, línea gruesa modelo lineal. Manglar y Matorral de duna costera (MyD): Celestún (Cel) y San-Benito (SB), selva baja

caducifolia (SBC): Mérida (Mer), selva mediana sub-caducifolia (SMSC): Akil (Aki), Tabi (Tab) y Oxkutzcab (Oxk), selva mediana sub-perennifolia (SMSP): Calakmul (Cal), Calakmul satélite (Cal.sat). *Datos originales.

Cuadro 2.6.4. Período de registro, media, pendiente y valor *d* de los cambios en la temperatura mínima extrema de los diferentes sitios de estudio.

Vegetación	Duración registros	Media (°C)	Pendiente (°C/año)	Valor d
Manglar y matorral de duna costera (Celestún)	1960-2017	17.11	0.00094	0
Manglar y matorral de duna costera (Progreso)	1961-2003	20.49	-0.010	1
Manglar y matorral de duna costera (Telchac)	1960-2017	17.35	0.010	0
Selva baja caducifolia (Mérida)	1960-2017	16.27	-0.025	1
Selva mediana subcaducifolia (Akil)	1977-2017	15.09	0.022	0
Selva mediana subcaducifolia (Oxkutzcab)	1977-2017	13.95	-0.015	0
Selva mediana subcaducifolia (Tabi)	1977-2017	13.37	-0.013	0
Selva mediana subcaducifolia (Tekax)	1960-2008	14.97	-0.060	1
Selva mediana subperennifolia (Calakmul)	1950-2016	13.42	0.0002	0

2.7 COMPARACIÓN DE CAMBIO OBSERVADO CON RCP 8.5

2.7.1 Precipitación

Contrario a lo esperado en el escenario RCP 8.5, para 2020, no todas las estaciones registran una modificación en la precipitación anual ($d = 1$). Ocurre únicamente en Progreso, Mérida y Calakmul, con un aumento en Mérida y Progreso, mientras se observa una reducción en Calakmul. En el resto de los sitios el análisis indica que no se han dado cambios en la precipitación ($d = 0$) (Cuadro 2.7.1).

Cuadro 2.7.1. Comparación entre proyecciones para precipitación de IPCC (2013) y datos de las estaciones.

sitio	Cambio esperado (mm) en escenario RCP 8.5 para 2020	Cambio observado 1980-2017 (mm)	Similitud (%)	Evaluación
D y M (Celestún)	-46.64	1.48	-3.17	Sin cambio
D y M (Progreso)	-40.694	34.96**	-85.91	Difiere
D y M (Telchac)	-42.784	-80.29	187.66	Coincide
SBC (Mérida)	-43.983	76.96**	-174.98	Difiere
SMSC (Tabi)	-44.414	42.92	-96.64	Difiere
SMSC (Oxkutzcab)	-50.743	-33.3	65.62	Coincide
SMSC (Akil)	-59.133	46.25	-78.21	Difiere
SMSC (Tekax)	-159.62	22.96	-14.38	Difiere
SMSP (Calakmul)	-63.955	-127.08**	198.70	Coincide

** $d = 1$

3.5.1 censos

Se trató de abarcar la mayor cantidad de comunidades vegetales de la Península de Yucatán. Se incluyeron comunidades de los tipos de vegetación más representativos de la región: matorral de duna costera (San-Benito, 21°19'21"N y 89°26'48"O), Manglar (Celestún, 20°59'47"N y 90°14'23"O), selva baja caducifolia (Dzibilchaltún, 21°5'33.72"N y 89°36'0.36"O), selva mediana sub-caducifolia (Kiuic, 20°7'N y 89°32O), así como selva mediana sub-perennifolia (Calakmul, 17°45'N y 89°15'O). Se representó el gradiente de precipitación ascendente de norte a sur. Los datos usados en la presente investigación provienen del proyecto "Bromeliáceas epifitas del mosaico vegetacional de la península de Yucatán como indicadores de los efectos del cambio climático"; en el cual se colectaron datos una vez al año durante diez años consecutivos: de 2009 a 2018 para todos los sitios excepto Calakmul, para el que se cuentan con datos a partir del 2010.

Se establecieron cuadrantes permanentes en los cinco sitios de estudio, para determinar su número en cada sitio, se consideró la riqueza de especies, extensión de cada sitio de estudio, tamaño y densidad de sus árboles, de forma que se obtuviera una muestra representativa del lugar, por lo que el número de cuadrantes varió en cada sitio, siendo mayor en los sitios con mayor riqueza de especies. Estimaciones de la curva de acumulación de especies indican que se alcanzó el 70 % de especies de los sitios a excepción de selva medianas subcaducifolia y selva mediana subperennifolia, en las cuales no se alcanzó la asíntota en epífitas ni en forofitos (Cach-Pérez *et al.*, 2013b). Se estableció un cuadrante en el matorral de duna costera, tres cuadrantes en manglar chaparro, 11 cuadrantes en la selva baja caducifolia, 13 en la selva mediana subcaducifolia y seis en la selva mediana subperennifolia.

En cada sitio los cuadrantes establecidos tuvieron una superficie de 10 x 10 m, en los que se etiquetó para su seguimiento todos los potenciales forofitos incluyendo árboles, arbustos, palmeras y cactáceas con DAPs mayores a 4 cm. En los sitios de manglar y matorral de duna costera, donde muchos forofitos tuvieron un DAP menor a 4 cm y una baja altura, todos los forofitos potenciales se incluyeron en la muestra y los diámetros fueron registrados antes de la primera ramificación (Cach-Pérez, 2013b). En las parcelas de manglar no se registró la altura de las epífitas debido a que los cambios en la marea dificultaban obtener este dato, y dada la dificultad para distinguir entre diferentes

individuos de forofitos y darles seguimientos, tampoco se registró la especie del forofito, sin embargo, estos estuvieron casi totalmente compuestos por *Rizophora mangle*.

Se contabilizó e identificó a todas las bromeliáceas epífitas de los cuadrantes, registrando especie de epífita, altura y especie del forofito en que se encuentran. Únicamente se analizó la población de individuos adultos de las especies más abundantes de cada sitio. Las especies con menos individuos, así como etapas juveniles de las bromeliáceas, fueron descartadas para el análisis en el presente trabajo, debido a que las poblaciones pequeñas pueden cambiar en gran medida por factores aleatorios, mientras que los individuos juveniles son difíciles de avistar e identificar su especie, sobre todo en los estratos más altos.

2.7.2 Temperatura máxima extrema

La temperatura máxima extrema tampoco se comportó como era esperado en las proyecciones. Registra un aumento al norte de la península (Celestún, Progreso, Mérida) excepto en Celestún, donde se reduce. En el centro (Akil, Oxkutzcab, Tabi, Tekax) únicamente en Akil registra un aumento y al sur (Calakmul) muestra una reducción (cuadro 2.7.2).

Cuadro 2.7.2. Comparación entre proyecciones para temperatura máxima extrema de IPCC (2013) y datos de las estaciones.

sitio	Cambio esperado (°C) en escenario RCP 8.5 para 2020	Cambio observado 1980-2017 (°C)	Similitud (%)	Evaluación
D y M (Celestún)	1.124	-0.74**	-65.84	Difiere
D y M (Progreso)	1.165	0.92**	78.97	Coincide
D y M (Telchac)	1.081	0.518	47.92	Coincide
SBC (Mérida)	1.26	2.035**	161.51	Coincide
SMSC (Tabi)	1.407	0.0259**	1.84	Sin cambio
SMSC (Oxkutzcab)	1.556	-0.037	-2.38	Sin cambio
SMSC (Akil)	1.463	2.368	161.86	Coincide
SMSC (Tekax)	1.667	0.28	16.80	Sin cambio
SMSP (Calkmul)	1.387	-1.44**	-103.82	Difiere

** $d = 1$

2.7.3 Temperatura media

El cambio en la temperatura media, contrario a lo esperado, no fue un aumento uniforme a lo largo de la península de Yucatán. En los sitios del norte de la península, excepto Celestún, (Mérida, Telchac y Progreso) los registros de las estaciones coinciden con las proyecciones. En el centro (Tabi, Oxkutzcab, Akil, Tekax) únicamente Akil y Tabi muestran un aumento de temperatura media, y al sur (Calakmul) se registra un descenso de temperatura (cuadro 2.7.3).

Cuadro 2.7.3. Comparación entre proyecciones para temperatura media de IPCC (2013) y datos de las estaciones.

sitio	Cambio esperado (mm) en escenario RCP 8.5 para 2020	Cambio observado 1980-2017 (°C)	Similitud (%)	Evaluación
D y M (Celestún)	1.062	-0.185	-17.42	Difiere
D y M (Progreso)	1.005	0.322	32.04**	Coincide
D y M (Telchac)	1	0.925	92.50**	Coincide
SBC (Mérida)	1.046	0.333	31.84**	Coincide
SMSC (Tabi)	1.088	0.148	13.60	Coincide
SMSC (Oxkutzcab)	1.123	-0.296	-26.36	Difiere
SMSC (Akil)	1.115	0.37	33.18	Coincide
SMSC (Tekax)	1.287	-0.84	-65.27**	Difiere
SMSP (Calkmul)	1.207	-1.08	-89.48**	Difiere

** $d = 1$

2.7.4 Temperatura mínima extrema

Todos los sitios a excepción de Telchac y Tabi, muestran una reducción en la temperatura mínima extrema, contrario a lo esperado en el escenario RCP 8.5, o no muestran cambios (cuadro 2.7.4).

Cuadro 2.7.4. Comparación entre proyecciones para temperatura mínima de IPCC (2013) y datos de las estaciones.

sitio	Cambio esperado (mm) en escenario RCP 8.5 para 2020	Cambio observado 1980-2017 (°C)	Similitud (%)	Evaluación
D y M (Celestún)	0.868	0.03478	4.01	Sin cambio
D y M (Progreso)	0.935	-0.23**	-24.60	Difiere
D y M (Telchac)	0.919	0.37	40.26	Coincide
SBC (Mérida)	0.946	-0.925**	-97.78	Difiere
SMSC (Tabi)	1.025	0.814	79.41	Coincide
SMSC (Oxkutzcab)	1.005	-0.555	-55.22	Difiere
SMSC (Akil)	1.109	-0.481	-43.37	Difiere
SMSC (Tekax)	1.016	-1.68**	-165.35	Difiere
SMSP (Calkmul)	1.26	0.007	0.57	Sin cambio

** $d = 1$

2.8 DISCUSIÓN

Debe considerarse que las proyecciones de IPCC (2013) sobre la precipitación en Centro América arrojan gran incertidumbre con una pequeña pendiente y gran varianza. Lo cual coincide con los resultados aquí mostrados. A falta de un cambio consistente y similar en todos los sitios igualmente puede corresponder con lo previsto por Orellana *et al.* (2009). Estos autores mostraron que bajo el escenario de cambio climático con mayor concentración de gases de efecto invernadero (A1FI), gran parte de la península no presentará cambios en precipitación, correspondientes a las selvas mediana subcaducifolia y mediana subperennifolia del oeste y centro de la península, en cambio las

lluvias se reducirán al este de la península (Orellana *et al.*, 2009) (figura 2.8.1), zona que no se analizó en este trabajo.

Con respecto al análisis de temperaturas, las diferencias entre las tendencias de los distintos sitios de estudio muestran que es poco claro cuáles han sido los efectos del incremento de concentración atmosférica de gases de efecto invernadero para la región, ya que se proyectaba un aumento uniforme de temperatura a lo largo de la península. Así mismo, se encontró una respuesta distinta entre las regiones de la península de Yucatán. En el presente trabajo se encontró que existe un aumento de temperatura media al norte de la península mientras al sur se reduce, lo cual no apoya la hipótesis de que el cambio climático ejercerá su efecto de forma similar en toda la península. En cambio, estas diferencias entre las variables registradas por las estaciones apuntan a que las tendencias en las variables del clima difieren dependiendo de la ubicación en la península de Yucatán, debido a que el clima es regulado por diversos fenómenos. Estas diferencias ya han sido reportadas previamente, en un estudio más amplio realizado por Márdero *et al.* (2012), quienes usan las observaciones de varias estaciones meteorológicas ubicadas en distintas regiones de la Península de Yucatán; observando el comportamiento de la precipitación total anual y estacional a lo largo del tiempo. Concluyen que existe un aumento en la frecuencia de sequías a lo largo de la península, sin existir sincronía en los años con sequías extremas entre las zonas estudiadas, lo cual apoya que el clima a lo largo de la península se ve regulado por factores que son independientes entre sí o se ven afectados de forma distinta por el cambio climático.

El análisis de la precipitación se realizó de forma diferente en este trabajo que en el de Márdero *et al.* (2012), quienes miden las anomalías respecto a los valores promedio de 1965 a 2000, lo que puede explicar los diferentes resultados obtenidos. En la presente se evaluó la precipitación total anual; adicional a que Márdero *et al.* (2012) analiza un mayor número de estaciones logrando mejor representación de los distintos climas de la región, si bien, en un período de tiempo más corto, ya que, la estación con la serie de tiempo más larga que analizan inicia en 1953.

Todas las proyecciones acerca de temperatura media indican un aumento, tanto en escenarios RCP (IPCC, 2013) como en SRES (Special Report on Emissions Scenarios) (IPCC, 2001) con reducción de escala para la península de Yucatán (Orellana *et al.* 2009), en el escenario de mayor concentración de gases de efecto invernadero. Mediciones a

nivel global de temperatura media muestran un aumento de casi un grado Celsius en zonas tropicales respecto al modelo 1951-1980 (NASA, GISS, 2018), mientras Orellana *et al.* (2009) también indican un aumento cercano a un grado Celsius, pasando de 26.5 a 27.75 cerca del golfo de México y de 25.75 a 26.5 cerca del mar Caribe. Este es un cambio pequeño si se compara con la variabilidad anual de la temperatura de la región y los efectos que ha tenido la deforestación en el microclima (Duarte *et al.*, 2015). Por lo que es probable que factores que afectan el clima a microescala y mesoescala impidan ver este aumento.

La vegetación puede ser causante de este ruido dada su importancia en la regulación del clima local, ya que al retener y transpirar agua, y absorber la energía solar estabiliza la temperatura. Es bien conocido el efecto que tienen los árboles en el microclima urbano reduciendo la temperatura interceptando la radiación solar y disipando energía mediante la transpiración (Drake *et al.*, 2018) y al retener agua en sus tejidos tienen una gran capacidad para almacenar calor, que liberan como luz infrarroja lo cual aumenta la temperatura en ausencia de luz solar (Porter *et al.*, 2002). Esto podría dar una explicación al cambio repentino hacia temperaturas más extremas en la selva baja caducifolia, cuyo clima se analizó con datos tomados dentro de la ciudad de Mérida. Para descartar que las temperaturas cada vez más extremas se deban a la reducción de la cobertura arbórea de la ciudad de Mérida, es necesario analizar el clima de más sitios cercanos o de estaciones que se han mantenido cercanas a sitios con cobertura arbórea, sin embargo, dichas estaciones no cuentan con datos cercanos a la fecha donde ocurre el cambio en las temperaturas.

De igual manera debe tomarse en consideración que existe cierto grado de error en los modelos de cambio climático. Rahmstorf *et al.*, (2007) compararon las proyecciones de IPCC (2001) para distintas variables del clima, encontrando que los datos no se ajustaban a los modelos, siendo el aumento de las temperaturas y nivel del mar registrados mayor al esperado, a pesar de que las estimaciones de aumento de concentración de CO₂ fueron muy precisas; lo cual es atribuido a la participación de otros factores adicionales al CO₂ y errores en el modelo. Esta imprecisión aumenta cuando los modelos de circulación general usados por IPCC son usados en escala más pequeña (Timm y Diaz, 2009). Los resultados aquí obtenidos muestran las limitaciones de los modelos de circulación general para predecir los efectos del aumento de gases de efecto invernadero a nivel

mesoclimático y recalcan la importancia de contar con un enfoque más regional para visualizar las probables características del clima en el futuro.

Contemplar la auto-correlación temporal de los datos es un procedimiento poco frecuente en el análisis del clima, sin embargo, se consideró necesario observando este factor en los residuos de los datos, lo que pudo llevar a este análisis a conclusiones diferentes a estudios previos. No obstante, esto puede ayudar a distinguir el incremento gradual de la temperatura debido al incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero, de las oscilaciones a mediano o largo plazo de las variables climáticas.

Gran parte de los registros parecen confirmar las proyecciones para la precipitación de la región de Orellana *et al.* (2009), hechas con base al escenario A1FI de IPCC (2001) (figura 2.8.1), en las cuales no se esperaban cambios en los puntos analizados en este trabajo, no obstante, se requiere ampliar el análisis a toda la península para obtener resultados más conclusivos y considerar que se registran aumentos de precipitación en Mérida, Progreso y Calakmul. Por otra parte, la temperatura no se comportó como estimaron estos autores o IPCC (2013), es decir, un aumento muy uniforme en toda la península (figura 2.8.1), lo cual apoya una perspectiva de un cambio heterogéneo e incierto en el clima futuro de la región.

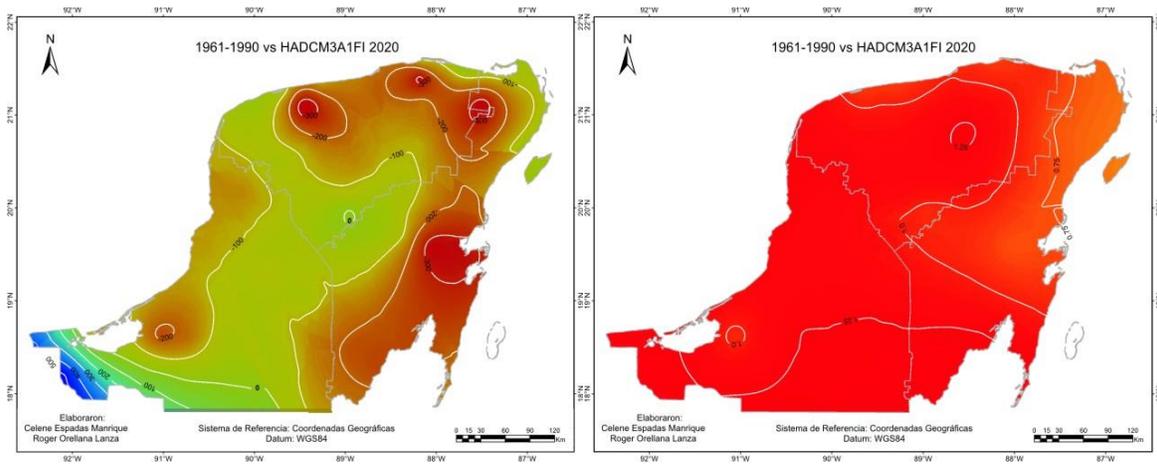


Figura 2.8.1. Mapas de los cambios proyectados en el clima para 2020 en el escenario A1FI para precipitación y temperatura. Tomado de (Orellana *et al.*, 2009).

A pesar de que en las variables climáticas estudiadas no se dieran cambios que indicaran concluyentemente la existencia de cambios en las condiciones promedio de la temperatura y la precipitación, es posible que otras variables se hayan visto modificadas, como la intensidad o frecuencia de las lluvias, sequías y observaciones climáticas extremas (Anandhi *et al.*, 2008).

CAPÍTULO III

EVALUACIÓN DE LAS BROMELIÁCEAS EPÍFITAS (BROMELIACEAE) COMO BIOINDICADORES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN SELVAS TROPICALES

3.1 INTRODUCCIÓN

A pesar de que el cambio climático ha sido un fenómeno ampliamente estudiado su efecto en los ecosistemas de la Península de Yucatán es incierto y existen pocos estudios hechos al respecto. Es de gran importancia conocer estos posibles cambios del clima, ya que, la vegetación juega un papel muy importante para el bienestar y las actividades humanas. En este trabajo se propone el uso de Bromeliáceas con hábito epífita como bioindicadores climáticos. Estas plantas al ser pequeñas y carecer de un sistema radical en contacto con el suelo, son muy sensibles a los cambios climáticos, esperándose una respuesta más rápida de estas plantas a cambios en el clima, a diferencia de las plantas que establecen raíces funcionales (Cach-Pérez, 2013), por lo cual son particularmente interesantes para estudiar los efectos de los cambios en el régimen climático en la vegetación. Se espera que los cambios del clima se vean reflejados en las características de sus poblaciones en poco tiempo.

3.1.1 Efecto del tipo de vegetación en abundancia y composición de especies de bromeliáceas epífitas

El mesoclima y clima local parecen ser los factores de mayor influencia en la presencia de especies epífitas, sin embargo, existen ciertos elementos que pueden influir en la calidad de los hospederos así como una gran selectividad de las epífitas a ciertas especies arbóreas la comunidad vegetal (Chilpa-Galván, 2015).

Flores-Palacios y García-Franco (2006) encontraron que la altura y edad del árbol tienen una correlación positiva con la riqueza de epífitas que hospeda, debido a la mayor cantidad de condiciones microambientales que genera conforme el árbol aumenta su altura, y al mayor tiempo que permaneció el árbol acumulando epífitas, mientras el factor más limitante fue la saturación de epífitas en el árbol. Cardelús *et al.* (2005) encontraron una mayor diversidad de epífitas en altura media dado el solapamiento de microclimas. El árbol proporciona sombra reduciendo la temperatura y el déficit de presión de vapor,

favoreciendo a las epífitas (Chilpa-Galván, 2013), sin embargo, limita la luz que necesitan para generar biomasa y el agua, ya que las hojas del árbol evitan en parte que la precipitación alcance las epífitas (Andrade, 2003). El grado de afectación dependerá de las adaptaciones de la epífita a su medio, factor que juega un papel importante en la estratificación de especies de epífitas (Reyes-García *et al.*, 2012).

Otro factor que influye en la abundancia de las bromeliáceas en los árboles es la corteza de estos (Sáyago *et al.*, 2013). Chilpa-Galván (2015) asocia las propiedades de la corteza con su capacidad de retención de agua y por lo tanto con la germinación de semillas, este autor encontró mayor importancia en las condiciones microclimáticas y las características de la semilla que en las características de la corteza sobre la germinación. Por su parte Reyes-García *et al.* (2008) igualmente encontraron que las características del microambiente tienen mayor importancia que las de las características de la corteza.

La senescencia de las ramas es un factor de gran importancia que determina la estabilidad del sustrato de las epífitas. Se ha encontrado que las especies de árboles con menor mortalidad de ramas presentan mayores números de plantas epífitas, ya que permanecen más tiempo acumulando estas plantas, no obstante, existen especies de árboles con ramas muy estables y pocas epífitas por lo que se cree que otros factores intervienen en esta abundancia (Cortes-Anzures *et al.*, 2017). En la selva baja caducifolia de la península de Yucatán se ha reportado que la mayor parte de las bromeliáceas que se establecen en ramas delgadas caen del forofito (el árbol que hospeda a las epífitas) antes de llegar a la etapa adulta, por lo que la mayor parte de individuos adultos se encuentran en las ramas más gruesas (Mondragón *et al.*, 2004). Sobre la importancia de la superficie del árbol y su edad en su número de epífitas, Bennett (1986) no encontró una correlación entre el diámetro a la altura de pecho (DAP) y número de epífitas en árboles, en cambio encontró una correlación entre el número de ramas verticales y el número de epífitas, lo que puede indicar que el área de superficie y la arquitectura del árbol son igualmente un factor importante.

3.1.2 Dinámica poblacional de las tillandsias

Existe una gran tasa de mortalidad en especies de bromeliáceas epífitas, en especial en individuos jóvenes, solo una mínima parte de los nuevos reclutamientos llegan a la etapa adulta. Como ya se mencionó, en gran parte debido a la inestabilidad de las ramas que en que se encuentran (Mondragón *et al.*, 2004a). En cuanto al clima, los individuos juveniles

de *T. brachycaulos* tienen una supervivencia apreciable únicamente en los años más húmedos, mientras sus poblaciones se reducen rápidamente en los años secos (Mondragón *et al.*, 2004b). Otros estudios igualmente han encontrado una elevada tasa de germinación en las bromeliáceas (Chilpa-Galván *et al.*, 2018) pero de igual manera una gran mortalidad en esta etapa, con solo una pequeña proporción que logra alcanzar la etapa adulta (Chilpa-Galván *et al.*, 2017).

3.1.3 Estratificación microambiental en el dosel

La vegetación posee un gradiente microambiental que va desde la copa de los árboles hasta el suelo, esto ocurre aún en la vegetación de escasa altura (Shaw, 2004); existiendo dentro de un mismo ecosistema diversos microhábitats para las plantas epífitas (Krömer *et al.*, 2006).

Se ha reportado que los estratos más bajos del dosel son los que poseen menor déficit de presión de vapor debido a las temperaturas más bajas; no obstante, las especies que se encuentran en este estrato ven limitada su productividad debido a la escasa cantidad de luz y precipitación que reciben; en contraste, los estratos superiores son los que reciben más energía luminosa y agua mediante precipitación, sin embargo, presentan elevados déficits de presión de vapor, temperaturas más extremas y excesiva luz (Wagner *et al.*, 2013).

No obstante, en las selvas baja caducifolia y mediana subcaducifolia de la península de Yucatán, no se encontraron diferencias en el déficit de presión de vapor entre distintos estratos de la vegetación (Chilpa-Galván, 2011). A pesar de esto se reporta una estratificación diferenciada en distintas especies de *Tillandsia* en la selva baja caducifolia. *Tillandsia brachycaulos* que se encuentra en estratos bajos, donde cuenta con mayor protección a la radiación solar (Graham y Andrade, 2004), es menos tolerante a la pérdida de agua en sus tejidos, mientras *Tillandsia elongata*, que habita en estratos altos puede tolerar mayor deshidratación sin reducir su actividad fotosintética (Andrade, 2003). Entonces esta estratificación se le atribuye a la tolerancia al estrés causado por la luz y al incremento de agua disponible debido a formación de rocío (Andrade, 2003; Graham y Andrade, 2004) o neblina (Reyes-García *et al.*, 2012) en el estrato más expuesto.

3.1.4 Diferencia en el microambiente debida a características de la especie de hospedero y estacionalidad

Las características del microambiente que producen los árboles dependen en gran medida de las características de las hojas, cómo la luz que dejan pasar, el agua que transpiran y el tiempo que permanecen en el árbol durante el año. Se ha encontrado que las hojas compuestas, al permitir el paso de la luz favorecen la presencia de bromeliáceas en los estratos medios (Reyes-García *et al.*, 2008). Las investigaciones hechas en la selva baja caducifolia de Yucatán respecto al gradiente microambiental del dosel, muestran que este se ve influido en gran medida por la estacionalidad anual de la región, dada por la precipitación, que regula la presencia de hojas en el dosel y en consecuencia sus microambientes. Las diferencias en el flujo de fotones en especies arbóreas de diferentes características varían entre la estación seca y húmeda, existiendo diferencias en el dosel de las diferentes especies arbóreas durante la estación húmeda, mientras en la seca estas son menos evidentes (Chilpa-Galván, 2011).

3.1.5 Especies de bromeliáceas epífitas presentes en la península de Yucatán

En la península de Yucatán se han registrado relativamente pocas especies de bromeliáceas epífitas, acorde con lo mencionado en la literatura al tratarse de un ambiente seco comparado con las selvas húmedas neotropicales, donde se reporta la mayor diversidad de especies de plantas epífitas (Granados-Sánchez *et al.*, 2004).

En el presente estudio se midió el comportamiento de las poblaciones de bromeliáceas epífitas en la península de Yucatán relacionado a las fluctuaciones climáticas anuales, para lograr obtener de forma anticipada una imagen de los efectos del cambio climático sobre la vegetación arbórea. Se analizaron los cambios del número de individuos de poblaciones de bromeliáceas epífitas en diversas comunidades vegetales ubicadas en un amplio rango de condiciones climáticas dentro de la península de Yucatán, en respuesta a las características climáticas anuales, a lo largo de diez años. Lo que ayudará a conocer la respuesta de las poblaciones de bromeliáceas, en su número de individuos, a un amplio rango de condiciones climáticas, permitiendo observar su respuesta en distintos ecosistemas distintas condiciones climáticas. Se asume que en la Península de Yucatán el clima se tornará más cálido y seco, por lo tanto, más estresante para la bromeliáceas epífitas lo que llevará a menores tasas de crecimiento y reproducción, reduciendo su número de individuos en sus poblaciones, no obstante, se puede encontrar una gran

diversidad de estrategias de supervivencia en las bromeliáceas epífitas, así como diferentes características de los ecosistemas en los que se encuentran, y por lo tanto distintas respuestas de sus poblaciones a las condiciones atmosféricas futuras.

Se procesaron bases de datos de la abundancia de bromeliáceas epífitas dentro de parcelas permanentes en diversas comunidades vegetales de la Península de Yucatán de 2009 a 2018, así como su altura, estadio de desarrollo y especie de árbol hospedero. En la obtención de los datos climáticos se contó con los registros de las estaciones climáticas de CONAGUA más cercanas a las parcelas durante los años correspondientes a cada censo con lo cual se obtuvo una imagen de la forma en que el clima ha afectado al número de individuos de las poblaciones de las especies de bromeliáceas epífitas de la Península de Yucatán.

3.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

2.1- ¿Se ha dado un cambio sostenido en el número de individuos de las poblaciones de bromeliáceas epífitas a lo largo del tiempo del estudio?

2.2- ¿Cómo responden las bromeliáceas epífitas a las fluctuaciones climáticas anuales?

2.3- ¿Influyen las diferencias en las condiciones microambientales causadas por las características de los estratos del dosel y especies de árboles hospederos en la respuesta de las bromeliáceas epífitas al clima?

3.3 HIPÓTESIS

2.1- Si el cambio climático se manifiesta en la península de Yucatán como aumento en la temperatura y reducción de la precipitación, se espera que las poblaciones de bromeliáceas epífitas de la Península hayan visto reducido sus números de individuos en respuesta a estas condiciones climáticas adversas del 2009-2017.

2.2- Dada la sensibilidad de las bromeliáceas epífitas al clima, se espera que muestren un aumento en su población en los años con mayor humedad y menor temperatura, mientras que en los años secos y cálidos se produzca una reducción en sus poblaciones.

2.3- Los efectos de las variaciones climáticas en las poblaciones de bromeliáceas epífitas difieren entre distintos estratos del dosel debido a las variaciones que existen en el

microclima entre estos. Se espera que, en los estratos altos y por lo tanto más expuestos, las poblaciones de bromeliáceas epífitas presenten las mayores variaciones de número de individuos en respuesta a las variaciones del clima anual.

3.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1- Cuantificar el cambio anual de las poblaciones de bromeliáceas epífitas en distintos ecosistemas de la Península de Yucatán de 2009 a 2018.

2-Establecer la respuesta del índice poblacional de las bromeliáceas epífitas las fluctuaciones climáticas anuales en:

- monto total de lluvia durante la estación lluviosa.
- monto total de la lluvia en la estación seca.
- temperatura máxima extrema mensual promedio a lo largo de todo el año.

3-Comparar la respuesta al clima de las bromeliáceas epífitas en distintos estratos del dosel y especies de árboles hospederos.

3.5 MATERIALES Y MÉTODOS

3.5.1 Datos climáticos

Se analizaron las características de las variables climáticas anuales, relacionadas con el estrés hídrico, para relacionarlas con el comportamiento de las poblaciones de epífitas.

