



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL REQUERIMIENTO HÍDRICO DEL
MAÍZ EN REGIONES AGROCLIMÁTICAS DE MÉXICO

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA

M.I. BENIGNO DURÁN AGUILAR

DIRECTOR

DR. RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ



CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2025

**IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL REQUERIMIENTO HÍDRICO
DEL MAÍZ EN REGIONES AGROCLIMÁTICAS DE MÉXICO**

Tesis realizada por **BENIGNO DURÁN AGUILAR** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR: _____

DR. RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ

ASESOR: _____

DR. ALEJANDRO ISMAEL MONTERROSO RIVAS

ASESOR: _____

DR. MARIO ALBERTO VÁZQUEZ PEÑA

LECTOR EXTERNO: _____

DR. DELMER GÓMEZ HELERIA

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
DEDICATORIA	viii
AGRADECIMIENTOS.....	ix
DATOS BIOGRÁFICOS.....	x
RESUMEN GENERAL.....	xi
GENERAL ABSTRACT.....	xii
1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Contexto climático y el uso de CMIP6	1
1.3 Metodología FAO-56 para la estimación de requerimientos hídricos	2
1.4 Relevancia del estudio.....	3
1.5 Justificación	4
1.6 Objetivos.....	4
1.6.1 Objetivos específicos.....	5
1.7 Hipótesis.....	5
1.8 Contenido temático.....	5
1.9 Literatura citada	6
2. VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN DISTRITOS DE TEMPORAL TECNIFICADO DEL NORTE, SURESTE Y SUR DE MÉXICO	8
2.1. Resumen	8
2.2. Abstract.....	9

2.3.	Introducción	10
2.4.	Materiales y métodos.....	11
2.4.1.	Descripción de la zona de estudio.....	11
2.4.2.	Recopilación de datos climáticos.....	12
2.4.3.	Homogenización y control de calidad de datos climáticos.....	16
2.4.4.	Prueba de Mann-Kendall	16
2.4.5.	Estimador de Pendiente de Sen	18
2.5.	Resultados.....	19
2.6.	Discusión	30
2.7.	Conclusiones	31
2.8.	Referencias.....	33
3.	PROYECCIONES CMIP6 DE CAMBIO CLIMÁTICO EN TRES REGIONES AGROCLIMÁTICAS DE MÉXICO.....	36
3.1.	Resumen:	36
3.2.	Abstract:.....	37
3.3.	Introducción	37
3.4.	Materiales y métodos.....	39
3.4.1.	Área de estudio	39
3.4.2.	Base de datos climáticos	40
3.4.3.	Generador Meteorológico Estocástico LARS – WG 8.0	44
3.4.4.	Calibración y validación del modelo LARS – WG 8.0	44
3.4.5.	Escenarios de cambio climático	45

3.4.6. Análisis de tendencias mediante los métodos de Mann-Kendall y pendiente de Sen	46
3.5. Resultados.....	47
3.6. Discusión	61
3.7. Conclusiones	63
3.8. Referencias.....	64
4. IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL REQUERIMIENTO HÍDRICO DEL MAÍZ EN REGIONES AGROCLIMÁTICAS DE MÉXICO.....	68
4.1. Resumen:	68
4.2. Abstract.....	69
4.3. Introducción	70
4.4. Materiales y métodos.....	71
4.4.1. Área de estudio	71
4.4.2. Datos climáticos	73
4.4.3. Escenarios de cambio climático	76
4.4.4. Requerimiento hídrico del maíz (Zea mays L.)	76
4.4.5. Tendencias del requerimiento hídrico del maíz (Zea mays L.)	80
4.5. Resultados.....	80
4.6. Discusión	88
4.7. Conclusiones	90
4.8. Referencias.....	92
5. Conclusiones generales.....	97

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas en los cinco DTT de Chiapas.....	14
Cuadro 2. Estaciones meteorológicas en el DTT 010 San Fernando en Tamaulipas	15
Cuadro 3. Estaciones meteorológicas ubicadas en el DTT 08 Oriente de Yucatán	15
Cuadro 4. Estaciones meteorológicas situadas en los cinco DTT en Chiapas .	42
Cuadro 5. Estaciones meteorológicas situadas en el DTT 010 San Fernando en Tamaulipas	43
Cuadro 6. Estaciones meteorológicas situadas en el DTT en Yucatán	43
Cuadro 7. Estaciones meteorológicas distribuidas en los cinco DTT de Chiapas	74
Cuadro 8. Estaciones meteorológicas distribuidas en el DTT 010 San Fernando en Tamaulipas	75
Cuadro 9. Estaciones meteorológicas distribuidas en el DTT 08 Oriente de Yucatán.....	75
Cuadro 10. Fases de desarrollo, duración y Kc para los DTT en Chiapas	78
Cuadro 11. Fases de desarrollo, duración y Kc para los DTT en Tamaulipas ..	78
Cuadro 12. Fases de desarrollo, duración y Kc para los DTT en Yucatán	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de los Distritos de Temporal Tecnificado de estudio; a) Chiapas, b) Tamaulipas y c) Yucatán.....	13
Figura 2. Tendencias en la precipitación acumulada mensual de abril.....	19
Figura 3. Tendencias en la precipitación acumulada mensual de mayo	20
Figura 4. Tendencias en la precipitación acumulada mensual de junio	20
Figura 5. Tendencias en la precipitación acumulada mensual de julio	20
Figura 6. Tendencias en la precipitación acumulada mensual de agosto	21
Figura 7. Tendencias en precipitación acumulada mensual, septiembre.....	21
Figura 8. Tendencias en la precipitación acumulada mensual de octubre	21
Figura 9. Tendencias, precipitación acumulada mensual de noviembre.....	22
Figura 10. Tendencias en temperatura máxima media mensual de abril.....	23
Figura 11. Tendencias, temperatura máxima media mensual de mayo.....	23
Figura 12. Tendencias, temperatura máxima media mensual de junio.....	23
Figura 13. Tendencias en temperatura máxima media mensual de julio	24
Figura 14. Tendencias en temperatura máxima media mensual, agosto.....	24
Figura 15. Tendencias temperatura máxima media mensual septiembre.....	24
Figura 16. Tendencias en temperatura máxima media mensual, octubre	25
Figura 17. Tendencias, temperatura mínima media mensual, noviembre	25
Figura 18. Tendencias en temperatura mínima media mensual, abril	26
Figura 19. Tendencias en temperatura mínima media mensual, mayo	26
Figura 20. Tendencias en temperatura mínima media mensual, junio.....	27
Figura 21. Tendencias en temperatura mínima media mensual, julio	27
Figura 22. Tendencias en temperatura mínima media mensual, agosto	27
Figura 23. Tendencias temperatura mínima media mensual septiembre	28
Figura 24. Tendencias en temperatura mínima media mensual, octubre	28
Figura 25. Tendencias temperatura mínima media mensual, noviembre	28

Figura 26. Localización geográfica de los Distritos de Temporal Tecnificado analizados: a) Chiapas, b) Tamaulipas y c) Yucatán.	41
Figura 27. Tendencias de precipitación acumulada anual para los DTT en Chiapas.....	48
Figura 28. Tendencias de temperatura máxima media anual para los DTT en Chiapas.....	49
Figura 29. Análisis de tendencias de temperatura mínima media anual para los DTT ubicados en Chiapas	50
Figura 30. Tendencias de precipitación acumulada anual para los DTT ubicados en Tamaulipas	52
Figura 31. Tendencias de temperatura máxima media anual para los DTT ubicados en Tamaulipas	53
Figura 32. Tendencias de temperatura mínima media anual para los DTT ubicados en Tamaulipas	54
Figura 33. Tendencias de precipitación acumulada anual, DTT en Yucatán	57
Figura 34. Tendencias de temperatura máxima media anual, en el DTT en Yucatán.....	58
Figura 35. Tendencias de temperatura mínima media anual, en el DTT en Yucatán.....	59
Figura 36. Área geográfica donde se ubican los Distritos de Temporal Tecnificado estudiados: a) Chiapas, b) Tamaulipas y c) Yucatán.....	72
Figura 37. Tendencias de requerimiento hídrico anual para el cultivo de maíz (Zea mays L.) en los DTT en Chiapas.....	81
Figura 38. Tendencias de requerimiento hídrico anual para el cultivo de maíz (Zea mays L.) en los DTT en Tamaulipas	84
Figura 39. Tendencias de requerimiento hídrico anual para el cultivo de maíz (Zea mays L.) en los DTT en Yucatán.....	86

DEDICATORIA

Con respeto y agradecimiento a mis padres Benigno Durán Méndez y María Trinidad Aguilar Santillán.

A mis hermanos Rogelio, Santiago Raúl y Rubén por su ejemplo y motivación.

A mi hija Alessia Durán Méndez por su motivación y a mi esposa por su apoyo y paciencia.

AGRADECIMIENTOS

A la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)** por el apoyo económico que me permitió dedicarme completamente a mis estudios de posgrado.

A la **Universidad Autónoma Chapingo (UACH)** y al **Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA)** por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado y proporcionarme todas las herramientas necesarias para llevar a cabo este proyecto de investigación.

A los integrantes de mi comité asesor, Dr. Ramón Arteaga-Ramírez, Dr. Alejandro Ismael Monterroso-Rivas y Dr. Mario Alberto Vázquez Peña, por su apoyo y orientación en la realización de este trabajo investigación.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Benigno Durán Aguilar
Fecha de nacimiento	26 de noviembre de 1990
Lugar de nacimiento	Texcoco, Estado de México
CURP	DUAB901126HMCRGN06
Licenciatura	Ingeniero en Irrigación
Cedula profesional	9687872
Maestría	Maestría en Ingeniería
Cedula profesional	511571

Desarrollo académico

Licenciatura	Ingeniero en Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo (UACH)
Maestría	Maestría en Ingeniería Civil/Hidráulica, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

RESUMEN GENERAL

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL REQUERIMIENTO HÍDRICO DEL MAÍZ EN REGIONES AGROCLIMÁTICAS DE MÉXICO

El cambio climático representa uno de los principales desafíos para la sostenibilidad agrícola en México, al afectar la disponibilidad de agua y la productividad del maíz (*Zea mays L.*). Esta investigación evaluó el impacto del cambio climático en el requerimiento hídrico del maíz en Distritos de Temporal Tecnificado (DTT) de Chiapas, Tamaulipas y Yucatán, mediante series históricas diarias (1980–2020) de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación, complementadas con proyecciones futuras (2021–2070) de los modelos HadGEM3-GC31-LL, MPI-ESM1-2-LR y GFDL-ESM4 bajo el escenario SSP2-4.5 del CMIP6.

Las pruebas de Mann-Kendall y la pendiente de Sen aplicadas a los datos históricos mostraron incrementos en las temperaturas máximas y mínimas, junto con alta variabilidad de la precipitación. En los DTT de Chiapas, el requerimiento hídrico del maíz mostró estabilidad en el periodo histórico, pero se proyectaron aumentos acumulados de 40 a 75 mm para 2021–2070 ($0.8\text{--}1.5\text{ mm año}^{-1}$), vinculados al incremento térmico y ligera reducción de lluvias. En el DTT de Tamaulipas, aunque no se detectaron tendencias históricas significativas, los escenarios futuros, especialmente con el modelo HadGEM3, estiman incrementos de 70 a 125 mm ($1.4\text{--}2.5\text{ mm año}^{-1}$) en más del 70 % de las estaciones, indicando un posible aumento del estrés hídrico y la necesidad de estrategias de manejo adaptativo. En el DTT de Yucatán, los tres modelos climáticos proyectan tendencias positivas y consistentes, con incrementos de 60 a 90 mm ($1.2\text{--}1.8\text{ mm año}^{-1}$).

En conjunto, los resultados confirman una tendencia creciente del requerimiento hídrico del maíz en el periodo 2021–2070, con diferencias regionales vinculadas a la interacción entre temperatura y precipitación. El aumento proyectado en el requerimiento hídrico del cultivo podría comprometer la sostenibilidad de los cultivos de temporal, destacando la necesidad de fortalecer estrategias de adaptación, uso eficiente del agua y selección de variedades tolerantes al estrés hídrico.

Palabras clave: cambio climático, requerimiento hídrico; maíz (*Zea mays L.*), Distritos de Temporal Tecnificado, CMIP6.

Tesis de Doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Benigno Durán Aguilar.

Director de Tesis: Dr. Ramón Arteaga Ramírez

GENERAL ABSTRACT

IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON MAIZE WATER REQUIREMENTS IN AGROCLIMATIC REGIONS OF MEXICO

Climate change represents one of the main challenges to agricultural sustainability in Mexico, as it affects water availability and maize (*Zea mays L.*) productivity. This study evaluated the impact of climate change on the water requirement of maize in Technified Rainfed Districts (DTT) located in Chiapas, Tamaulipas, and Yucatán, using daily historical series (1980–2020) of maximum temperature, minimum temperature, and precipitation, complemented with future projections (2021–2070) from the HadGEM3-GC31-LL, MPI-ESM1-2-LR, and GFDL-ESM4 models under the SSP2-4.5 scenario of CMIP6.

The Mann-Kendall and Sen's slope tests applied to historical data showed increases in maximum and minimum temperatures, along with high precipitation variability. In the DTT of Chiapas, the maize water requirement remained stable during the historical period but is projected to increase by 40–75 mm for 2021–2070 ($0.8\text{--}1.5\text{ mm year}^{-1}$), linked to thermal rise and a slight rainfall reduction. In DTT of Tamaulipas, although no significant historical trends were detected, future scenarios—particularly with the HadGEM3 model—estimate increases of 70–125 mm ($1.4\text{--}2.5\text{ mm year}^{-1}$) in over 70% of the stations, indicating a possible rise in water stress and the need for adaptive management strategies. In DTT of Yucatán, the three climate models project consistent positive trends, with increases of 60–90 mm ($1.2\text{--}1.8\text{ mm year}^{-1}$).

Overall, the results confirm a rising trend in maize water requirements during 2021–2070, with regional differences linked to the interaction between temperature and precipitation. The projected increase in crop water demand could threaten the sustainability of rainfed systems, highlighting the need to strengthen adaptation strategies, efficient water use, and the selection of drought-tolerant varieties.

Keywords: climate change, water requirement, maize (*Zea mays L.*), Technified Rainfed Districts, CMIP6.

Doctoral Thesis in Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Benigno Durán Aguilar.

Thesis Advisor: Dr. Ramón Arteaga Ramírez

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Antecedentes

La agricultura en México enfrenta desafíos cada vez más críticos debido al cambio climático, particularmente por la alteración en la disponibilidad hídrica, el aumento de las temperaturas y la mayor variabilidad en los patrones de precipitación. Estos factores afectan de manera directa a cultivos estratégicos, como el maíz (*Zea mays L.*), el cual es fundamental para la seguridad alimentaria y para los sistemas agrícolas de temporal tecnificado, que representan una proporción significativa de la superficie cultivada a nivel nacional en México (Bellon, 2011). Dada la importancia del cultivo del maíz, es crucial evaluar cómo las variaciones en temperatura, precipitación y evapotranspiración afectan los requerimientos hídricos del cultivo y, en consecuencia, su desempeño productivo.

Los cultivos de temporal, que dependen directamente de las lluvias estacionales, son particularmente vulnerables a los cambios climáticos debido a su limitada capacidad para compensar los déficits hídricos (Bellon, 2011). Aproximadamente el 46 % de la variabilidad en los rendimientos de maíz en regiones mexicanas se explica por las fluctuaciones en las condiciones climáticas (Lobell et al., 2014). En particular, el incremento de las temperaturas y la inestabilidad de las precipitaciones afectan tanto los rendimientos como los requerimientos hídricos del cultivo, acortando los ciclos de desarrollo y aumentando la demanda de agua por evapotranspiración (Hsiao et al., 2019).

En México se proyectan disminuciones significativas en los rendimientos agrícolas de los sistemas de temporal, lo que representa un desafío importante para la seguridad alimentaria (Estrada et al., 2022).

1.2 Contexto climático y el uso de CMIP6

El Proyecto de Intercomparación de Modelos de Clima Acoplados Fase 6 (CMIP6, por sus siglas en inglés), coordinado por el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WCRP, por sus siglas en inglés), constituye la base científica para los informes del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). CMIP6 ofrece una mejora significativa respecto a su predecesor, CMIP5, al incluir un conjunto más amplio de modelos globales de circulación (GCMs, por sus siglas en inglés) con

mayor resolución espacial y temporal, así como escenarios de vías socioeconómicas compartidas (SSPs, por sus siglas en inglés) que integran variables climáticas, socioeconómicas y políticas de mitigación (Eyring et al., 2016). Estos escenarios, como SSP1-2.6 (bajas emisiones), SSP2-4.5 (camino intermedio) y SSP5-8.5 (emisiones intensivas), permiten proyectar con mayor precisión los impactos del cambio climático en sectores vulnerables como la agricultura (Semenov et al. 2025).

En México, las proyecciones de CMIP6 indican incrementos en las temperaturas medias de 1.5 a 6 °C hacia finales de siglo, dependiendo del escenario, junto con una mayor frecuencia de sequías y una reducción en la precipitación en regiones semiáridas del norte y centro del país (IPCC, 2022). Estas tendencias son particularmente críticas para el maíz, ya que pueden incrementar la evapotranspiración y el estrés hídrico, afectando los rendimientos en sistemas de temporal tecnificado. Para generar escenarios climáticos regionalizados, herramientas como el Generador de Clima LARS-WG han demostrado ser eficaces al producir datos de alta resolución a partir de proyecciones de CMIP6, permitiendo analizar cambios en temperatura, precipitación y eventos extremos (Semenov et al., 2025).