Los datos climáticos se obtuvieron de los registros de diversas estaciones meteorológicas ubicadas lo más cerca posible de los sitios de estudio y con los registros más extensos y completos disponibles, los datos usados para el análisis de la selva mediana sub-perennifolia se obtuvieron de observaciones satelitales (cuadro 3.1), dado que las estaciones disponibles en esta zona se encontraban a gran distancia del sitio de estudio, en zonas deforestadas o cercanas a cuerpos de agua, lo que puede llevar a grandes diferencias en las características del clima de las parcelas con el registrado por la estación. Por último debe mencionarse que para facilitar el análisis se transformó la precipitación, de milímetros a metros.

Cuadro 3.1. Estaciones climáticas analizadas.

Estación	Sitio de censo	Vegetación
Telchac	San Benito	MDC
Celestún	Celestún	MCh
CICY	Dzibilchaltún	SBC
Tabi	Reserva Kaxil-Kiuic	SMSC
Akil	Akil	SMSC
Oxkutzcab	Oxkutzcab	SMSC
Observaciones satelitales	Reserva de la biosfera de Calakmul	SMSP

SMSP=selva mediana sub-perennifolia, SMSC=Selva mediana sub-caducifolia, SBC=selva baja caducifolia, MDC=Matorral de duna costera, MCh=Manglar chaparro.

3.5.2 Consideraciones previas al análisis de datos

Con los datos obtenidos se realizó el análisis de la relación de número de individuos y características del clima anual. Se asumió que los efectos del clima en las epífitas no tendrán un efecto inmediato en sus poblaciones, sino que estos efectos serán observados al año siguiente, por lo que los datos del clima corresponden a los del año anterior al censo, a excepción de Celestún y San-Benito, donde los censos se realizan en octubre o noviembre, por lo cual se consideró que el comportamiento del clima del mismo año del censo ya había ejercido su efecto en las bromeliáceas. Los datos de las bromelias fueron colectados para Dzibilchaltún en enero o febrero a lo largo del estudio, en Kiuic se colectaron en febrero y en Calakmul de abril a mayo.

En San-Benito y Celestún las únicas variables en el modelo fueron las características del clima, ya que en estos sitios la vegetación es compacta, homogénea y de baja altura. En Celestún se incluyó a los cuadrantes como factor aleatorio.

Tanto en Dzibilchaltún (selva baja caducifolia) como en Kiuic (selva mediana subcaducifolia), únicamente se contabilizó la especie *Tillandsia brachycaulos*, con el cuadrante y especie de forofito como factores aleatorios. Las demás especies fueron descartadas al contar con números poblacionales bajos. La estratificación no se logró incluir en los modelos para Dzibilchaltún debido a la escasa altura de los árboles que dificultó definir los estratos, ni para Kiuic, debido al pequeño número de individuos establecidos en los estratos más altos. En Calakmul los factores aleatorios fueron la especie de epífita y el estrato. La estratificación se realizó con base en la altura del árbol en el que las epífitas se encontraron, utilizando la escala semicuantitativa de estratificación de Johansson (1974) citado por Sanger y Kirkpatrick (2017), que divide el tronco y copa en tres estratos.

Se buscó reducir cambios desproporcionados en el índice poblacional debida a muertes y reclutamientos en pequeñas poblaciones. Por ejemplo, el reclutamiento de una epífita en un árbol que solo tuviera una llevaría a un aumento del 100% de la población. Por lo cual se eliminó del análisis a todos los árboles con menos de cuatro bromeliáceas epífitas. Este análisis igualmente tuvo el propósito de reducir la variabilidad del microambiente en el que habitan las bromeliáceas, inherente a las características de las diferentes especies de árboles (Chilpa-Galván et al. 2013). Debido a esto se realizó un análisis de regresión lineal entre el área de cobertura (m^2) y presencia de bromeliáceas epífitas de todas las especies de árboles registradas en los cuadrantes. De esta forma se seleccionó a las especies de árboles que tuvieran la mayor cantidad de bromeliáceas, reduciendo en número de especies analizadas y por lo tanto la variación microambiental atribuible a la especie de árbol.

Para definir los meses que abarca la estación seca y lluviosa, se realizó un análisis de componentes principales en la precipitación total mensual en las estaciones más cercanas al sitio de los censos. Se analizó el comportamiento de la precipitación de cada mes a lo largo de todos los años de los registros, de forma que se lograra visualizar la similitud entre los meses (apéndice 3).

En la selva mediana subperennifolia, con una vegetación muy alta y densa, se consideró que existe un sesgo considerable al contabilizar las bromeliáceas epífitas debido a que la cantidad de hojas en los árboles ha variado en los distintos años de estudio y por lo tanto la probabilidad de observar una Bromeliácea. Debido a esto se analizó la forma en que la

precipitación y en consecuencia la cantidad de hojas influye en el número de bromeliáceas contabilizadas (apéndices 4 y 5). Con base a lo cual se decidió descartar el estrato más alto del dosel para su análisis.

3.5.3 Modelación

Para estimar los cambios en las poblaciones de bromeliáceas se estimó su índice poblacional (No. Individuos/ No. Individuos año anterior) siendo este la medida en la que cambian la cantidad de individuos adultos en las poblaciones: si el índice poblacional se mantiene en uno indica estabilidad mientras menos de uno indica reducción en la población y mayor a uno aumento.

Dadas las características del conjunto de observaciones, que presentaron una varianza muy heterogénea, así como distintos factores que podrían influir en la respuesta de las bromeliáceas al clima, se recurrió a un modelo lineal mixto con mínimos cuadrados ponderados para estimar la respuesta del índice poblacional con las variables del clima. Lo cual se realizó utilizando el programa "R" (R core team, 2017). Debido a las diferentes características de cada sitio se modeló de forma individual cada uno de ellos, con diferentes variables aleatorias. Los mínimos cuadrados ponderados son usados en datos que no cumplen con el supuesto de homocedasticidad (igualdad de la varianza) lo que puede llevar a una modelación inapropiada (Asuero y Gonzales, 2007). En datos con esta característica el modelo se ajusta mejor a los datos con el uso de mínimos cuadrados ponderados (Almeida *et al.*, 2002). En este caso se asigna menos peso a los datos que presentan más varianza y mayor a los datos que presentan menor dispersión (Asuero y Gonzales, 2007). En el caso del presente proyecto cada punto representa, por ejemplo, el cambio en la población por especie de forofito por cuadrante, y estos datos pueden tener mayor o menor dispersión según el año. Una forma de conocer que tan efectivo fue la ponderación de los mínimos cuadrados es observando si el modelo obtenido a partir de estos se ajusta mejor a los datos, es decir: un estrecho margen de error relativo (Asuero y Gonzales, 2007). Las variables usadas para modelar el efecto de las variables climáticas sobre el índice poblacional de las bromeliáceas epífitas se muestran en el cuadro 3.5.4. Únicamente se modeló la diferencia de las pendientes obviando el intercepto, por lo que la varianza explicada reportada únicamente corresponde a las pendientes de los modelos.

Cuadro 3.5.4. Modelación de los sitios de estudio.

Sitio	Factor dependiente	Factor fijo	Factor aleatorio 1	Factor aleatorio 2
Matorral de duna costera	Índice poblacional	Variable climática	Especie de bromeliácea	-
Manglar chaparro	Índice poblacional	Variable climática	Especie de bromeliácea	Cuadrante
Selva baja caducifolia	Índice poblacional	Variable climática	Especie de forofito	Cuadrante
Selva mediana subcaducifolia	Índice poblacional	Variable climática	Especie de forofito	-
Selva mediana subperennifolia	Índice poblacional	Variable climática	Especie de bromeliácea	Estrato del dosel

De igual manera, se realizó un análisis del cambio en las poblaciones con las observaciones en orden cronológico, de forma que se logren visualizar cambios a lo largo del tiempo. En este caso se sustituye el índice poblacional por número de individuos. Únicamente se modeló en número de bromelias como factor dependiente y tiempo como independiente. La significancia de estos cambios se estableció con el valor de p del modelo lineal de los datos. Para visualizar el efecto del clima en las bromeliáceas se añadió la gráfica de temperatura máxima extrema y precipitación debajo de la gráfica den número de bromeliáceas.

3.6 RESULTADOS

La respuesta de las bromeliáceas epífitas al estrés hídrico presentó una respuesta contrastante entre los sitios, a pesar de que los modelos no se ajustaron a los datos de forma satisfactoria, observándose pequeños valores de R^2 (< 0.1). A pesar de esto se

encontró una respuesta de las bromeliáceas al estrés hídrico en las selvas baja caducifolia y mediana subcaducifolia, donde las poblaciones de bromeliáceas respondieron como se esperaba en las hipótesis: una reducción del número de individuos ante condiciones climáticas causantes de estrés hídrico, mientras en la selva mediana subperennifolia su comportamiento fue un aumento ante condiciones potencialmente causantes de estrés hídrico. Mientras en el matorral de duna costera y manglar chaparro la respuesta de las bromeliáceas al clima no fue clara.

3.6.1 Especies de bromeliáceas epífitas más abundantes en los sitios de estudio

Las especies de bromeliáceas epífitas más abundantes en el matorral de duna costera fueron: *Tillandsia balbisiana* Schult. f., *Tillandsia dasyliriifolia* Baker, *Tillandsia utriculata* (L.) y *Tillandsia yucatanana* Baker. Sin embargo, *T. utriculata* presentó años con población muy baja y nula, por lo que se descartó su análisis. En el manglar chaparro las especies más abundantes fueron *T. dasyliriifolia* y *T. yucatanana*. En la selva baja caducifolia como en la mediana subcaducifolia la especie más abundante fue *Tillandsia brachycaulos* Schlttdl., con escasa presencia de otras especies. Por último, la selva mediana subperennifolia fue el ecosistema que presentó mayor densidad y diversidad de especies, las más abundantes fueron *T. fasciculata*, *T. juncea*, *T. schiedeana* y *T. brachycaulos* (figura 3.6.1).

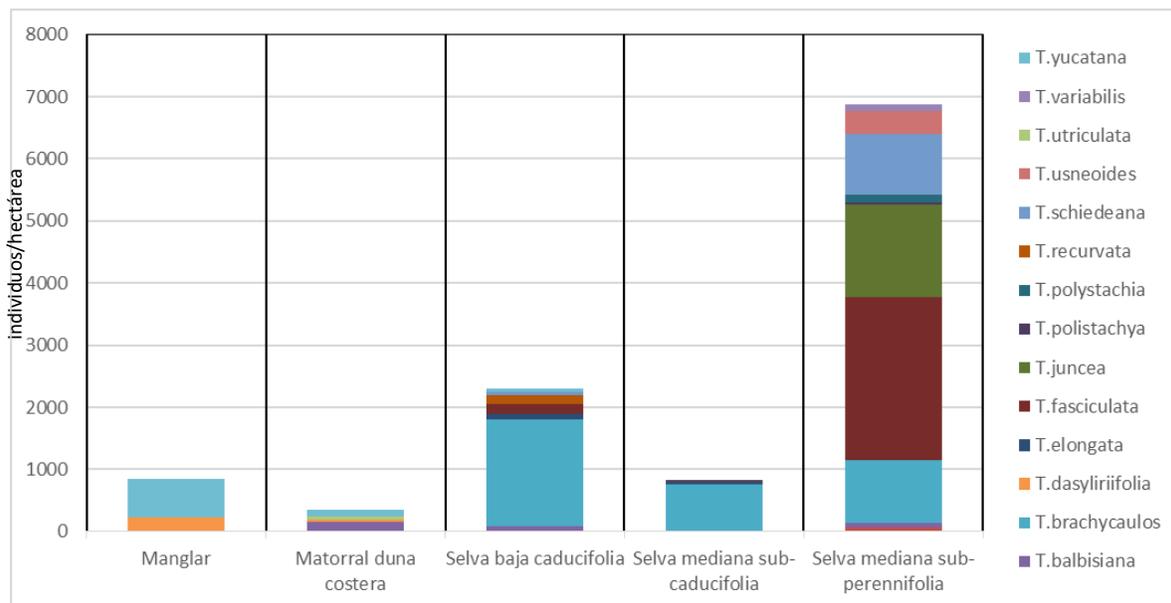


Figura 3.6.1. Total del número de observaciones de bromeliáceas epífitas del género *Tillandsia* por especie (individuos/hectárea) en los sitios de estudio, entre 2009 y 2018.

3.6.2. Relación entre área de cobertura las especies arbóreas y número de bromeliáceas epífitas que hospedan

En ninguna de las selvas se encontró una correlación entre área de cobertura disponible en las especies de hospederos y el número de bromeliáceas hospedadas (pendiente (m) = 2.9, $P = 0.174$; $m = 0.93$, $P = 0.203$ y $m = 0.77$, $P = 0.061$ para Calakmul, Kiuic y Dzibilchaltún respectivamente). Las especies arbóreas con mayor número de bromeliáceas en Calakmul fueron *Melicoccus oliviformis* Kunth, *Brosimum alicastrum* Sw., *Drypetes lateriflora* (Swartz), y *Platymiscium yucatanum* Standl. En Kiuic las especies que hospedaron mayor número de bromeliáceas fueron *Thouinia paucidentata* Radlk., *Diospyros anisandra* Blake, *Caesalpinia mollis* (Kunth), *Luehea candida* (Moc. & Sessé ex DC.). En Dzibilchaltún, fueron *Phyllostylon brasiliense* (Capan. ex Benth. & Hook. f.), *Malpighia glabra* L., *Pithecellobium dulce* (Roxb.) y *Gymnopodium floribundum* Rolfe. (apéndice 6).

3.6.3 Respuesta al clima de las bromeliáceas epífitas

3.6.3.1 Matorral de duna costera

La población de bromeliáceas epífitas ha cambiado a lo largo del estudio en el matorral de duna costera en San-Benito ($P < 0.05$, $R^2 = 0.71$). El análisis del número de individuos por año muestra un aumento de población en *T. dasyliriifolia* y, en menor medida, en *T. yucatanana*, mientras se observa una reducción en los individuos de *T. balbisiana* (figura 3.6.2, cuadro 3.6.2).



Figura 3.6.2. Observaciones anuales de bromeliáceas epífitas en el matorral de duna costera y precipitación y temperatura máxima extrema de los años correspondientes a los censos.

Cuadro 3.6.2. Análisis de cambio en poblaciones de bromeliáceas epífitas en matorral de duna costera.

especie	Pendiente (individuos/año)	valor <i>P</i>
<i>T. balbisiana</i>	-2.62	0.000005 ***
<i>T. dasyliriifolia</i>	0.25	0.000114 ***

<i>T. yucatan</i>	1.07	0.000005	***
-------------------	------	----------	-----

Contrario a lo esperado, en San-Benito la temperatura máxima extrema se relacionó de forma positiva con el crecimiento de la población de bromeliáceas ($m = 0.3537$ IP/°C, $P = 0.00978$, $R^2 = 0.021$). La especie de bromeliáceae explicó el 0.41% de la varianza de la relación entre temperatura e índice poblacional (figura 3.6.3).

La precipitación en lluvias no presentó efecto significativo sobre el número de individuos, ($m = -0.083$ IP/m, $P = 0.61$, $R^2 = 0.0002$). La varianza explicada por la especie de bromeliácea fue el 0.86% (figura 3.6.3).

La precipitación en estación seca tampoco fue un factor que incidiera sobre las poblaciones de bromeliáceas ($m = 0.454$ IP/m, $P = 0.18$, $R^2 = 0.004$) como se observa en la figura 3.6.3. La varianza explicada por especie de bromeliáceae fue 2.34%.

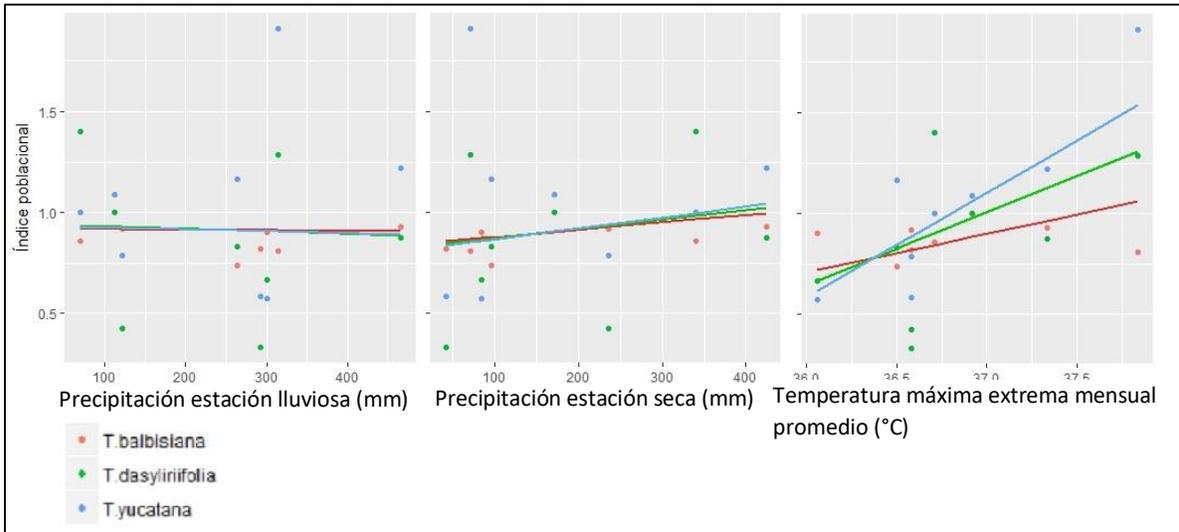


Figura 3.6.3. Relación del índice poblacional con la temperatura máxima extrema, precipitación en estación lluviosa y estación seca en San-Benito. Cada punto representa el índice poblacional de una especie de bromelia en el sitio, en la línea se observa el modelo generado con estos datos.

3.6.3.2 Manglar chaparro

La población de bromeliáceas en Celestún muestra un aumento a lo largo del estudio para las bromeliáceas, esto no tiene relación con su especie y varía entre los distintos cuadrantes (Figura 3.6.4, cuadro 3.6.2).

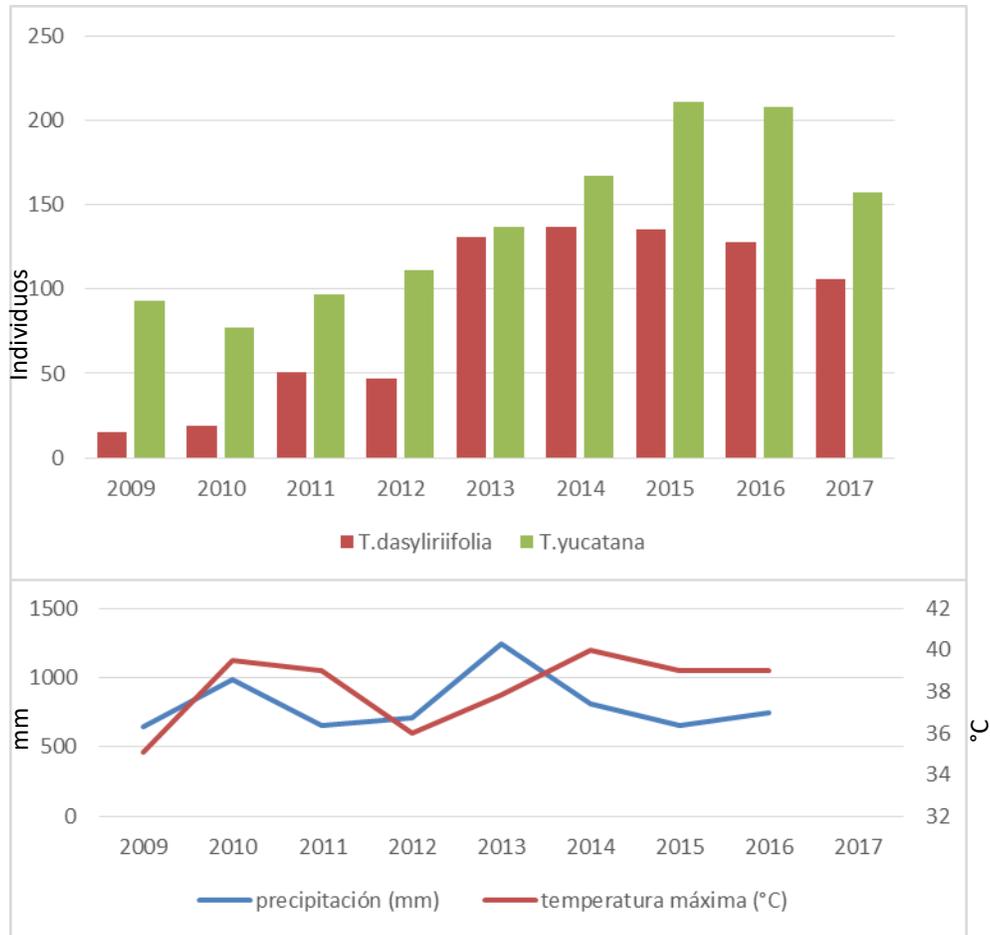


Figura 3.6.4. Observaciones anuales de bromeliáceas epífitas en el manglar chaparro y precipitación y temperatura máxima extrema de los años correspondientes a los censos.

Cuadro 3.6.3. Análisis de cambio en poblaciones de Bromeliáceas epífitas en manglar chaparro.

Especie y cuadrante	pendiente (individuos/año)	valor de P	
<i>T. dasyliiriifolia</i> cuadrante 1	8.95	0.000015	***
<i>T. dasyliiriifolia</i> cuadrante 2	6.23	0.30854	
<i>T. dasyliiriifolia</i> cuadrante 3	0.53	0.00238	**
<i>T. yucatanana</i> cuadrante 1	5.65	0.21596	
<i>T. yucatanana</i> cuadrante 2	8.03	0.73929	
<i>T. yucatanana</i> cuadrante 3	1.72	0.00817	**

La temperatura máxima mostró una correlación negativa con el índice poblacional, $m = -0.7045$ IP/°C, ($P < 0.0005$, $R^2 = 0.216$), la varianza no logró ser explicada por el cuadrante ni por la especie de bromeliáceae (figura 3.6.5).

La precipitación en la estación lluviosa no mostró correlación con el índice poblacional $m = -0.55$, ($P = 0.152$, $R^2 = 0.046$). El factor especie en esta variable contribuyó a explicar el 6.56% de la varianza, mientras el factor cuadrante 0.58% y la varianza no explicada representó el 92.88%.

La precipitación durante la estación seca mostró una correlación negativa con el índice poblacional, $m = -3.66$ IP/metro ($P < 0.0005$, $R^2 = 0.104$). En esta variable, la especie de bromeliácea y el cuadrante no contribuyeron a explicar la varianza (0%) (figura 3.6.5).

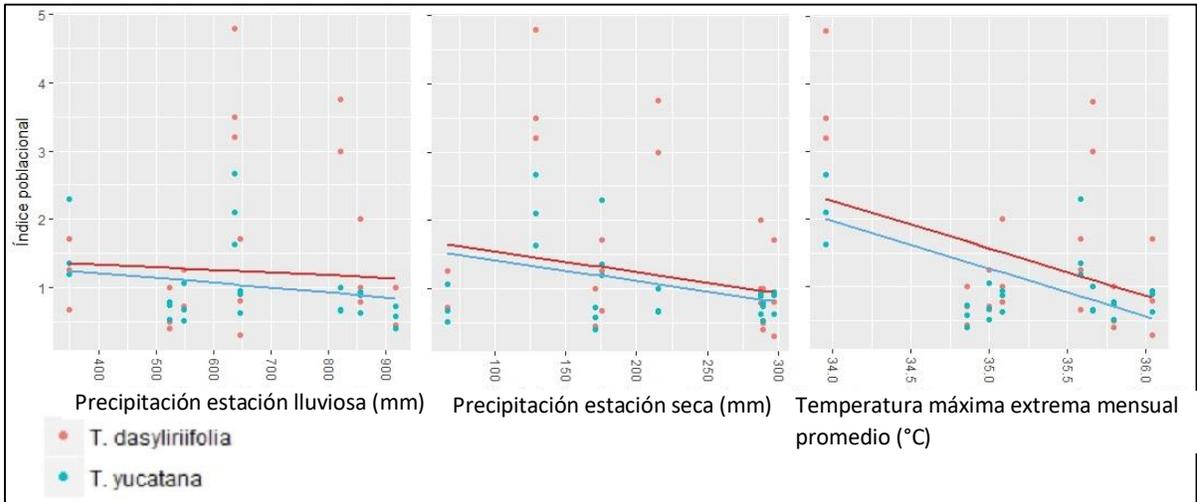


Figura 3.6.5. Relación entre índice poblacional y Temperatura máxima extrema promedio, precipitación en estación lluviosa y estación seca en Celestún. Cada punto representa el índice poblacional de una especie de bromeliácea en determinado cuadrante, en la línea se observa el modelo generado con estos datos.

3.6.3.3 Selva baja caducifolia

Los cuadrantes en la selva baja caducifolia muestran diferentes tasas de cambio del número de individuos de bromeliáceas que difiere entre sí, incluso pueden encontrarse tendencias centrales opuestas en diferentes cuadrantes, la mitad de los cuadrantes analizados no presentaron un cambio significativo ($P > 0.05$) (figura 3.6.6, cuadro 3.6.4).

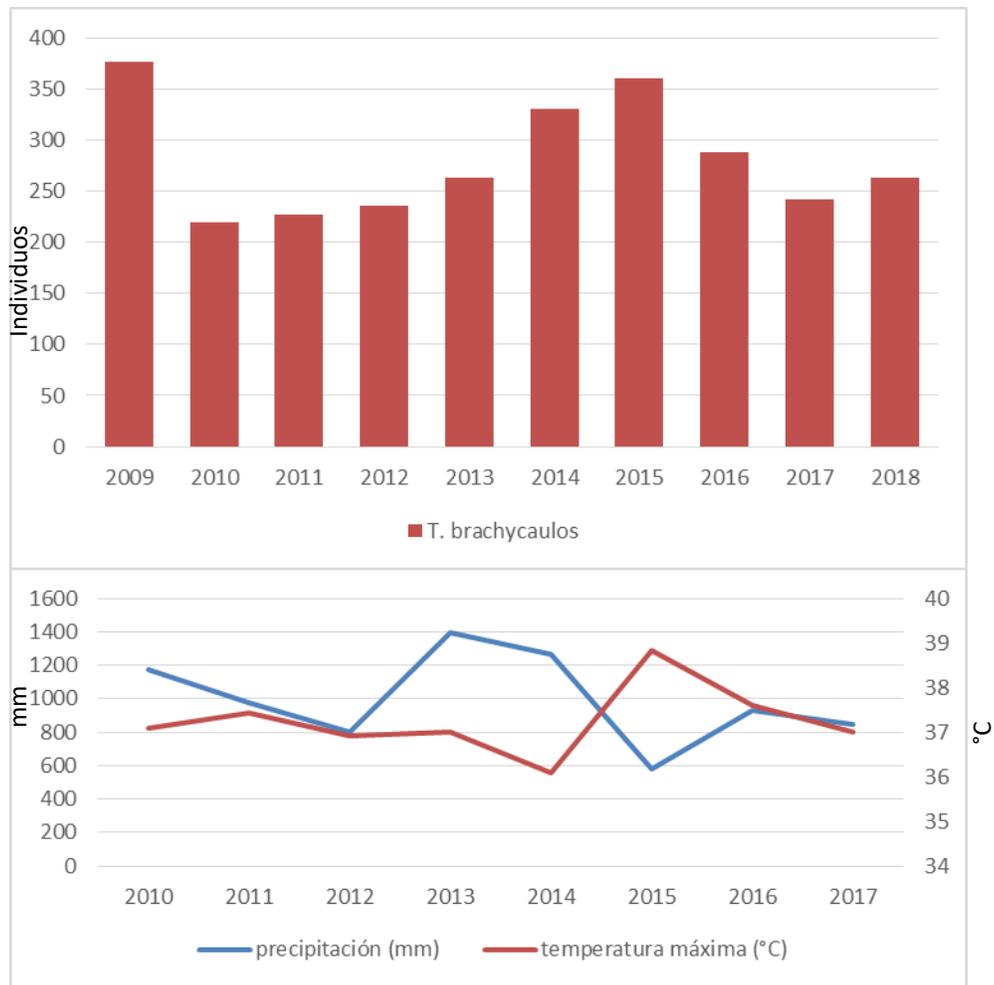


Figura 3.6.6. Observaciones anuales de bromeliáceas epífitas en la selva baja caducifolia y precipitación y temperatura máxima extrema de los años anteriores a los censos.

Cuadro 3.6.4. Análisis de cambio en poblaciones de Bromeliáceas epífitas en selva baja caducifolia.

Cuadrante	pendiente	valor P	
1	-7.56	0.013	*
2	-1.32	0.134	
3	-4.53	0.462	
4	12.67	0.00002	***

La temperatura máxima extrema mensual promedio durante el año mostró una correlación negativa con el índice poblacional ($m = -0.3$, $P < 0.0005$, $R^2 = 0.0556$). La mayor parte de la varianza (99.99%) no pudo ser explicada, una mínima parte se debió al efecto del forofito (0.00000169%) y el cuadrante no tuvo ningún efecto (0%) en la respuesta de las plantas al clima (figura 3.6.7).

La precipitación durante la estación lluviosa muestra una correlación significativa con el índice poblacional de las bromeliáceas ($m = 1.12$, $P < 0.0005$, $R^2 = 0.05748352$). No existió variación explicada por la especie de forofito ni cuadrante (figura 3.7). Para esta variable la especie de forofito y cuadrante no logran explicar la varianza (0%).

La precipitación durante la estación seca, presentó una correlación positiva con el índice poblacional ($P = 0.0008$), pero su pendiente ($m = 0.91IP/m$) presentó un valor más bajo que con la precipitación en la estación lluviosa y la temperatura máxima extrema (figura 3.6.7). La varianza explicada no muestra el efecto de cuadrante ni la especie del árbol hospedero (0%).

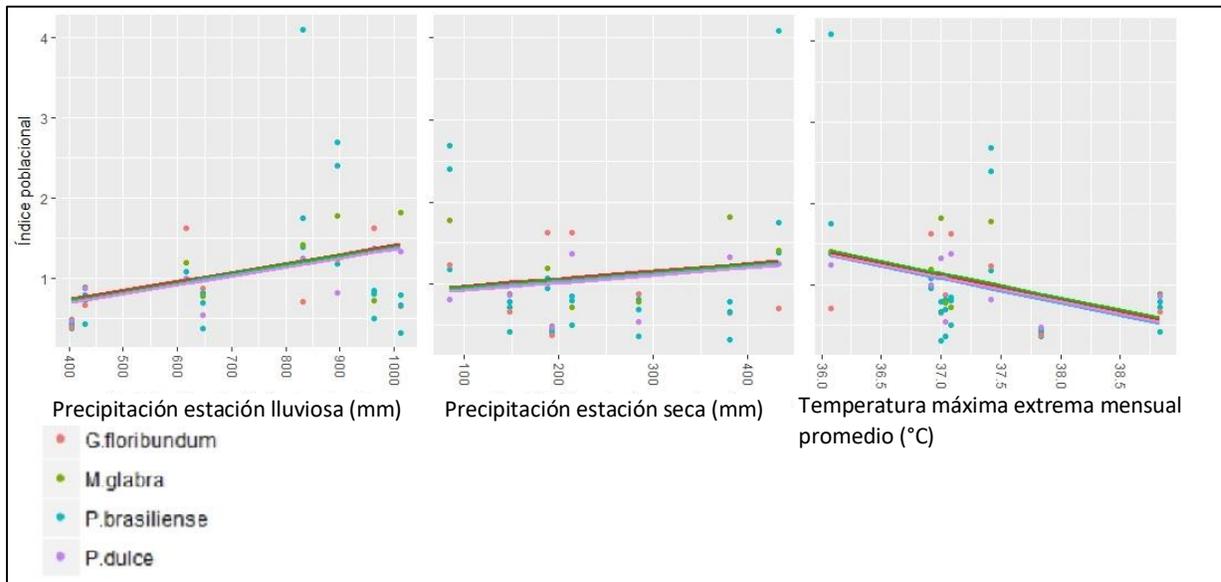


Figura 3.6.7. Relación entre índice poblacional y temperatura máxima, precipitación en la estación lluviosa y estación seca en Dzibilchaltún. Cada punto representa el índice poblacional de las bromeliáceas en una especie de forofito en cada uno de los cuadrantes, en la línea se observa el modelo generado con estos datos.