1.3 Metodología FAO-56 para la estimación de requerimientos hídricos

La metodología FAO-56, descrita en el documento de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), proporciona un marco estandarizado para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) y del cultivo (ET_c), fundamentales para determinar los requerimientos hídricos en agricultura (Allen et al., 2006). La ecuación de Penman-Monteith, base de FAO-56, estima ET_o integrando variables meteorológicas como temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar. La evapotranspiración del cultivo (ET_c) se calcula como $ET_c = K_c * ET_o$, donde K_c es el coeficiente de cultivo específico para cada etapa fenológica del maíz (inicial, desarrollo, media y final), que varía según las condiciones locales (Allen et al., 2006). Esta metodología es ampliamente utilizada por su precisión y adaptabilidad, incluso en contextos con datos meteorológicos limitados, mediante herramientas como CROPWAT o ET_o Calculator (Allen et al, 2006).

En el caso del maíz, los requerimientos hídricos oscilan entre 450 y 650 mm por ciclo, con picos durante la floración y el llenado de grano, etapas críticas donde el déficit hídrico puede reducir los rendimientos hasta en un 40 % (Howell, 2001). Bajo condiciones de cambio climático, el aumento de las temperaturas eleva la ETo en un 5-15 % por cada grado Celsius adicional, incrementando la demanda hídrica del maíz (Velázquez y Ortiz, 2025). La integración de FAO-56 con proyecciones climáticas de CMIP6 permite estimar cómo estas tendencias afectarán los requerimientos hídricos en regiones específicas de México.

1.4 Relevancia del estudio

A pesar de los avances en la modelización climática y en la estimación de los requerimientos hídricos de los cultivos, persisten lagunas importantes en la literatura, especialmente en lo relativo a los impactos del cambio climático sobre los requerimientos hídricos del maíz en los Distritos de Temporal Tecnificado en México. Esta brecha resulta particularmente crítica, dado que la agricultura de temporal, que abarca aproximadamente el 79 % de la superficie agrícola nacional, enfrenta riesgos crecientes asociados a la variabilidad de los patrones de precipitación y al aumento sostenido de las temperaturas (CONAGUA, 2022).

La agricultura climáticamente inteligente, que promueve la integración de producción, resiliencia climática y reducción de emisiones, ofrece un marco para abordar estos desafíos (World Bank, 2019). Sin embargo, la falta de datos regionalizados sobre los requerimientos hídricos del maíz limita la capacidad de los productores para implementar estrategias de adaptación efectivas, como la selección de variedades resistentes, la optimización del riego suplementario o la mejora de la gestión del agua en el suelo. Este estudio busca llenar esta laguna al analizar la variabilidad climática histórica y proyectada en los Distritos de Temporal Tecnificado de Chiapas, Tamaulipas y Yucatán, utilizando proyecciones de CMIP6 y la metodología FAO-56 para estimar los requerimientos hídricos del maíz. Con ello, se pretende generar un diagnóstico actualizado que contribuya al desarrollo de estrategias de adaptación agroclimática y a la gestión sostenible del agua en la agricultura mexicana.

1.5 Justificación

La evaluación de los requerimientos hídricos del maíz bajo condiciones de cambio climático es fundamental, especialmente en los Distritos de Temporal Tecnificado (DTT) de Chiapas, Tamaulipas y Yucatán, donde la variabilidad climática influye de manera directa en la producción agrícola. Diversos estudios han mostrado que el cambio climático puede reducir hasta un 20 % el rendimiento del maíz en México, comprometiendo su disponibilidad y la seguridad alimentaria (Corso, 2022).

La variabilidad climática, caracterizada por alteraciones en los patrones de temperatura y precipitación, modifica las temporadas de siembra y cosecha, así como la frecuencia y duración de sequías e inundaciones, lo que impacta la disponibilidad de agua para los cultivos y aumenta su vulnerabilidad (Ojeda-Bustamante, 2011). Este escenario resalta la necesidad de comprender de manera detallada cómo la dinámica climática afecta la demanda hídrica del maíz, especialmente en sistemas de temporal tecnificado.

En este contexto, el presente estudio analiza la variabilidad climática histórica (1980-2020) y las proyecciones futuras a 50 años de temperatura máxima y mínima, así como de precipitación, en los Distritos de Temporal Tecnificado (DTT) seleccionados, con el objetivo de estimar de manera precisa los requerimientos hídricos del maíz. Este enfoque permite evaluar los impactos del cambio climático sobre la demanda hídrica del cultivo y generar información sólida para orientar estrategias de manejo eficiente del recurso hídrico.

1.6 Objetivos

Analizar el impacto del cambio climático sobre los requerimientos hídricos del maíz (*Zea mays L.*) en los Distritos de Temporal Tecnificado (DTT) de Chiapas, Tamaulipas y Yucatán, mediante el estudio de la variabilidad climática histórica y proyecciones futuras de temperatura y precipitación, con el fin de orientar estrategias de manejo eficiente del recurso hídrico y adaptación agroclimática.

1.6.1 Objetivos específicos

- i. Evaluar la variabilidad histórica de temperatura máxima, mínima y precipitación en los DTT seleccionados durante el periodo 1980-2020, utilizando herramientas estadísticas como la prueba de Mann-Kendall y la pendiente de Sen.
- ii. Generar proyecciones climáticas de los DTT seleccionados a 50 años para temperatura máxima y mínima, así como precipitación mediante modelos de circulación general HadGEM3-GC31-LL, MPI-ESM1-2-LR y GFDL-ESM4 con el generador estocástico LARS-WG.
- iii. Estimar la evapotranspiración del cultivo (ETc) y los requerimientos hídricos del maíz en los DTT seleccionados bajo escenarios históricos y proyectados, utilizando la metodología FAO-56.
- iv. Desarrollar recomendaciones que apoyen en la formulación de estrategias de adaptación agroclimática para asegurar la sostenibilidad de la producción de maíz en sistemas de temporal tecnificado.

1.7 Hipótesis

El cambio climático aumenta los requerimientos hídricos del maíz (*Zea mays* L.) en los Distritos de Temporal Tecnificado de Chiapas, Tamaulipas y Yucatán, debido al aumento en las temperaturas máximas y mínimas, así como a la mayor variabilidad en los patrones de precipitación, lo que impacta directamente la demanda hídrica del cultivo.

1.8 Contenido temático

El presente trabajo de investigación está estructurado en cuatro capítulos.

El **Capítulo 1**, titulado *Introducción General*, presenta una visión integral del proyecto de investigación, que incluye los antecedentes, la formulación del problema, la justificación, los objetivos y la estructura general del documento.

El **Capítulo 2**, denominado *Variabilidad climática en Distritos de Temporal Tecnificado del norte, sureste y sur de México*, analiza la dinámica climática de tres regiones representativas del país mediante la evaluación de las tendencias históricas de precipitación y de temperaturas máximas y mínimas durante el periodo 1980–2020.

El **Capítulo 3**, titulado *Proyecciones CMIP6 de cambio climático en tres regiones agroclimáticas de México*, desarrolla la metodología empleada para la generación y el análisis de los escenarios de cambio climático en los DTT. En este apartado se utilizan tres modelos de circulación general del CMIP6 —HadGEM3-GC31-LL, MPI-ESM1-2-LR y GFDL-ESM4— bajo la trayectoria socioeconómica SSP2-4.5, regionalizados mediante el generador estocástico LARS-WG 8.0. Este análisis permite estimar las posibles variaciones futuras de temperatura y precipitación durante el periodo 2021–2070.

El **Capítulo 4**, denominado *Impacto del cambio climático en el requerimiento hídrico del maíz en regiones agroclimáticas de México*, integra los resultados de las proyecciones climáticas con la estimación del requerimiento hídrico del maíz de temporal para los periodos histórico (1980–2020) y futuro (2021–2070). En este capítulo se evalúan las tendencias del requerimiento hídrico del cultivo bajo distintos escenarios de cambio climático.

1.9 Literatura citada

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/4/X0490E/X0490E00.htm>
- Bellon, M. R. (2011). Assessing the vulnerability of traditional maize seed systems to climate change in Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(33), 13432–13437.
- CONAGUA. (2022). Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Temporal Tecnificado, Año agrícola 2021-2022. Comisión Nacional del Agua. México.
- Corso, P. (2022). Rendimiento del maíz amenazado por el cambio climático. SciDev.Net. <https://www.scidev.net/america-latina/news/rendimiento-del-maiz-amenazado-por-el-cambio-climatico/>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6

- (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Estrada, F., Mendoza-Ponce, A., Calderón-Bustamante, O., et al. (2022). Impacts and economic costs of climate change on Mexican agriculture. *Regional Environmental Change*, 22, 126. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01986-0>
- Hsiao, J., Swann, A. L. S., & Kim, S.-H. (2019). Maize yield under a changing climate: The hidden role of vapor pressure deficit. *arXiv preprint*.
- Howell, T. A. (2001). Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy Journal*, 93(2), 281–289. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.932281x>
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J. (2014). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616–620.
- Ojeda-Bustamante, W. (2011). Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia*, 45(1), 1–11. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952011000100001&script=sci_arttext
- Semenov, N., Senapati, K., Coleman, & A. L. Collins. (2025). A dataset of large ensemble of CMIP6-based transient climate scenarios for impact assessment in Great Britain. *Data in Brief*, 61, 111695. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2025.111695>
- Velázquez-Zapata, J. A., & Dávila-Ortiz, R. (2025). Projected meteorological drought in Mexico under CMIP6 scenarios: Insights into future trends and severity. *Geosciences*, 15(5), 186. <https://doi.org/10.3390/geosciences15050186>
- World Bank. (2019). *Climate-Smart Agriculture in Mexico*. World Bank.

2. VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN DISTRITOS DE TEMPORAL TECNIFICADO DEL NORTE, SURESTE Y SUR DE MÉXICO

CLIMATE VARIABILITY IN TECHNIFIED TEMPORARY DISTRICTS IN NORTHERN, SOUTHEASTERN, AND SOUTHERN MEXICO

2.1. Resumen

Se analizó la variabilidad climática en Distritos de Temporal Tecnificado (DTT) de Chiapas, Tamaulipas y Yucatán, evaluando tendencias de precipitación mensual acumulada y temperaturas medias mensuales de máximas y mínimas. La selección de estas regiones se debe a la diversidad climática del país, lo que permite contar con escenarios representativos. Se aplicaron la prueba de Mann-Kendall y el Estimador de Pendiente de Sen sobre datos de 44 estaciones climáticas: 17 del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y 27 del INIFAP, considerando 36 años (1980-2015) para las estaciones del SMN y 41 años (1980-2020) para las del INIFAP.

Los resultados muestran variaciones significativas en el clima de los DTT del norte, sureste y sur de México. Se identificó un aumento generalizado en las temperaturas máximas y mínimas, con tasas más altas en meses de junio a septiembre, un patrón consistente con tendencias de cambio climático documentadas. Estas tendencias sugieren posibles alteraciones en los ciclos de crecimiento de los cultivos, asociadas con mayor demanda hídrica y estrés térmico, lo que podría afectar la productividad agrícola.

El análisis de la precipitación acumulada mensual sugiere la posibilidad de una variabilidad interanual significativa. En meses clave para la siembra, como mayo, se detecta una tendencia a menores precipitaciones en varias estaciones, mientras que en octubre se registran incrementos. Estos cambios podrían influir en la disponibilidad de agua para los cultivos de temporal y con ello en su productividad.

Palabras clave: Variabilidad climática, Mann – Kendall, Pendiente de Sen, cambio climático, productividad agrícola.

Capítulo 2. Artículo enviado a la revista *Tecnología y Ciencias del Agua* del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Estatus: enviada y en revisión

2.2. Abstract

Climatic variability was analyzed in Technified Rainfed Districts (DTT) of Chiapas, Tamaulipas, and Yucatán, evaluating trends in monthly accumulated precipitation and monthly mean maximum and minimum temperatures. The selection of these regions is due to the country's climatic diversity, allowing for representative scenarios. The Mann-Kendall test and Sen's Slope Estimator were applied to data from 44 weather stations: 17 from the National Meteorological Service (SMN) and 27 from INIFAP, covering 36 years (1980–2015) for SMN stations and 41 years (1980–2020) for INIFAP stations.

The results show significant climatic variations in the DTTs of northern, southeastern, and southern Mexico. A general increase in maximum and minimum temperatures was identified, with higher rates in summer, a pattern consistent with documented climate change trends. These trends suggest potential alterations in crop growth cycles, associated with increased water demand and thermal stress, which could affect agricultural productivity.

The analysis of monthly accumulated precipitation suggests the possibility of significant interannual variability. In key planting months, such as May, there is a tendency toward lower precipitation at several stations, while in October increases are observed. These changes could potentially affect water availability for rainfed crops and, consequently, their productivity.

Keywords: Climatic variability, Mann–Kendall, Sen's Slope, climate change, agricultural productivity.

2.3. Introducción

Las acciones humanas, especialmente las que liberan gases de efecto invernadero, han sido la causa clara del calentamiento global, elevando la temperatura promedio de la superficie del planeta a 1.1°C por encima de lo que era entre 1850 y 1900, al periodo de 2011 a 2020 (IPCC, 2023). Al estudiar el cambio climático, el objetivo principal es identificar, describir y comprender los cambios a largo plazo en diferentes variables climáticas, tanto en términos de su tendencia central como de su variabilidad (Estrada F., et al., 2023).

El estudio de los patrones climáticos y su impacto es fundamental por diversas razones, que abarcan tanto la seguridad alimentaria como la sostenibilidad ambiental y la adaptación al cambio climático. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2024), garantizar la producción agrícola frente a las variaciones climáticas es vital para combatir el hambre y la malnutrición. De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2023), es esencial que las decisiones políticas se basen en evidencia científica para abordar los desafíos del cambio climático.

Cruz Hernández (2021) documenta cómo la irregularidad en la distribución de lluvias incrementa el riesgo de estrés hídrico, mientras que Estrada F. (2023) destacan la necesidad de estrategias de adaptación frente a escenarios de cambio climático que afectan la eficiencia de la producción agrícola. Asimismo, Mendoza-Ponce et al. (2023) subrayan que la combinación de temperaturas elevadas y variaciones pluviométricas puede alterar la fenología de los cultivos y disminuir los rendimientos, enfatizando la importancia de un manejo integrado que considere la variabilidad climática a escala regional y temporal.

La investigación analiza la variabilidad climática durante el ciclo de crecimiento de los cultivos de maíz, sorgo y frijol, comprendido entre abril y noviembre. Dada la diversidad climática del país, se seleccionaron tres regiones representativas: Chiapas, Tamaulipas y Yucatán, con el propósito de examinar los patrones climáticos a través de la precipitación mensual acumulada, así como las temperaturas medias mensuales de máximas y mínimas en estas zonas.

2.4. Materiales y métodos

2.4.1. Descripción de la zona de estudio

Los Distritos de Temporal Tecnificado (DTT) de estudio para Chiapas son los siguientes (Figura 1 a)): DTT 06 Acapetahua, DTT 17 Tapachula, DTT 18 Huixtla, DTT 19 Jesús Diego y el DTT 20 Margaritas Pijijiapan; los cuales se ubican en la región del Istmo-Costa y Soconusco. Estos DTT comprenden los municipios de Tonalá, Pijijiapan, Mapastepec, Acapetahua, Acacoyagua, Escuintla, Villa Comaltitlán, Huixtla, Huehuetán, Tuzantán, Mazatán, Tapachula, Tuxtla Chico, Metapa, Frontera Hidalgo y Suchiate. Desde el punto de vista climático se presentan los grupos cálidos y semicálidos, predominando el cálido subhúmedo con lluvias de junio a agosto, seguido por el clima cálido húmedo con lluvias abundantes en junio a agosto y la precipitación anual fluctúa entre 1,200 mm y 3,000 mm (SHC, 2012).

El Distrito de Temporal Tecnificado 010 San Fernando se localiza en el estado de Tamaulipas, México (Figura 1 b)). Comprende parte del municipio de San Fernando y otras áreas circundantes, situándose en una región del noreste del país que se caracteriza por una importante actividad agrícola, enfocada principalmente en cultivos de temporal. Climáticamente, esta zona presenta un clima semiárido a subhúmedo, con lluvias concentradas durante el junio a agosto. Esta variabilidad climática puede generar desafíos para la producción agrícola debido a la presencia de sequías y fluctuaciones de temperatura que afectan los ciclos de cultivo (INEGI, 2020).

El Distrito de Temporal Tecnificado 008 Oriente de Yucatán se encuentra en el estado de Yucatán, México, abarcando parte de la región oriental del estado (Figura 1 c)). Se caracteriza por su dedicación a cultivos de temporal que han sido esenciales para la economía y la subsistencia local. El clima de esta región es principalmente subhúmedo con lluvias en junio a agosto, presentando una marcada estacionalidad en las precipitaciones. La precipitación anual puede ser considerable, aunque su distribución no siempre es uniforme, lo que genera periodos de sequía ocasionales. Las temperaturas suelen ser cálidas a calurosas durante todo el año, con ligeras variaciones estacionales. Esta variabilidad climática representa un reto para la producción agrícola de temporal

debido a la dependencia de la precipitación y las posibles fluctuaciones en temperatura que afectan el crecimiento de los cultivos (INEGI, 2020).

2.4.2. Recopilación de datos climáticos

Se emplearon datos de 44 estaciones meteorológicas distribuidas en las áreas de estudio, de las cuales 17 pertenecen al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2024) y 27 del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP, 2024). El periodo de estudio comprende 36 años (1980-2015) para las estaciones del SMN y 41 años (1980-2020) para las estaciones del INIFAP, se recopilaron datos climáticos diarios de precipitación en mm, temperaturas máximas y mínimas en °C (Tabla 1, 2 y 3).

Para elegir las estaciones meteorológicas se consideraron las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), donde menciona que las estaciones seleccionadas deben tener un mínimo del 80% de datos disponibles en el período analizado y que no presente una falta de información por más de tres años seguidos (OMM, 2013). De igual manera se consideró el criterio del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2021), lo cual recomienda el uso de registros climáticos que cubran al menos tres décadas para capturar adecuadamente las variaciones naturales y los cambios inducidos por el ser humano.

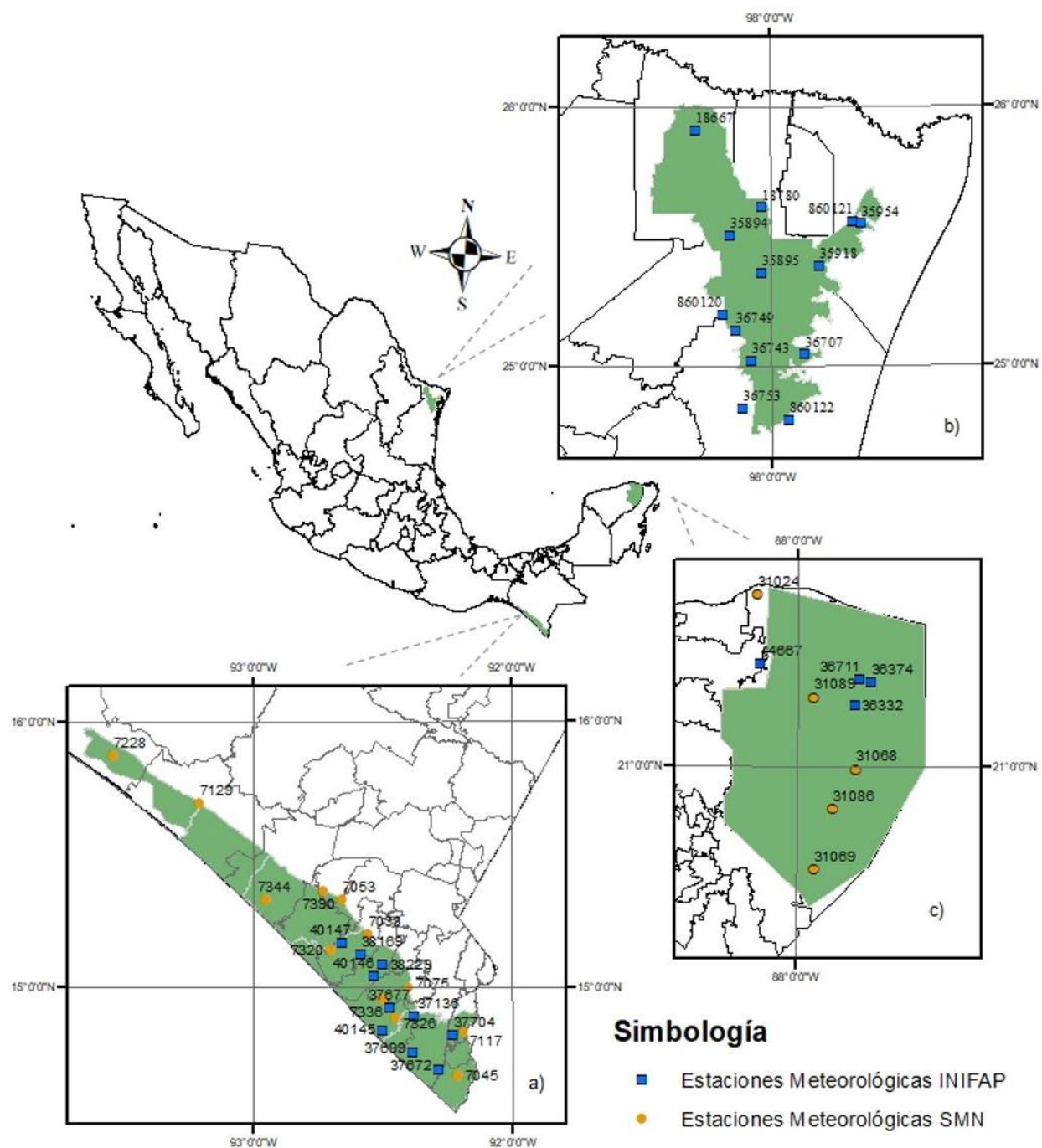


Figura 1. Ubicación geográfica de los Distritos de Temporal Tecnificado de estudio; a) Chiapas, b) Tamaulipas y c) Yucatán.

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas en los cinco DTT de Chiapas.

Número	Clave	Estación meteorológica	Fuente	Longitud	Latitud	Altitud
1	37136	Buena Vista	INIFAP	-92.3797	14.8940	44
2	37672	Yunnuen (Rancho Alegre)	INIFAP	-92.2875	14.6910	13
3	37677	Carolina	INIFAP	-92.4743	14.9245	19
4	37699	La Norteña	INIFAP	-92.3863	14.7599	16
5	37704	Umoa 2 sección	INIFAP	-92.2313	14.8235	84
6	38169	Rancho San José	INIFAP	-92.5844	15.1291	24
7	38229	Ingenio Huixtla	INIFAP	-92.5039	15.0883	35
8	40145	Argelia	INIFAP	-92.5037	14.8397	8
9	40146	5 de marzo	INIFAP	-92.5333	15.0447	13
10	40147	Teziutlán	INIFAP	-92.6608	15.1695	13
11	7038	Despoblado	SMN	-92.5581	15.2025	63
12	7045	El Dorado	SMN	-92.2128	14.6728	35
13	7053	Escuintla	SMN	-92.6558	15.3308	92
14	7075	Huehuetán	SMN	-92.4003	15.0022	65
15	7117	Metapa de Domínguez	SMN	-92.1917	14.8311	98
16	7129	Pijijiapan	SMN	-93.2114	15.6978	57
17	7228	Tres Picos	SMN	-93.5458	15.8750	20
18	7320	Salvación	SMN	-92.7014	15.1439	8
19	7326	Mazatán	SMN	-92.4539	14.8864	15
20	7336	Plan de Iguala	SMN	-92.5042	14.9589	18
21	7344	Ejido Ibarra	SMN	-92.9522	15.3339	9
22	7390	Cacaluta	SMN	-92.7311	15.3650	80

Cuadro 2. Estaciones meteorológicas en el DTT 010 San Fernando en Tamaulipas

Número	Clave	Estación meteorológica	Fuente	Longitud	Latitud	Altitud
1	18667	Galeana	INIFAP	-98.3211	25.9131	75
2	18780	El Avión	INIFAP	-98.0408	25.6144	53
3	35894	Martin Rocha	INIFAP	-98.1767	25.5056	65
4	35895	San Lorenzo	INIFAP	-98.0411	25.3592	23
5	35918	Los Ebanos	INIFAP	-97.7964	25.3853	6
6	35954	5 de Mayo	INIFAP	-97.6172	25.5500	4
7	36707	Ej. Pastores	INIFAP	-97.8571	25.0454	2
8	36743	Francisco Villa	INIFAP	-98.0866	25.0204	23
9	36749	Ej. 20 de Noviembre	INIFAP	-98.1528	25.1386	47
10	36753	San Fernando	INIFAP	-98.1218	24.8376	59
11	860120	La Peñita	INIFAP	-98.2074	25.1999	84
12	860121	Las Margaritas	INIFAP	-97.6540	25.5578	7
13	860122	Rancho Rospman	INIFAP	-97.9309	24.7934	16

Cuadro 3. Estaciones meteorológicas ubicadas en el DTT 08 Oriente de Yucatán

Número	Clave	Estación meteorológica	Fuente	Longitud	Latitud	Altitud
1	36332	Los Laureles	INIFAP	-87.7886	21.2117	15
2	36374	Sitio experimental Tizimín	INIFAP	-87.7267	21.2903	18
3	36711	Rancho Alegre	INIFAP	-87.7698	21.3030	12
4	44667	Santa Martha	INIFAP	-88.1344	21.3554	19
5	31024	Rio Lagartos	SMN	-88.1475	21.5897	4
6	31068	Chan Cenote	SMN	-87.7839	20.9908	30
7	31069	Chemax	SMN	-87.9350	20.6486	26
8	31086	Kuxeb	SMN	-87.8703	20.8550	21
9	31089	Dzonot Ake	SMN	-87.9369	21.2367	16

2.4.3. Homogenización y control de calidad de datos climáticos

La homogenización y el análisis de calidad de los datos climáticos es un proceso esencial para asegurar la fiabilidad y validez de los estudios sobre clima, meteorología y cambio climático. La precisión y consistencia de los datos recopilados por estaciones meteorológicas son afectados por fallos en los instrumentos de medición, cambios en las ubicaciones de las estaciones o errores humanos en la recolección de datos. Estos problemas pueden introducir errores sistemáticos o aleatorios que distorsionan las conclusiones sobre las tendencias y variaciones climáticas, por lo que el análisis de homogeneidad y calidad es indispensable antes de realizar estudios basados en estos datos (OMM, 2013).

Por tal razón, se empleó el paquete CLIMATOL en R, el cual es una herramienta diseñada para el análisis y homogeneización de datos climatológicos, este paquete permite realizar una variedad de tareas relacionadas con la manipulación, el análisis, relleno de datos faltantes y la visualización de datos climáticos, siendo especialmente útil para investigadores y meteorólogos que trabajan con series temporales de datos (A. Guijarro, 2024).

Para el análisis de los datos climáticos en CLIMATOL, se emplearon datos diarios de los parámetros climáticos de interés, cubriendo los ocho meses en los que se lleva a cabo el ciclo agrícola del maíz, frijol y sorgo, que es de abril a noviembre.

2.4.4. Prueba de Mann-Kendall

La prueba de tendencia de Mann-Kendall (MK) es un método estadístico no paramétrico utilizado para detectar tendencias en series temporales de datos; esta prueba es especialmente útil en el análisis de datos ambientales y climáticos, ya que permite identificar si hay una tendencia monotónica ascendente o descendente en los datos sin asumir una distribución normal; la hipótesis nula de la prueba establece que no existe una tendencia, mientras que la hipótesis alternativa sugiere la presencia de una tendencia monotónica; una de las ventajas del prueba de Mann-Kendall es su robustez frente a valores atípicos y cambios abruptos en los datos, lo que lo convierte en una herramienta

valiosa para el análisis de series temporales en campos como la hidrología y la meteorología (Hirsh, Slack, & Smith, 1982).

Los valores de los datos se evalúan como una serie temporal ordenada, y todos los valores de datos posteriores se comparan con cada uno de los valores de datos iniciales.

La serie temporal $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ representa n puntos de datos

La estadística de la prueba de Mann-Kendall (S) se calcula de la siguiente manera:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (1)$$

donde sign es la función signo, que devuelve 1, -1 o 0 dependiendo de si el argumento es positivo, negativo o cero, respectivamente. Un valor positivo de S indica una tendencia ascendente en la serie temporal, mientras que un valor negativo sugiere una tendencia descendente. Un valor cercano a cero indica que no hay una tendencia clara.

La media de S es $E[S] = 0$, y la varianza (σ^2) de S se da por la siguiente fórmula:

$$\sigma^2 = \frac{1}{18} \{n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^p t_j(t_j-1)(2t_j+5)\} \quad (2)$$

Donde n es el número de puntos de datos en la serie temporal y p es el número de grupos de datos empatados en el conjunto de datos, y t_j es el número de puntos de datos en el j -ésimo grupo empatado.

La estadística S se distribuye aproximadamente de manera normal, siempre que se emplee la siguiente transformación Z .

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\sigma^2}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\sigma^2}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Una vez que se tiene el valor de Z , se utilizó la distribución normal estándar para obtener el p - *value* correspondiente para una prueba de dos colas (donde se analizan tanto tendencias ascendentes como descendentes), el p - *value* se calcula así:

$$p - value = 2 * P(Z > |Z|) \quad (4)$$

Donde:

$P(Z > |Z|)$ es la probabilidad de que la estadística Z tome un valor mayor en una distribución normal estándar. Si el $p - value$ es menor que el nivel de significancia, se puede concluir que existe una tendencia significativa en los datos.

Para la prueba de Mann Kendall se eligió el valor del nivel de significancia de 0.05 ($\alpha = 0.05$) debido a que investigaciones como S. & P. (2004) determinan que el uso de este valor ayuda a garantizar que las conclusiones sobre la existencia de tendencias climáticas sean estadísticamente robustas y no se deban a fluctuaciones aleatorias. Además, facilita la comparación y replicación de estudios a nivel internacional.

Mientras que el valor de Z indica la dirección de la tendencia, la interpretación es la siguiente:

- $Z > 0$ indica que la variable tiene una tendencia creciente,
- $Z < 0$ indica una tendencia decreciente
- $Z \approx 0$ indica que no hay tendencia significativa en los datos

2.4.5. Estimador de Pendiente de Sen

El estimador de pendiente de Sen es un método no paramétrico utilizado para identificar una tendencia en una serie temporal, además de mostrar la magnitud de dicha tendencia. El estimador de la pendiente de Sen requiere al menos 10 valores en una serie temporal. Esta prueba calcula tanto la pendiente (es decir, la tasa de cambio lineal) como los interceptos de acuerdo con el método de Sen (Sen, 1968). Asimismo, como describieron (Drápela & Drápelova, 2011), el modelo lineal puede calcularse de la siguiente manera:

$$Y = Q * X + B \quad (5)$$

Donde:

Y : es el valor estimado de la variable dependiente,

Q es la pendiente de Sen (la tasa de cambio),

X es la variable independiente (por ejemplo, el tiempo),

B es el intercepto.

Este modelo lineal describe cómo cambia una variable en función del tiempo o de otro parámetro de interés, proporcionando una manera simple y robusta de analizar tendencias lineales en datos no paramétricos.

2.5. Resultados

A continuación, se presentan figuras de la prueba de Mann - Kendall y pendiente de Sen para la precipitación acumulada mensual, temperaturas máximas y mínimas media mensual de las tres zonas de estudio, la simbología para conocer si la tendencia es significativa o no es significativa es la siguiente:

- ▲ Tendencia significativa
- Tendencia no significativa

La pendiente de Sen se representa mediante un rango de colores escalonado, tomando el valor cero como punto medio de referencia.

La numeración de los mapas se corresponde con las Tablas 1, 2 y 3, lo que permite establecer una relación directa entre la representación de los mapas y las tablas de información de las estaciones meteorológicas.

Pruebas de tendencia de Mann-Kendall y pendientes de Sen aplicadas a la precipitación acumulada mensual