3.6.3.4 Selva mediana subcaducifolia

En la selva mediana sub-caducifolia las poblaciones de bromeliáceas en distintos cuadrantes respondieron de forma opuesta, a pesar de tratarse de la misma especie (figura 3.6.8, cuadro 3.6.5).

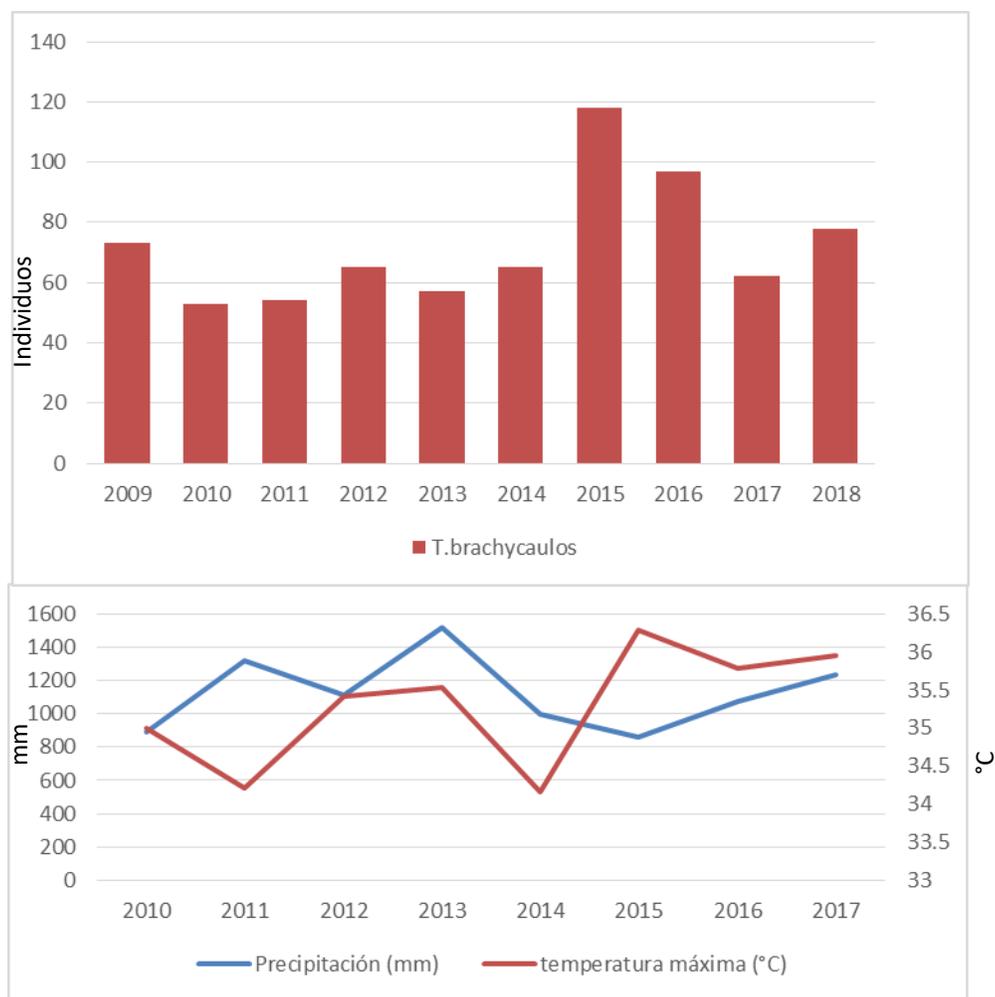


Figura 3.6.8. Observaciones anuales de bromeliáceas epífitas en la selva mediana subcaducifolia y precipitación y temperatura máxima extrema de los años anteriores a los censos.

Cuadro 3.6.5. Análisis de cambio en poblaciones de Bromeliáceas epífitas en selva mediana subcaducifolia.

cuadrante	pendiente	valor P	
1	5.45	0.0007	***
2	-2.48	0.0006	***

La temperatura máxima extrema mensual promedio mostró correlación negativa con el índice poblacional ($m = -0.093$, $P = 0.001$, $R^2 = 0.0147$) (figura 3.6.9). La especie de forofito explicó el 0.00025% de la varianza.

La precipitación en la estación lluviosa presenta correlación positiva con el índice poblacional, ($m = 1.013$ IP/m, $P < 0.0005$, $R^2 = 0.041$) (figura 3.6.9). La especie de forofito y el cuadrante no logra explicar la varianza del modelo (0%).

La precipitación en la estación seca igualmente presenta correlación positiva con el índice poblacional, no obstante no es tan evidente como la de la estación lluviosa ($m = 0.425$ IP/m, $P < 0.0005$, $R^2 = 0.003$) (figura 3.6.9). La varianza no se logra explicar con la especie de forofito (0%).

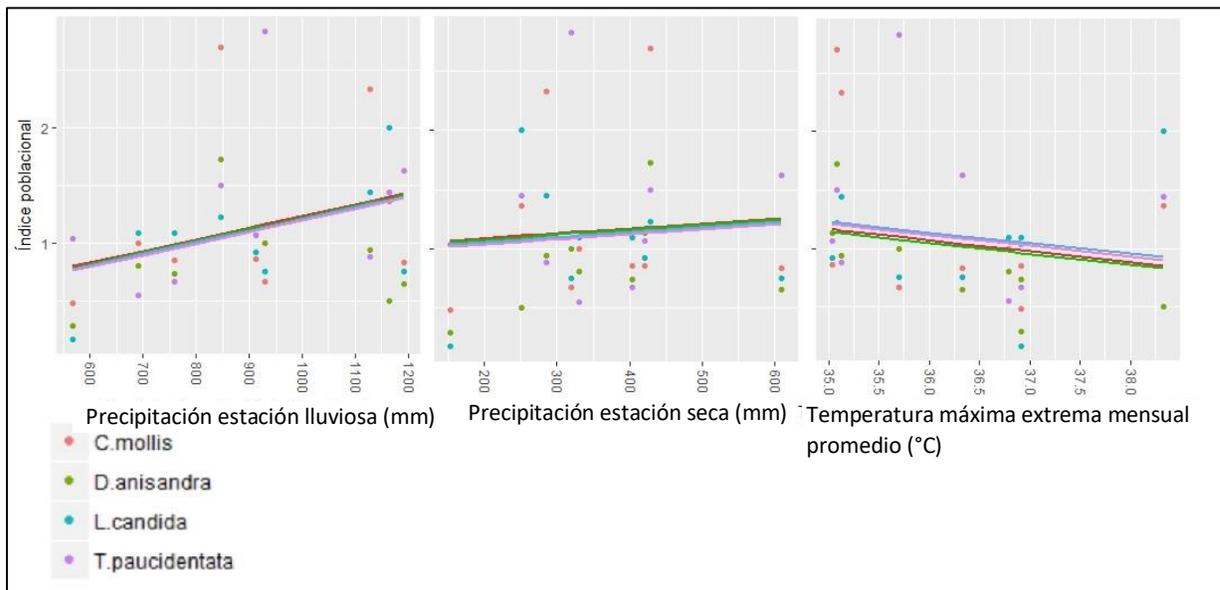


Figura 3.6.9. Relación entre índice poblacional y temperatura máxima extrema, precipitación en estación seca y estación lluviosa en la selva mediana subcaducifolia.

Cada punto representa el índice poblacional de las bromeliáceas en una especie de forofito en cada uno de los cuadrantes, en la línea se observa el modelo generado con estos datos.

3.6.3.5 Selva mediana subperennifolia

Se observa que *T. fasciculata*, *T. juncea* y *T. schiedeana* mantuvieron poblaciones estables a lo largo del tiempo ($P < 0.05$) (cuadros 3.6.6, 3.6.7, 3.6.8) pero se observan algunas fluctuaciones importantes a lo largo del tiempo en la población de *T. juncea* observándose un descenso en 2014 y 2016 (figura 3.6.10, cuadro 3.6.7).

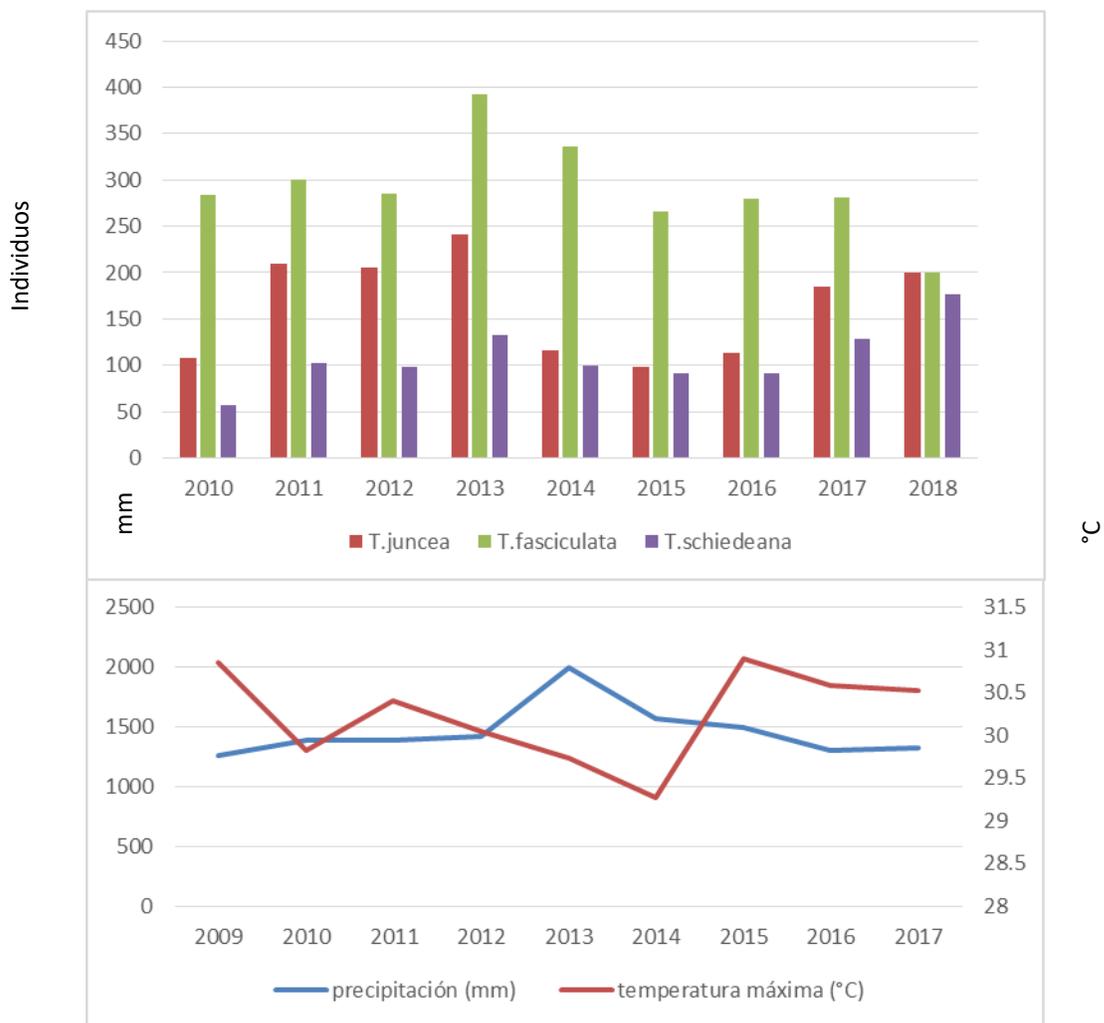


Figura 3.6.10. Observaciones anuales de bromeliáceas epífitas en la selva mediana subperennifolia de precipitación y temperatura máxima extrema de los años anteriores a los censos.

Cuadro 3.6.6. Análisis de cambio en la población de *T. fasciculata* en selva mediana subperennifolia.

estrato	pendiente	valor p
copa 1	-3.08	0.14
copa 2	-1.48	0.59
copa 3	2.35	0.07
tronco2	-1.75	0.65
tronco 3	-4.85	0.55

Cuadro 3.6.7. Análisis de cambio en la población de *T. juncea* en selva mediana subperennifolia.

estrato	pendiente	valor P
copa 1	-3.0	0.31
copa 2	-0.57	0.55
copa 3	6.30	0.03
tronco 3	-3.33	0.94

Cuadro 3.6.8. Análisis de cambio en la población de *T. schiedeana* en selva mediana subperennifolia.

estrato	pendiente	valor P
copa 1	1.16	0.32
copa 2	2.95	0.28
copa 3	4.33	0.06
tronco 2	-0.02	0.47
Tronco 3	0.40	0.64

Puede observarse una correlación negativa del índice poblacional con la precipitación en la estación lluviosa ($m = -1.45IP/m$, $P < 0.0005$, $R^2 = 0.022$) (figura 3.6.11). La especie de epífita y el estrato no contribuyeron a explicar la varianza (0%).

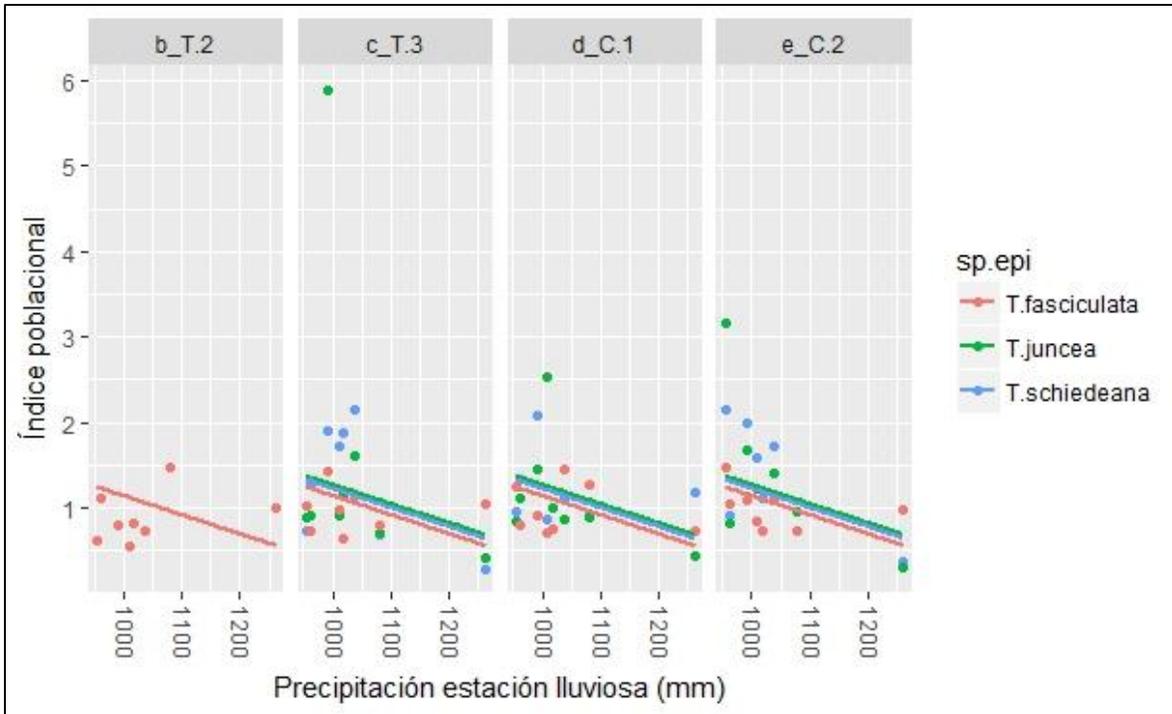


Figura 3.6.11. Relación entre índice poblacional de las especies de bromeliáceas más abundantes de la selva mediana subperennifolia y precipitación en estación lluviosa en Calakmul dividido por estrato (b_T.2= tronco2, c_T.3=tronco 3, d_C.1=copa 1, e_C.2=copa 2). Cada punto representa el índice poblacional de una especie de bromeliáceae, en la línea se observa el modelo generado con estos datos.

Se observa una correlación negativa del índice poblacional con la precipitación en la estación seca ($m = -1.08326$, $P < 0.0005$, $R^2 = 0.04$) (figura 3.6.12). El estrato y la especie de bromeliácea no contribuyeron a explicar la varianza (0%).

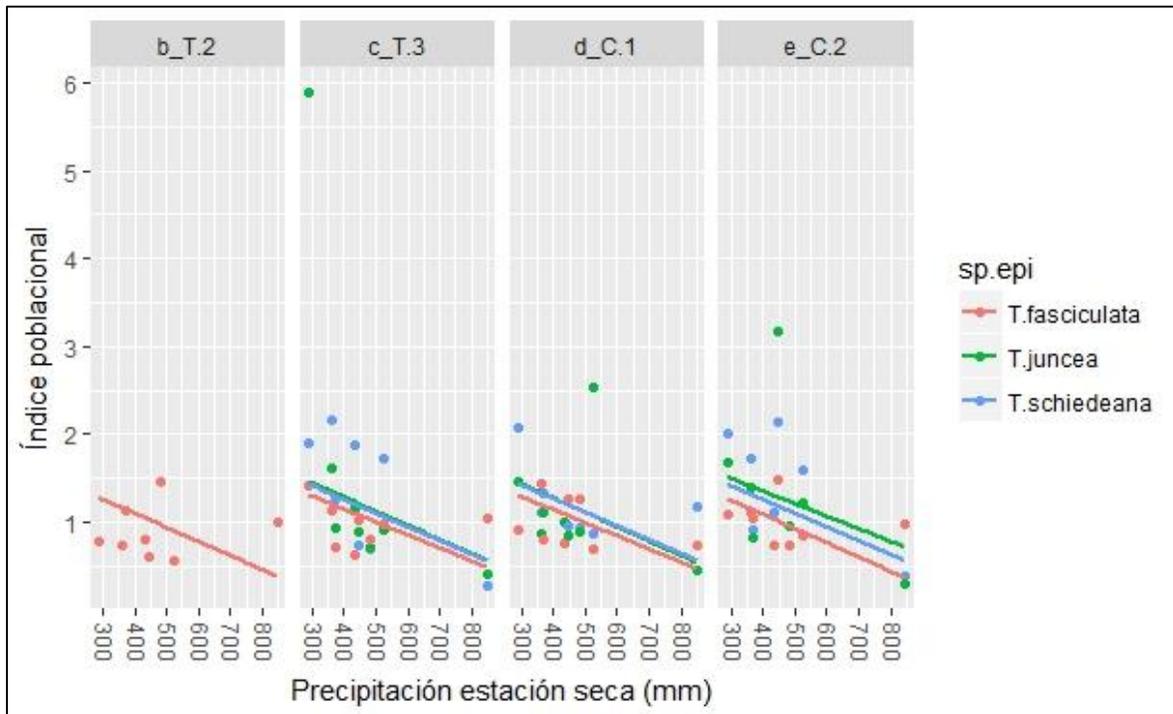


Figura 3.6.12. Relación entre índice poblacional de las especies de bromeliáceas más abundantes de la selva mediana subperennifolia y precipitación en estación seca en Calakmul dividido por estrato (b_T.2= tronco2, c_T.3=tronco 3, d_C.1=copa 1, e_C.2=copa 2). Cada punto representa el índice poblacional de una especie de bromeliáceae en determinado estrato, en la línea se observa el modelo generado con estos datos.

Se observa una correlación positiva del índice poblacional con la temperatura máxima mensual promedio del año, ($m = 0.04151$, $P < 0.0005$, $R^2 = 0.0048$) (figura 3.6.13). La especie de epífita explicó el pobremente la varianza (0.0000047%), mientras el estrato no explicó la variación en la respuesta a la temperatura máxima (0%).

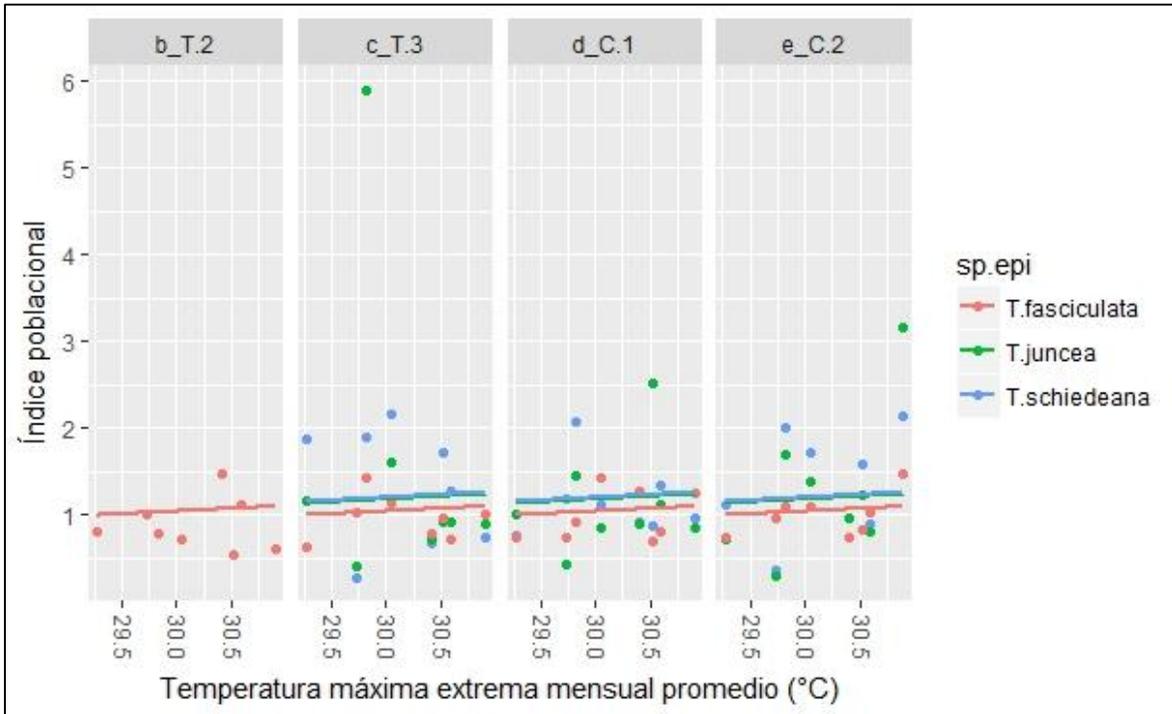


Figura 3.6.13. Relación entre índice poblacional de las especies de bromeliáceas más abundantes de la selva mediana subperennifolia y temperatura máxima extrema en Calakmul dividido por estrato (b_T.2= tronco2, c_T.3=tronco 3, d_C.1=copa 1, e_C.2=copa 2). Cada punto representa el índice poblacional de una especie de bromeliáceae en determinado estrato, en la línea se observa el modelo generado con estos datos.

3.7 DISCUSIÓN

Diez años es un período muy breve para observar cambios en el clima y por lo tanto un cambio en orden cronológico en el número de bromeliáceas epífitas. Entonces, en la mayor parte de los sitios no logró ser registrado ($p > 0.05$) excepto en el manglar chaparro y matorral de duna costera. Para obtener una tendencia definida que indique un cambio del número de individuos a lo largo del tiempo, sería necesario obtener datos de un período mucho más largo que cuente con períodos con condiciones climáticas contrastantes. Otros estudios de cambios en la vegetación a largo plazo muestran que aún en períodos de ochenta años, con un cambio significativo en el clima, no necesariamente se presentan grandes cambios en el número de individuos de especies de plantas (Kapfer *et al.*, 2012). Si bien, las plantas y el clima poseen una estrecha relación, la variabilidad de los elementos climáticos a corto plazo no necesariamente lleva a un cambio en el número de individuos de las poblaciones plantas. Esto se debe a que

las plantas cuentan con mecanismos que permiten su supervivencia años con un clima que les resulta particularmente adverso (Balfagón *et al.*, 2018), de forma que una gran variación en el clima de un año específico no lleve a una gran variación en la composición de especies en la vegetación de un sitio. Su respuesta a estas condiciones adversas se ve influida por el clima de años anteriores ya que este habrá influido en el estado de la planta y su capacidad para tolerar condiciones difíciles. Debido a esto, a pesar de realizarse un estudio a largo plazo (10 años), si se analiza los cambios en orden cronológico, las epífitas mantienen una población estable a lo largo del estudio. A partir de esto es evidente que en los últimos diez años no se han dado cambios en el clima de la región de manera que logren modificar de forma significativa, por un número considerable de años, el número de individuos de las poblaciones de bromeliáceas epífitas.

Por otra parte, se logra apreciar un cambio del índice poblacional de las bromeliáceas debido a la variabilidad de las condiciones climáticas anuales sin necesariamente seguir un orden cronológico. Sobresale que el matorral de duna costera respondió positivamente a la temperatura máxima extrema, mientras en el manglar chaparro lo hizo de forma negativa con esta misma variable y la precipitación en secas. Estas respuestas no pueden explicarse únicamente con el estrés hídrico causado por estas variables climáticas. Es muy probable que existan otros factores involucrados: en primer lugar, se trata de los sitios con el clima más seco de la península de Yucatán, por lo tanto, puede esperarse que las especies de bromeliáceas epífitas presentes en estos sitios sean las menos competitivas de las bromeliáceas estudiadas, ya que, en sitios con clima adverso las especies suelen perder competitividad a cambio de adaptaciones que les ayuden a sobrellevar condiciones adversas (Grime, 1973; Fraser *et al.*, 2015), lo que significa una menor respuesta de las especies de estos sitios a los cambios en el clima. En la península de Yucatán esto se ha confirmado por Cach-Pérez *et al.* (2018) quienes encuentran mayor succulencia en bromeliáceas epífitas en los ecosistemas más secos que en los húmedos. Incluso dentro de una misma especie, *Tillandsia utriculata*, una población en un ecosistema húmedo muestra una mayor capacidad para capturar carbono, comparada con una población de un ecosistema seco, donde los individuos tienden a poseer características que les permiten lidiar con la falta de agua, disminuyendo su capacidad fotosintética (Rosado-Calderón *et al.*, 2018).

Por otra parte se tiene al microclima generado por la vegetación, el cual es necesario estudiar más detenidamente para resolver cual es el efecto del clima sobre las bromeliáceas en estos ecosistemas, ya que la vegetación, tanto del matorral de duna costera como del manglar chaparro, presenta condiciones muy particulares, al ser de escasa altura, densa y mantener las hojas durante todo el año, puede mantener muy estable el microclima y limitar la cantidad de luz que reciben las bromeliáceas epífitas presentes en ellos, reduciendo su tasa de crecimiento y su potencial respuesta al clima. De igual forma, esta vegetación se encuentra muy cercana a cuerpos de agua; en el manglar chaparro, las bromeliáceas se encuentran a unos centímetros de la superficie del agua lo que puede influir en gran medida sobre la humedad del microclima en el que se encuentran las epífitas, por lo que es muy probable que las condiciones del microclima que produce la vegetación de estos sitios tengan mayor importancia que la del clima a mayor escala sobre el comportamiento de las bromeliáceas. Existe información que muestra mayor humedad relativa bajo el dosel del manglar que sobre él, así como una temperatura más estable (De Lima *et al.*, 2013). En estudios hechos para el manglar chaparro y matorral de duna costera de Yucatán, se muestra que estos ecosistemas son particularmente secos, con altos déficits de presión de vapor, comparados con otros ecosistemas (Cach-Pérez *et al.*, 2018). Sin embargo, en el manglar chaparro este se mantiene en valores similares en las estaciones seca y lluviosa; por otra parte, en el matorral de duna costera, el flujo de luz es el mismo en la estación seca que en la estación lluviosa, si bien, el déficit de presión de vapor aumentó en la seca (Cach-Pérez *et al.*, 2018). Se requieren estudios más detallados para responder la inusual respuesta de las especies de bromeliáceas epífitas de estos ecosistemas a las variables climáticas.

En las selvas baja caducifolia, mediana subcaducifolia y mediana subperennifolia, donde la vegetación presenta mayor altura y es menos compacta se presentó una respuesta que puede explicarse de con la variación del clima anual. En las selvas baja caducifolia y mediana subcaducifolia, el índice poblacional se relacionó negativamente con condiciones de estrés hídrico, mientras en la selva mediana sub-perennifolia estas condiciones de estrés se relacionaron con un aumento del índice poblacional. Los ecosistemas más similares entre sí dentro del estudio fueron las selvas baja caducifolia y mediana subcaducifolia, lo que puede explicar la similitud en la respuesta de sus bromeliáceas al clima. En estos dos ecosistemas se analizó una única especie: *Tillandsia brachycaulos*. En contraste, la selva mediana sub-perennifolia presenta un clima más húmedo y cuenta

con otras especies de bromeliáceas, *Tillandsia brachycaulos* es una especie compartida en estas tres selvas, pero en la mediana sub-perennifolia su población era relativamente pequeña. Entonces esta diferencia en la respuesta al clima puede ser atribuida tanto a la diferencia de especies de bromeliáceas como al microclima que genera la vegetación y las características del clima de los ecosistemas, siendo poco recomendable realizar comparaciones entre ecosistemas, además de que es muy probable que el clima de éstos se vea afectado en forma distinta por el cambio climático.

Esa diferencia a la respuesta al estrés hídrico parece indicar que las bromeliáceas en las selvas baja caducifolia y mediana subcaducifolia, se encuentran al límite de tolerancia a la falta de agua, lo que lleva a una respuesta negativa a las condiciones climáticas que lo producen, mientras en la selva mediana subperennifolia las bromeliáceas responden de forma positiva a las condiciones de estrés hídrico. Para explicar este comportamiento debe considerarse que en la selva mediana subperennifolia los árboles mantienen sus hojas la mayor parte del año, lo que limita la luz disponible (Cach-Pérez, 2013), limitando el crecimiento de las bromeliáceas, el cual aumenta cuando el clima se torna más seco y los árboles pierden sus hojas, permitiendo mayor iluminación, crecimiento y aumento del número de individuos. Son necesarios más estudios para confirmar lo anterior, ya que, en otros estudios, se ha encontrado que la selva mediana subperennifolia permite el paso de menos luz que la baja caducifolia pero no de la mediana subcaducifolia (Cach-Pérez *et al.*, 2018). Sin embargo, los resultados aquí obtenidos sugieren que sus bromeliáceas en la selva mediana subperennifolia no se encuentran severamente estresadas por falta de agua, en cambio, ven limitado su desarrollo por la sombra de las hojas.