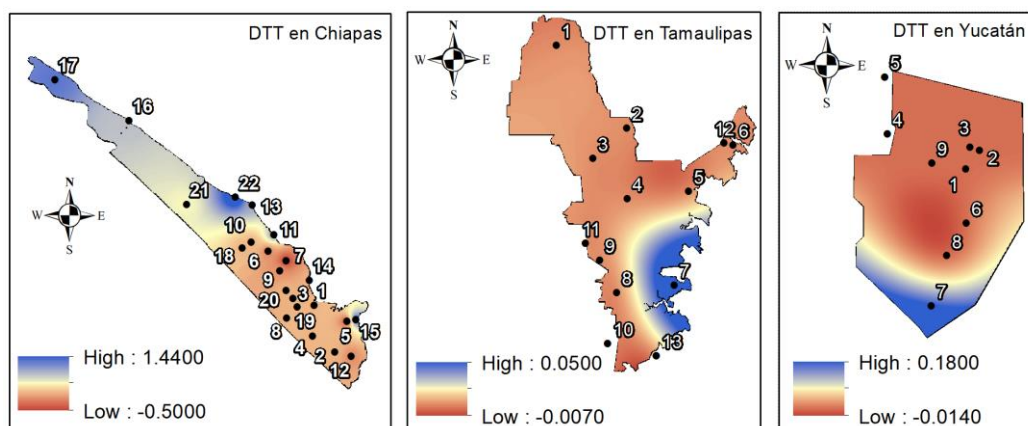


Figura 2. Tendencias en la precipitación acumulada mensual de abril

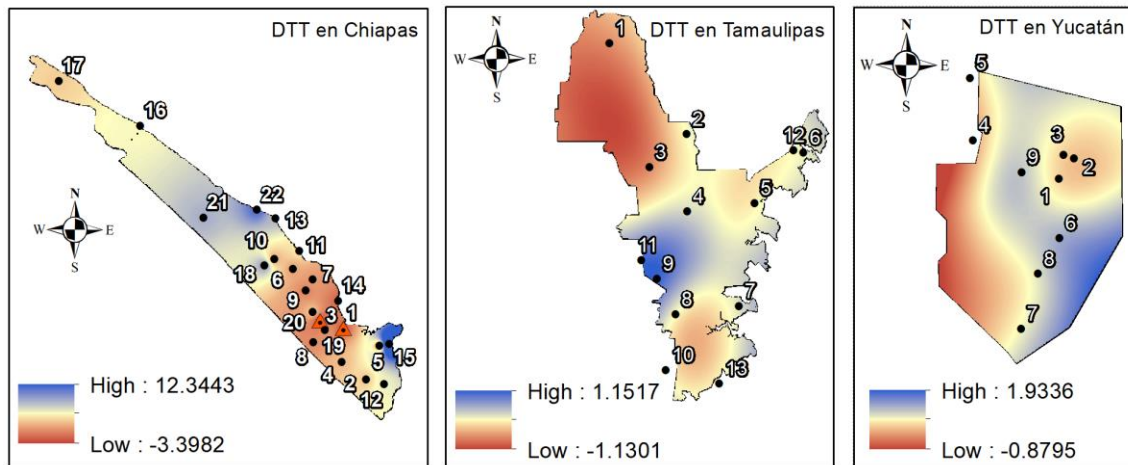


Figura 3. Tendencias en la precipitación acumulada mensual de mayo

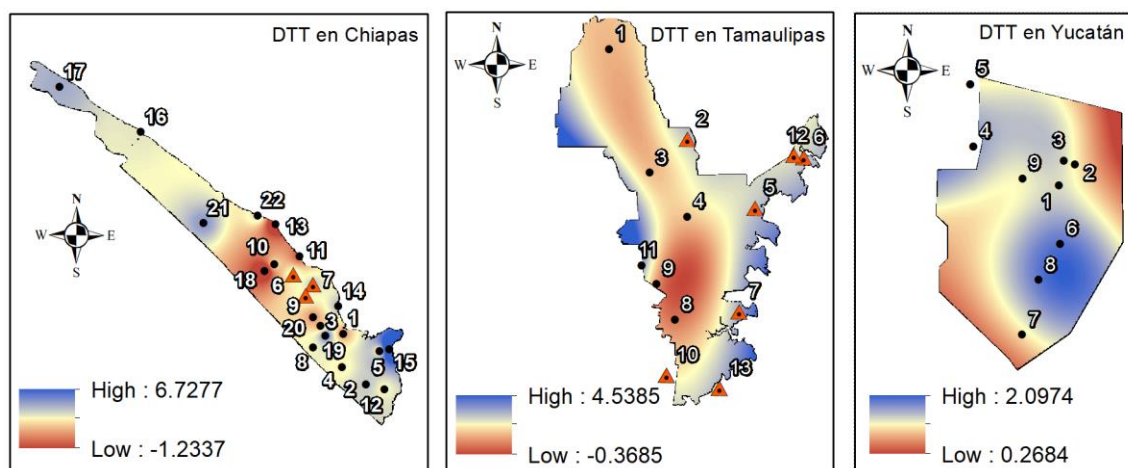


Figura 4. Tendencias en la precipitación acumulada mensual de junio

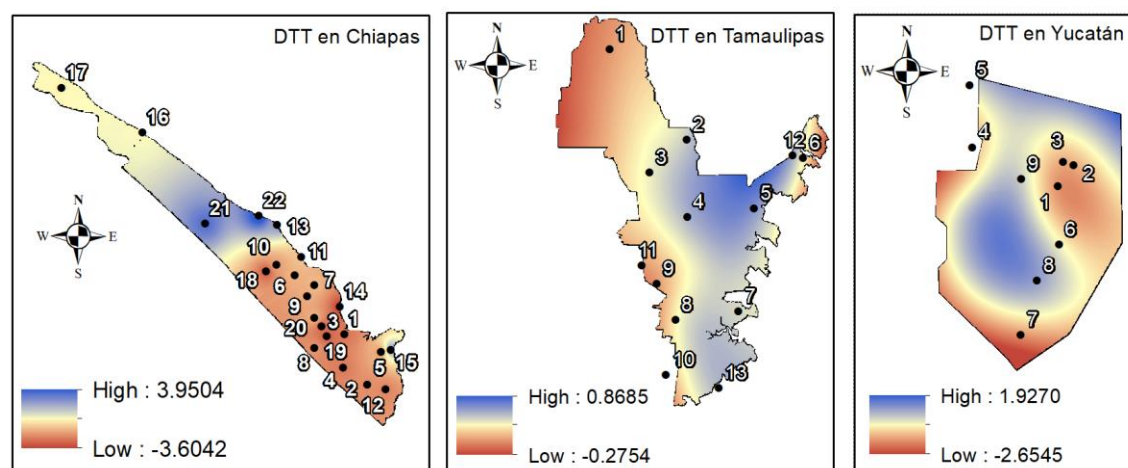


Figura 5. Tendencias en la precipitación acumulada mensual de julio

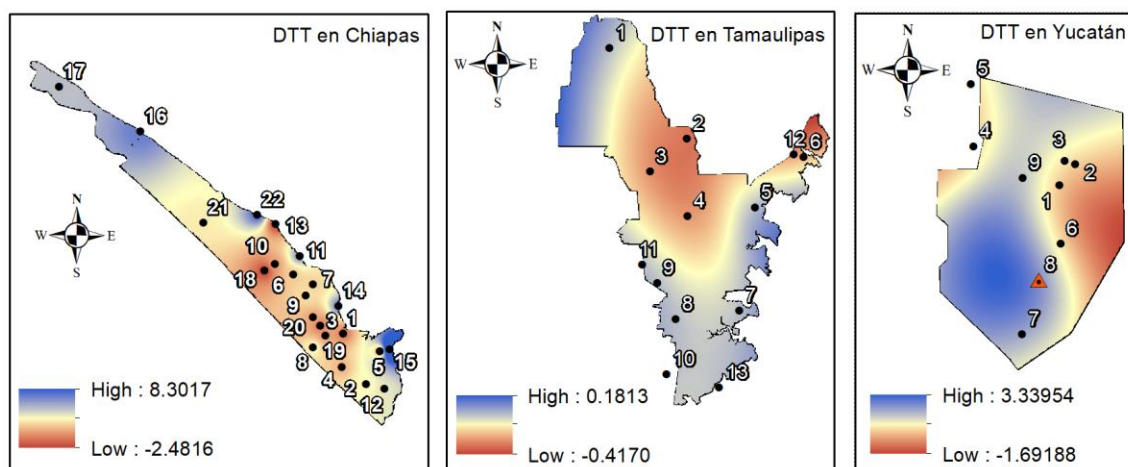


Figura 6. Tendencias en la precipitación acumulada mensual de agosto

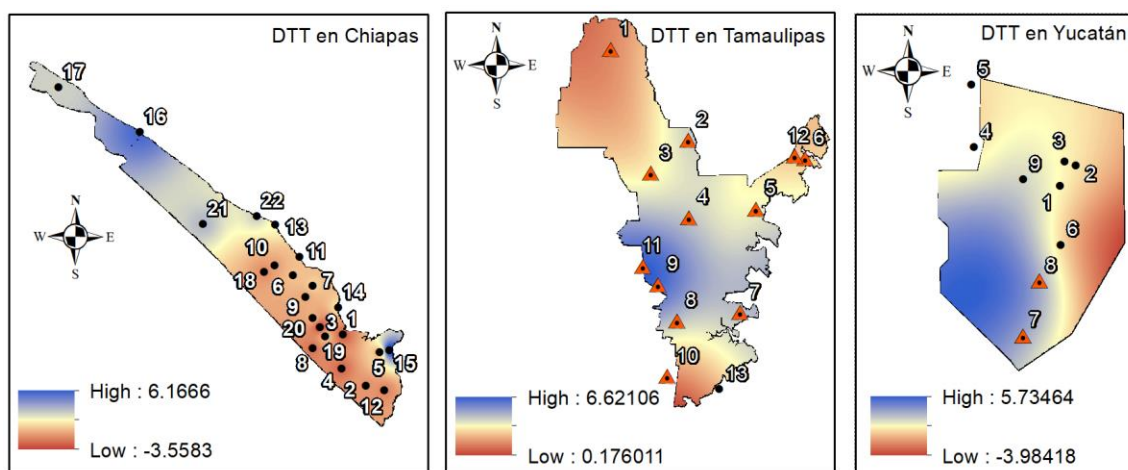


Figura 7. Tendencias en precipitación acumulada mensual, septiembre

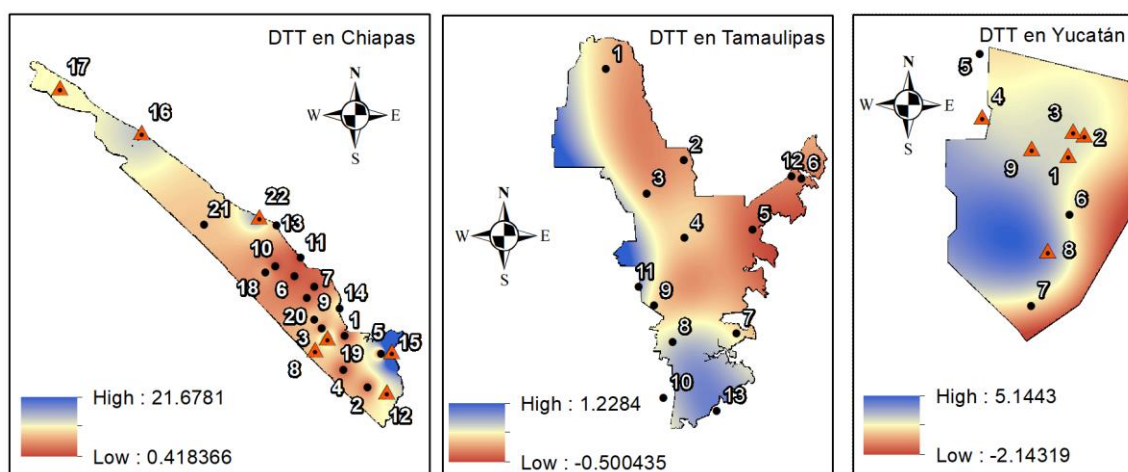


Figura 8. Tendencias en la precipitación acumulada mensual de octubre

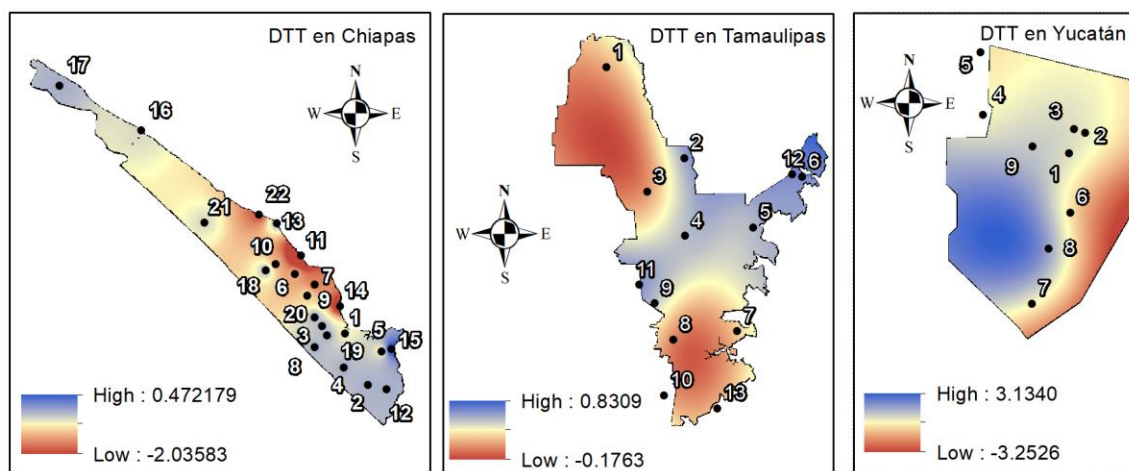


Figura 9. Tendencias, precipitación acumulada mensual de noviembre

En los DTT de Chiapas se observaron tendencias significativas en meses como mayo, junio y octubre. En mayo, estaciones como Buena Vista (1) y Carolina (3) mostraron disminuciones en la precipitación (pendientes de -2.90 y -3.40). Junio presentó tendencias positivas en estaciones como Rancho San José (6) e Ingenio Huixtla (7) (pendientes hasta 2.50), y octubre destacó con aumentos importantes, como en Metapa de Domínguez (15) (pendiente de 21.80). Sin embargo, la mayoría de las estaciones no mostraron tendencias significativas, indicando estabilidad.

En el DTT 010 San Fernando Tamaulipas predominó la ausencia de tendencias, como en abril, donde Galeana (1) y El Avión (2) registraron pendientes de 0. No obstante, junio y septiembre mostraron incrementos en estaciones como El Avión (2) y Galeana (1), con pendientes de hasta 4.1, lo que podría reflejar efectos climáticos regionales.

En el DTT 08 Oriente de Yucatán, abril no presentó tendencias. En mayo y junio hubo ligeros aumentos no significativos, mientras que julio mostró disminuciones leves. Agosto registró un aumento significativo en Kuxeb (8) (pendiente de 2.4), y septiembre y octubre en estaciones como Chemax (7) y Rancho Alegre (3) (hasta 4.0 en octubre). Noviembre no presentó cambios relevantes.

Pruebas de tendencia de Mann-Kendall y pendientes de Sen aplicadas a la temperatura máxima media mensual