Se ha explorado el efecto que tiene la apertura del dosel sobre las bromeliáceas epífitas: por una parte, las condiciones de alta humedad que produce un dosel cerrado favorecen a las epífitas, mientras que la luz sería un factor favorable en un dosel más abierto. En la selva húmeda pre-montana se reporta que un dosel más abierto lleva a mayores temperaturas máximas y menor humedad, estando estas condiciones relacionadas con un mayor número de bromeliáceas epífitas (Toivonen *et al.*, 2017). Bromeliaceae es una de las familias de plantas epífitas mejor adaptadas a la falta de agua; dentro del gremio de las epífitas se ha señalado que la proporción de bromeliáceas en la flora epífita aumenta conforme los ecosistemas se tornan más áridos (Ibisch *et al.*, 1996, citado por Kessler, 2002), lo cual apoya lo observado en el comportamiento de su población en la selva mediana subperennifolia.

En este punto es importante mencionar que las especies pueden tener distintos grados de vulnerabilidad hacia un cambio en el clima (Dawson *et al.*, 2011), que se verá reflejado en su población. Para estimar esta afectación debe considerarse (1) qué tan expuesta está la especie a los efectos de este cambio, en este trabajo esto puede aplicarse a las características del microclima que genera la vegetación, el cual reduce los efectos directos del clima sobre las bromeliáceas epífitas; (2) la sensibilidad, que se refiere que tanto depende una especie para su supervivencia de determinado factor, por ejemplo, existen especies de bromeliáceas que requieren de mayor cantidad de lluvia para sobrevivir, contrastando con otras que se han adaptado a resistir condiciones de constante falta de agua; y (3) la capacidad de adaptación, que se refiere a la capacidad de la especie para lidiar con los cambios, que dependerá de su plasticidad ya sea para tolerar condiciones adversas, o bien, aprovechar un aumento en la disponibilidad de recursos.

Una consideración que debe de tenerse al realizar una hipótesis a mediano o largo plazo sobre el comportamiento de las bromeliáceas si este ecosistema se tornara más seco, es el efecto de este cambio sobre las plántulas, ya que su población puede verse afectada de distinta forma por el microambiente, en comparación con los individuos juveniles cercanos a alcanzar la etapa adulta, analizados en este trabajo. Si bien, debe mencionarse que Zotz y Andrade (1998) encuentran que *T. fasciculata*, la especie de bromeliáceae más abundante en la selva mediana subperennifolia, no presenta mayores pérdidas de agua en individuos más pequeños, en comparación a los grandes, debido a su baja relación entre área foliar y contenido de agua, por lo que puede esperarse para esta especie un aumento de individuos en un ambiente más seco.

Debe considerarse que la cantidad de hojas en la selva mediana subperennifolia pudo ser un factor que influyó en las observaciones de epífitas durante los monitoreos anuales, ya que en este ecosistema existe gran proporción de bromeliáceas en los estratos más altos de la vegetación. Previo análisis (apéndices 4 y 5), se optó por remover a este estrato debido a que el número de epífitas en él se vio influenciado por la cantidad de hojas. Las selvas baja caducifolia y mediana subcaducifolia, presentaron la mayor parte de las bromeliáceas en estratos bajos, adicionalmente la vegetación de estas comunidades no es tan frondosa ni tan elevada como la selva mediana subperennifolia, por lo que se consideró despreciable el sesgo debido a la cantidad de hojas sobre las observaciones de bromeliáceas.

La reducida importancia de la precipitación en la estación seca sobre las poblaciones de bromeliáceas en las selvas baja caducifolia y mediana subcaducifolia puede explicarse por diversas razones, una de ellas es que *T. brachycaulos* fue la única especie analizada, debido a que las otras especies tenían escasa presencia. Esta especie se caracteriza por encontrarse en el estrato bajo, donde el microclima permanece relativamente estable a lo largo del año, lo cual ayuda a que actividad fotosintética continúe después de cesar las lluvias (Andrade, 2003; Graham y Andrade, 2004, Reyes *et al.*, 2008). Adicionalmente, el rocío y niebla son una fuente de agua que permite a las bromeliáceas sobrellevar la falta de lluvias en la estación seca, si bien estas fuentes de agua son insuficientes para mantener su contenido relativo de agua los niveles de la estación lluviosa (mismos autores). Adicionalmente a esta explicación es posible que la estación seca sea un período muy estresante para las bromeliáceas en todos los años, lo que puede tener mayor importancia que las variaciones en la precipitación durante esta estación en el crecimiento poblacional, por lo cual, si no se registran lluvias extraordinariamente altas, no se esperaría una respuesta en las poblaciones de bromeliáceas a esta variable a pesar de existir grandes diferencias en esta variable en distintos años.

Un problema evidente con los modelos obtenidos es su reducido ajuste a los datos, con un valor de R^2 en la mayoría de los casos, menor a 0.1. No obstante, comparando el comportamiento del índice poblacional entre las selvas baja caducifolia y mediana subcaducifolia, que son los ecosistemas más parecidos entre sí, se observa que en los dos casos el índice poblacional responde de forma igual al clima, siendo poco probable que esta respuesta se deba a la aleatoriedad de los datos. Estos bajos valores de R^2 pueden ser atribuidos a la gran cantidad de variables que ejercen influencia sobre el índice poblacional que no se encuentran en el modelo, como pueden ser la influencia de años anteriores en el crecimiento, los tiempos de reproducción, la longevidad de las bromeliáceas, etc. Adicionales al pequeño número de cuadrantes y años del estudio.

Debido a que la familia Bromeliaceae se compone de plantas de lento crecimiento, el cambio en la población observado en los censos es el desarrollo de los últimos estadios de etapas juveniles a etapa adulta y las muertes de individuos adultos. Estos individuos juveniles, pueden tolerar cierto estrés hídrico, por lo que su respuesta al clima adverso no necesariamente será la muerte de forma inmediata, lo cual dificulta observar los efectos a corto plazo del clima sobre su población, como podrían reflejarlo las plántulas. Sin embargo, en la etapa de plántula, hay una alta mortalidad por diversas circunstancias, no

necesariamente relacionadas a las condiciones climáticas (por ejemplo, depredación, Chilpa-Galván et al. 2017) y existe un ciclo anual el comportamiento de su población vinculado al clima (Mondragón *et al.*, 2004), por lo que para realizar un estudio que logre mostrar mayores cambios de su población, se requiere cuantificar la fluctuación cuando menos a nivel mensual. Esto requiere aumentar la frecuencia de los censos, así como dedicar mayor tiempo a ellos debido a que los individuos juveniles son más difíciles de avistar. A su vez, sería recomendable documentar el grosor y estado de las ramas en las que se encuentran, ya que estos factores afectan la supervivencia (Mondragón *et al.*, 2004).

Si bien, la transición de las últimas etapas del estadio juvenil al adulto, no refleja de forma clara el efecto del clima a corto plazo, estos estadios tienen mayor estabilidad poblacional ya que mientras la planta crece se reduce la posibilidad de que muera por factores ajenos al clima como la caída de ramas (Mondragón *et al.*, 2004). Un clima adverso, que se vería reflejado en muchas muertes en la población de plántulas, en la población de juveniles es probable que se vea reflejado en una reducción de la tasa de crecimiento, por lo tanto, en un menor incremento de individuos adultos.

El efecto del clima de años anteriores sobre el número de bromeliáceas es un factor que no se ha tomado en cuenta, a pesar de su gran importancia, debido a que la población de los años de cada censo no depende únicamente del clima del año anterior, sino del de los años anteriores a este, esto es de especial importancia en el desarrollo de las etapas juveniles de las bromeliáceas, por lo que cabe que la población de bromeliáceas de los censos sea en gran parte determinada por el clima de varios años anteriores y su efecto en la mortalidad de plántulas, más la mortalidad de individuos debida a la caída de ramas o a que completan su ciclo vital.

Acerca de la falta de evidencia de la existencia de mayor variación anual del número de bromeliáceas epífitas en el dosel superior, que se vería reflejada en una respuesta más fuerte de las bromeliáceas en este estrato; debe recordarse de descartó analizar el estrato superior del dosel en la selva mediana subperennifolia, debido a un posible sesgo en el avistamiento de bromeliáceas, ya que las hojas de los árboles pueden ocultarlas. Debajo de este estrato las condiciones microclimáticas podrían ser menos contrastantes, lo cual explicaría la ausencia de diferencias en el comportamiento de las bromeliáceas entre estratos. Para llegar a resultados más conclusivos se requiere cuantificar con mayor

precisión las observaciones en estratos superiores y mejor caracterización del microclima en diferentes estratos.

Únicamente se logró poner a prueba la hipótesis acerca del efecto de la especie del árbol hospedero en la selva baja caducifolia y mediana subcaducifolia; en donde contrario a lo esperado, el efecto del forofito en la respuesta del índice poblacional al clima fue poco evidente. La mayor parte de las bromeliáceas en estas selvas se encontraban en los estratos más bajos del dosel lo cual puede contribuir a homogeneizar las condiciones microclimáticas en las que se encuentran las bromeliáceas, independientemente de la especie de hospedero; sumado al solapamiento del dosel de distintas especies arbóreas. Esto puede ser igualmente atribuido a la plasticidad de las bromeliáceas, donde en una sola especie, se pueden encontrar distintas adaptaciones a su medio ambiente (Cach-Pérez *et al.*, 2018; Rosado-Calderón *et al.*, 2018), lo que reduce el efecto de las condiciones microclimáticas causadas por el hospedero en la mortalidad.

Todo lo anterior dificulta modelar el efecto del clima sobre las poblaciones de bromeliáceas epífitas, siendo necesario refinar los modelos de forma que logren un mejor ajuste a los datos. Es de especial importancia poder definir cómo se ve afectado el desarrollo de las plántulas debido al clima, para que sea posible incluir en el modelo este factor, que puede mejorar el ajuste del modelo a los datos; así como el efecto del clima de años anteriores sobre individuos juveniles.

Ya que las hipótesis de los efectos del cambio climático de IPCC (2013) para la península de Yucatán, hasta ahora no se han visto confirmadas por los registros climáticos locales; un cambio en las poblaciones de bromeliáceas a través del tiempo era muy improbable. Sin embargo, se encontró una respuesta de las bromeliáceas epífitas a las variaciones del clima anual, por lo cual se espera que las bromeliáceas presenten una respuesta ante un eventual cambio en el clima. Así mismo, estos resultados dan una idea de cómo responderán las bromeliáceas ante estos cambios. No obstante, es recomendable aumentar las observaciones y refinar los modelos, para realizar análisis más robustos.

Los resultados de la presente investigación parecen indicar que ante un cambio hacia un clima más seco, puede esperarse una reducción del número de bromeliáceas pertenecientes a la especie *Tillandsia brachycaulos* en las selvas baja caducifolia y mediana subcaducifolia. En la selva mediana subperennifolia un cambio del clima hacia

uno más árido a corto y mediano plazo se verá reflejado en un aumento del número de individuos de *Tillandsia schiedeana*, *Tillandsia fasciculata* y *Tillandsia juncea*. Sin embargo se desconoce los efectos de este cambio a largo plazo debido a la falta de información sobre la respuesta a estas condiciones en las plántulas de estas especies.

En el manglar chaparro y duna costera, los efectos del cambio climático en las poblaciones de bromeliáceas pueden verse muy reducidos debido al microclima que genera la vegetación y cuerpos de agua en estos ecosistemas, sin embargo, no se pueden descartar cambios en poblaciones de bromeliáceas ante cambios mayores en el clima.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

4.1 CONCLUSIONES

En el transepto de estaciones analizadas no se encontró evidencia contundente que apoye las proyecciones para la península de Yucatán bajo el escenario RCP 8.5 para 2020, que proyectan una reducción en la precipitación y aumento uniforme de la temperatura para toda la península. Muchos sitios los datos de las variables climáticas no presentaron pendientes significativas y en algunos de ellos la pendiente es contraria a la esperada en los escenarios de cambio climático, se concluye que el efecto del cambio climático en la región difiere a lo previsto por IPCC (2013) para 2020 al no observarse un cambio sostenido y similar en el clima de los sitios estudiados de la península de Yucatán, como proyectan los modelos de este organismo para precipitación y temperatura. En cambio, se observa una gran variabilidad de las series de datos y tasas de cambio muy variadas en los diversos sitios de estudio. Acorde a una respuesta distinta entre las regiones de la península de Yucatán, se logra observar que en la temperatura media existe una tendencia positiva al norte de la península, mientras en el centro y sur esta tiende a descender, lo cual puede ayudar en cierta medida, a conocer qué ocurrirá en la región debido al cambio climático, sin embargo, dado el limitado número de estaciones meteorológicas analizadas sería necesario hacer un estudio con una mayor cobertura de estaciones.

Pasando a las conclusiones del análisis de las bromeliáceas epífitas, se encontró que el número de individuos de las bromeliáceas epífitas responde a la variación anual del clima, sin embargo, existe gran cantidad de otros factores, incluso el clima de años anteriores, que tienen influencia en las bromelias. Adicionalmente las condiciones microambientales generadas por la vegetación tienen una gran influencia, incluso en mayor medida que el clima, como parecen indicar las observaciones de Celestún y San-Benito. Todos estos factores ajenos a la modelación se dificultan un ajuste satisfactorio de los datos al modelo.

La respuesta a la variación climática anual, en las selvas baja caducifolia y mediana subcaducifolia, fue consistente con las hipótesis planteadas, con menor crecimiento poblacional ante condiciones de estrés hídrico (mayor temperatura máxima extrema y

menor precipitación). En la selva mediana subperennifolia, contrario a lo esperado, el estrés hídrico ocasiono un aumento del índice poblacional. Y en el manglar chaparro y matorral de duna costera, el índice poblacional no respondió de manera negativa a la falta de agua.

A partir de esto puede concluirse que las condiciones climáticas causantes de estrés hídrico tienen diversos efectos en el índice poblacional de las bromeliáceas epífitas, dependiendo del ecosistema en que se encuentren y de las características de la especie de bromeliácea epífita.

A pesar de estos resultados, que muestran una respuesta al clima de las bromeliáceas, no se encontró un cambio en su número de individuos en orden cronológico, excepto en Celestún y San-Benito, donde aumentaron. Se concluye que no se han dado cambios en el clima de los últimos diez años lo suficientemente significativos como para producir un cambio en la vegetación de epífitas. El clima a lo largo del estudio se ha mantenido dentro del rango habitual de condiciones para el que las bromeliáceas se encuentran adaptadas, acorde a lo encontrado en el capítulo II referente al clima, que no señala cambios. No obstante, a nivel cuadrante, se observan grandes cambios en poblaciones de bromeliáceas con diversas tendencias, incluso opuestas. En la mayor parte de los casos no modifican la tendencia de los datos de todo el sitio. Esto se observa en la selva mediana subcaducifolia. Lo cual parece indicar que existen factores indeterminados adicionales al clima que influyen en su número de individuos, muy probablemente intrínsecos a las dinámicas de sus metapoblaciones como tiempo de vida, disponibilidad de semillas y capacidad de los árboles para hospedarlas.

Sobre este punto, igualmente es importante señalar que en la selva mediana subperennifolia, que fue el sitio donde se encontró a las poblaciones más numerosas de bromeliáceas epífitas; solo en un cuadrante se encontró cambio en orden cronológico del número de individuos con una tendencia significativa. Esta estabilidad puede atribuirse al gran número de individuos a las poblaciones de este ecosistema.

Diferentes condiciones microclimáticas producidas por las distintas especies de árboles hospederos, no fueron relevantes en la respuesta de las bromeliáceas al clima, sin embargo, es necesario realizar estudios más cuidadosos para conocer el efecto de la especie de árbol hospedero sobre el comportamiento de las poblaciones de bromeliáceas. El estrato tampoco juega un papel importante en la respuesta de las bromeliáceas epífitas

al clima, sin embargo, igualmente cabe confirmar esto con estudios más profundos del microclima en la selva mediana subperennifolia e incluir en el análisis al estrato superior tratando de reducir el sesgo de observaciones causados por la abundancia de hojas.

Pese a que los resultados aquí obtenidos no se sostienen con un análisis robusto, debido a la escasez de datos, se logró corroborar que las bromeliáceas responden a las variaciones del clima anual, de forma que pueden ser usadas como bioindicadores de cambio climático. Esta respuesta puede ser muy variable, dependiendo del ecosistema en el que se encuentren y las especies de bromeliáceas epífitas. Por lo cual en los ecosistemas en los que el efecto del clima se ve muy influido por la vegetación o cuerpos de agua (matorral de duna costera y manglar chaparro), en el mediano plazo no se observa una respuesta al clima en las bromeliáceas, por lo cual se desaconseja su uso como bioindicadores climáticos en estos ecosistemas. Sin embargo, no se descarta que a largo plazo o ante cambios muy abruptos en el clima pueden presentar respuestas.

4.2 PERSPECTIVAS

Sería de gran utilidad ampliar las estaciones analizadas, de forma que se logre representar toda la región, permitiendo comparar las estaciones a los puntos de la península en los que se esperan los mayores cambios en las variables climáticas según la reducción de escala a los modelos de IPCC (2001) para la península de Yucatán en 2020, por Orellana *et al.* (2009).

Dada la fuerte influencia del microclima en los ecosistemas de duna costera y manglar chaparro, se recomienda, antes que el uso de datos climáticos colectados por estaciones cercanas a los sitios de estudio, tomar los datos del microclima del sitio, de forma que se logre representar mejor las condiciones en las que crecen las bromeliáceas.

El uso de bromeliáceas epífitas como bioindicadores climáticos es una propuesta muy nueva, que no ha sido llevada a la práctica y los datos disponibles para realizar los análisis son escasos. Esto, sumado a las adaptaciones de las bromeliáceas para tolerar condiciones adversas y la influencia del clima de años anteriores sobre su comportamiento al clima del año anterior al censo, dificultan ver claramente su respuesta al clima. Se espera aumentar la exactitud de los análisis conforme se añadan más

observaciones, se refine la toma de datos (mencionar si juveniles se encontraban en rama delgada o gruesa, el estado de los adultos, si presentaban inflorescencia los adultos) y se añada el efecto de los años anteriores al modelo.

Para lograr modelar de forma más precisa el crecimiento de las poblaciones de bromeliáceas epífitas es clave conocer de forma precisa la forma en la que ocurre su desarrollo y cómo este se ve afectado por las condiciones climáticas por lo que se plantean las siguientes preguntas respecto a las bromeliáceas epífitas que pueden ayudar a mejorar la modelación:

¿Cuánto tiempo permanecen viables sus semillas?

¿Cuál es su tasa de crecimiento en condiciones de estrés hídrico?

¿Cuál es su tasa de crecimiento en condiciones ambientales favorables?

¿Cuánto tiempo les toma alcanzar la etapa adulta y reproducirse?

¿Cuánto tiempo puede tolerar en sus diferentes estadios de desarrollo condiciones adversas?

¿Cómo se ve afectada su capacidad reproductiva debido a las condiciones ambientales?

Con base en los análisis de la relación de distintas variables climáticas con el cambio en de las poblaciones de bromeliáceas epífitas, se recomienda usar como medida de estrés térmico la temperatura máxima extrema sobre la temperatura media. Con temperatura y precipitación puede estimarse el estrés hídrico al que se ven sometidas las plantas, sin embargo, temperatura media representa el promedio de las temperaturas máxima y mínima diarias, representando a ambas de forma equivalente. Estos dos parámetros pueden tener distinta importancia en el estrés que experimentan las plantas, por lo que puede considerarse realizar la estimación del estrés hídrico únicamente con temperatura máxima. Es muy probable que esta tenga una mayor importancia que la mínima en el estrés hídrico, debido a que esta determina la cantidad de agua que se pierde por los estomas y la actividad fotosintética de las plantas, siendo mayor el efecto mientras más elevada sea la temperatura, mientras la temperatura mínima extrema en no se relaciona de forma tan directa con el estrés hídrico, y en la región, no desciende a niveles que causen estrés a las plantas. Se ha estudiado el efecto del rocío en las plantas, este se

encuentra fuertemente vinculado con la temperatura mínima, no obstante, su importancia se da debido a que contribuye a reducir el estrés hídrico en las bromeliáceas epífitas capaces de acceder a él durante la estación seca, teniendo poca importancia en la asimilación de carbono (Andrade, 2008).

REFERENCIAS

- Acebey, A., Gradstein, S. R., & Krömer, T. (2003). Species richness and habitat diversification of bryophytes in submontane rain forest and fallows of bolivia. *Journal of Tropical Ecology*, 19(1), 9-18. doi:10.1017/S026646740300302X
- Aguirre-Leon, E. (1992). Vascular epiphytes of Mexico: a preliminary inventory. *Selbyana*, 13, 72-76.
- Alexander, J. M; Chalmandrier, L; Lenoir, J; Burgess, T; Essl, F; Haider, S; Kueffer, C; McDougall, K; Milbau, A; Nuñez, M. A; Pauchard, A; Rabitsch, W; Rew, L. J; Sanders, N. J; Pellissier, L. 2017. Lags in the Response of Mountain Plant Communities to Climate Change. *Global Change Biology*, 24 (2), 563-579.
- Almeida, A. M., Castel-Branco, M. M., & Falcão, A. C. (2002). Linear regression for calibration lines revisited: Weighting schemes for bioanalytical methods. *Journal of Chromatography B: Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences*, 774(2), 215-222. doi:10.1016/S1570-0232(02)00244-1
- Anandhi, A., Srinivas, V. V., Nanjundiah, R. S., & Nagesh Kumar, D. (2008). Downscaling precipitation to river basin in India for IPCC SRES scenarios using support vector machine. *International Journal of Climatology*, 28(3), 401-420. doi:10.1002/joc.1529
- Andrade, J. L. (2003). Dew deposition on epiphytic bromeliad leaves: An important event in a mexican tropical dry deciduous forest. *Journal of Tropical Ecology*, 19(5), 479-488.
- Aragon-Moreno, A., Islebe, G., & Torrescano-Valle, N. (2012). A similar to 3800-yr, high-resolution record of vegetation and climate change on the north coast of the yucatan peninsula. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 178, 35-42. doi:10.1016/j.revpalbo.2012.04.002
- Aranda-Coello, J. M., Ochoa Ochoa, L. M. y Naranjo-Piñera, E. L. (2012). Evaluación de algunos efectos de la extracción tradicional de bromelias sobre la herpetofauna de los bosques de Chanal, Chiapas. *Acta Zoológica Mexicana*, 28 (3), 621-624.

- Ash, J. D; Givnish, T. J; Waller, D, M. 2016. Tracking Lags in Historical Plants Species' Shifts in Relation to Regional Climate Change. *Global Change Biology*, 23(3), 1305-1315.
- Asuero, A. G., & González, G. (2007). Fitting straight lines with replicated observations by linear regression. III. weighting data. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 37(3), 143-172. doi:10.1080/10408340701244615
- Orellana, R., Balam-Ku, M., Bañuelos-Robles, I., García, E., Gonzalez-Iturbide, J. A., Herrera-Cetina y Vidal-López, J. (1999). Cambio climático y las fluctuaciones en la península de Yucatán. En: *Atlas de Procesos Territoriales de Yucatán*. García de Fuentes, A., Córdoba y Ordóñez, J. y Chico Ponce de León, P. (eds.). Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán. pp 163-182.
- Balfagón, D., Zandalinas, S. I., & Gómez-Cadenas, A. (2019). High temperatures change the perspective: Integrating hormonal responses in citrus plants under co-occurring abiotic stress conditions. *Physiologia Plantarum*, 165(2), 183-197. doi:10.1111/ppl.12815
- Barre, J. P. G., Deletraz, G., Frayret, J., Pinaly, H., Donard, O. F. X., & Amouroux, D. (2015). Approach to spatialize local to long-range atmospheric metal input (Cd, Cu, Hg, Pb) in epiphytic lichens over a meso-scale area (pyrénées-atlantiques, southwestern france). *Environmental Science and Pollution Research*, 22(11), 8536-8548.
- Barve, N., Martin, C. E. y Peterson T. (2015). Climatic and flowering and fruiting phenology of an epiphytic plant. *AoB Plants an open-access journal for environmental and evolutionary plant biology*, 7, 1-10.
- Bennett, B. C. (1986). Patchiness, Diversity, and Abundance Relationship of an Epiphytic plants. *Selbyana*, 9 (1), 70-75.
- Benzing, D. H. (1986). The vegetative basis of vascular epiphytism. *Selbyana*, 9(1), 23-43.
- Benzing, D. H. (1987). Vascular Epiphytism: Taxonomic Participation and Adaptive Diversity. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 74(2), 183-204.

-
- Benzing, D. H. (1990). *Vascular epiphytes general biology and related biota*. Cambridge University Press, New York. pp. 26.
- Benzing, D. H. (2000). *Bromeliaceae. Profile of an adaptive radiation*. Cambridge University Press, Cambridge. pp. 6-15.
- Benzing, D. H. (2012). *Air Plants: Epiphytes and Aerial Gardens*. Comstock Publishing Associates a division of Cornell University Press, Ithaca, New York. pp. 15
- Bertrand, R; Lenoir, J; Piedallu, C; Dillon, G. R; De Ruffray, P; Vidal, C; Pierrat, J. C; Géout, J. C. 2011. *Chenages in Plant Community Composition Lag Behind climate warming in Lowland Forest*. *Nature*, 479(7374), 517-520.
- Birk, K., Lupo, A. R., Guinan P. Y Barbieri, C. E. 2010, *The interannual variability of midwestern temperatures and precipitation as related to the ENSO and PDO*. *Atmósfera*, 23 (2).
- Brönnimann, S. (2015). *Climatic changes since 1700*. 1a ed. Cham: Springer International Publishing.10.1007/978-3-319-19042-6
- Burkhardt, U. (1995). *Validation of the small-scale performance of a climate model*. *Climate Dynamics*, 11(5), 299-305. doi:10.1007/BF00211681
- Cach-Pérez, M. J. (2013). *Bromeliáceas epífitas de la península de Yucatán como indicadores de los posibles efectos del cambio climático Regional*. Tesisdoctorado, Centro de investigación científica de Yucatán. México. pp. 56-62.
- Cach-Pérez, M. J., Andrade, J. L., Chilpa-Galván, N., Tamayo-Chim, M., Orellana, R. y Reyes-García, C. (2013b). *Climatic and Structural Factors Influencing Epiphytic Bromeliad Community Assemblage along a Gradient of Water-Limited Environments in the Yucatan Peninsula, Mexico*. *Tropical Conservation Science*, 6 (2).
- Cach-Pérez, M. J., Andrade, J. L., & Reyes-García, C. (2018). *Morphophysiological plasticity in epiphytic bromeliads across a precipitation gradient in the Yucatan peninsula, Mexico*. *Tropical Conservation Science*, 11, 194008291878192. doi:10.1177/1940082918781926

- Calles, J. A. (2007). Bioindicadores terrestres y acuáticos para las microcuencas de los ríos Illangama y Alumbre, provincia Bolívar. ECOCIENCIA, USAID, SANREM CRSP. Watershed-based natural resource management in small-scale Agriculture: sloped areas of the Andean region. Disponible en https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/67132/2794_bioindicadores_jul07.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Caloiero, T., Coscarelli, R., Ferrari, E., & Mancini, M. (2010). Trend detection of annual and seasonal rainfall in Calabria (southern Italy). *International Journal of Climatology*, 31(1), 44-56. doi:10.1002/joc.2055
- Carbon Brief, 2017. Analysis: How well have climate models projected global warming? (Seleccionando (Seleccionando los encabezados el artículo) [Online] (Actualizado 5 septiembre 2017) Disponible en: <https://www.carbonbrief.org/analysis-how-well-have-climate-models-projected-global-warming> [Acceso 30 noviembre 2018].
- Cardelús, C. L., Colwell, R. K. y Watkins., J. E. (2006). Vascular Epiphyte distribution patterns: explaining the mid-elevation richness peak. *Journal of Ecology*, 94 (1), 144-156.
- Cascante-Marín, A., & Nivia-Ruíz, A. (2013). Neotropical flowering epiphyte diversity: Local composition and geographic affinities. *Biodiversity and Conservation*, 22(1), 113-125.
- Cavalier, J. y Goldstein, G. (1989). Mist and fog interception in elfin cloud forests in Colombia and Venezuela. *Journal of Tropical Ecology*, 5(3): 309-322.
- Cavazos, T., Salinas J. A., Martínez B., Colorado, G., De Grau, P., Prieto-González, R., Conde-Álvarez, A. C., Quintanar-Isaías, A., Santana-Sepúlveda, J. S., Romero-Centeno, R., Maya-Magaña, M. E., Rosario-de La Cruz, J. G., Ayala Enríquez, M. R., Carrillo Tlazazanatzá, H., Santiesteban, O. y Elena Bravo, M. (2013). Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la quinta comunicación nacional. Descargado de <https://www.researchgate.net/publication/321274898> Actualizacion de escenari

[os de cambio climatico para Mexico como parte de los productos de la Quinta Comunicacion Nacional](#)

- Cervantes, S. E., Graham, E. A., & Andrade, J. L. (2005). Light microhabitats, growth and photosynthesis of an epiphytic bromeliad in a tropical dry forest. *Plant Ecology*, 179(1), 107-118. doi:10.1007/s11258-004-5802-3
- Ceusters, J., Borland, A. M., Londers, E., Verdoodt, V., Godts, C., & M. P. De Proft. (2008). Diel shifts in carboxylation pathway and metabolite dynamics in the CAM bromeliad *aechmea 'maya'* in response to elevated CO₂. *Annals of Botany*, 102(3), 389.
- Chapin-III, F. S., Matson, P. A. y Vitousek, P. M. (2011). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. 2a ed. Springer. New York. pp. 17-18.
- Chilpa-Galván, N. C. (2015). Factores que influyen en el crecimiento de especies de *Tillandsia* (Bromeliaceae) en selvas secas de la Península de Yucatán. Tesis doctoral. Centro e Investigación Científica de Yucatán. México. pp. 102-103.
- Chilpa-Galván, N. C. 2011. Distribución y ecofisiología de bromeliáceas epífitas en dos selvas de la Península de Yucatán, México. Tesis maestría. Centro de Investigación Científica de Yucatán. México. pp 54-58.
- Chilpa-Galvan, N., Marquez-Guzman, J., Zotz, G., Echevarria-Machado, L., Andrade, J., Espadas-Manrique, C., & Reyes-García, C. (2018). Seed traits favouring dispersal and establishment of six epiphytic tillandsia (bromeliaceae) species. *Seed Science Research*, 28(4), 349-359. doi:10.1017/S0960258518000247
- Chilpa-Galván, N., Tamayo-Chim, M., Andrade, J. L., & Reyes-García, C. (2013). Water table depth may influence the asymmetric arrangement of epiphytic bromeliads in a tropical dry forest. *Plant Ecology*, 214(8), 1037-1048. doi:10.1007/s11258-013-0229-3
- Chilpa-Galván, N., Zotz, G., Sánchez-Fuente, G. J., Espadas-Manrique, C., Andrade, J. L., & Reyes-García, C. (2017). Drought, post-dispersal seed predation, and the establishment of epiphytic bromeliads (*tillandsia* spp.). *Biotropica*, 49(6), 770-773. doi:10.1111/btp.12482

- Conde, A., Gay, C., Estrada, F., Fernández, A., López, F., Lozano, M., Magaña, V., Martínez, B., Sánchez, O., Ramírez, J., Zavala, J. y Zermeño, D. (2008). Guía para la Generación de Escenarios de Cambio Climático a Escala Regional Primera versión. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Corona-López, A. M., Valencia-Díaz, S., Cortes-Anzures, B. O., Toledo-Hernández, V. H., & Flores-Palacios, A. (2017). Branch mortality influences phorophyte quality for vascular epiphytes. *Botany*, 95(7), 709-716. doi:10.1139/cjb-2017-0023.
- Coxson, D.S., and N.M. Nadkarni. 1995. Ecological Roles of Epiphytes in Nutrient Cycles of Forest Ecosystems, en: *Forest Canopies*. Academic Press. pp 495–543.
- Dawson, T. P., Jackson, S. T., House, J. I., Prentice, I. C., & Mace, G. M. (2011). Beyond predictions: Biodiversity conservation in a changing climate. *Science*, 332(6025), 53-58. doi:10.1126/science.1200303
- De la Fuente-Fernández, S.F. Series temporales, modelo ARIMA. Universidad Autónoma de Madrid. Disponible en: <http://www.estadistica.net/ECONOMETRIA/SERIES-TEMPORALES/modelo-arima.pdf> (Consultado 10 marzo 2019).
- De Lima, N., Beserra, G., Galvani, E. (2013). Mangrove microclimate: A case study from southeastern Brazil. *Earth Interactions*, 17(2), 1-16. doi:10.1175/2012EI000464.1
- Dergachev, V. A. (2017). Paleoclimate of the earth and solar activity. *Geomagnetism and Aeronomy*, 57(5), 524-528. doi:10.1134/S0016793217050073
- Deser, C., Phillips, A., Bourdette, V., & Teng, H. (2012). Uncertainty in climate change projections: The role of internal variability. *Climate Dynamics*, 38(3), 527-546. doi:10.1007/s00382-010-0977-x
- Díaz-Alvarez, E., Lindig-Cisneros, R., & de la Barrera, E. (2018). Biomonitoring of atmospheric nitrogen deposition: Potential uses and limitations. *Conservation Physiology*, 6(1), coy011. doi:10.1093/conphys/coy011
- Donovan, G. H., Jovan, S. E., Gatzolis, D., Burstyn, I., Michael, Y. L., Amacher, M. C., & Monleon, V. J. (2016). Using an epiphytic moss to identify previously unknown

- sources of atmospheric cadmium pollution. *Science of the Total Environment*, 559, 84-93.
- Drake, J. E., Tjoelker, M. G., A., Medlyn, B., Reich, P. B., Leigh, A., Pfautsch, F., Blackman, C., López, R., Aspinwall, M., Crous, K. Y., Duursma R. A., Kumarathunge., De Kauwe, M. G., Jiang, M., Nicotra, A. B., Tissue, D. T., Coat, B., Atkin, O. K., Barton, C. V. M. (2018). Trees tolerate an extreme heatwave via sustained transpirational cooling and increased leaf thermal tolerance. *Global Change Biology*, 24(6), 2390-2402. doi:10.1111/gcb.14037
- Duarte, D. H. S., Shinzato, P., Gusson, C. d. S., & Alves, C. A. (2015). The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance built density in a subtropical changing climate. *Urban Climate*, 14, 224-239. doi:10.1016/j.uclim.2015.09.006
- Duch J. (1988). La conformación territorial del estado de Yucatán: los componentes del medio físico. Universidad Autónoma de Chapingo. Mérida, Yucatán. pp 308-323.
- Fick, S.E. and R.J. Hijmans, 2017. Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*
- Flores-Guido, J. S., Durán-García, R. Y Ortiz-Días, J. J. (2010). Comunidades terrestres, en: Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán. Durán-García, R. Y Méndez-González, M. E. (eds.), Centro de Investigación Científica de Yucatán, México. pp. 125-129.
- Flores-Palacios, A. y García-Franco, J. G. (2006). The Relationship Between Tree Size and Epiphyte Species Richness: Testing Four Different Hypotheses. *Journal of Biogeography*, 33, 323-330.
- Francis, A., & Currie, D. (2003). A globally consistent Richness-Climate relationship for angiosperms. *The American Naturalist*, 161(4), 523-536. doi:10.1086/368223
- Fraser, L. H., Pither, J., Jentsch, A., Sternberg, M., Zobel, M., Askarizadeh, D., . . . Zupo, T. (2015). Worldwide evidence of a unimodal relationship between productivity and plant species richness. *Science*, 349(6245), 302-305. doi:10.1126/science.aab3916

- G. J. Di Cecco & T. C. Gouhier. (2018). Increased spatial and temporal autocorrelation of temperature under climate change. *Scientific Reports*: 8 (14850).
- García. E. y Hernández, M. (S.F.). Anomalías de la precipitación en la República Mexicana de 1921-1980, en: Orellana-Lanza, R. Y Vidal-Zepeda, R. (eds). (2005). *Enriqueta García Antología*. Centro de Investigación Científica de Yucatán. pp. 393-416.
- Garduño, R. 2004. ¿Qué es el efecto invernadero?, en: *Cambio climático: una visión desde México*. Martínez, J., Fernández-Bremauntz, A. Y Osnaya, P. (Comp.). Instituto Nacional de Ecología y Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. pp. 29-39.
- Giannini, A., Kushnir, Y., & Cane, M. A. (2000). Interannual variability of Caribbean rainfall, ENSO, and the Atlantic ocean. *Journal of Climate*, 13(2), 297-311. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<0297:IVOCRE>2.0.CO;2
- González-Salvatierra, C., Andrade, J. L., Escalante-Erosa, F., García-Sosa, K. y Peña-Rodríguez, L. M. (2009). Antioxidant Content in Two CAM Bromeliad Species as a Response to Seasonal Light Changes in a Tropical Dry Deciduous Forest. *Journal of Plant Physiology*, 167, 792-799.
- Graham, E. A., & Andrade, J. L. (2004). Drought tolerance associated with vertical stratification of two co-occurring epiphytic bromeliads in a tropical dry forest. *American Journal of Botany*, 91(5), 699-706.
- Granados-Sánchez, D., López-Ríos, G. F., Hernández-García, M. A., Sánchez-González, A. (2004). Ecología de las plantas epífitas. *Revista de Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9(2), 101-111.
- Griffiths, H., & Maxwell, K. (1999). In memory of C. S. Pittendrigh: Does exposure in forest canopies relate to photoprotective strategies in epiphytic bromeliads? *Functional Ecology*, 13(1), 15-23.
- Grime, J. P. (1973). Competitive Exclusion in Herbaceous Vegetation. *Nature*, 242(5396), 344–347. doi:10.1038/242344a0.

-
- Hemerson-Sellers, A. y Robinson, P. J. 1986. Contemporary climatology. 1ª ed. Longman. Singapore. pp 66-72.
- Hernández-Terrones L. M. 2017. El consejo de cuenca de la península de Yucatán, en: El Manejo del agua a través el tiempo en la península de Yucatán. M. Chávez-Guzmán (ed.). Universidad Autónoma de Yucatán, Secretaría de desarrollo Urbano y Medio Ambiente, Consejo de la Cuenca de La península de Yucatán, Rio Arronte Fundación.
- Hietz-Seifert, U., Hietz, P., & Guevara, S. (1996). Epiphyte vegetation and diversity on remnant trees after forest clearance in southern Veracruz, Mexico. *Biological Conservation*, 75(2), 103-111. doi:10.1016/0006-3207(95)00071-2
- Hyndman R, Athanasopoulos G, Bergmeir C, Caceres G, Chhay L, O'Hara-Wild M, Petropoulos F, Razbash S, Wang E, Yasmineen F (2019). forecast: Forecasting functions for time series and linear models. R package version 8.7, <http://pkg.robjhyndman.com/forecast>
- Hsu, R. C. y Wolf, J. H. (2013). A Novel Approach to Simulate Climate Change Impacts on Vascular Epiphytes: Case Study in Taiwan, en: Treetops at Risk Challenges of Global Canopy Ecology and Conservation, Lowman, M., Devy, S. y Ganesh, T. (eds.). Springer. New York. pp. 123-130.
- Imbach, P., Beardsley, M., Bouroncle, C., Medellín, C., Läderach, P., Hidalgo, H., Alfaro, E., Van Etten, J., Allan, R., Hemming, D., Stone, R., Hannah, L. y Donatti, C. I. (2017). Climate change, ecosystems and smallholder agriculture in Central America: an introduction to the special issue. *Climatic Change*, 141 (1), 1-12.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on

- Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Kapfer, J., Virtanen, R., & Grytnes, J. (2012). Changes in arctic vegetation on Jan Mayen island over 19 and 80 years. *Journal of Vegetation Science*, 23(4), 771-781. doi:10.1111/j.1654-1103.2012.01395.x
- Kennett, D. J., Breitenbach, S. F. M., Aquino, V. V., Asmerom, Y., Awe, J., Baldini, J. U. L., Bartlein, P., Culleton B. J., Ebert, C., Jazwa, C., Macri, M., Marwan. N., Polyak.V., Prufer, K. M., Ridley, H. E., Sodemann, H., Winterhalder, B., Haug, G. H. (2012). Development and disintegration of maya political systems in response to climate change. *Science*, 338(6108), 788-791. doi:10.1126/science.1226299
- Kessler, M. (2002). Species richness and ecophysiological types among Bolivian bromeliad communities. *Biodiversity and Conservation*, 11(6), 987-1010.
- Krömer, T., Kessler, M., y Gradstein, S. R. (2006). Vertical stratification of vascular epiphytes in submontane and montane forest of the Bolivian Andes: the importance of the understory. *Plant ecology*, 189, 261-278.
- Kularatne, K. I. A., & De Freitas, C. R. (2013). Epiphytic lichens as biomonitors of airborne heavy metal pollution. *Environmental and Experimental Botany*, 88, 24-32.
- Lira, J. (2007). Fauna fitotelmata en las bromelias *Aechmea fendleri* Andre y *Hohenbergia stellata* Schult del Parque Nacional San Esteban, Venezuela. *Revista Peruana de Biología*, 14 (1), 33.
- Llanes-Baeza, C. A. y González, N. E. (2002). Evaluación de los mejillones *Mytilopsis sallei* (Reclúz) y *Brachidontes exustus* (Linné) como bioindicadores de materia

-
- orgánica en la bahía de Chetumal, México. *Universidad y Ciencia*, 35 (18), 29-41. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=15403502>
- Lomolino, M. K., Riddle, B. R., Whittaker, R. J. y Brown J. (2010). *Biogeography*. Sinauer, Sunderland. pp. 313-357.
- Lozán, J. L; Graßl, H; Hupfer, P; Menzel, L; Schönwiese, C. D. 2007. *Global Change: Enough Water for All? Wissenschaftliche Auswertungen/GEO*. Hamburg. pp 185-199.
- Lüttge U. (2008). *Physiological Ecology of Tropical Plants*. 2ª ed. Springer. Berlin. pp. 165.
- Macip-Ríos, R. y Macip, R. F. (2013). Pago Por Servicios Ambientales (Ecosistémicos) En México ¿Una Alternativa Para La Conservación De La Biodiversidad Y El Desarrollo? *BIOCYT*. 6(20), 375-387.
- Magaña-Rueda, V. O. (2004). El cambio climático global: comprender el problema, en: cambio climático: una visión desde México, Martínez, J., Fernández-Bremauntz, A. y Osnaya, P. (eds). Instituto Nacional de Ecología. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Márdero, Sofía, Nickl, Elsa, Schmook, Birgit, Schneider, Laura, Rogan, John, Christman, Zachary, & Lawrence, Deborah. (2012). Sequías en el sur de la península de Yucatán: análisis de la variabilidad anual y estacional de la precipitación. *Investigaciones geográficas*, 78, 19-33. Recuperado en 29 de septiembre de 2017, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112012000200003&lng=es&tlng=es.
- Marshall, J., & Plumb, R. A. (2008). *Atmosphere, Ocean, and Climate Dynamics An introduction Text*. Elsevier. United States of America. p 140.
- Martínez-Meléndez, N., Pérez-Farrera, M. A. y Flores-Palacios, A. (2008). Estratificación Vertical y Preferencia de Hospedero de las Epífitas de un Bosque Nublado de las Epífitas Vasculares de un Bosque Nublado de Chiapas, México. *Revista Biología tropical*, 56 (4).

- Martínez-Ramos, M. (2008). 13 Grupos funcionales, en: Soberón, J., Halffter, G., Llorente-Bousquets (comp), Capital natural de México conocimiento actual de la biodiversidad. p. 366.
- Martorell, C., y Ezcurra, E. (2007). The narrow-leaf syndrome: A functional and evolutionary approach to the form of fog-harvesting rosette plants. *Oecologia*, 151(4), 561-573.
- Miller, A. A. 1975. Climatología. 4a ed. Omega S. A. Barcelona. pp 27-28.
- Mintzer, I. M; Kleiner, A; Leonard, A; Rosemarin y A; Pohjolainen, H. (eds.) 1992. Confronting Climate Change Risks, Implications and Responses. Cambridge University Press. Great Britain. pp 382.
- Mondragón, D. y Cruz-Ruiz, G. I. (2009). Presence of *Vaejovis franckei* in Epiphytic Bromeliads in Three Temperate Forest Types. *The Journal of Arachnology*, 37 (3), 371-372.
- Mondragón, D., Calvo-Irabien, L. M., & Benzing, D. H. (2004a). The basis for obligate epiphytism in *Tillandsia brachycaulos* (bromeliaceae) in a Mexican tropical dry forest. *Journal of Tropical Ecology*, 20(1), 97-104. doi:10.1017/S0266467403001007.
- Mondragón, D., Durán, R., Ramírez, I., & Valverde, T. (2004b). Temporal variation in the demography of the clonal epiphyte *Tillandsia brachycaulos* (bromeliaceae) in the Yucatán peninsula, Mexico. *Journal of Tropical Ecology*, 20(2), 189-200. doi:10.1017/S0266467403001287.
- Mosiño-Alemán, P. E. y García, E. (1981). The variability of rainfall in Mexico and its determination by means of the gamma distribution, en: Enriqueta García Antología. Orellana-Lanza, R. Y Vidal-Zepeda, R. (eds). Centro de Investigación Científica de Yucatán. pp 285-295.
- National Aeronautics and Space Administration, Earth Science/Applied Science Program. 2018. NASA Langley Research Center (LaRC) POWER. [Online] (Actualizado 8 agosto 2018). Disponible en: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. [Acceso 5 noviembre 2018].

-
- National Aeronautics and Space Administration, Goddard Institute for Space Studies, 2018, GISS Surface Temperature Analysis, Analysis Graphs and Plots. [Online] (Actualizado 13 noviembre 2018). Disponible en: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/>. [Acceso noviembre 14, 2018].
- National Oceanic & Atmospheric Administration. Earth System Research Laboratory. 2018. [on line]. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/data.html>. Consultado octubre 2018.
- Oliver, J. E. 1973. Climate and man's environment an introduction to applied climatology. 1a ed. John Wiley & Sons. United States of America. pp 7-14.
- Oliver, J. E. y Hidore, J. J. 2002. Climatology an atmospheric science. 2ª ed. Prentice Hall. United States. pp 105-121.
- Orellana, R., Espadas, C., Conde, C. y Gay, C. (2009). Atlas escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán. Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C. Mérida. p. 1.
- Orellana-Lanza, R. y Espadas-Manrique, C. 2017. El Papel de la Cubierta Vegetal en la Conservación del Agua en la Península de Yucatán, en: El Manejo del agua a través el tiempo en la península de Yucatán. M. Chávez-Guzmán (ed.). Universidad Autónoma de Yucatán, Secretaría de desarrollo Urbano y Medio Ambiente, Consejo de la Cuenca de La península de Yucatán, Rio Arronte Fundación.
- Orellana-Lanza, R., Hernández-Cerda, M.E. y C. Espadas-Manrique. 2011. Clima. En: Técnicas de Muestreo para Manejadores de Recursos Naturales, Segunda Edición; Edits: F. bautista-Zuñiga, J.L. palacio-Prieto y H. Delfín-González. ISBN: 978-607-02-2127-9, UNAM, México, D.F., pags. 189-225.
- Parmesan, C. (2006). Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. The Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 37, 637-669.

- Petrović, A. 2009. Revolution and Insolation How Milutin Milanković has Assembled the Puzzle of the Climate? *Scientific Technical Review*, 59: (1). Consultado marzo 14 de 2018 en URL: <http://www.vti.mod.gov.rs/ntp/rad2009/1-09/petr/petr.pdf>
- Pineda-García, F., Paz, H., y Meinzer, F. C. (2013). Drought resistance in early and late secondary successional species from a tropical dry forest: The interplay between xylem resistance to embolism, sapwood water storage and leaf shedding. *Plant, Cell & Environment*, 36(2), 405-418. doi:10.1111/j.1365-3040.2012.02582.x
- Pittendrigh, C. S. (1948). The bromeliad-anopheles-malaria complex in Trinidad. I-the bromeliad flora. *Evolution*, 2(1), 58-89. doi:10.1111/j.1558-5646.1948.tb02732.x .
- Porter, W. P., Sabo, J. L., Tracy, C. R., Reichman, O. J., & Ramankutty, N. (2002). Physiology on a landscape scale: Plant-animal interactions. *Integrative and Comparative Biology*, 42(3), 431-453. doi:10.1093/icb/42.3.431
- R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Rahmstorf, S., cazenave, A, church J. A.,. Hansen, J. E.,. Keeling, R. F., parker, D. E., Somerville, R. C. J. (2007). Recent Climate Observations Compared to Projections. *SCIENCE* (709).
- Rahmstorf, S., Foster, G., & Cazenave, A. (2012). Comparing climate projections to observations up to 2011. *Environmental Research Letters*, 7(4), 44035. doi:10.1088/1748-9326/7/4/044035
- Reyes-García, C. (2005). Niche differentiation in coexisting CAM bromeliads from the seasonally dry forest of Chamela (México). Tesis de doctorado, Universidad de Cambridge. UK.
- Reyes-García, C. Y Griffiths H. (2009). Ecophysiological studies of perennials of the Bromeliaceae family in a dry forest: strategies for survival, en: *Perspectives in Biophysical plant ecology A tribute to Park S. Nobel*. De la Barrera, E. y Smith W. K. pp 121-151.

-
- Reyes-García, C., Griffiths, H., Rincón, E., & Huante, P. (2008). Niche differentiation in tank and atmospheric epiphytic bromeliads of a seasonally dry forest: Niche differentiation in epiphytic bromeliads. *Biotropica*, 40(2), 168-175.
- Reyes-García, C., Mejía-Chang, M. Y Griffiths, H. (2012). High but not dry: diverse epiphytic bromeliad adaptations to exposure within a seasonally dry tropical forest community. *New Phytologist*, 193(3), 745-754.
- Ricklefs, R. E., Latham, R. E., & Qian, H. (1999). Global patterns of tree species richness in moist forests: Distinguishing ecological influences and historical contingency. *Oikos*, 86(2), 369-373.
- Rola, K., & Osyczka, P. (2014). Cryptogamic community structure as a bioindicator of soil condition along a pollution gradient. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(9), 5897-5910.
- Root, H. T., Geiser, L. H., Jovan, S., & Neitlich, P. (2015). Epiphytic macrolichen indication of air quality and climate in interior forested mountains of the pacific northwest, USA. *Ecological Indicators*, 53, 95-105.
- Rosado-Calderón, A. T., Tamayo-Chim, M., de la Barrera, E., Ramírez-Morillo, I. M., Andrade, J. L., Briones, O., & Reyes-García, C. (2018). High resilience to extreme climatic changes in the CAM epiphyte *Tillandsia utriculata* L. (bromeliaceae). *Physiologia Plantarum*, doi:10.1111/ppl.12805
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. 1a ed digital, Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad, México. pp. 200-214.
- Salisbury, F. B. y Ross, C. W. (1992). *Plant Physiology*, 4^a ed. Wadsworth, California. pp. 242-244.
- Sanger, J. C., & Kirkpatrick, J. B. (2017). Fine partitioning of epiphyte habitat within johansson zones in tropical australian rain forest trees. *Biotropica*, 49(1), 27-34. doi:10.1111/btp.12351
- Sáyago, R., Lopezaraiza-Mikel, M., Quesada, M., Álvarez-Añorve, M., Cascante-Marín, A., & Bastida, J. (2013). Evaluating factors that predict the structure of a

- commensalistic epiphyte-photosynthetic network. *Proceedings: Biological Sciences*, 280(1756), 1-9. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/23353373>.
- Scarano, F. R., Duarte, H. M., Rôcas, G., Barreto, S. M. B., Amado, E. F., Reinert, F., Wendt, T., Montivani, A., Lima, H. R. P. y Barros, C. F. (2002). Acclimation or stress symptom? an integrated study of intraspecific variation in the clonal plant *Aechmea bromeliifolia*, a widespread CAM tank-bromeliad. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 140(4), 391-401.
- Semenov, D. A. (2008). Biological contribution to global climate dynamics on a “geological” timescale. *Ecological Modelling*, 212(1), 171-177. 10.1016/j.ecolmodel.2007.10.031
- Shaftel, H., Jackson, R. y Callery, S. 2018. Global climate change vital signs of the planet [Online] (actualizado marzo 15, 2018). Disponible en: <https://climate.nasa.gov/resources/global-warming/> [Acceso 15 de marzo, 2018].
- Shaw, D. C. (2004). Vertical Organization of Canopy Biota, en: *Forest canopies*, Lowman, M. D. y Rinker, H. B. (eds.). Elsevier Academic Press. Burlington. pp. 73-101.
- Soberón, J. (2007). Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. *John Wiley & Sons, Ltd*, 10 (12), 1115-1123.
- Srivastava, T. 2015. A Complete Tutorial on Time Series Modeling in R. consultado mayo 2, 2018 en: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2015/12/complete-tutorial-time-series-modeling/>
- Steel, J.B. y Wilson, J. B. (2003). Which Is the Phyte in Epiphyte? *Folia Geobotanica*, 38 (1), 97-99.
- Timm, O., & Diaz, H. F. (2009). Synoptic-statistical approach to regional downscaling of IPCC twenty-first-century climate projections: Seasonal rainfall over the Hawaiian Islands. *Journal of Climate*, 22(16), 4261-4280. doi:10.1175/2009JCLI2833.1
- Toivonen, J. M., Suominen, L., Gonzales-Inca, C. A., Trujillo Paucar, G., Jones, M. M., & Overbeck, G. (2017). Environmental drivers of vascular and non-vascular

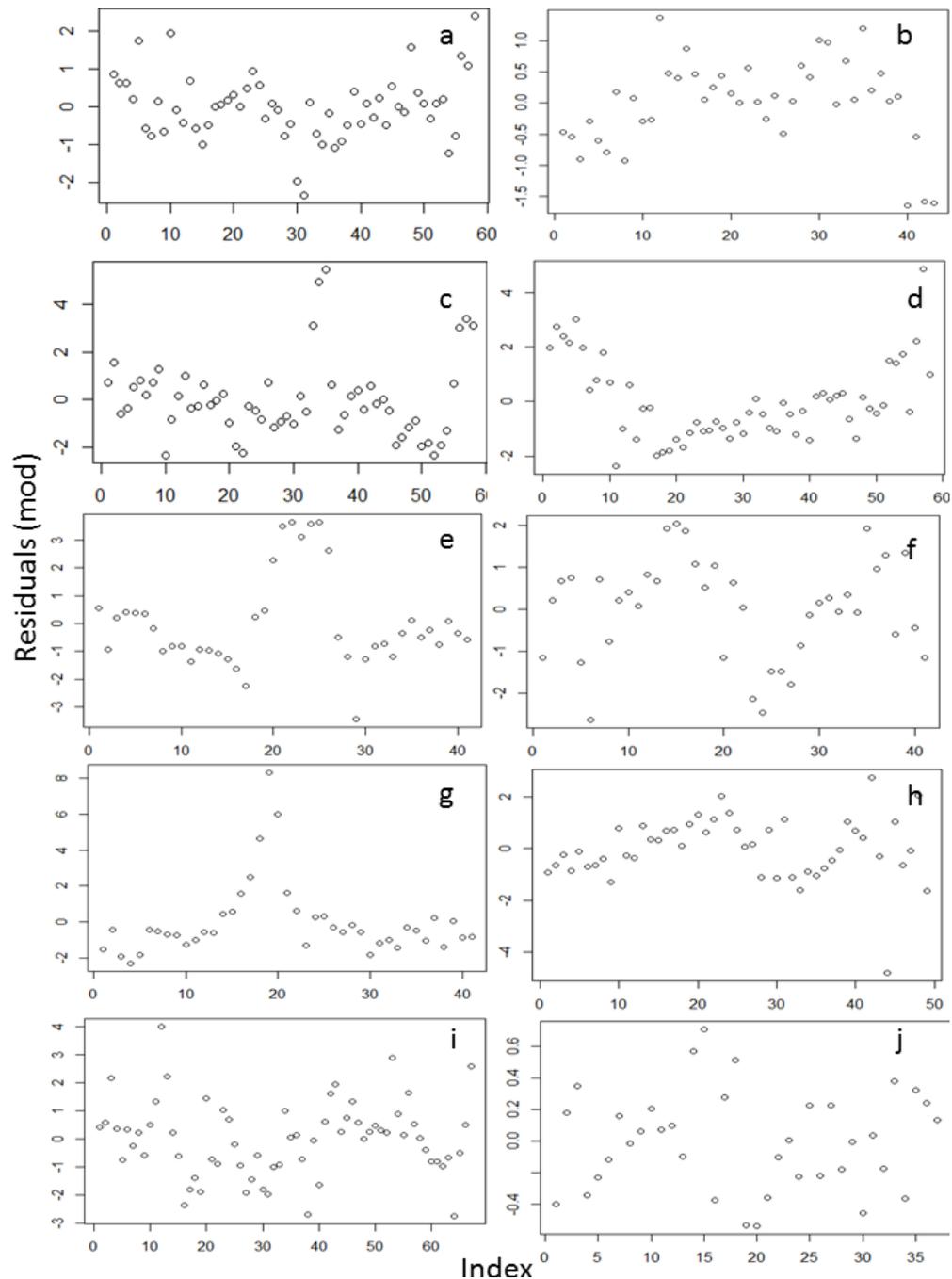
- epiphyte abundance in tropical pre-montane cloud forests in northern Peru. *Journal of Vegetation Science*, 28(6), 1198-1208. doi:10.1111/jvs.12577
- Townsend, C. R; Begon, M. y Harper, H. L. 2002. *Essentials of Ecology*. Blackwell Publishing. 2ª ed. Italy. pp 366-395.
- Van-Straalen, N. M. (1998). Evaluation of bioindicator systems derived from soil arthropod communities. *Applied Soil Ecology*, 9 (1-3), 429-437.
- Wagner, K., Bogusch, W. y Zotz G. (2013). The role of the regeneration niche for the vertical stratification of vascular epiphytes. *Journal of Tropical Ecology*, 29 (4), 277-290.
- Walter, H. (1977). *Zonas de Vegetación y Clima*. Omega, Barcelona.
- Whyte, I. 2013. *A Dictionary of Environmental History*. I. B. TAURIS. London. p. 171.
- Wise, E. K. (2015). Tropical pacific and northern hemisphere influences on the coherence of pacific decadal oscillation reconstructions: Climate Influences On Pdo Inter-Reconstruction Coherence. *International Journal of Climatology*, 35(1), 154-160. doi:10.1002/joc.3966
- World Meteorological Organization. 2018. FAQs – climate. [on line] (actualizado 2019). Disponible en <https://public.wmo.int/en/about-us/FAQs/faqs-climate>. [Acceso febrero 5, 2019].
- World Meteorological Organization. 2015. *Technical Regulations, Volume I - General Meteorological Standards and Recommended Practices*. [on line] (Actualizado 2018) Disponible en https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=14073#.XRJ7L-gzbIV [Acceso junio 25, 2019].
- Zaldivar-Jimenez, A., Herrera-Silveira, J., Teutli-Hernández, C., Hernandez-Zaavedra, R. Y Caamal-Sosa. (2010). Manglares, en: *Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán*. Durán-García, R. Y Méndez-González, M. E. (eds.), Centro de Investigación Científica de Yucatán, México. pp. 138-139.

- Zotz, G. (2005). Vascular epiphytes in the temperate zones: A review. *Plant Ecology*, 176(2), 173-183.
- Zotz, G. (2016). *Plants on Plants – The Biology of Vascular Epiphytes*. Springer, Switzerland. pp. 1.
- Zotz, G. y Bader, M. Y. (2009). Epiphytic Plants in a Changing World-Global: Change Effects on Vascular and Non-Vascular Epiphytes, en: *Progress in Botany*, Lüttge, U., Beyschlag, W., Büdel, B. y Francis, D. (Eds). Springer. Heidelberg. pp. 147-149.
- Zotz, G., Bogusch, W., Hietz, P., & Ketteler, N. (2010). Growth of epiphytic bromeliads in a changing world: The effects of CO₂, water and nutrient supply. *Acta Oecologica*, 36(6), 659-665.
- Zotz, G., y Andrade, J. L. (1998). Water relations of two co-occurring epiphytic bromeliads. *Journal of Plant Physiology*, 152(4-5), 545-554.