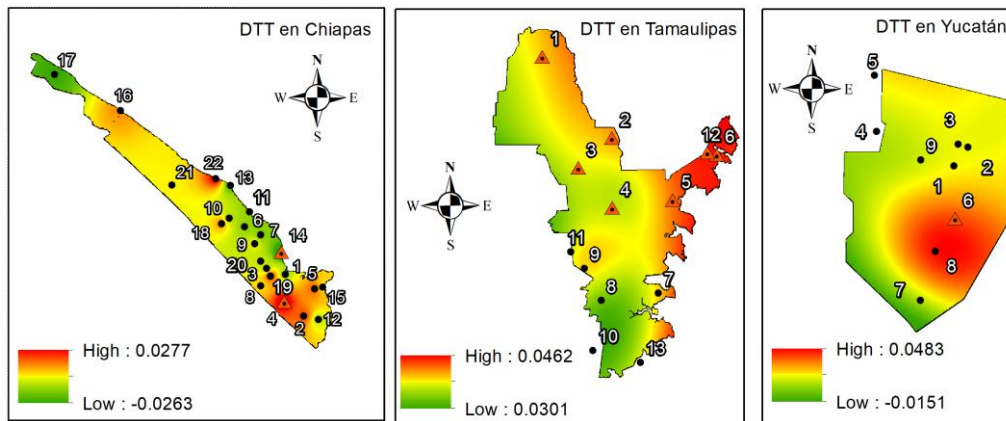


Figura 10. Tendencias en temperatura máxima media mensual de abril

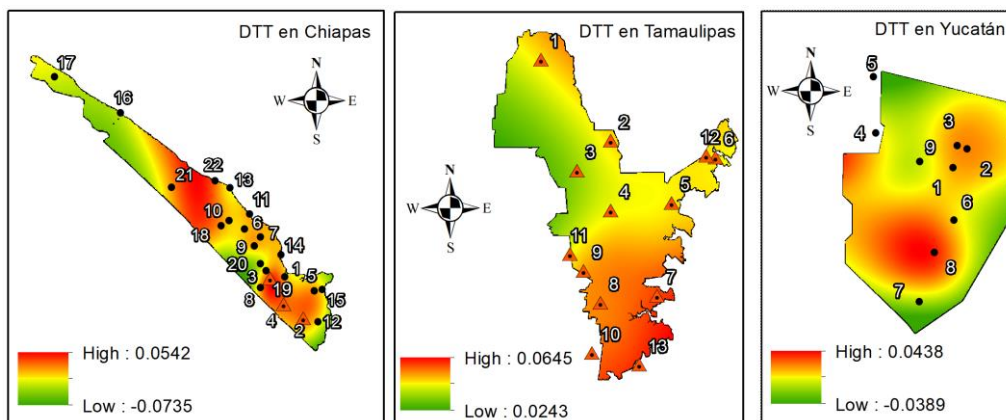


Figura 11. Tendencias, temperatura máxima media mensual de mayo

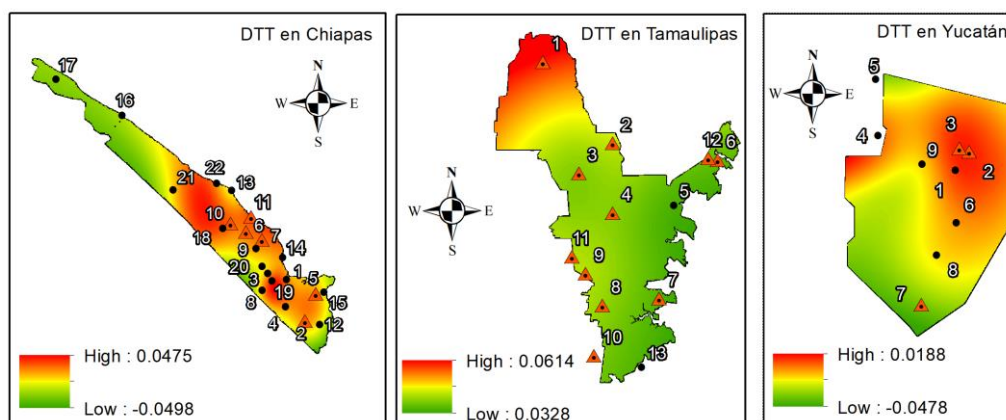


Figura 12. Tendencias, temperatura máxima media mensual de junio

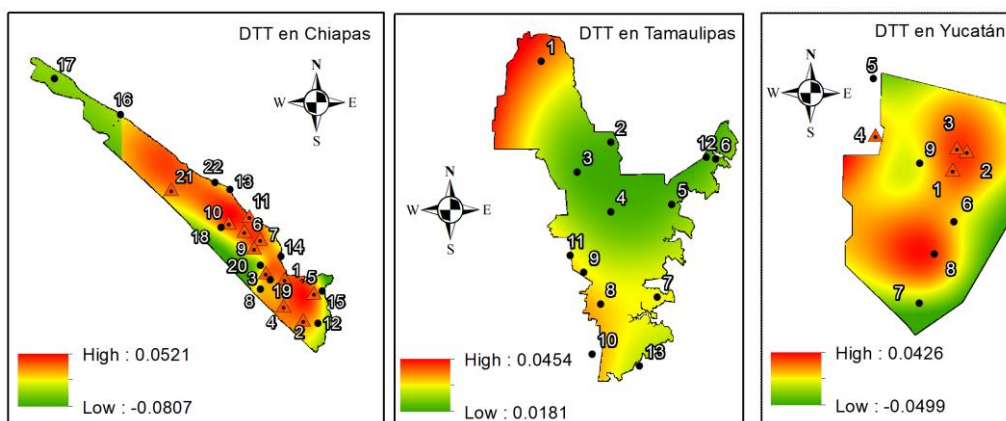


Figura 13. Tendencias en temperatura máxima media mensual de julio

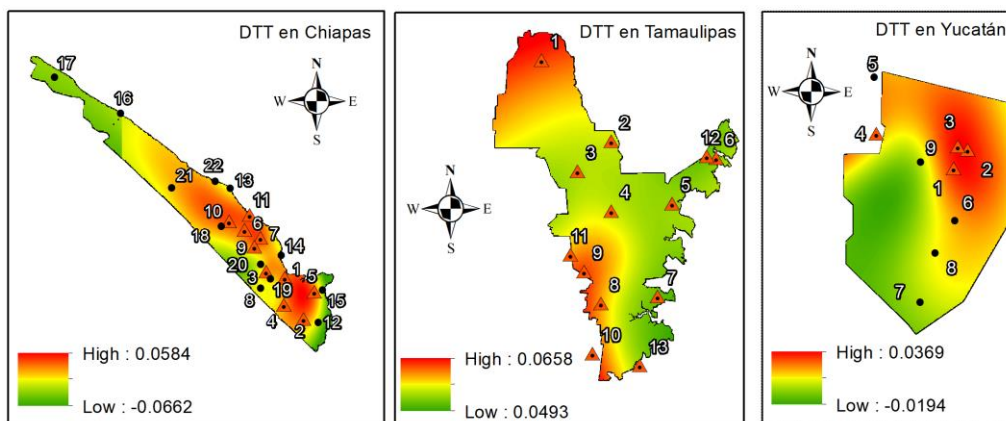


Figura 14. Tendencias en temperatura máxima media mensual, agosto

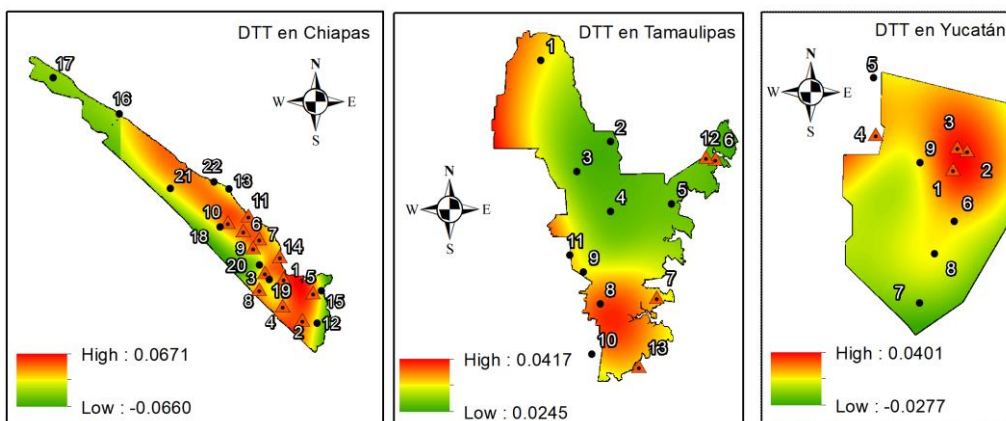


Figura 15. Tendencias temperatura máxima media mensual septiembre

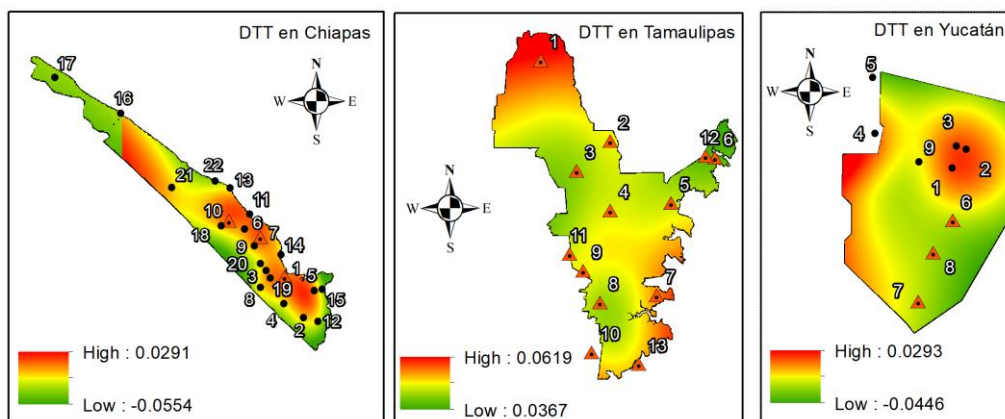


Figura 16. Tendencias en temperatura máxima media mensual, octubre

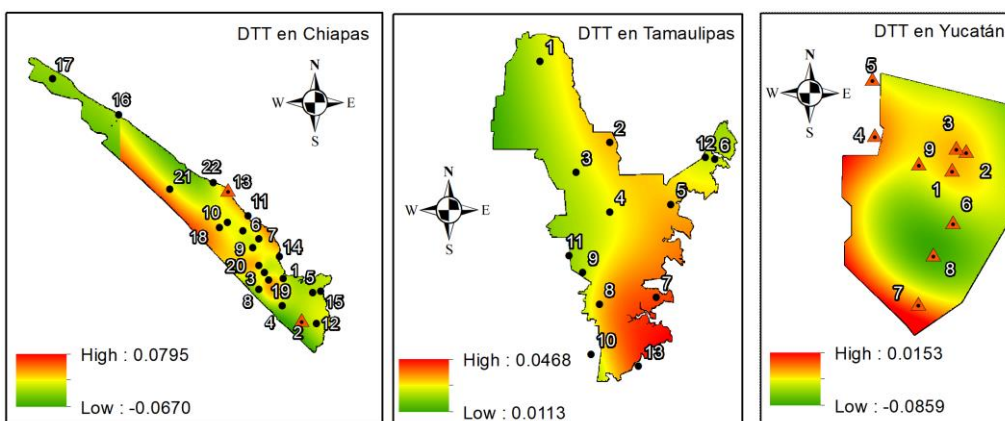


Figura 17. Tendencias, temperatura mínima media mensual, noviembre

En general, predomina la estabilidad en la mayoría de las estaciones ($p\text{-value} > 0.05$). En los DTT de Chiapas, las tendencias significativas se concentran entre junio y septiembre, con un pico en julio, cuando 12 estaciones presentan incrementos (pendientes de hasta 0.05). En octubre se observa una disminución en la variabilidad de los cambios, aunque destacan pendientes positivas en estaciones como Teziutlán (10) y Rancho San José (6). Este comportamiento resulta particular, ya que contrasta con la fase habitual del ciclo anual de precipitación, en el cual octubre suele marcar la transición hacia una reducción progresiva de las lluvias.

En el DTT 08 San Fernando Tamaulipas, mayo, junio y agosto concentran la mayoría de incrementos, destacando mayo con pendientes elevadas como en Rancho Rospman (13) (0.06). Julio y septiembre reflejan menor actividad, mientras octubre

muestra nuevas tendencias al alza, como en Galeana (1), posiblemente por variaciones climáticas regionales.

En Yucatán, julio a septiembre presentan aumentos en estaciones como el Sitio experimental Tizimín (2) y Rancho Alegre (3) (pendientes de Sen > 0.04 en septiembre). En contraste, noviembre muestra las mayores disminuciones, como en Chan Cenote (6) y Kuxeb (8) (pendientes de hasta -0.08), lo que sugiere posibles impactos climáticos negativos.

Pruebas de tendencia de Mann-Kendall y pendientes de Sen aplicadas a la temperatura mínima media mensual

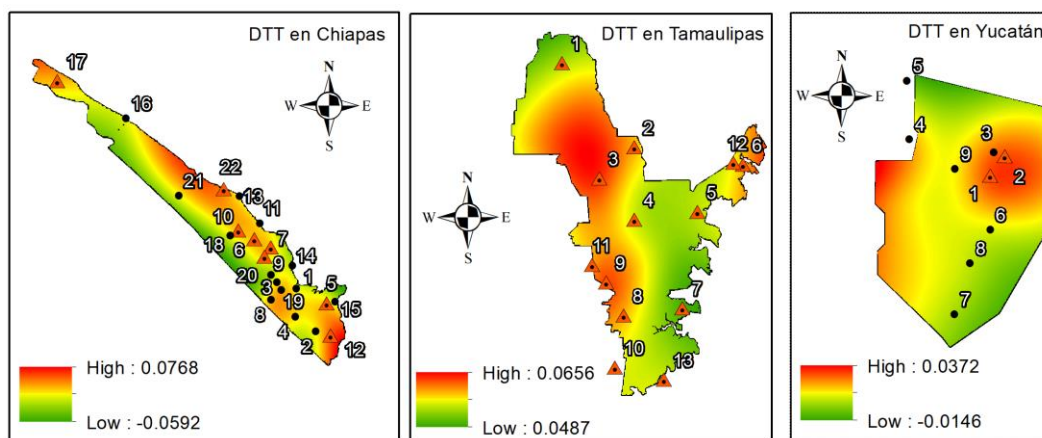


Figura 18. Tendencias en temperatura mínima media mensual, abril

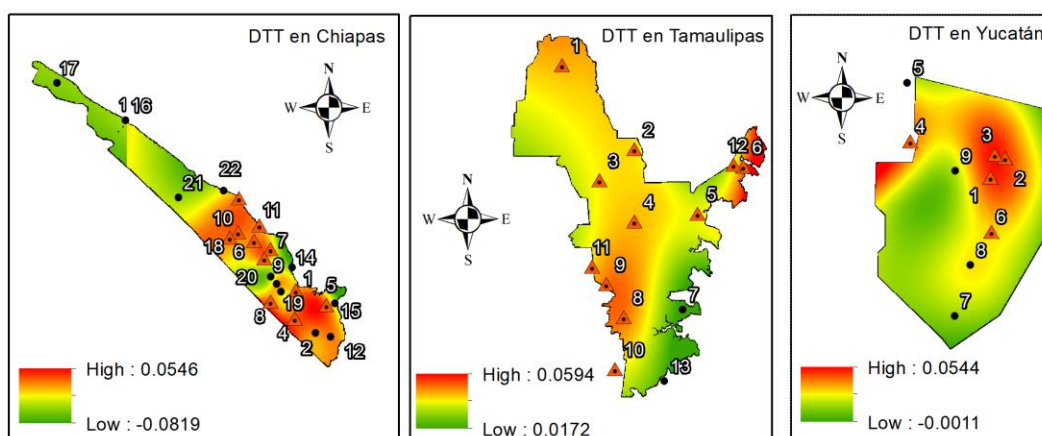


Figura 19. Tendencias en temperatura mínima media mensual, mayo

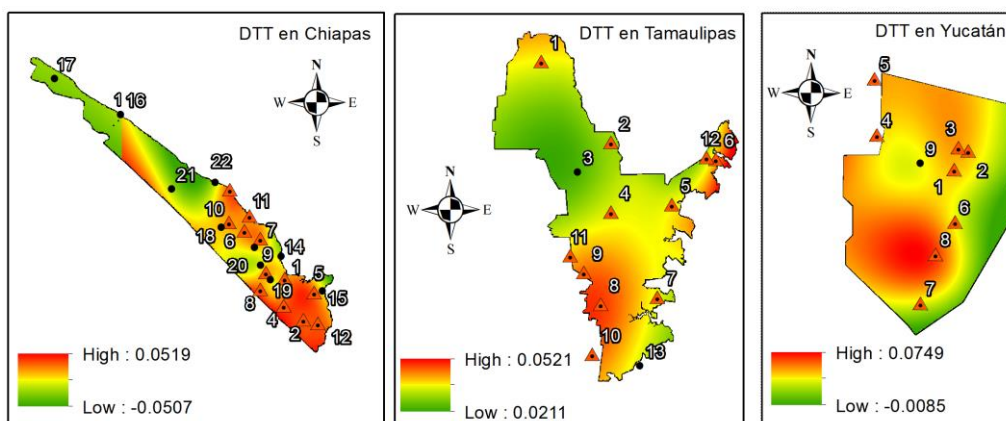


Figura 20. Tendencias en temperatura mínima media mensual, junio

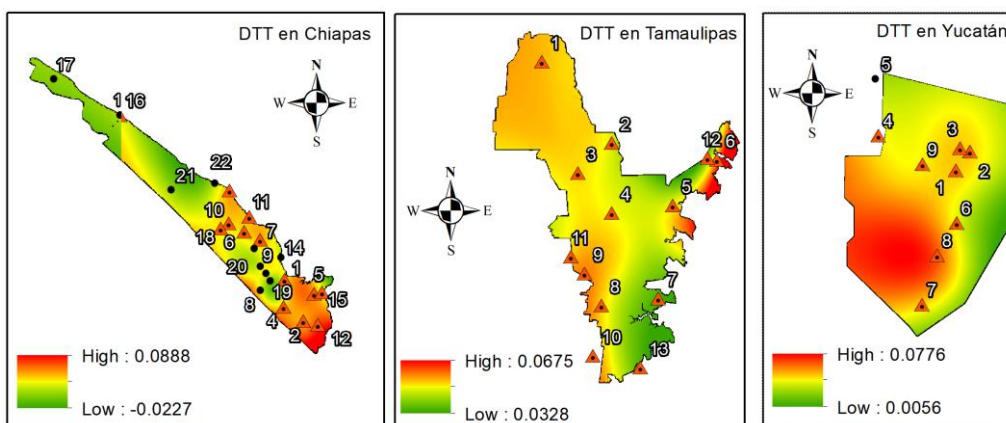


Figura 21. Tendencias en temperatura mínima media mensual, julio

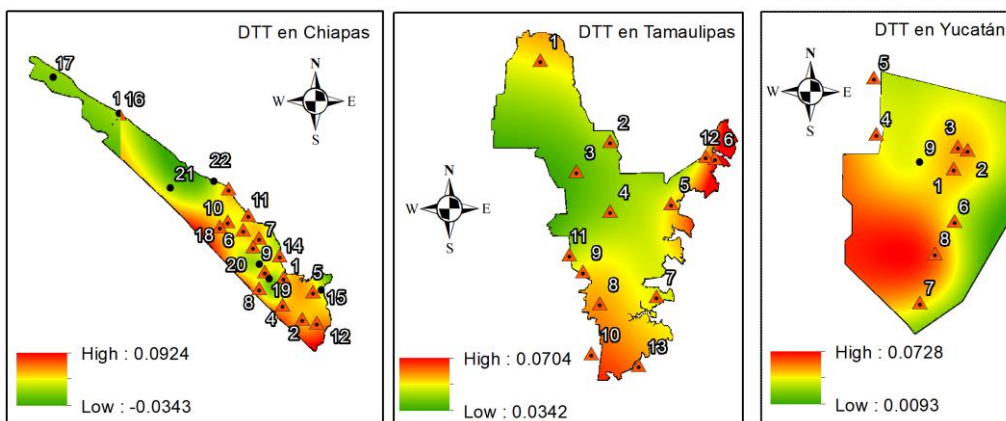


Figura 22. Tendencias en temperatura mínima media mensual, agosto

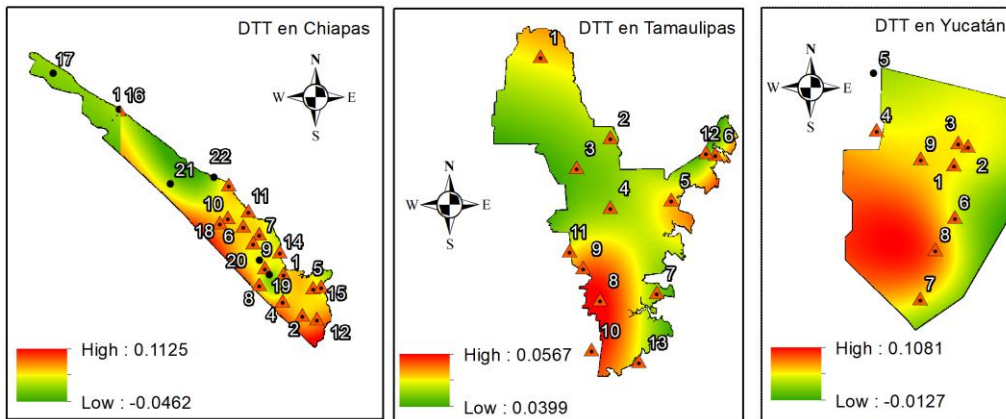


Figura 23. Tendencias temperatura mínima media mensual septiembre

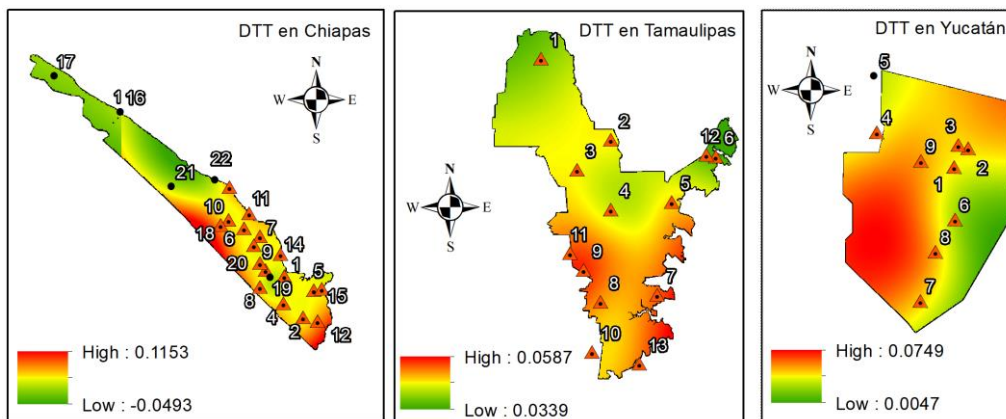


Figura 24. Tendencias en temperatura mínima media mensual, octubre

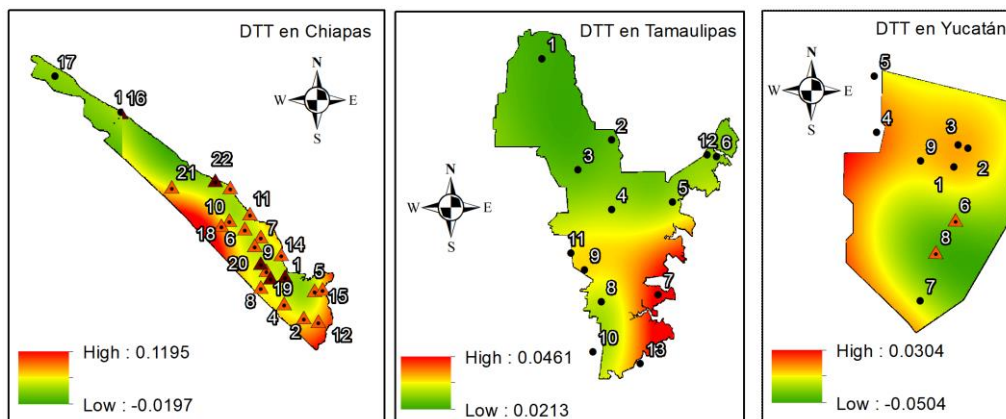


Figura 25. Tendencias temperatura mínima media mensual, noviembre

El análisis de las tendencias de la temperatura mínima media mensual mediante la prueba de Mann-Kendall y la pendiente de Sen, revela patrones significativos de cambio climático en diversas estaciones meteorológicas de las tres regiones estudiadas. Los

resultados obtenidos reflejan una tendencia general hacia el aumento de las temperaturas mínimas, con algunas excepciones y variabilidad local importante.