APÉNDICES

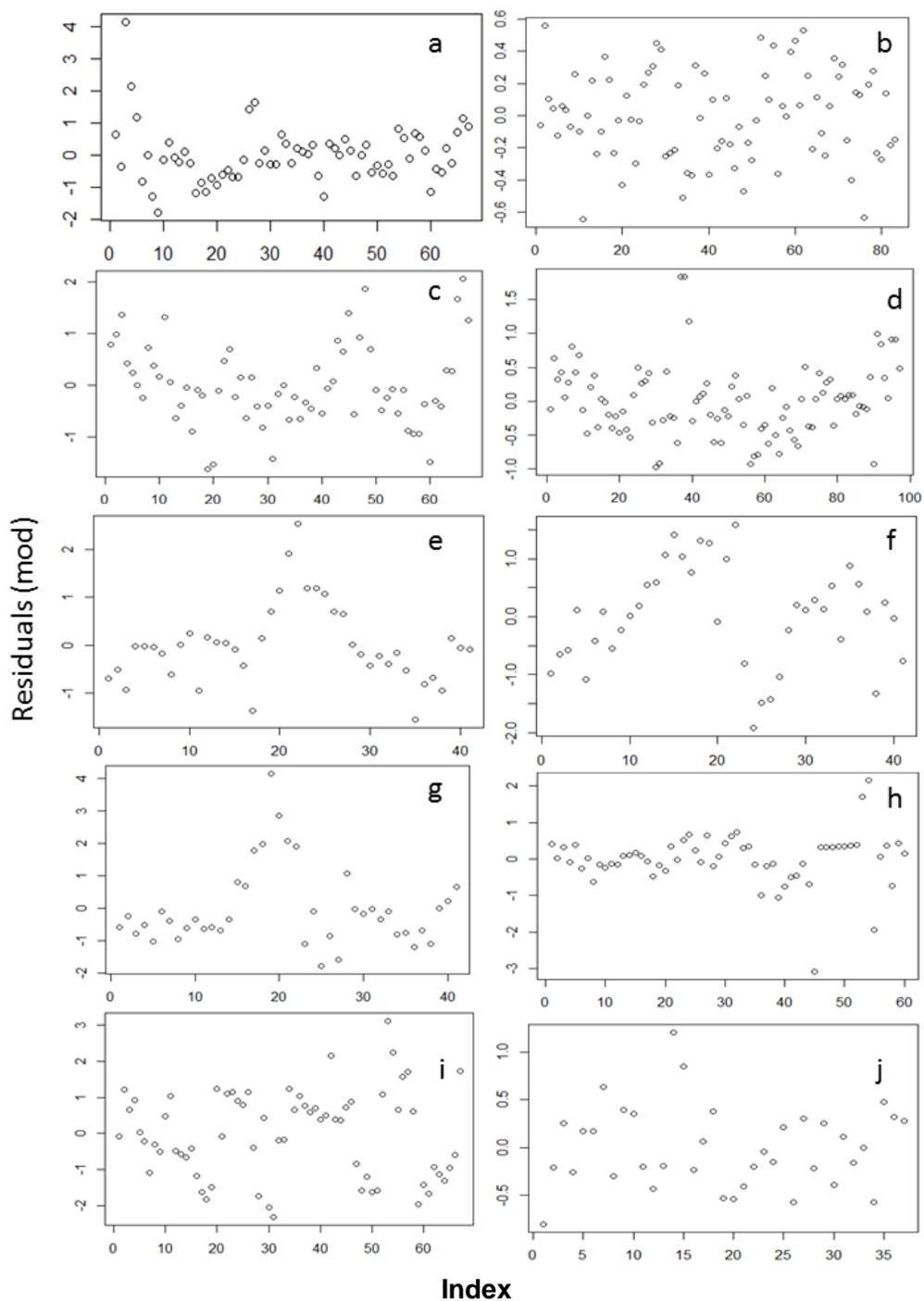
APÉNDICE 1. RESIDUOS DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS ANALIZADAS

RESIDUOS DE TEMPERATURAS MÍNIMAS EXTREMAS



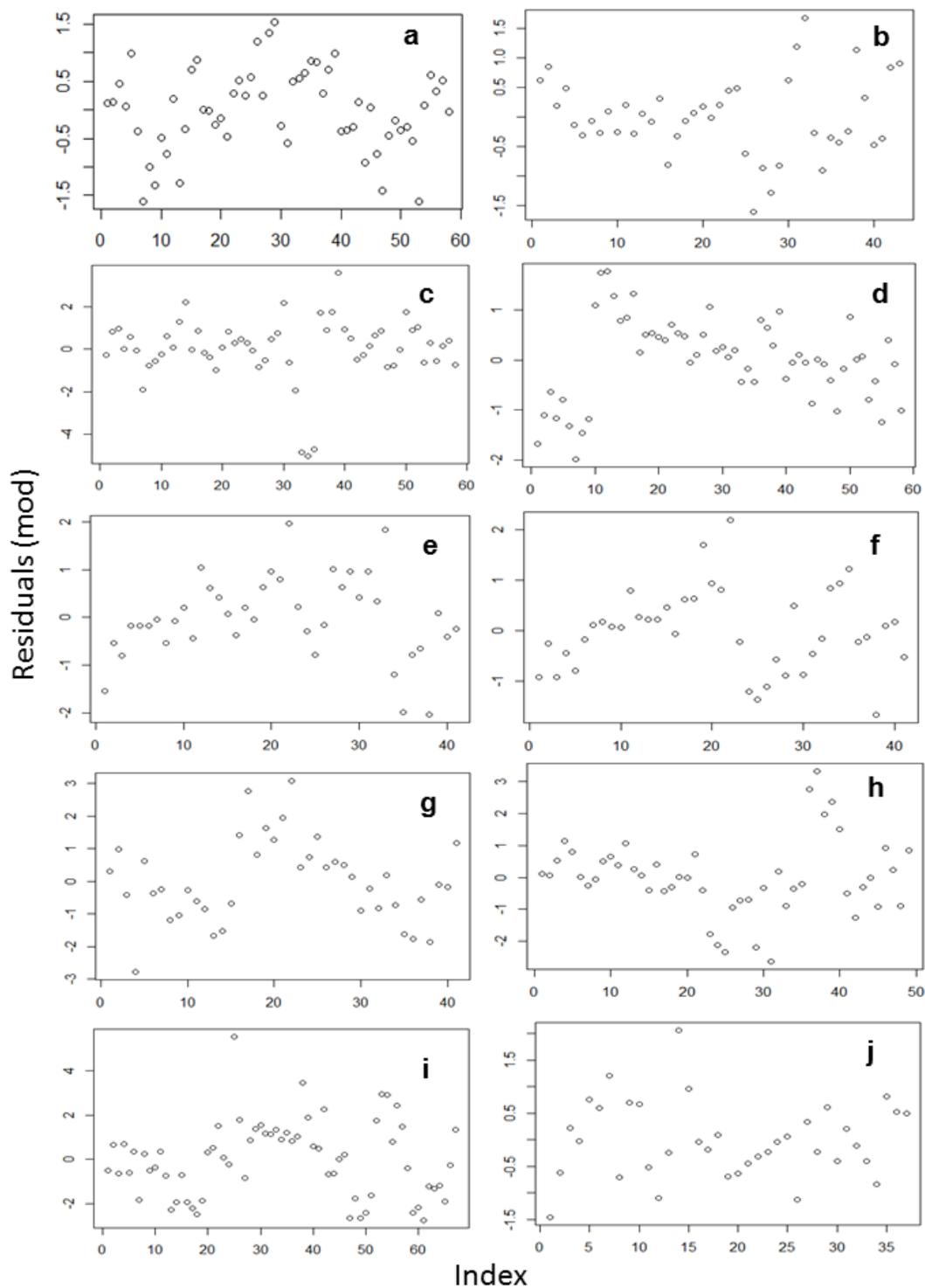
Temperaturas mínimas extremas. Residuos del promedio anual de las temperaturas mínimas extremas mensuales de a) Celestun, b) Progreso, c) Telchac, d) Mérida, e) Akil, f) Oxcutzcab, g) Tabi, h) Tekax, i) Zoh-Laguna, j) Calakmul satellite

RESIDUOS DE TEMPERATURAS MEDIAS



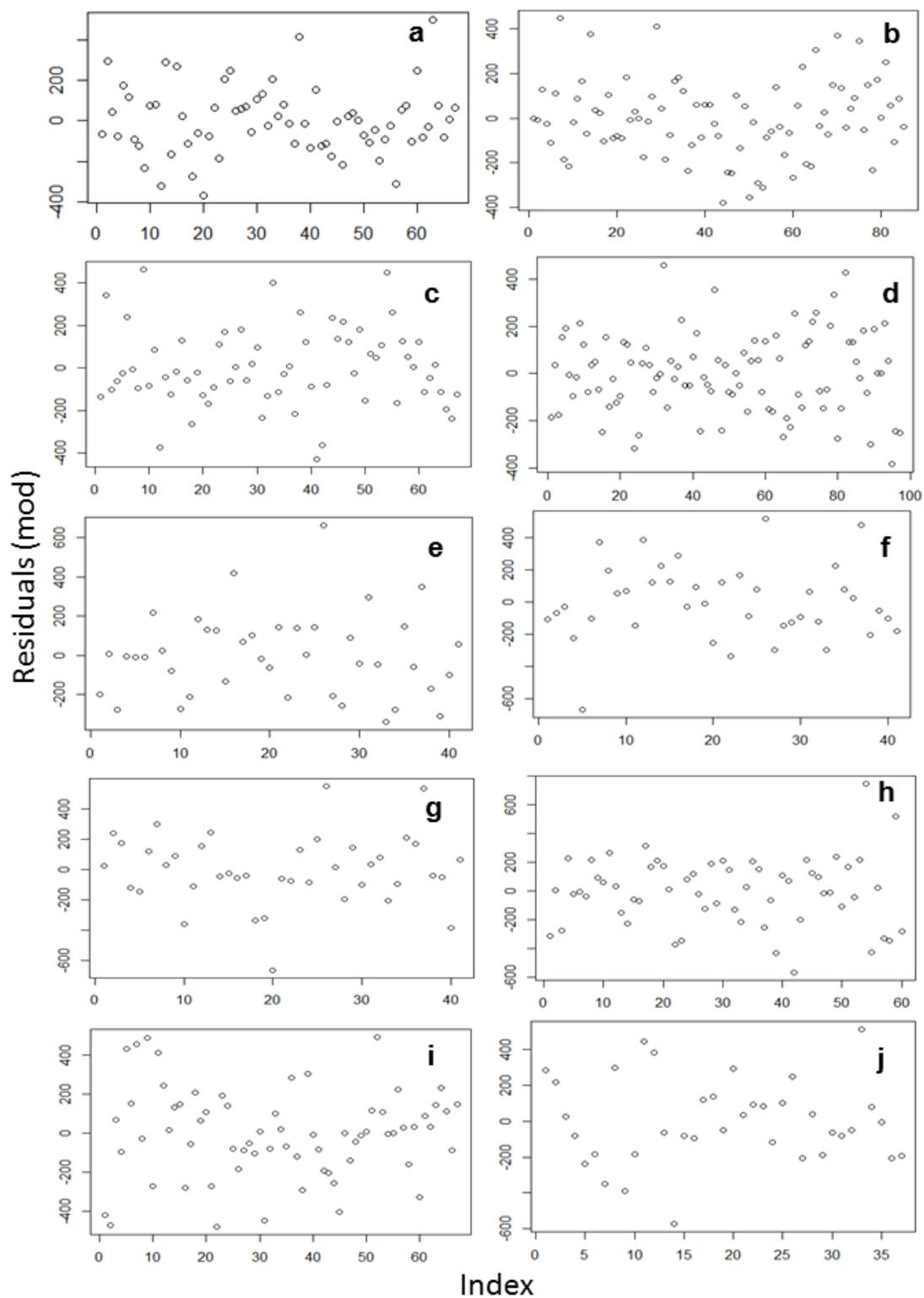
Residuos del promedio anual de las temperaturas medias mensuales de a) Celestun, b) Progreso, c) Telchac, d) Mérida, e) Akil, f) Oxcutzcab, g) Tabi, h) Tekax, i) Zoh-Laguna, j) Calakmul satélite.

RESIDUOS DE TEMPERATURA MÁXIMA EXTREMA



Residuos del promedio anual de las temperatura promedio anual de máximas extremas mensuales de a) Celestun, b) Progreso, c) Telchac, d) Mérida, e) Akil, f) Oxcutzcab, g) Tabi, h) Tekax, i) Zoh-Laguna, j) Calakmul satélite.

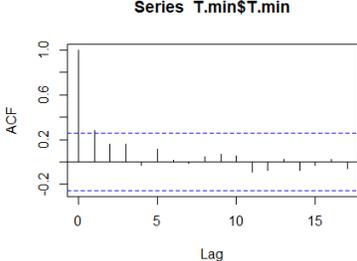
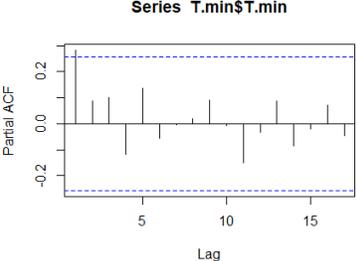
RESIDUOS DE PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL



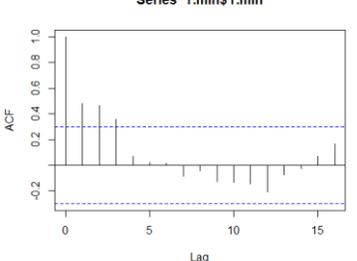
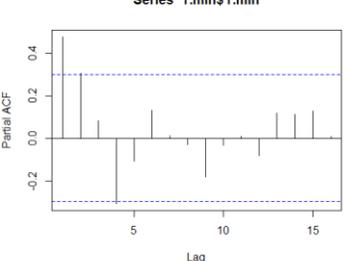
Residuos de la precipitación total anual de a) Celestun, b) Progreso, c) Telchac, d) Mérida, e) Akil, f) Oxcutzcab, g) Tabi, h) Tekax, i) Zoh-Laguna, j) Calakmul satélite.

APÉNDICE 2.1. CORRELOGRAMAS Y SALIDAS DE MODELOS ARIMA DEL PROMEDIO ANUAL DE LAS TEMPERATURAS MÍNIMAS EXTREMAS MENSUALES

Celestún

Auto-correlación	Auto-correlación parcial
 <p style="text-align: center;">Series T.min\$T.min</p>	 <p style="text-align: center;">Series T.min\$T.min</p>
<p>Series: Temperatura mínima ARIMA(1,0,0) with non-zero mean Coefficients: ar1 mean 0.3359 17.1348 s.e. 0.1354 0.1618 sigma^2 estimated as 0.6977: log likelihood=-70.9 AIC=147.8 AICc=148.24 BIC=153.98 Training set error measures: ME RMSE MAE MPE MAPE MASE ACF1 Training set -0.004180454 0.8207274 0.6166263 -0.2524195 3.598796 0.8244901 -0.03243034</p>	

Progreso

Auto-correlación	Auto-correlación parcial
 <p style="text-align: center;">Series T.min\$T.min</p>	 <p style="text-align: center;">Series T.min\$T.min</p>
<p>Series: Temperatura mínima ARIMA(1,1,0) Coefficients: ar1 -0.5723 s.e. 0.1225 sigma^2 estimated as 0.3237: log likelihood=-35.6 AIC=75.21 AICc=75.51 BIC=78.68 Training set error measures: ME RMSE MAE MPE MAPE MASE ACF1 Training set -0.07313179 0.555588 0.4162469 -0.4296533 2.051184 0.7510684 -0.1420792</p>	

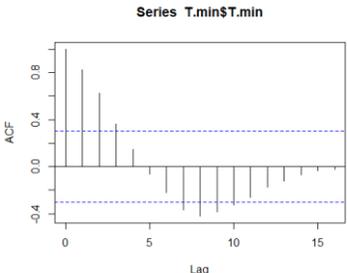
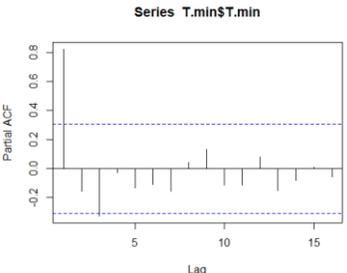
Telchac

Auto-correlación	Auto-correlación parcial
<p>Series: Temperatura mínima ARIMA(2,0,0) with non-zero mean Coefficients: ar1 ar2 mean 0.8331 -0.2463 17.3966 s.e. 0.1270 0.1339 0.3830 sigma^2 estimated as 1.552: log likelihood=-93.85 AIC=195.71 AICc=196.46 BIC=203.95 Training set error measures: ME RMSE MAE MPE MAPE MASE ACF1 Training set 0.002753779 1.212956 0.9040607 -0.4389244 5.142641 0.9224008 -0.005528805</p>	

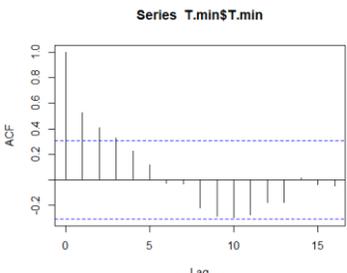
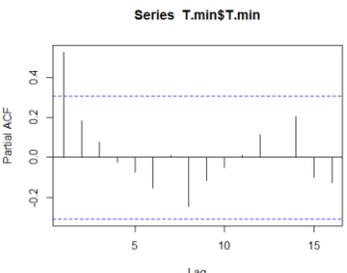
Mérida

Auto-correlación	Auto-correlación parcial
<p>Series: Temperatura mínima ARIMA(2,1,0) Coefficients: ar1 ar2 -0.3928 -0.6243 s.e. 0.1179 0.1190 sigma^2 estimated as 0.8917: log likelihood=-77.12 AIC=160.24 AICc=160.69 BIC=166.37 Training set error measures: ME RMSE MAE MPE MAPE MASE ACF1 Training set -0.01922849 0.9195521 0.6849451 -0.3389588 4.224718 0.8090182 -0.01916142</p>	

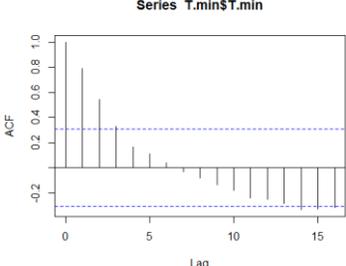
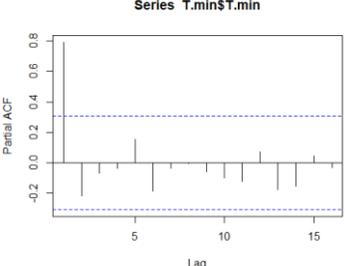
Akil

Auto-correlación	Auto-correlación parcial
	
<p>Series: Temperatura mínima ARIMA(1,0,0) with non-zero mean Coefficients: ar1 mean 0.8042 15.0835 s.e. 0.0846 0.6942</p> <p>sigma^2 estimated as 0.9557: log likelihood=-56.74 AIC=119.49 AICc=120.14 BIC=124.63</p> <p>Training set error measures: ME RMSE MAE MPE MAPE MASE ACF1 Training set 1.333632e-05 0.9534706 0.6971487 -0.4119677 4.686796 0.9938615 0.1445062</p>	

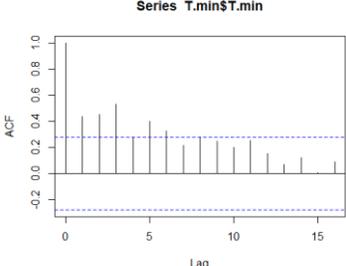
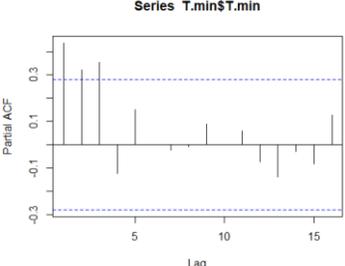
Oxkutzcab

Auto-correlación	Auto-correlación parcial
	
<p>Series: Temperatura mínima ARIMA(1,0,0) with non-zero mean Coefficients: ar1 mean 0.5440 13.8924 s.e. 0.1321 0.3544</p> <p>sigma^2 estimated as 1.181: log likelihood=-60.74 AIC=127.48 AICc=128.13 BIC=132.62</p> <p>Training set error measures: ME RMSE MAE MPE MAPE MASE ACF1 Training set 0.006746355 1.059983 0.8544256 -0.5562186 6.241005 0.9199474 -0.09057261</p>	

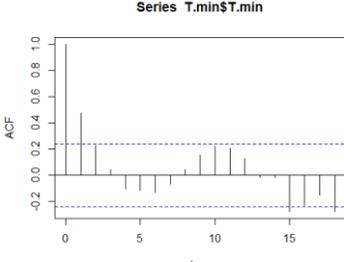
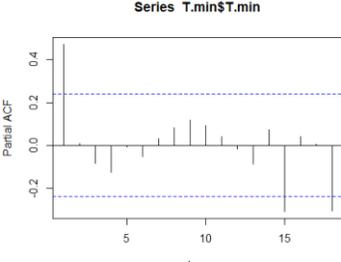
Tabi

Auto-correlación	Auto-correlación parcial
	
<p>Series: Temperatura mínima ARIMA(1,0,0) with non-zero mean Coefficients: ar1 mean 0.7864 13.2139 s.e. 0.0904 0.8464</p> <p>sigma^2 estimated as 1.646: log likelihood=-67.85 AIC=141.71 AICc=142.35 BIC=146.85</p> <p>Training set error measures: ME RMSE MAE MPE MAPE MASE ACF1 Training set 0.02510257 1.251396 0.8648903 -0.5041829 6.135637 0.9141285 0.1899861</p>	

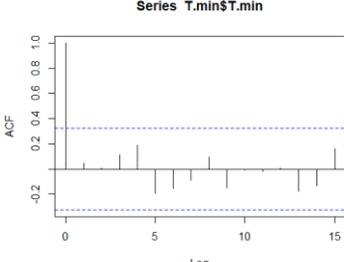
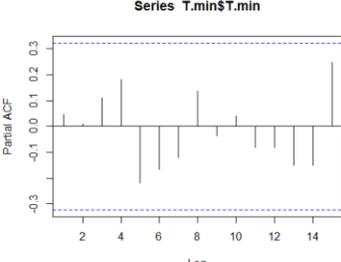
Tekax

Auto-correlación	Auto-correlación parcial
	
<p>Series: Temperatura mínima ARIMA(0,1,1) with drift Coefficients: ma1 drift -0.8385 -0.0664 s.e. 0.1163 0.0328</p> <p>sigma^2 estimated as 1.589: log likelihood=-78.82 AIC=163.63 AICc=164.18 BIC=169.24</p> <p>Training set error measures: ME RMSE MAE MPE MAPE MASE ACF1 Training set 0.02991619 1.221518 0.8457825 -0.6988372 6.209437 0.7730991 -0.02479921</p>	

Zoh-Laguna

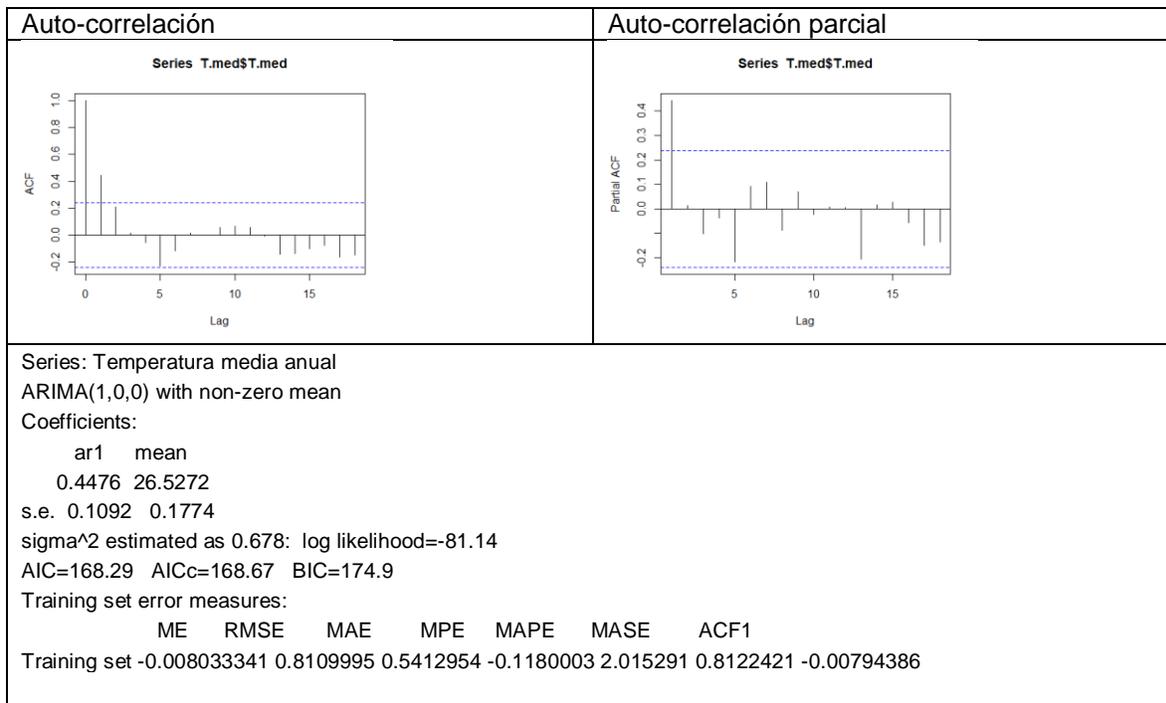
Auto-correlación	Auto-correlación parcial
	
<p>Series: Temperatura mínima ARIMA(1,0,0) with non-zero mean Coefficients: ar1 mean 0.4969 13.5756 s.e. 0.1088 0.2760</p> <p>sigma^2 estimated as 1.365: log likelihood=-104.61 AIC=215.22 AICc=215.6 BIC=221.84</p> <p>Training set error measures: ME RMSE MAE MPE MAPE MASE ACF1 Training set -0.002122854 1.15063 0.8930642 -0.7382696 6.634441 0.8412422 0.007920384</p>	

Calakmul satelitales

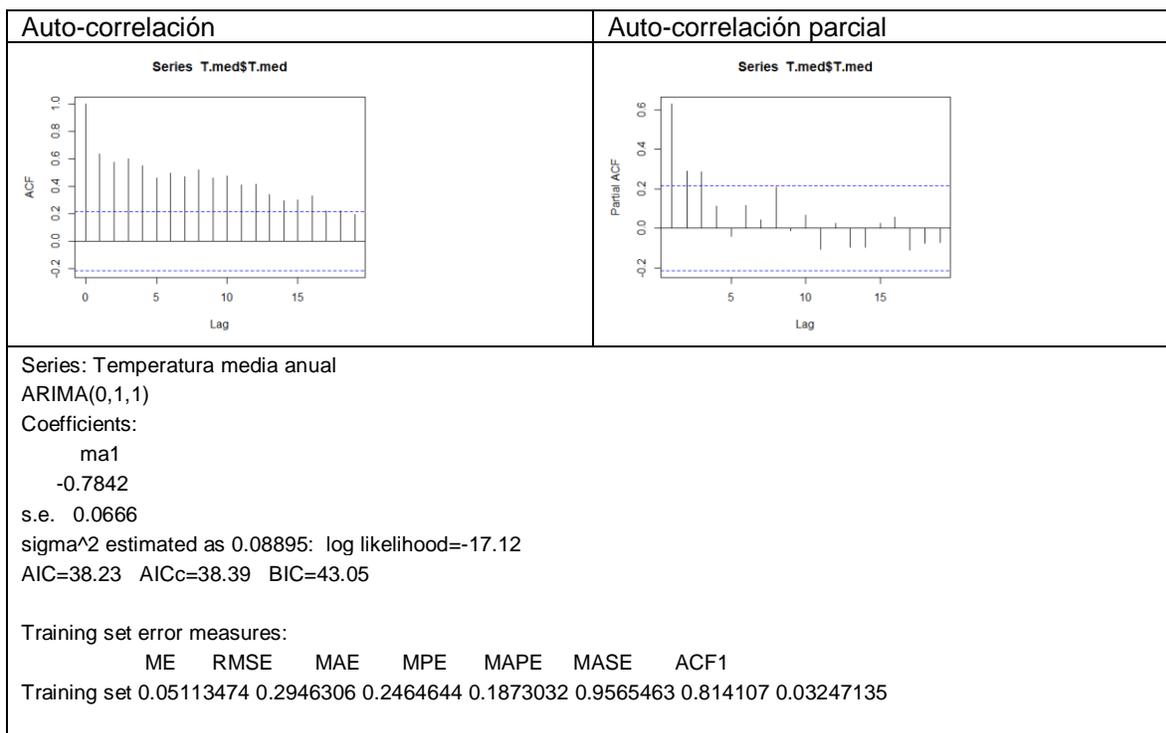
Auto-correlación	Auto-correlación parcial
	
<p>Series: Temperatura mínima ARIMA(0,0,0) with non-zero mean Coefficients: mean 15.3577 s.e. 0.0536</p> <p>sigma^2 estimated as 0.1091: log likelihood=-11.01 AIC=26.02 AICc=26.37 BIC=29.24</p> <p>Training set error measures: ME RMSE MAE MPE MAPE MASE ACF1 Training set -1.216564e-13 0.3258303 0.2655783 -0.04495181 1.728876 0.7593978 0.04729718</p>	

Apéndice 2.2. Correlogramas y salidas de modelos ARIMA de la temperatura media anual