En general, las estaciones en los DTT ubicados en Chiapas muestran una tendencia al incremento de las temperaturas mínimas durante los meses de abril a septiembre, con un número destacado de estaciones, como UMOA 2 Sección (5), Rancho San José (6) e Ingenio Huixtla (7), que presentan tendencias significativas en múltiples meses. Estas estaciones presentan pendientes elevadas, lo que indica un aumento sostenido de la temperatura mínima. En contraste, algunas estaciones, como Huehuetán (14), muestran tendencias negativas en ciertos meses, aunque estas no son estadísticamente significativas. La mayor frecuencia de tendencias significativas se presenta en los meses de agosto y septiembre, durante la temporada de lluvias.

En el DTT 10 San Fernando Tamaulipas, los resultados indican un claro aumento de las temperaturas mínimas durante los meses de abril a septiembre, especialmente de abril a octubre. En estos meses, la mayoría de las estaciones muestran tendencias significativas y pendientes positivas, como las estaciones 5 de Mayo (6) y San Fernando (10) destacan por sus incrementos más pronunciados. Sin embargo, en noviembre, las tendencias dejan de ser significativas, lo que sugiere que las temperaturas mínimas se estabilizan durante la transición hacia la temporada más fría.

En el DTT 08 Yucatán, varias estaciones, como Los Laureles (1), Sitio Experimental Tizimín (2) y Rancho Alegre (3), presentan tendencias significativas de aumento en la temperatura mínima desde abril hasta octubre, reflejando una tendencia de calentamiento consistente. La pendiente de Sen también muestra un aumento gradual a lo largo de los meses, con valores significativos en agosto y septiembre. No obstante, en algunos casos, como en Rancho Alegre (3) y Santa Martha (4), las fluctuaciones de temperatura no alcanzan la significancia estadística, lo que podría indicar que los cambios en estas áreas no son lo suficientemente pronunciados o están influenciados por otros factores locales. Además, algunas estaciones en noviembre, como Chan Cenote (6) y Kuxeb (8), muestran pendientes negativas.

2.6. Discusión

Dado que en Chiapas, Tamaulipas y Yucatán se identificó una limitada disponibilidad de estudios previos sobre análisis de tendencias de los DTT a escala mensual, fue necesario proceder con un ajuste de los valores a nivel anual. Esta decisión metodológica permitió garantizar la coherencia en la interpretación de los resultados y, al mismo tiempo, posibilitó la comparación adecuada de las tendencias observadas en las tres entidades.

En términos generales, los resultados indican que la mayoría de las estaciones no presentan cambios estadísticamente significativos en la precipitación acumulada mensual y en las temperaturas medias máximas y mínimas ($p\text{-value} > 0.05$), lo que evidencia una moderada estabilidad climática en las series analizadas. No obstante, se identificaron tendencias significativas en ciertas estaciones, lo cual fue evaluada mediante la comparación con estudios previos, permitiendo validar la consistencia y relevancia de los hallazgos en un contexto regional más amplio, tal como se detalla a continuación.

En los DTT de Chiapas se identificaron principalmente tendencias significativas de precipitación acumulada mensual durante el mes de junio, destacando las estaciones Rancho San José (6) e Ingenio Huixtla (7), que registraron incrementos en la pendiente de Sen de hasta 2.50 mm/año. De manera consistente, Méndez et al. (2007) reportaron incrementos de precipitación de entre 0.5 y 1.4 mm/año para el mes de junio en el periodo 1920–2004, lo que coincide con los patrones climáticos observados en Chiapas y refuerza la evidencia de un aumento sostenido en la precipitación durante este mes.

En el DTT 010 San Fernando, Tamaulipas, se observó ausencia de tendencias en abril (pendientes de Sen de 0), mientras que en junio y septiembre se registraron incrementos de hasta 4.1 mm/año, particularmente en las estaciones Galeana (1) y El Avión (2). Estos resultados son consistentes con lo reportado por Cavazos y Hastenrath (1990) para el periodo 1940–1985, quienes documentaron aumentos en la precipitación de 0.5 a 2 mm/año durante los meses de junio a septiembre en el noreste de México.

En Yucatán, agosto mostró aumentos significativos en Kuxeb (8) con pendiente de Sen de 2.4 mm/año, y septiembre y octubre en Chemax (7) y Rancho Alegre (3) con

pendientes hasta 4.0 mm/año. Pavia et al. (2006) reportaron aumentos de hasta 3 mm/año en la península de Yucatán en el mes de agosto durante el periodo de 1960–2000, lo que concuerda con el presente estudio. El aumento observado puede interpretarse como una señal de intensificación de la precipitación estacional, lo cual tendría implicaciones potenciales en la recarga de acuíferos y en la disponibilidad hídrica de la región.

En el análisis de la temperatura mínima media mensual se observó un aumento generalizado. En Chiapas, estaciones como Rancho San José (6) e Ingenio Huixtla (7) registraron incrementos sostenidos con pendientes de Sen de 0.04 a 0.05 °C/año entre abril y noviembre, lo que coincide con lo reportado por Estrada et al. (2023), quienes documentaron para el periodo 1980–2020 tuvieron incrementos de 0.03 a 0.06 °C/año en zonas agrícolas de Chiapas durante los mismos meses.

En Tamaulipas, las estaciones 5 de Mayo (6) y San Fernando (10) presentaron incrementos significativos de temperatura mínima (pendiente de Sen de 0.04 a 0.06 °C/año) y máxima (pendiente de Sen de 0.02 a 0.04 °C/año) entre abril y octubre, reflejando patrones similares a Hulme et al. (1998), quienes reportaron aumentos de 0.1 a 0.7 °C/año en los meses de abril a octubre en el norte de México en el periodo de 1901–1995.

2.7. Conclusiones

El análisis de tendencias en precipitación y temperatura mediante Mann-Kendall y la pendiente de Sen mostró patrones diversos en tres regiones de México, relevantes para una gestión agrícola y ambiental adaptada al cambio climático.

En los DTT ubicados en Chiapas, se identificaron tendencias significativas en la precipitación acumulada, con disminuciones notables en mayo y aumentos importantes en octubre. Respecto a las temperaturas máximas y mínimas, se observó un patrón consistente de aumento, especialmente durante los meses de transición hacia la temporada de lluvias, lo que sugiere una posible influencia del cambio climático en estas variaciones.

En el DTT 10 San Fernando Tamaulipas las tendencias en la precipitación fueron más evidentes durante los meses de junio a agosto, con incrementos significativos en junio y septiembre. En cuanto a la temperatura máxima y mínima, los meses de abril a septiembre mostraron aumentos constantes, con las estaciones de mayor pendiente localizadas en áreas específicas que parecen ser más vulnerables a fenómenos climáticos regionales. Sin embargo, en noviembre, tanto las precipitaciones como las temperaturas máximas y mínimas reflejaron una mayor estabilidad, posiblemente debido a la transición hacia los meses más fríos.

En el DTT 08 Oriente de Yucatán se observaron incrementos significativos durante los meses de abril a octubre en la precipitación acumulada, especialmente en agosto y octubre, esto sugiere que la precipitación acumulada durante la temporada de lluvias presenta variaciones significativas, las cuales se deben a cambios en la duración y frecuencia de los eventos lluviosos. Esta tendencia sugiere posibles alteraciones en los ciclos agrícolas, con impactos en la disponibilidad de agua para los cultivos de estudio y la planificación de estos. En cuanto a las temperaturas mínimas, se identificó una tendencia general de aumento desde abril hasta octubre en varias estaciones, como Los Laureles (1), Sitio Experimental Tizimín (2) y Rancho Alegre (3). Sin embargo, en noviembre se observaron algunas disminuciones en las temperaturas mínimas, lo que podría estar relacionado con el cambio estacional a la temporada fría.

En conjunto, estos resultados subrayan la importancia de un seguimiento constante y detallado de las tendencias climáticas en estas regiones para poder anticipar los efectos del cambio climático y adaptar las prácticas agrícolas, la gestión de los recursos hídricos y la planificación ambiental. Las diferencias observadas entre las estaciones y las regiones resaltan la complejidad de los sistemas climáticos locales, lo que requiere un enfoque integral para comprender los factores que están modelando el clima en el país.

2.8. Referencias

- A. Guijarro, J. (2024). Paquete Climatol en R. Islas Baleares, España: Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Recuperado de <https://www.climatol.eu/>.
- Adger, W., Arnell, N., & Tompkins, E. (2005). Successful adaptation to climate change across scales. ELSEVIER, 77-86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.12.005>
- CONAGUA. (2024). Información Estadística Climatológica. Ciudad de México: CONAGUA. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Cavazos, T., & Hastenrath, S. (1990). Convection and rainfall over Mexico and their modulation by the Southern Oscillation, *International Journal of Climatology*, no. 10, pp. 377–386.
- Cruz Hernández, S. (2021). Impacto de la variabilidad climática en la agricultura de temporal en el estado de Tlaxcala, México. *Revista ASyD*, 17(4), 1–19. DOI: <https://doi.org/10.22231/asyd.v17i4.1401>
- DOF. (2014). Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018. Ciudad de México: Secretaría de Gobernación, México. Recuperado de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5342492&fecha=28/04/2014
- Drápela, K., & Drápelova, I. (2011). Application of Mann-Kendall test and the Sen's slope estimates for trend detection in deposition data from Bílý Kříž (Beskydy Mts., the Czech Republic) 1997–2010. *Beskydy Bulletin*, 7-13.
- Estrada, F., Calderón Bustamante, Ó., Raga, G., Altamirano del Carmén, M., Torres, V., & Zavala Hidalgo, J. (2023). Análisis del cambio climático observado y proyectado para México. Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAYCC), UNAM.

- FAO. (2024). El estado de la Seguridad Alimentaria y la Nutrición en el Mundo. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- Field A. (2013). Discovering statistics using IBM SPSS statistics (4th ed.). SAGE Publications.
- Hirsh, R., Slack, J., & Smith, R. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data. Water Resources Research. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR018i001p00107>
- Hulme, M., Doherty, R., Ngara, T., New, M., & Lister, D. (1998). Global warming and changes in drought and rainfall patterns in the 20th century. Climatic Change, 39(2), 199–210
- INEGI. (2020). Atlas de los Distritos de Temporal Tecnificado de México. Ciudad de México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INIFAP. (2024). Sistema de base de datos meteorológicos ESSENGER. Ciudad de México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Recuperado de <https://clima.inifap.gob.mx/Inmysr/DatosIndirectos/NEssenger>
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Ginebra, Suiza: University Press. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- IPCC. (2023). Climate Change 2023 Synthesis Report. Interlaken, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Lobell, D., Schlenker, W., & Costa Roberts, J. (2011). Climate Trends and Global Crop Production Since 1980. scienceexpress. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1204531>
- OMM. (2013). Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Geneve, Suiza: World Meteorological Organization. Recuperado de <https://wmo.int/es>

- Méndez González, Jorge, Návar Cháidez, José de Jesús, & González Ontiveros, Vladimir. (2008). Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. Investigaciones geográficas. Recuperado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112008000100004
- Mendoza-Ponce, A., Haro, A., Murray-Tortarolo, G., & Salazar Frausto, J. L. (2023). Agricultura y cambio climático en México. El Cambio climático en México (pp. 1–20). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pavia, E.G., F. Graef y J. Reyes. PDO-ENSO effects in the climate of Mexico. (2006). Journal of Climate, 19, 6433-6438
- Sheng, Y., & Paul, P. (2004). A comparison of the power of the t-test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend detection. Hydrological Sciences Journal, 21-37. DOI: <http://dx.doi.org/10.1623/hysj.49.1.21.53996>
- SEMAHN. (2011). Programa de Acción Ante el Cambio Climático del Estado de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México: Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural. Recuperado de https://www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/descargas/cambio_climatico/Programa_Estatal_Cambio_Climatico_Chiapas_Actualizacion2022.pdf
- SEMARNAT. (2013). Estrategia Nacional de cambio climático visión 10-20-40. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/41978/Estrategia-Nacional-Cambio-Climatico-2013.pdf>
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association, 1379-1389. DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- SHC. (2012). Programa Regional de Desarrollo. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: Secretaría de Hacienda Chiapas. Recuperado de <https://www.haciendachiapas.gob.mx/planeacion/prog-regionales.asp>

3. PROYECCIONES CMIP6 DE CAMBIO CLIMÁTICO EN TRES REGIONES AGROCLIMÁTICAS DE MÉXICO

CMIP6 CLIMATE CHANGE PROJECTIONS IN THREE AGROCLIMATIC REGIONS OF MEXICO

3.1. Resumen:

Se analizó la variabilidad espacio-temporal de las temperaturas máximas y mínimas medias anuales y la precipitación acumulada anual, junto con sus proyecciones futuras. Se emplearon los modelos de circulación general HadGEM3-GC31-LL, MPI-ESM1-2-LR y GFDL-ESM4 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados fase 6 (CMIP6, por sus siglas en inglés). Las proyecciones se basaron en la trayectoria socioeconómica SSP2-4.5, estimando temperaturas y precipitación anual en los Distritos de Temporal Tecnificado (DTT) de Chiapas, Tamaulipas y Yucatán. Para generar proyecciones regionalizadas se utilizó el generador estocástico LARS-WG 8.0 con datos de 44 estaciones meteorológicas. Las tendencias se evaluaron mediante las pruebas estadísticas de Mann-Kendall y la pendiente de Sen. Los resultados evidencian un incremento general de la temperatura y una mayor variabilidad hídrica, lo que podría afectar la productividad agrícola y la seguridad alimentaria regional, subrayando la necesidad de estrategias de adaptación y mitigación frente a escenarios climáticos futuros.

Palabras-clave: Proyecciones futuras, CMIP6, Distritos de Temporal Tecnificado, LARS – WG 8.0.

3.2. Abstract:

The spatiotemporal variability of mean annual maximum and minimum temperatures, as well as annual accumulated precipitation, was analyzed along with their future projections. The general circulation models HadGEM3-GC31-LL, MPI-ESM1-2-LR, and GFDL-ESM4 from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) were employed. Projections were based on the SSP2-4.5 socioeconomic pathway, estimating annual temperature and precipitation in the Technified Rainfed Districts (DTT) of Chiapas, Tamaulipas, and Yucatán. Regionalized projections were generated using the stochastic weather generator LARS-WG 8.0 with data from 44 meteorological stations. Trends were evaluated using the Mann-Kendall test and Sen's slope estimator. The results reveal a general increase in temperature and greater hydrological variability, which could affect agricultural productivity and regional food security, emphasizing the need for adaptation and mitigation strategies in response to future climate scenarios.

Keyword: future projections, CMIP6, Rainfed Agricultural Districts (DTT), LARS – WG 8.0.

3.3. Introducción

El cambio climático y el calentamiento global, considerados perturbaciones antropogénicas de gran preocupación, generan impactos significativos en los ecosistemas y sistemas productivos, al alterar los patrones climáticos, intensificar eventos extremos y provocar la pérdida de biodiversidad, lo que compromete la seguridad alimentaria y los medios de vida en diversas regiones (IPCC, 2021).