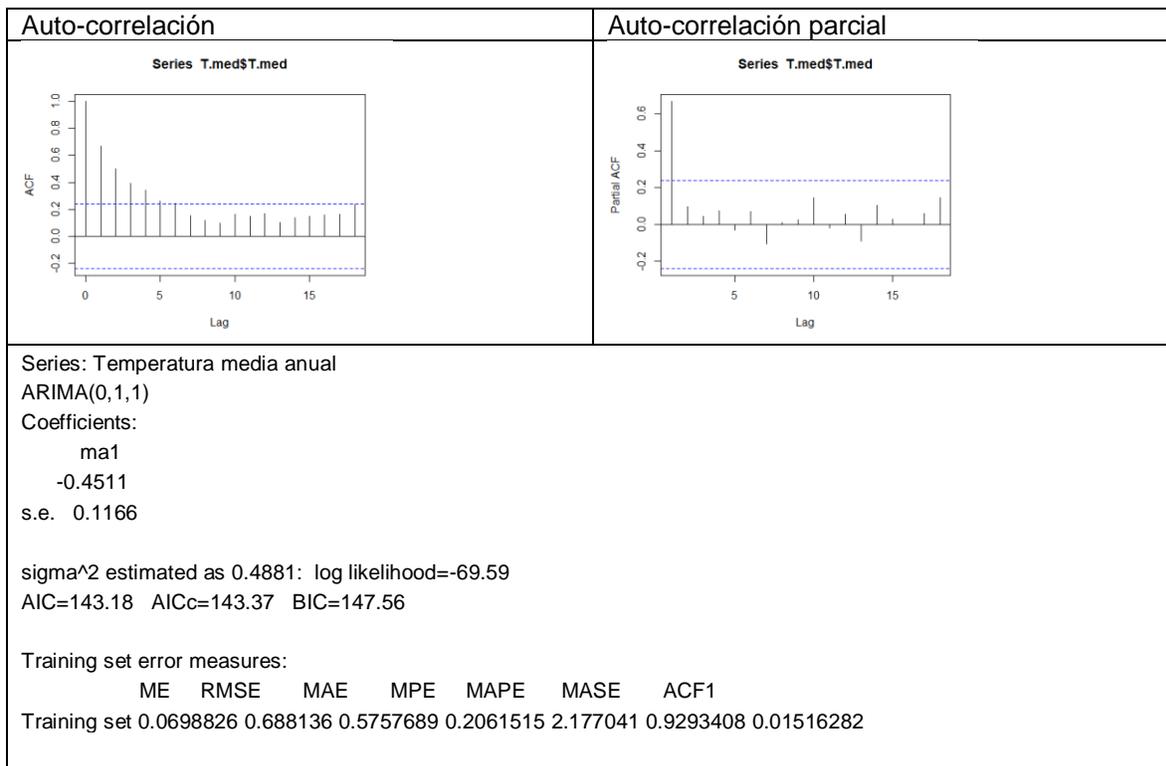
Celestún



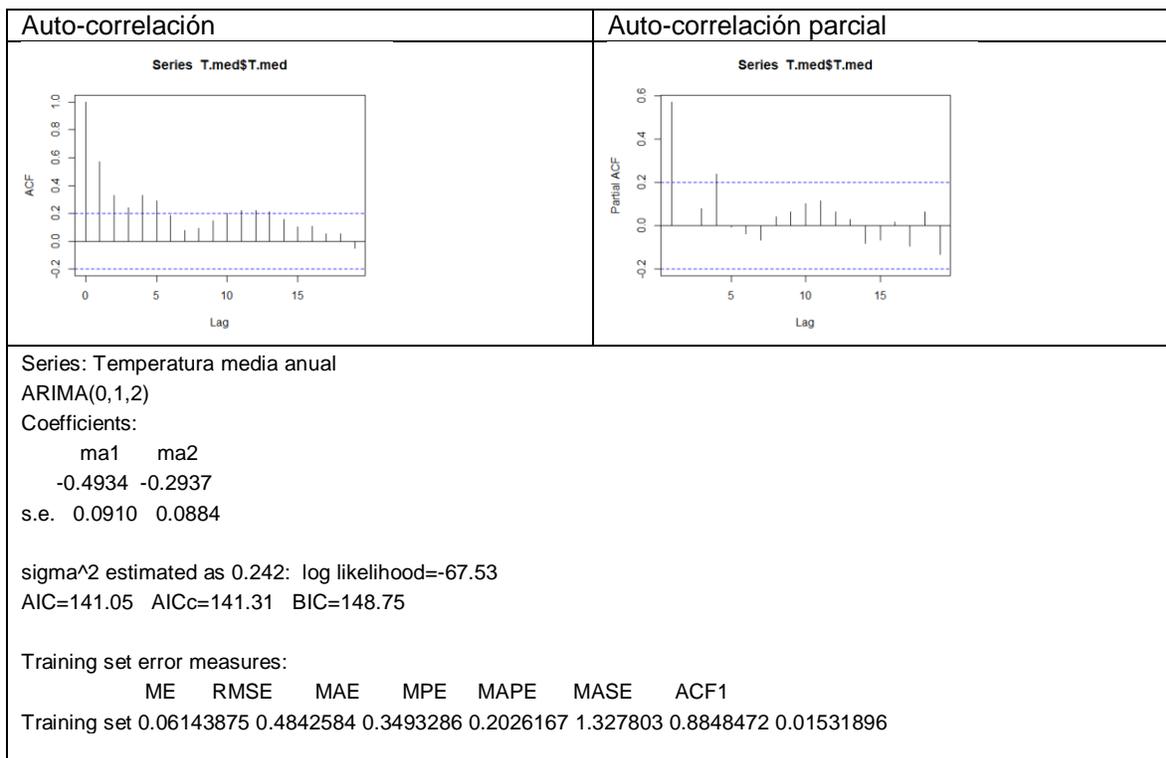
Progreso



Telchac



Mérida



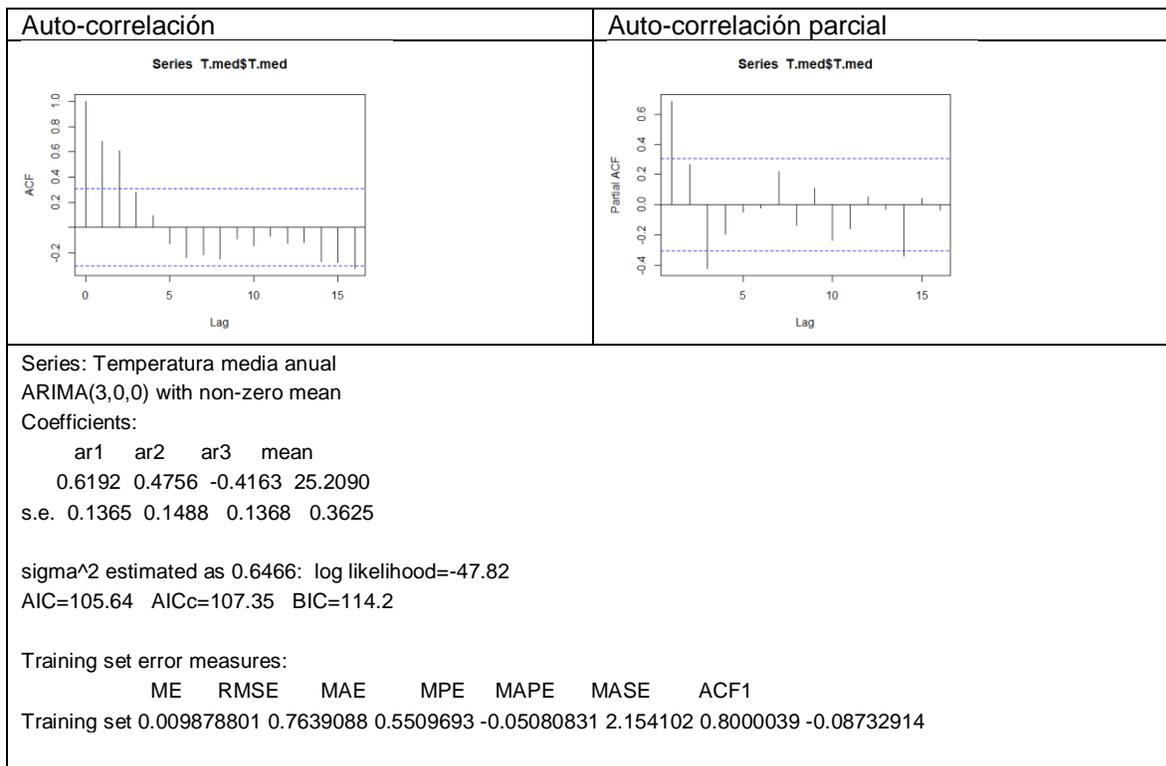
Akil

Auto-correlación	Auto-correlación parcial
<p>Series: Temperatura media anual ARIMA(1,0,0) with non-zero mean Coefficients: ar1 mean 0.7138 25.9560 s.e. 0.1052 0.2917</p> <p>sigma^2 estimated as 0.3354: log likelihood=-35.11 AIC=76.23 AICc=76.88 BIC=81.37</p> <p>Training set error measures: ME RMSE MAE MPE MAPE MASE ACF1 Training set 0.01806624 0.5648464 0.4276279 0.0223933 1.642689 0.9402999 -0.05287161</p>	

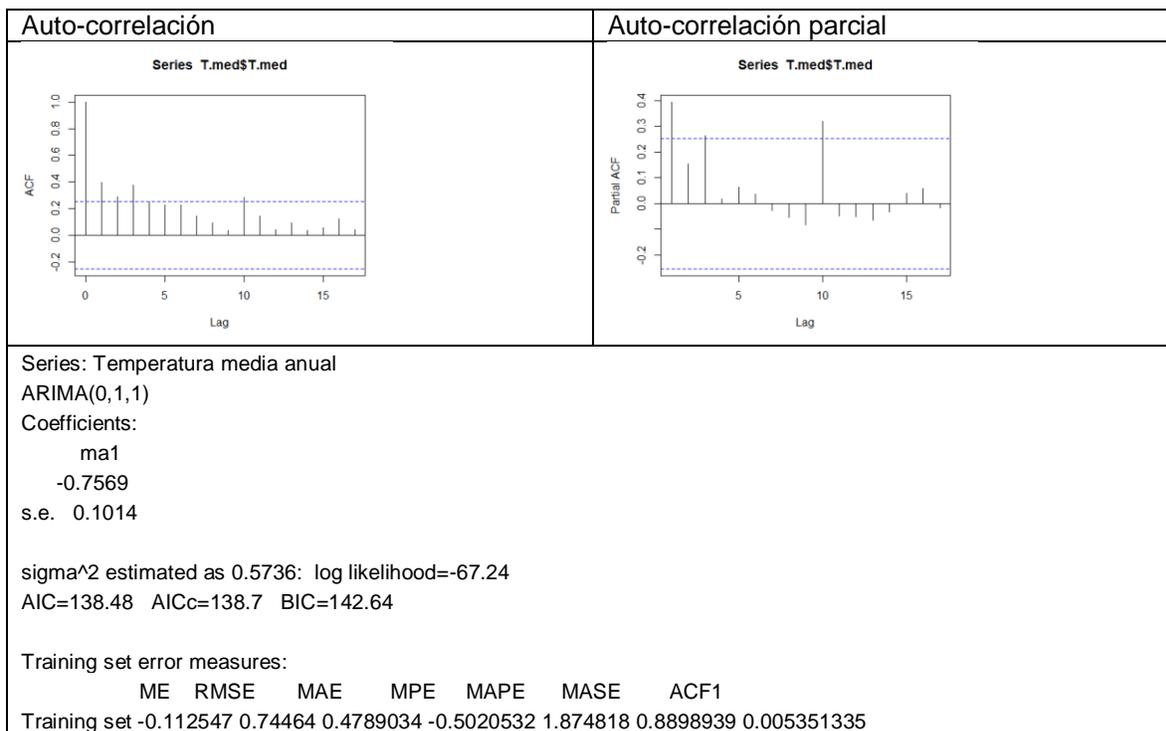
Oxkutzcab

Auto-correlación	Auto-correlación parcial
<p>Series: Temperatura media anual ARIMA(1,0,0) with non-zero mean Coefficients: ar1 mean 0.6129 25.8351 s.e. 0.1236 0.2715</p> <p>sigma^2 estimated as 0.5064: log likelihood=-43.44 AIC=92.87 AICc=93.52 BIC=98.01</p> <p>Training set error measures: ME RMSE MAE MPE MAPE MASE ACF1 Training set 0.01123784 0.6940177 0.5572311 -0.0300551 2.165132 0.9437862 0.001110444</p>	

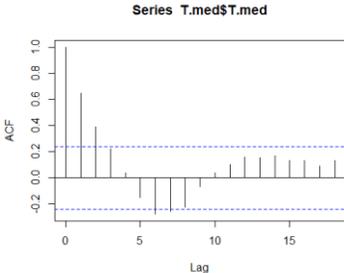
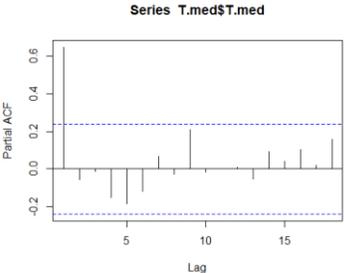
Tabi



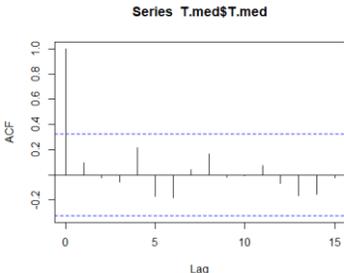
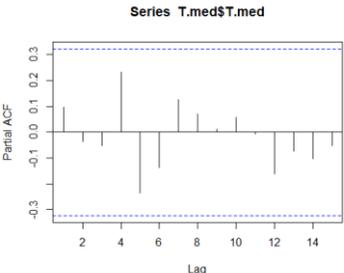
Tekax



Zoh-Laguna

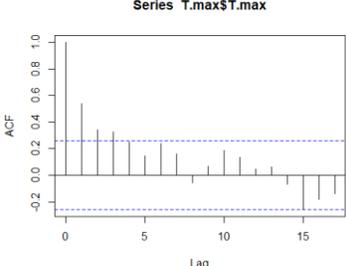
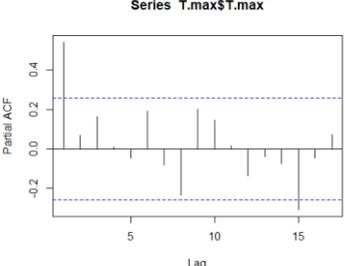
Auto-correlación	Auto-correlación parcial														
															
<p>Series: Temperatura media anual ARIMA(0,1,0)</p> <p>sigma² estimated as 1.236: log likelihood=-100.63 AIC=203.26 AICc=203.32 BIC=205.45</p> <p>Training set error measures:</p> <table border="0"> <tr> <td>ME</td> <td>RMSE</td> <td>MAE</td> <td>MPE</td> <td>MAPE</td> <td>MASE</td> <td>ACF1</td> </tr> <tr> <td>Training set -0.001866542</td> <td>1.103246</td> <td>0.8043711</td> <td>-0.1133406</td> <td>3.341007</td> <td>0.9855307</td> <td>-0.1242217</td> </tr> </table>		ME	RMSE	MAE	MPE	MAPE	MASE	ACF1	Training set -0.001866542	1.103246	0.8043711	-0.1133406	3.341007	0.9855307	-0.1242217
ME	RMSE	MAE	MPE	MAPE	MASE	ACF1									
Training set -0.001866542	1.103246	0.8043711	-0.1133406	3.341007	0.9855307	-0.1242217									

Calakmul satelitales

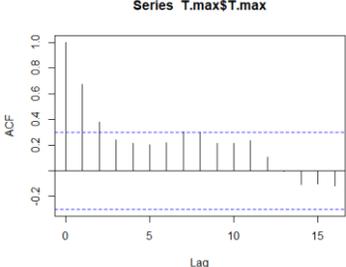
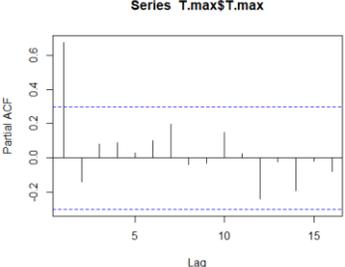
Auto-correlación	Auto-correlación parcial														
															
<p>Series: Temperatura media anual ARIMA(0,0,0) with non-zero mean</p> <p>Coefficients:</p> <p>mean 24.7296</p> <p>s.e. 0.0704</p> <p>sigma² estimated as 0.1882: log likelihood=-21.1 AIC=46.19 AICc=46.55 BIC=49.41</p> <p>Training set error measures:</p> <table border="0"> <tr> <td>ME</td> <td>RMSE</td> <td>MAE</td> <td>MPE</td> <td>MAPE</td> <td>MASE</td> <td>ACF1</td> </tr> <tr> <td>Training set 5.703546e-14</td> <td>0.4279445</td> <td>0.3487655</td> <td>-0.0296581</td> <td>1.406481</td> <td>0.7560553</td> <td>0.09701263</td> </tr> </table>		ME	RMSE	MAE	MPE	MAPE	MASE	ACF1	Training set 5.703546e-14	0.4279445	0.3487655	-0.0296581	1.406481	0.7560553	0.09701263
ME	RMSE	MAE	MPE	MAPE	MASE	ACF1									
Training set 5.703546e-14	0.4279445	0.3487655	-0.0296581	1.406481	0.7560553	0.09701263									

Apéndice 2.3. Correlogramas y salidas de modelos ARIMA del promedio anual de las temperaturas mínimas extremas mensuales

Celestún

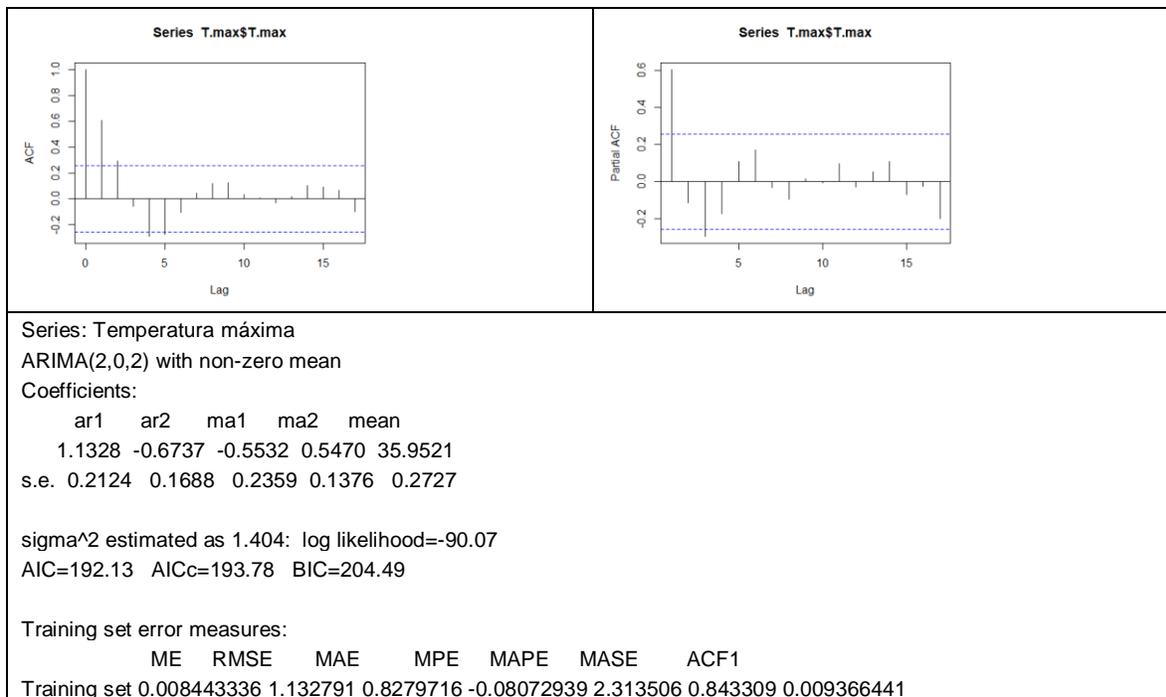
Auto-correlación	Auto-correlación parcial
	
<p>Series: Temperatura máxima ARIMA(0,1,2) Coefficients: ma1 ma2 -0.4543 -0.2517 s.e. 0.1300 0.1376 sigma^2 estimated as 0.4471: log likelihood=-57.21 AIC=120.43 AICc=120.88 BIC=126.55</p> <p>Training set error measures: ME RMSE MAE MPE MAPE MASE ACF1 Training set -0.0642078 0.6511249 0.5194852 -0.2071935 1.458178 0.8975923 -0.01506453</p>	

Progreso

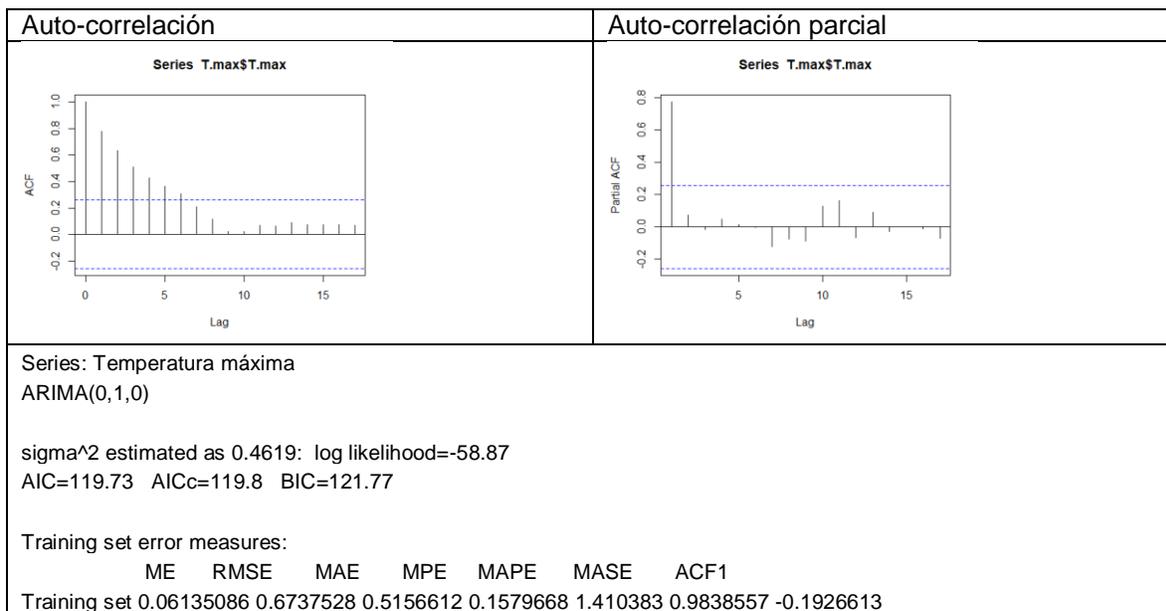
Auto-correlación	Auto-correlación parcial
	
<p>Series: Temperatura máxima ARIMA(0,1,0) sigma^2 estimated as 0.447: log likelihood=-42.68 AIC=87.37 AICc=87.47 BIC=89.1</p> <p>Training set error measures: ME RMSE MAE MPE MAPE MASE ACF1 Training set 0.05676163 0.6607292 0.5139322 0.1492256 1.557195 0.9781791 -0.0434348</p>	

Telchac

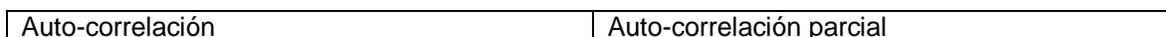
Auto-correlación	Auto-correlación parcial
------------------	--------------------------

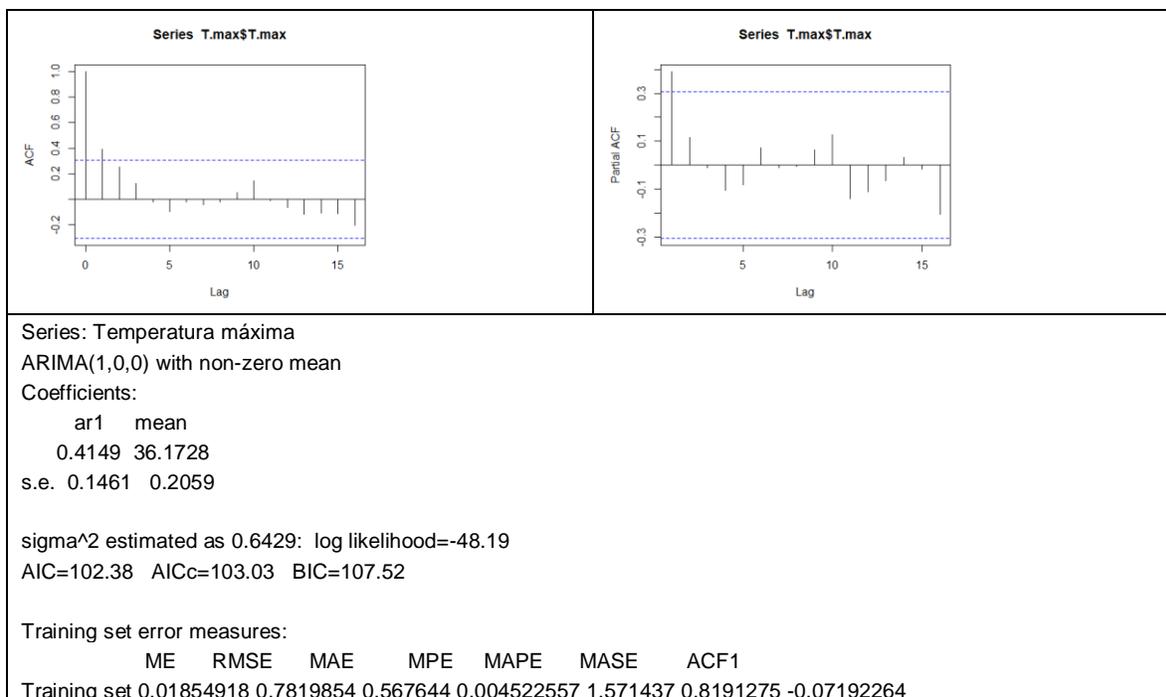


Mérida

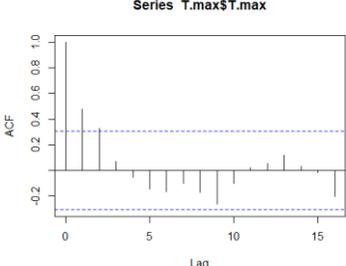
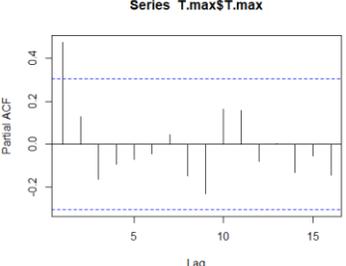


Akil

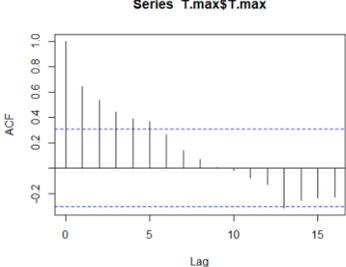
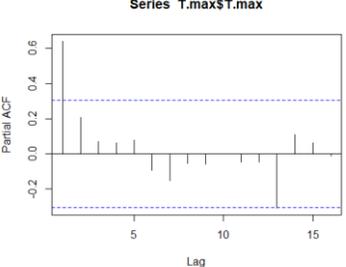




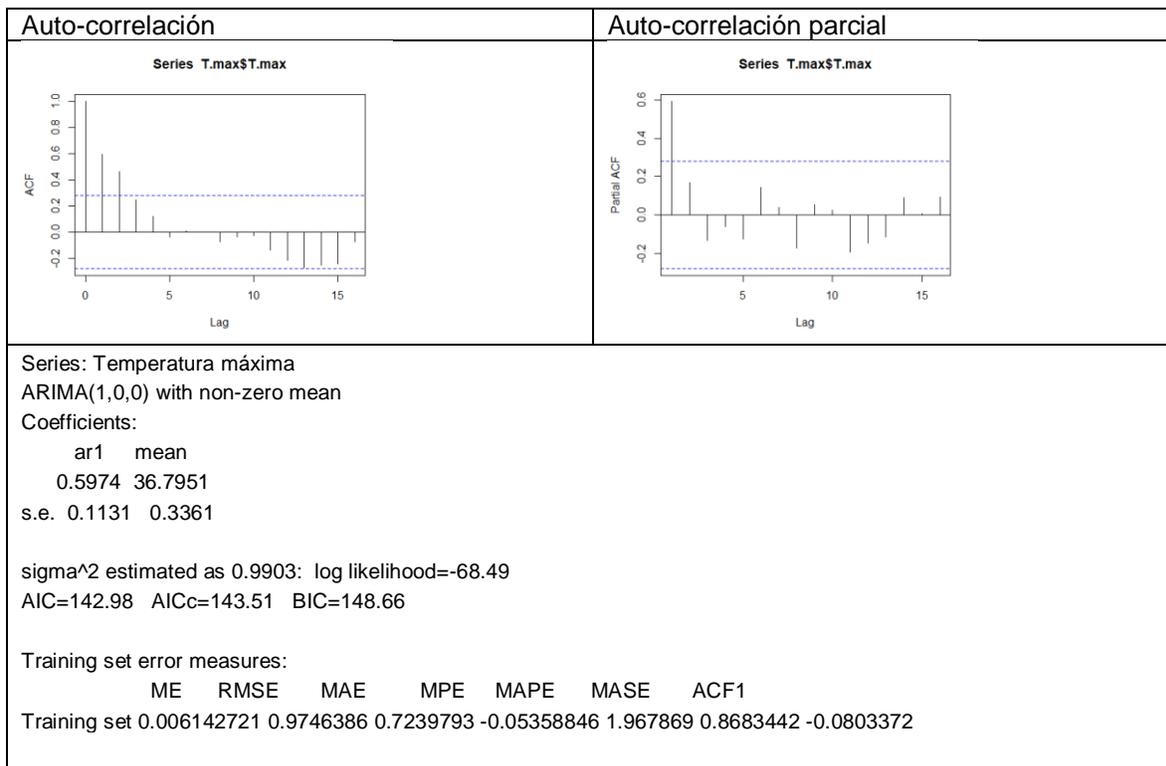
Oxkutzcab

Auto-correlación	Auto-correlación parcial
	
<p>Series: Temperatura máxima ARIMA(1,0,0) with non-zero mean Coefficients: ar1 mean 0.4839 36.5293 s.e. 0.1366 0.2112</p> <p>sigma^2 estimated as 0.5321: log likelihood=-44.35 AIC=94.7 AICc=95.35 BIC=99.84</p> <p>Training set error measures: ME RMSE MAE MPE MAPE MASE ACF1 Training set 0.01157196 0.7114617 0.5428884 -0.006180852 1.484921 0.8886357 -0.05911282</p>	

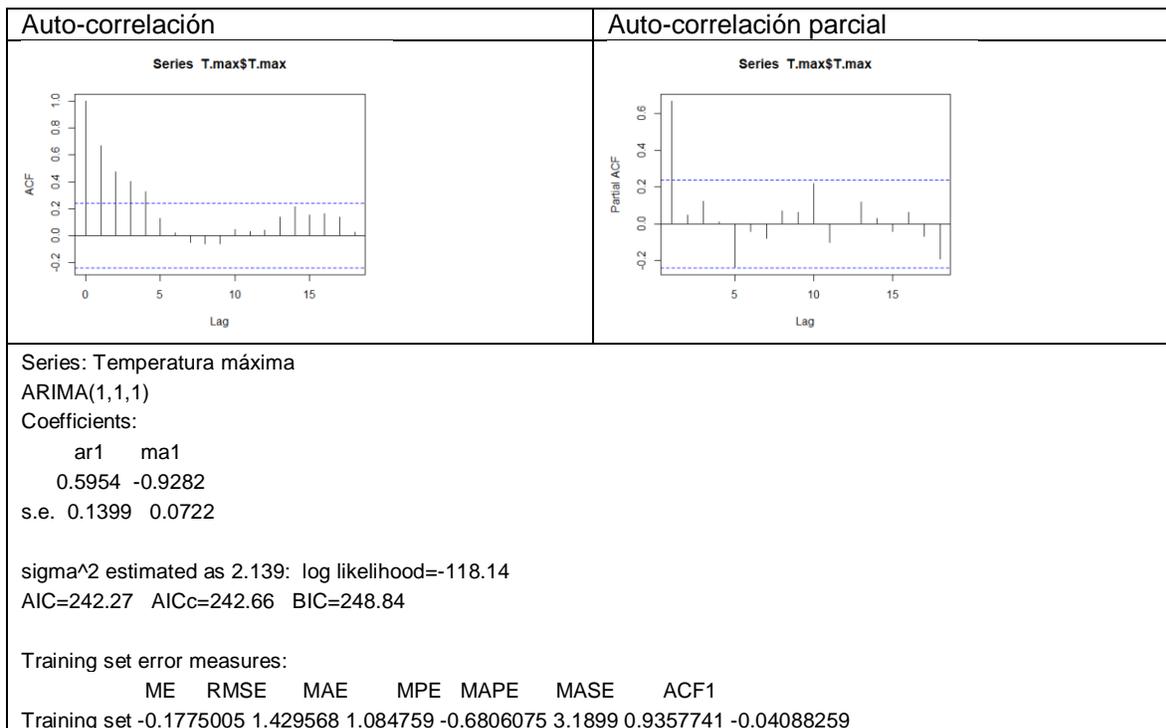
Tabi

Auto-correlación	Auto-correlación parcial
	
<p>Series: Temperatura máxima ARIMA(0,1,1) Coefficients: ma1 -0.4540 s.e. 0.1569</p> <p>sigma^2 estimated as 1.261: log likelihood=-61 AIC=125.99 AICc=126.32 BIC=129.37</p> <p>Training set error measures: ME RMSE MAE MPE MAPE MASE ACF1 Training set 0.1271717 1.095003 0.8233389 0.2833649 2.29681 0.8724121 0.01521866</p>	

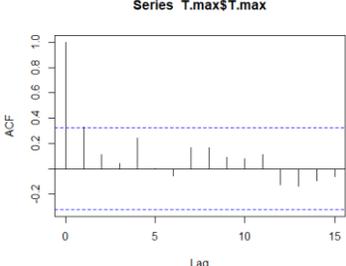
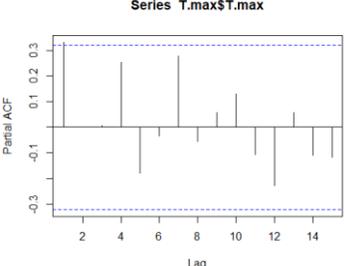
Tekax



Zoh-Laguna

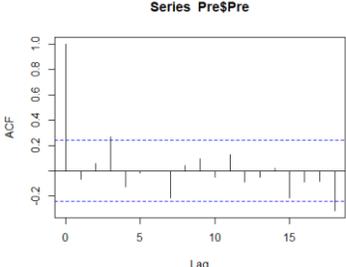
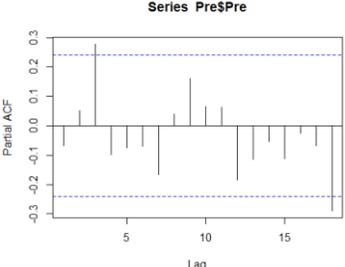


Calakmul satelitales

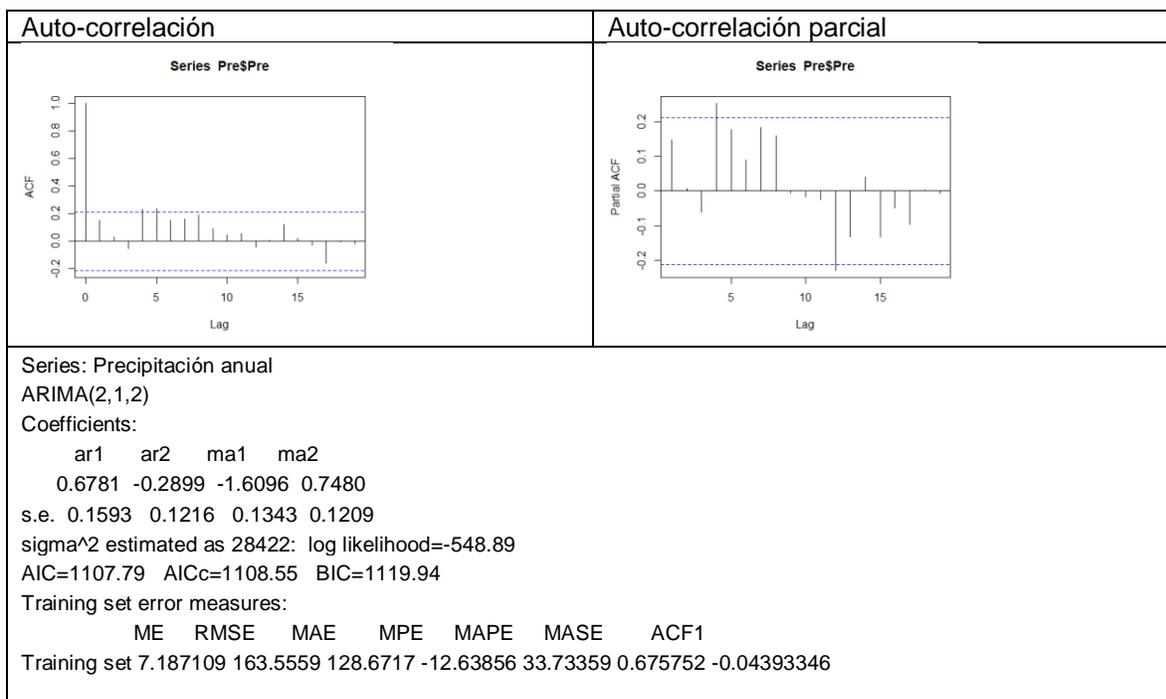
Auto-correlación	Auto-correlación parcial							
								
<p>Series: Temperatura máxima ARIMA(0,1,0)</p> <p>sigma² estimated as 0.775: log likelihood=-46.49 AIC=94.99 AICc=95.1 BIC=96.57</p> <p>Training set error measures:</p> <table border="0" data-bbox="341 793 938 821"> <tr> <td>ME</td> <td>RMSE</td> <td>MAE</td> <td>MPE</td> <td>MAPE</td> <td>MASE</td> <td>ACF1</td> </tr> </table> <p>Training set 0.02687302 0.8683581 0.6615127 0.04700833 1.823481 0.9743717 -0.3183996</p>		ME	RMSE	MAE	MPE	MAPE	MASE	ACF1
ME	RMSE	MAE	MPE	MAPE	MASE	ACF1		

APÉNDICE 2.4. CORRELOGRAMAS Y SALIDAS DE MODELOS ARIMA DE LA PRECIPITACIÓN ANUAL.