La agricultura de temporal de secano, dependiente exclusivamente de la precipitación pluvial para el desarrollo de los cultivos, se encuentra entre los sectores más vulnerables al cambio climático, representando aproximadamente el 60% de la superficie cultivada en México y siendo practicada principalmente por pequeños productores en zonas rurales (SAGARPA, 2017).

La agricultura de temporal, altamente dependiente de las condiciones climáticas, enfrenta impactos significativos debido a los cambios en los patrones de precipitación, el incremento en la frecuencia de sequías y la ocurrencia de eventos extremos, como lluvias torrenciales o heladas tempranas, que afectan gravemente la producción, la seguridad

alimentaria y los ingresos de las familias rurales (CONABIO, 2020). Para abordar estos desafíos, los estudios de proyecciones climáticas futuras emplean Modelos Climáticos Globales (GCM, por sus siglas en inglés), los cuales simulan los procesos físicos y químicos de la atmósfera, los océanos, la superficie terrestre y la criosfera, generando proyecciones que facilitan la toma de decisiones en políticas públicas, la gestión de riesgos y la planificación sectorial (IPCC, 2021).

En particular, el conjunto de modelos del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6) representa el esfuerzo más actualizado y coordinado para evaluar las respuestas del sistema climático a distintas trayectorias de desarrollo socioeconómico y emisiones (Eyring et al., 2016).

El uso de modelos climáticos en escalas regionales y locales, mediante técnicas como el *downscaling* dinámico o estadístico, ha permitido generar proyecciones más precisas para regiones específicas como México. Estas proyecciones son esenciales para analizar los impactos potenciales del cambio climático en sectores vulnerables como la agricultura de temporal, ya que permiten anticipar cambios en la distribución espacial y temporal de las lluvias, así como aumentos en las temperaturas extremas (Martínez Austria y Patiño Gómez, 2019).

La presente investigación tiene como objetivo principal generar proyecciones regionales de cambio climático mediante la aplicación de tres Modelos de Circulación General (MCG): HadGEM3-GC31-LL, MPI-ESM1-2-LR y GFDL-ESM4, bajo la trayectoria socioeconómica SSP2-4.5. Estas proyecciones se obtuvieron utilizando el generador estocástico LARS-WG 8.0 (*Long Ashton Research Station Weather Generator*), una herramienta ampliamente empleada para la creación de escenarios climáticos sintéticos a partir de datos observados y simulados. El enfoque se centra en la simulación y proyección de variables climáticas clave, tales como la precipitación acumulada anual, la temperatura máxima media anual y la temperatura mínima media anual, con alta resolución espacial, en Distritos de Temporal Tecnificado (DTT) ubicados en tres regiones representativas de México: Tamaulipas, Yucatán y Chiapas. Finalmente, para el análisis de tendencias se emplearon los métodos estadísticos de Mann-Kendall y la pendiente de Sen.

La selección de estos DTT responde a su importancia estratégica en la agricultura de temporal y a su diversidad climática, la cual se deriva de su ubicación geográfica contrastante. El estudio pretende aportar evidencia científica que respalde la formulación de estrategias de adaptación regionalizadas, con énfasis en la gestión del agua, la planificación agrícola y la resiliencia de los sistemas productivos en el contexto del cambio climático.

3.4. Materiales y métodos

3.4.1. Área de estudio

Los Distritos de Temporal Tecnificado (DTT) analizados en el estado de Chiapas (Figura 1a)) incluyen al DTT 06 Acapetahua, DTT 17 Tapachula, DTT 18 Huixtla, DTT 19 Jesús Diego y DTT 20 Margaritas Pijijiapan. Estos se localizan en las regiones del Istmo-Costa y el Soconusco. Los DTT abarcan diversos municipios como Tonalá, Pijijiapan, Mapastepec, Acapetahua, Acacoyagua, Escuintla, Villa Comaltitlán, Huixtla, Huehuetán, Tuzantán, Mazatán, Tapachula, Tuxtla Chico, Metapa, Frontera Hidalgo y Suchiate. En cuanto al clima, predominan las zonas cálidas y semicálidas, siendo más común el clima cálido subhúmedo con lluvias durante el verano. También se presentan áreas con clima cálido húmedo caracterizado por precipitaciones abundantes en la misma estación. La precipitación anual en esta región varía entre 1,200 mm y 3,000 mm (SHC, 2012).

El Distrito de Temporal Tecnificado 010 San Fernando se encuentra en el estado de Tamaulipas, México, e incluye parte del municipio de San Fernando y áreas aledañas (Figura 1b)). Esta región, ubicada en el noreste del país, es conocida por su significativa actividad agrícola, principalmente de cultivos de temporal. El clima de la zona es semiárido a subhúmedo, con la mayor parte de las lluvias concentradas en el verano. La precipitación anual promedio es variable, y las temperaturas fluctúan entre veranos cálidos e inviernos más frescos. Esta variabilidad climática presenta desafíos para la agricultura, ya que pueden ocurrir sequías y cambios de temperatura que impactan los ciclos de cultivo. (INEGI, 2020).

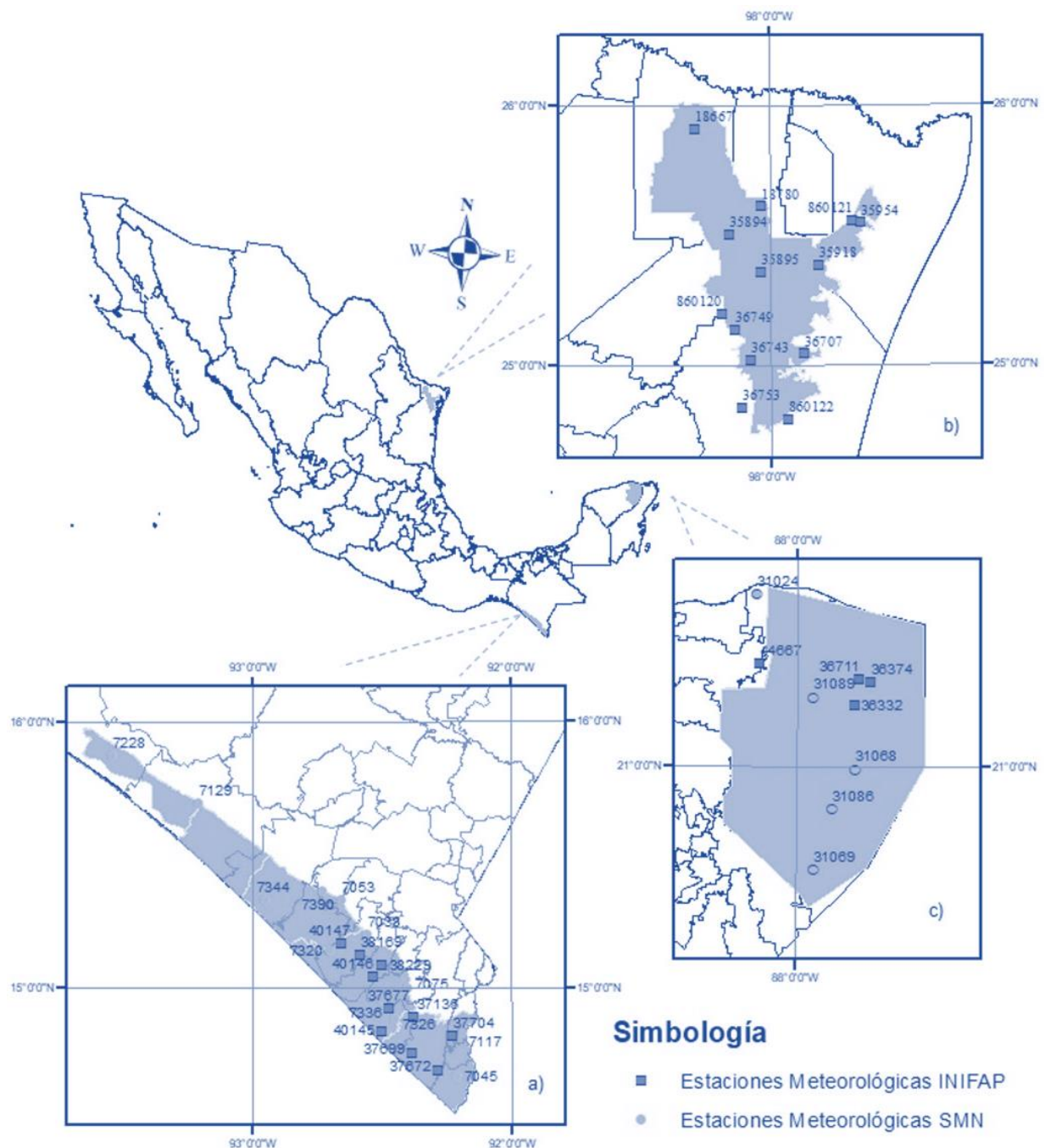
El Distrito de Temporal Tecnificado 008 Oriente de Yucatán, ubicado en la región oriental de Yucatán, México, se dedica a cultivos de temporal clave para la economía y

subsistencia local (Figura 1c)). Su clima subhúmedo con lluvias de verano tiene precipitaciones abundantes pero irregulares, lo que provoca sequías ocasionales. Las temperaturas son cálidas a calurosas todo el año, con pequeñas variaciones. Esta variabilidad climática dificulta la agricultura de temporal, ya que los cultivos dependen de las lluvias y son vulnerables a cambios de temperatura (INEGI, 2020).

3.4.2. Base de datos climáticos

Se usaron datos de 44 estaciones meteorológicas en las áreas de estudio (Tablas 1, 2 y 3), 17 del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2024) y 27 del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP, 2024). El periodo analizado abarca 36 años (1980-2015) para las estaciones del SMN y 41 años (1980-2020) para las del INIFAP. Se trabajó con datos meteorológicos diarios de precipitación (mm) y temperaturas máxima y mínima del aire (°C), los cuales fueron integrados para generar registros anuales representativos empleados en el análisis de variabilidad climática.

Para la selección de estaciones meteorológicas, se siguió la recomendación de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Esto implicó elegir únicamente estaciones que contaran con al menos el 80% de datos disponibles para el período de análisis y que no tuvieran más de tres años consecutivos de información faltante (OMM, 2013). También se tomó en cuenta el criterio del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2021), sugiere usar registros climáticos de al menos 30 años para reflejar con precisión tanto las variaciones naturales como los cambios causados por la actividad humana. Para garantizar la calidad de los datos, las series climáticas incompletas de cada estación meteorológica se homogeneizaron y completaron usando el software CLIMATOL versión 3.1.1. Este programa funciona comparando cada serie de datos con una serie de referencia. Lo hace interpolando y utilizando valores estandarizados de estaciones cercanas para los mismos periodos de tiempo, e incluso puede incorporar datos de estaciones vecinas cuando la estación analizada no tiene registros completos (A. Guijarro, 2024).



Nota: Los números que se indican son las claves de las estaciones meteorológicas

Figura 26. Localización geográfica de los Distritos de Temporal Tecnificado analizados: a) Chiapas, b) Tamaulipas y c) Yucatán.

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4. Estaciones meteorológicas situadas en los cinco DTT en Chiapas

Número	Clave	Estación meteorológica	Fuente	Longitud	Latitud	Altitud
1	37136	Buena Vista	INIFAP	-92.3797	14.8940	44
2	37672	Yunnuen (Rancho Alegre)	INIFAP	-92.2875	14.6910	13
3	37677	Carolina	INIFAP	-92.4743	14.9245	19
4	37699	La Norteña	INIFAP	-92.3863	14.7599	16
5	37704	Umoa 2 sección	INIFAP	-92.2313	14.8235	84
6	38169	Rancho san José	INIFAP	-92.5844	15.1291	24
7	38229	Ingenio Huixtla	INIFAP	-92.5039	15.0883	35
8	40145	Argelia	INIFAP	-92.5037	14.8397	8
9	40146	5 de marzo	INIFAP	-92.5333	15.0447	13
10	40147	Teziutlán	INIFAP	-92.6608	15.1695	13
11	7038	Despoblado	SMN	-92.5581	15.2025	63
12	7045	El Dorado	SMN	-92.2128	14.6728	35
13	7053	Escuintla	SMN	-92.6558	15.3308	92
14	7075	Huehuetan	SMN	-92.4003	15.0022	65
15	7117	Metapa de Domínguez	SMN	-92.1917	14.8311	98
16	7129	Pijijiapan	SMN	-93.2114	15.6978	57
17	7228	Tres Picos	SMN	-93.5458	15.8750	20
18	7320	Salvación	SMN	-92.7014	15.1439	8
19	7326	Mazatán	SMN	-92.4539	14.8864	15
20	7336	Plan de Iguala	SMN	-92.5042	14.9589	18
21	7344	Ejido Ibarra	SMN	-92.9522	15.3339	9
22	7390	Cacaluta	SMN	-92.7311	15.3650	80

Cuadro 5. Estaciones meteorológicas situadas en el DTT 010 San Fernando en Tamaulipas

Número	Clave	Estación meteorológica	Fuente	Longitud	Latitud	Altitud
1	18667	Galeana	INIFAP	-98.3211	25.9131	75
2	18780	El Avión	INIFAP	-98.0408	25.6144	53
3	35894	Martin Rocha	INIFAP	-98.1767	25.5056	65
4	35895	San Lorenzo	INIFAP	-98.0411	25.3592	23
5	35918	Los Ebanos	INIFAP	-97.7964	25.3853	6
6	35954	5 de Mayo	INIFAP	-97.6172	25.5500	4
7	36707	Ej. Pastores	INIFAP	-97.8571	25.0454	2
8	36743	Francisco Villa	INIFAP	-98.0866	25.0204	23
9	36749	Ej. 20 de Noviembre	INIFAP	-98.1528	25.1386	47
10	36753	San Fernando	INIFAP	-98.1218	24.8376	59
11	860120	La Peñita	INIFAP	-98.2074	25.1999	84
12	860121	Las Margaritas	INIFAP	-97.6540	25.5578	7
13	860122	Rancho Rospman	INIFAP	-97.9309	24.7934	16

Cuadro 6. Estaciones meteorológicas situadas en el DTT en Yucatán

Número	Clave	Estación meteorológica	Fuente	Longitud	Latitud	Altitud
1	36332	Los Laureles	INIFAP	-87.7886	21.2117	15
2	36374	Sitio experimental Tizimín	INIFAP	-87.7267	21.2903	18
3	36711	Rancho Alegre	INIFAP	-87.7698	21.3030	12
4	44667	Santa Martha	INIFAP	-88.1344	21.3554	19
5	31024	Rio Lagartos	SMN	-88.1475	21.5897	4
6	31068	Chan Cenote	SMN	-87.7839	20.9908	30
7	31069	Chemax	SMN	-87.9350	20.6486	26
8	31086	Kuxeb	SMN	-87.8703	20.8550	21
9	31089	Dzonot Ake	SMN	-87.9369	21.2367	16

3.4.3. Generador Meteorológico Estocástico LARS – WG 8.0

El *Long Ashton Research Station Weather Generator* (LARS-WG) es un modelo estadístico diseñado para generar series sintéticas de datos climáticos diarios que preservan las características estadísticas observadas localmente. Su versión 8.0 incorpora mejoras en la representación de las distribuciones de variables climáticas y permite la incorporación de escenarios de cambio climático derivados de Modelos de Circulación General (MCG) del conjunto CMIP6 (Semenov y Stratonovitch, 2015).

Este modelo se considera especialmente útil en estudios agroclimáticos, debido a su capacidad para generar datos climáticos sintéticos de largo plazo con alta resolución temporal, lo cual es crucial para la evaluación de impactos y el diseño de estrategias de adaptación en el sector agrícola (Semenov, Brooks, Barrow, y Richardson, 2010).

3.4.4. Calibración y validación del modelo LARS – WG 8.0

La calibración de LARS-WG 8.0 se realizó utilizando datos meteorológicos diarios observados para cada una de las estaciones ubicadas en los Distritos de Temporal Tecnificado (DTT) seleccionados. Esta etapa permite ajustar los parámetros del modelo a las condiciones climáticas locales mediante la estimación de las funciones de probabilidad empíricas para cada variable. Se emplearon las bases de datos climáticos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

Durante el proceso de calibración, el modelo ajusta la frecuencia de días secos y húmedos, la distribución de la duración de secuencias húmedas y las estadísticas de temperatura y radiación solar, con el propósito de reproducir de manera realista las condiciones climáticas observadas. Este ajuste resulta esencial para garantizar que las proyecciones futuras bajo escenarios de cambio climático sean coherentes y confiables respecto al clima de referencia local. La validación se efectuó mediante la comparación de las estadísticas de primer y segundo orden entre las series generadas por LARS-WG y las observadas, siguiendo la metodología propuesta por Ghahramani, Kokic, Crimp y Howden (2015).

3.4.5. Escenarios de cambio climático

Una vez completadas las etapas de calibración y validación del modelo, se procedió a la generación de series meteorológicas futuras. Este procedimiento se realizó mediante el módulo *GENERATOR* de *LARS-WG*, el cual emplea los parámetros previamente ajustados durante la fase de calibración, contenidos en archivos con extensión *.wgx. Dichos parámetros incorporan información estadística derivada de los datos climáticos históricos observados, y permiten simular cambios proyectados en las variables climáticas, específicamente precipitación y temperatura, bajo diferentes escenarios de cambio climático.