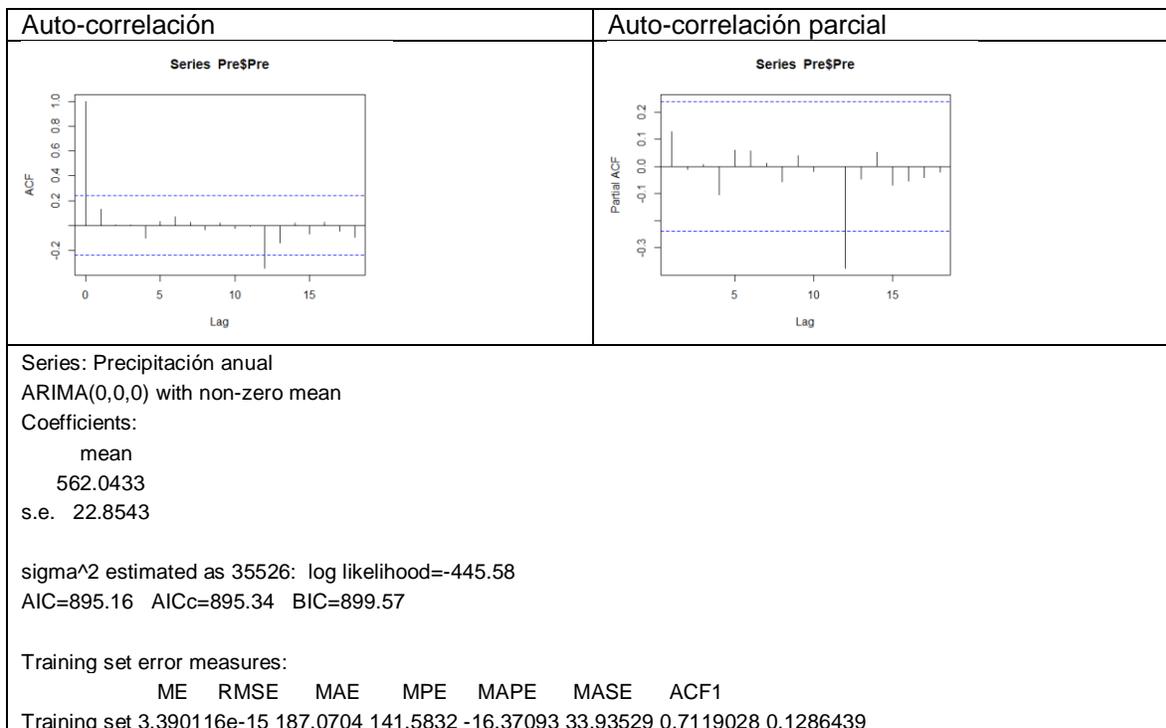
Celestún

Auto-correlación	Auto-correlación parcial																	
																		
<p>Series: Precipitación anual ARIMA(2,0,2) with non-zero mean</p> <p>Coefficients:</p> <table border="0" data-bbox="256 1549 672 1606"> <tr> <td>ar1</td> <td>ar2</td> <td>ma1</td> <td>ma2</td> <td>mean</td> </tr> <tr> <td>0.8907</td> <td>-0.5653</td> <td>-1.0645</td> <td>0.9418</td> <td>754.0017</td> </tr> </table> <p>s.e. 0.1549 0.1356 0.0927 0.0932 23.7851</p> <p>sigma² estimated as 24583: log likelihood=-432.2 AIC=876.41 AICc=877.81 BIC=889.63</p> <p>Training set error measures:</p> <table border="0" data-bbox="341 1728 914 1755"> <tr> <td>ME</td> <td>RMSE</td> <td>MAE</td> <td>MPE</td> <td>MAPE</td> <td>MASE</td> <td>ACF1</td> </tr> </table> <p>Training set -0.3657292 150.8273 119.271 -4.332369 16.7787 0.6103997 0.006530853</p>		ar1	ar2	ma1	ma2	mean	0.8907	-0.5653	-1.0645	0.9418	754.0017	ME	RMSE	MAE	MPE	MAPE	MASE	ACF1
ar1	ar2	ma1	ma2	mean														
0.8907	-0.5653	-1.0645	0.9418	754.0017														
ME	RMSE	MAE	MPE	MAPE	MASE	ACF1												

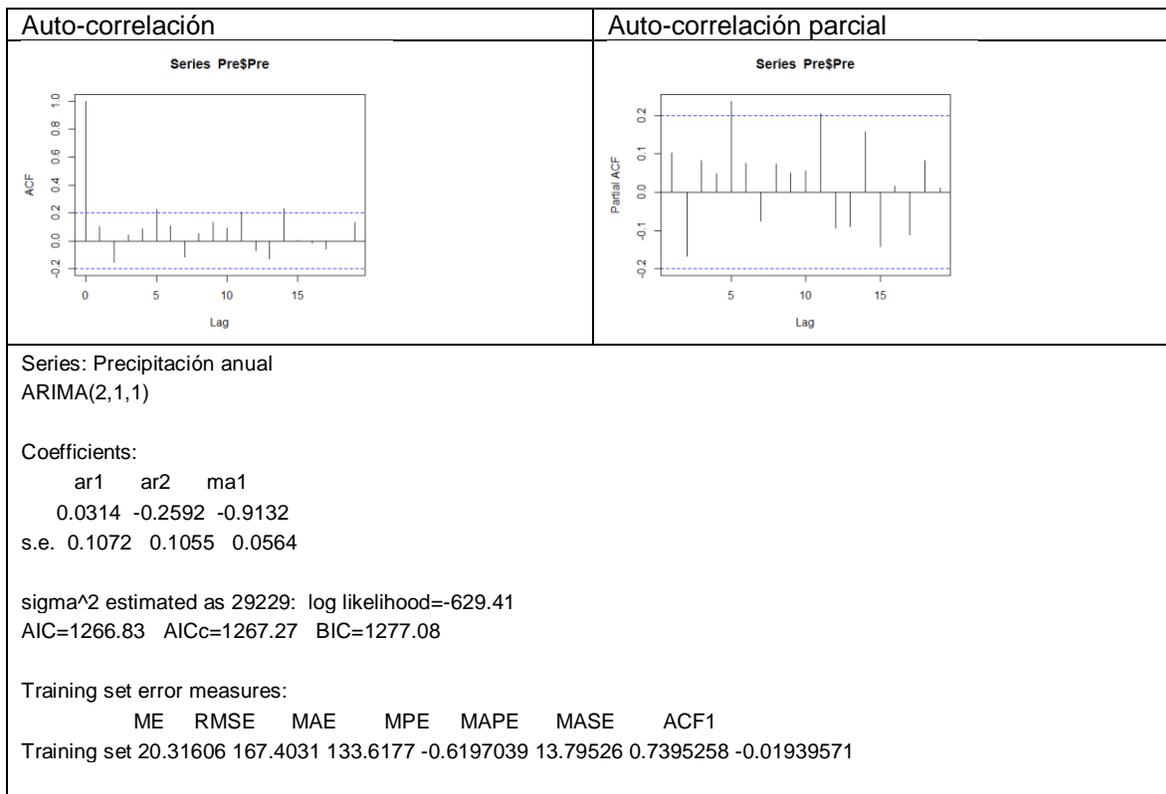
Progreso



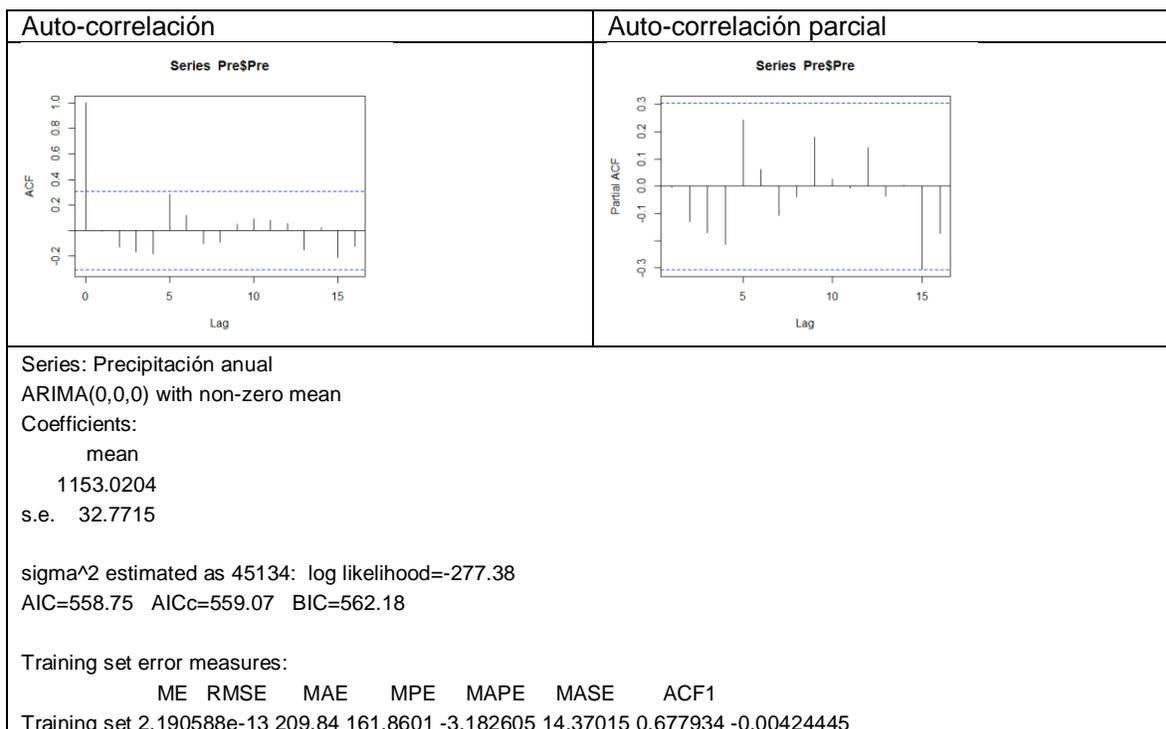
Telchac



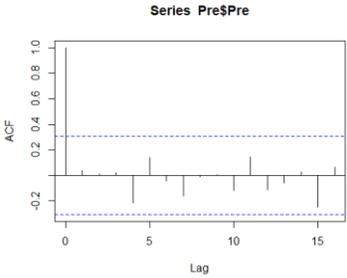
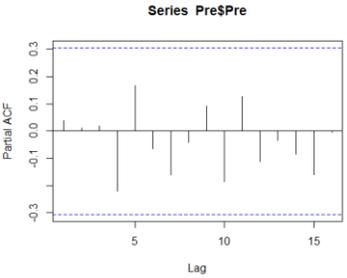
Mérida



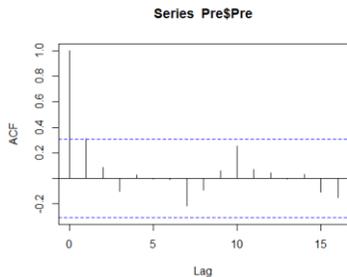
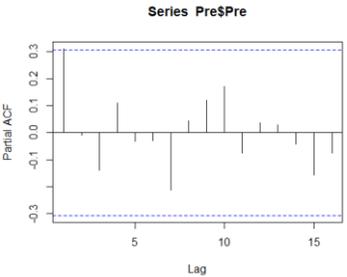
Akil



Oxkutzcab

Auto-correlación	Auto-correlación parcial
	
<p>Series: Precipitación anual ARIMA(0,0,0) with non-zero mean Coefficients: mean 1197.0785 s.e. 35.8598</p> <p>sigma^2 estimated as 54041: log likelihood=-281.07 AIC=566.14 AICc=566.45 BIC=569.57</p> <p>Training set error measures: ME RMSE MAE MPE MAPE MASE ACF1 Training set -1.746855e-13 229.6148 179.3486 -4.382512 16.46672 0.7114205 0.03961761</p>	

Tabi

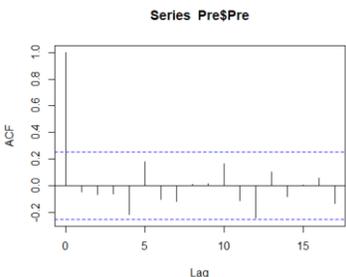
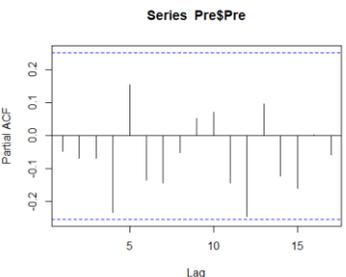
Auto-correlación	Auto-correlación parcial
	

Series: Precipitación anual
 ARIMA(1,0,0) with non-zero mean
 Coefficients:
 ar1 mean
 0.3076 1158.2476
 s.e. 0.1471 49.6961

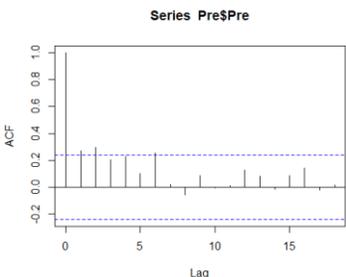
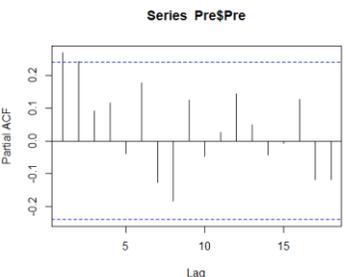
sigma^2 estimated as 52127: log likelihood=-279.86
 AIC=565.72 AICc=566.37 BIC=570.86

Training set error measures:
 ME RMSE MAE MPE MAPE MASE ACF1
 Training set 0.5841472 222.6743 177.389 -4.533519 17.1259 0.7826027 0.01285198

Tekax

Auto-correlación	Auto-correlación parcial
	
<p>Series: Precipitación anual ARIMA(0,0,0) with non-zero mean Coefficients: mean 1091.3734 s.e. 30.5147</p> <p>sigma^2 estimated as 56816: log likelihood=-413.06 AIC=830.12 AICc=830.33 BIC=834.31</p> <p>Training set error measures: ME RMSE MAE MPE MAPE MASE ACF1 Training set -3.656922e-13 236.3659 183.0721 -5.309402 18.69914 0.7169162 -0.04649869</p>	

Zoh-Laguna

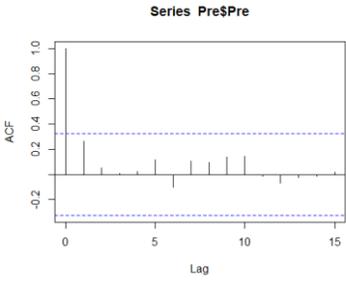
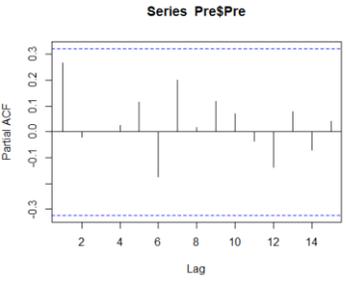
Auto-correlación	Auto-correlación parcial
	

Series: Precipitación anual
 ARIMA(0,1,1)
 Coefficients:
 ma1
 -0.8184
 s.e. 0.1170

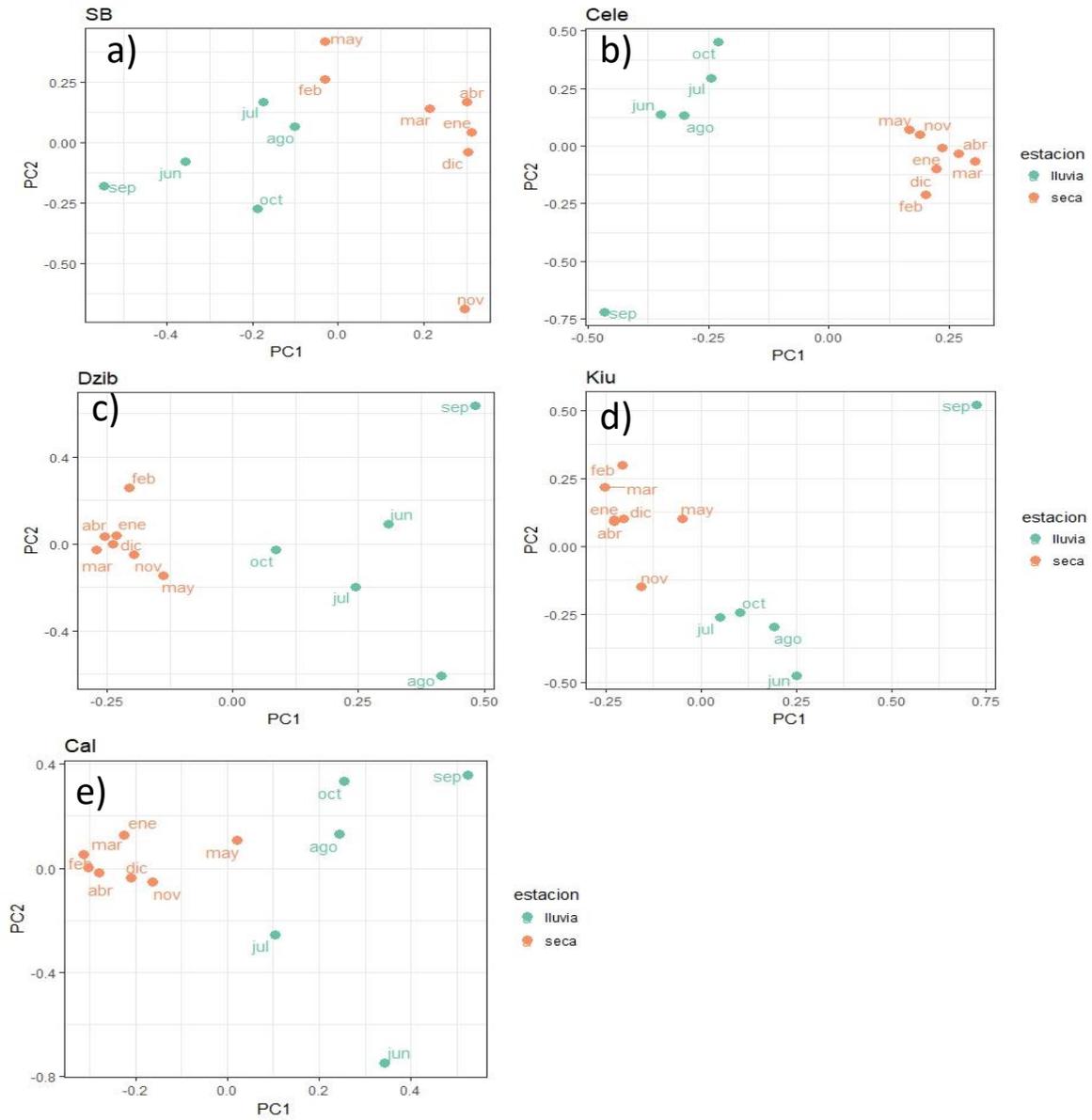
sigma^2 estimated as 55328: log likelihood=-454.09
 AIC=912.19 AICc=912.38 BIC=916.57

Training set error measures:
 ME RMSE MAE MPE MAPE MASE ACF1
 Training set 1.324507 231.6811 176.1532 -4.867973 18.88005 0.755297 0.04697244

Calakmul satelitales

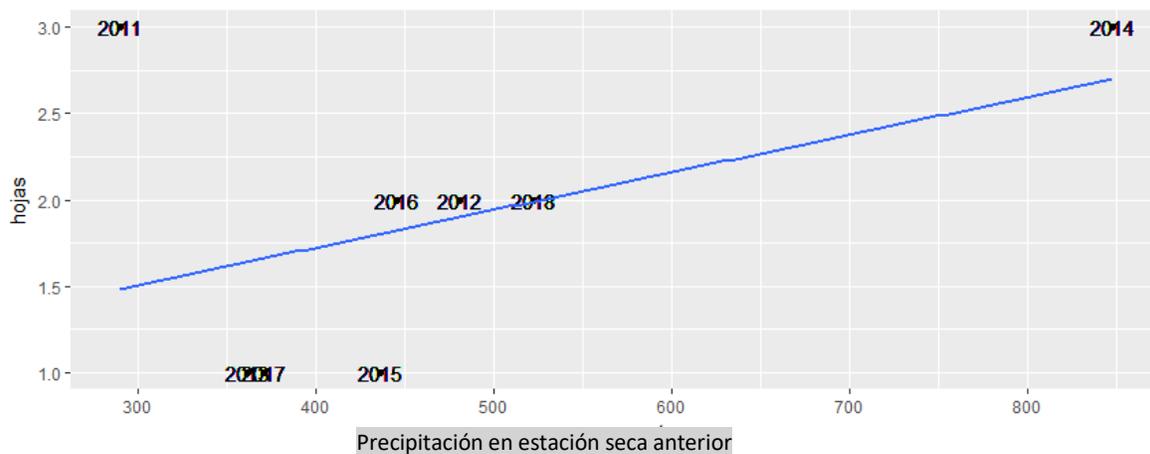
Auto-correlación	Auto-correlación parcial
	
<p>Series: Precipitación anual ARIMA(0,1,1) Coefficients: ma1 -0.8582 s.e. 0.0890</p> <p>sigma^2 estimated as 65590: log likelihood=-250.88 AIC=505.77 AICc=506.13 BIC=508.93</p> <p>Training set error measures: ME RMSE MAE MPE MAPE MASE ACF1 Training set 22.01903 249.0868 186.4687 -1.881331 14.63295 0.7934275 0.1414767</p>	

APÉNDICE 3. ANÁLISIS DE LA ESTACIONALIDAD DE LAS LLUVIAS



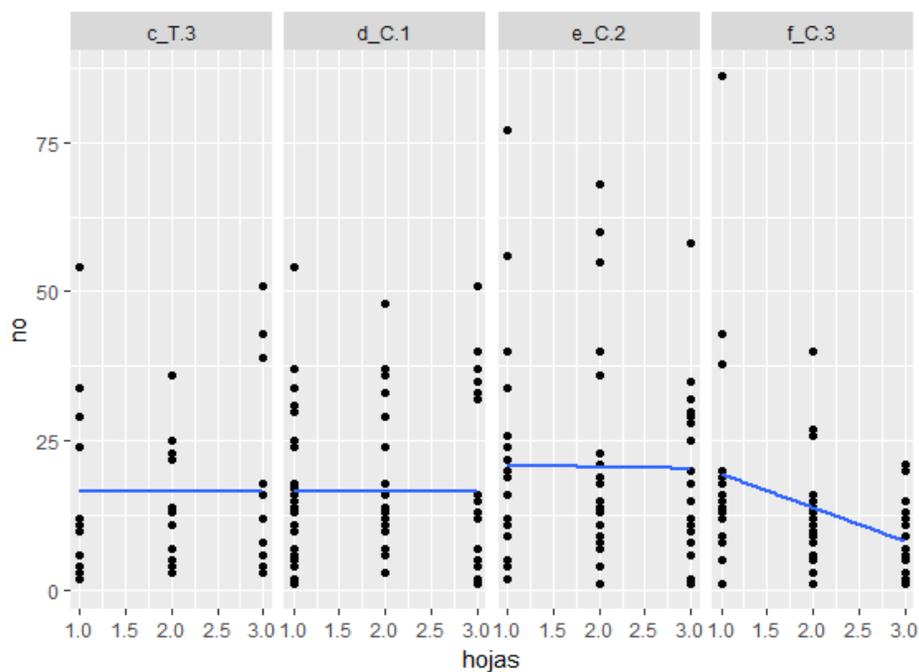
Análisis de componentes principales de la precipitación mensual en a) San-Benito, b) Celestún, c) Dzibilchaltún, e) Kiuic, f) Calakmul. Notar la diferencia de escalas en los ejes.

APÉNDICE 4. RELACIÓN ENTRE CANTIDAD DE HOJAS Y LA PRECIPITACIÓN DE LA ESTACIÓN SECA DURANTE EL MONITOREO ANUAL DE BROMELIÁCEAS.



escala semi-cuantitativa: 1 escasas, 2 intermedio y 3 abundantes

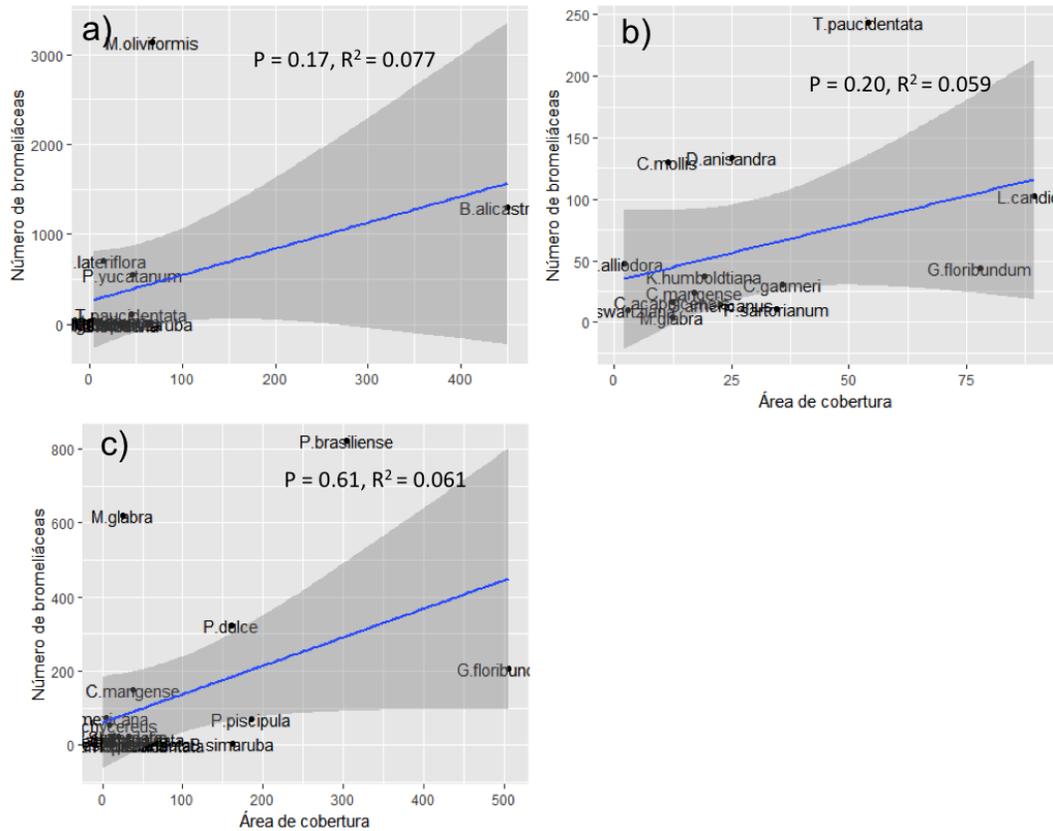
APÉNDICE 5. RELACIÓN ENTRE INDIVIDUOS AVISTADOS Y CANTIDAD DE HOJAS POR ESTRATO



Escala semi-cuantitativa de las hojas: 1 escasas, 2=intermedias, 3=abundantes

Se observa que el estrato copa 3 (f_C.3), el más elevado, presenta una reducción en las observaciones de bromeliáceas epífitas cuando aumenta la cantidad de hojas, sin embargo, no presenta una correlación significativa ($p=0.14$). Pese a esto se optó por no analizar el estrato para reducir el efecto de las hojas sobre las observaciones.

APÉNDICE 6. RELACIÓN ENTRÉ ÁREA DE COBERTURA Y BROMELIÁCEAS HOSPEDADAS EN LAS ESPECIES ARBÓREAS MÁS ABUNDANTES DE LAS SELVAS DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN.



Relación entre áreas de cobertura y número de bromeliáceas hospedadas por especie arbórea en las selvas mediana subperennifolia (a), mediana subcaducifolia (b) y baja caducifolia (c). Notar diferencia en la escala de las 3 secciones.