Para el análisis, se utilizaron tres Modelos de Circulación General (MCG) del conjunto CMIP6, integrados por defecto en la versión 8.0 del generador climático LARS-WG: HadGEM3-GC31-LL, MPI-ESM1-2-LR y GFDL-ESM4. Para esta investigación, se seleccionó el modelo HadGEM3-GC31-LL debido a su alta sensibilidad climática, que permite evaluar de manera conservadora los impactos del cambio climático en cultivos de temporal, además de contar con una amplia validación en proyectos internacionales como el Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP) (Williams et al., 2018). Asimismo, se incorporó el modelo MPI-ESM1-2-LR por su sensibilidad climática moderada y su estabilidad en simulaciones de largo plazo, ofreciendo variables agroclimáticas clave y habiendo sido ampliamente validado en estudios agrícolas globales (Williams et al., 2018). Por su parte, el modelo GFDL-ESM4 destaca por su resolución de aproximadamente 100 km en la atmósfera y 50 km en el océano, lo que permite capturar patrones climáticos regionales, como monzones y precipitaciones estacionales, esenciales para la agricultura de temporal en regiones como México (Dunne et al., 2020).

Para proyectar escenarios futuros, se empleó la trayectoria socioeconómica SSP2-4.5, ampliamente utilizada en estudios agrícolas por su enfoque intermedio, que permite comparaciones robustas con otras trayectorias (Fricko et al., 2017). Su aplicación en estudios previos sobre agricultura en regiones tropicales y subtropicales demuestra su idoneidad para modelar los efectos del cambio climático en sistemas agrícolas vulnerables, como los de temporal en México (O'Neill et al., 2016).

El análisis de las proyecciones futuras se realizó a partir de registros diarios de temperatura máxima, mínima y precipitación, los cuales fueron procesados e integrados para generar valores anuales de temperatura media máxima y mínima, así como de precipitación acumulada anual y se estructuró para el período 2021-2070, abarcando un horizonte temporal de 50 años. Este intervalo es ampliamente recomendado por organismos como el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) para estudios de impacto climático en sectores sensibles, como la agricultura de temporal, debido a su capacidad para capturar tendencias climáticas significativas con un nivel aceptable de certeza (IPCC, 2021).

El horizonte de 50 años facilita la evaluación de cambios en patrones climáticos relevantes para la planificación de infraestructura agrícola, la adopción de prácticas sostenibles y la gestión de riesgos en los Distritos de Temporal Tecnificado (DTT) de Chiapas, Tamaulipas y Yucatán. Las proyecciones futuras se compararon con un período histórico de referencia: 1980-2015 para datos de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y 1980-2020 para estaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), garantizando una base sólida para evaluar la variabilidad climática.

3.4.6. Análisis de tendencias mediante los métodos de Mann-Kendall y pendiente de Sen

Para evaluar las tendencias en las series temporales de las variables climáticas analizadas (precipitación acumulada anual, temperatura máxima y mínima media anual), se emplearon los métodos estadísticos no paramétricos de Mann-Kendall y la pendiente de Sen, ampliamente utilizados en estudios climáticos y agroclimáticos por su robustez frente a datos no normales y su capacidad para detectar tendencias monótonas (Hamed, 2008).

El test de Mann-Kendall se aplicó para determinar la significancia estadística de las tendencias en las series temporales. Este método evalúa si existe una tendencia creciente o decreciente en los datos a lo largo del tiempo, sin requerir una distribución específica, lo que lo hace adecuado para series climáticas con variabilidad estacional o irregular (Kendall, 1975). La prueba se realizó con un nivel de significancia del 5% ($p <$

0.05) para confirmar la presencia de tendencias estadísticamente significativas en las variables estudiadas.

Complementariamente, la pendiente de Sen se utilizó para estimar la magnitud de las tendencias detectadas. Este método calcula la pendiente media de los cambios en los datos a lo largo del tiempo, proporcionando una medida cuantitativa de la tasa de cambio en las variables climáticas (Sen, 1968).

El análisis se llevó a cabo utilizando el software estadístico R (versión 4.3.2), empleando los paquetes "trend" y "modifiedmk" para implementar los tests de Mann-Kendall y la pendiente de Sen, respectivamente (Pohlert, 2020). Los datos de entrada correspondieron a las series temporales generadas a partir de las 44 estaciones meteorológicas procesadas con el generador climático LARS-WG 8.0, asegurando una resolución adecuada para las proyecciones regionalizadas.

3.5. Resultados

A continuación, se muestran los resultados de las pruebas de Mann-Kendall y la pendiente de Sen para la precipitación acumulada anual, así como las temperaturas máximas y mínimas promedio anuales en las tres zonas de estudio. La simbología utilizada para indicar si la tendencia es estadísticamente significativa o no significativa es la siguiente:

- ▲ Tendencia significativa
- Tendencia no significativa

La pendiente de Sen se muestra utilizando una escala de colores graduada

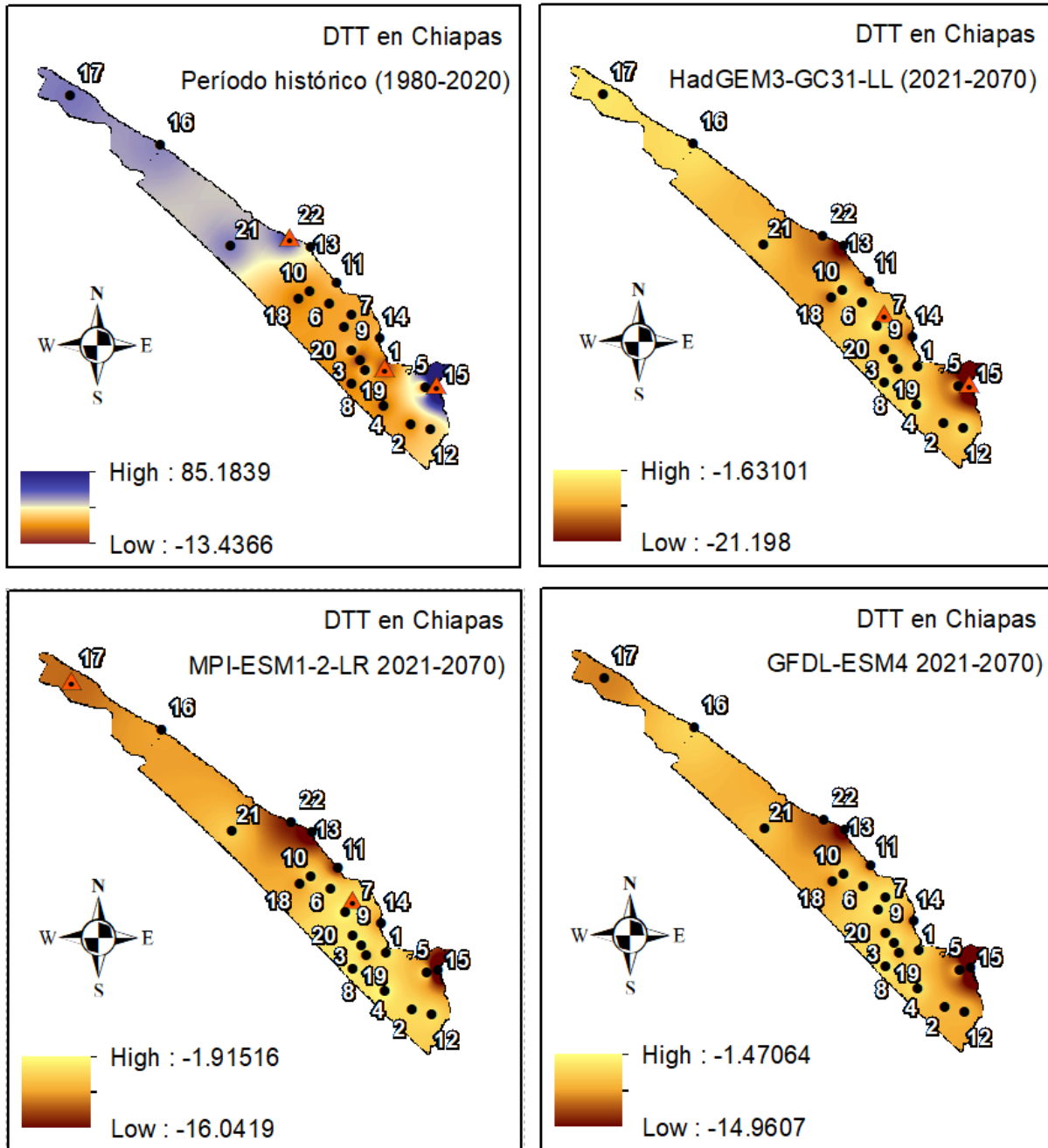


Figura 27. Tendencias de precipitación acumulada anual para los DTT en Chiapas

Fuente: Elaboración propia

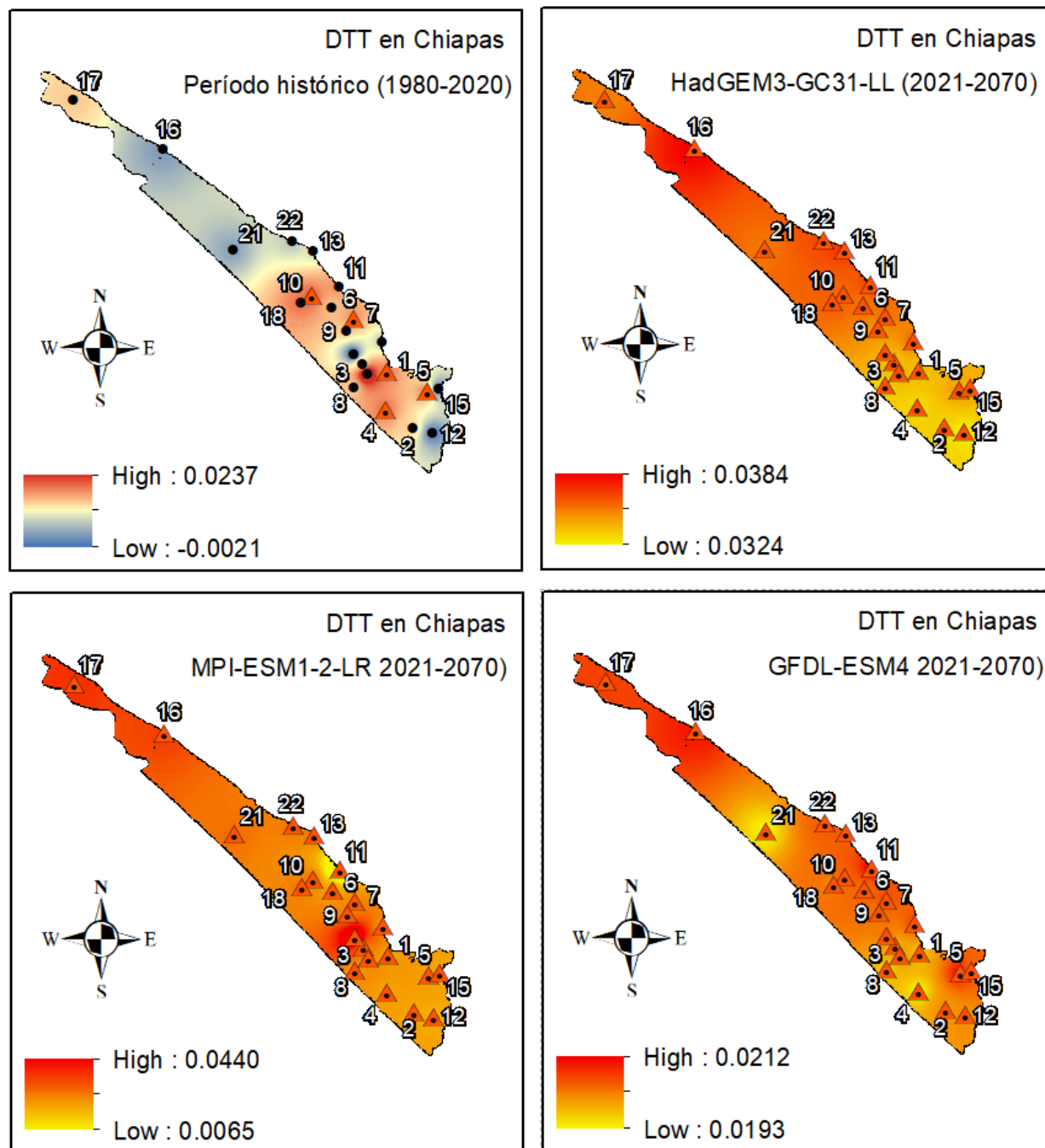


Figura 28. Tendencias de temperatura máxima media anual para los DTT en Chiapas

Fuente: Elaboración propia

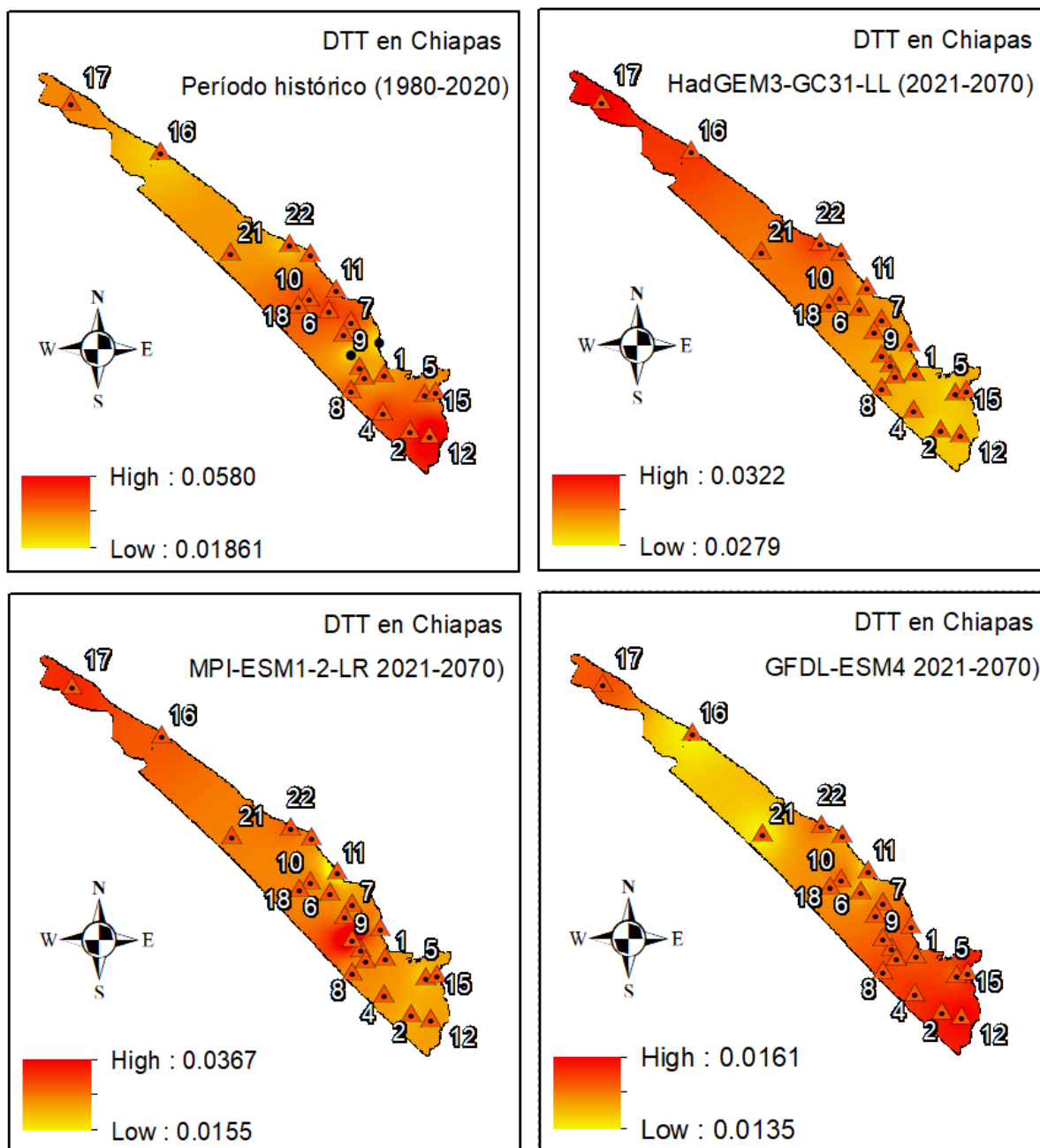


Figura 29. Análisis de tendencias de temperatura mínima media anual para los DTT ubicados en Chiapas

Fuente: Elaboración propia

Análisis de tendencias para los DTT ubicados en Chiapas: comparación histórica y proyecciones 2021-2070

Precipitación acumulada anual

El análisis histórico indica una variabilidad espacial considerable en la precipitación anual. Las pruebas de Mann-Kendall muestran que varias estaciones presentan tendencias significativas ($p < 0.05$), con pendientes de Sen generalmente positivas, lo que sugiere un ligero aumento de la precipitación en el período histórico en algunas estaciones.

En contraste, las proyecciones de los modelos CMIP6 (HadGEM3-GC31-LL, MPI-ESM1-2-LR y GFDL-ESM4) muestran tendencias decrecientes en la precipitación anual, reflejadas en pendientes negativas para la mayoría de las estaciones.

Temperatura máxima media anual

Los registros históricos evidencian un aumento sostenido de la temperatura máxima media anual, con pendientes de Sen positivas y significativas en la mayoría de las estaciones. Las proyecciones CMIP6 refuerzan esta tendencia, indicando incrementos continuos de la temperatura máxima media anual en todos los modelos.

Temperatura mínima media anual

De manera similar, la temperatura mínima media anual ha mostrado un incremento consistente en el periodo histórico. Las proyecciones CMIP6 sugieren que la temperatura mínima media anual continuará aumentando, con pendientes positivas en todos los modelos.

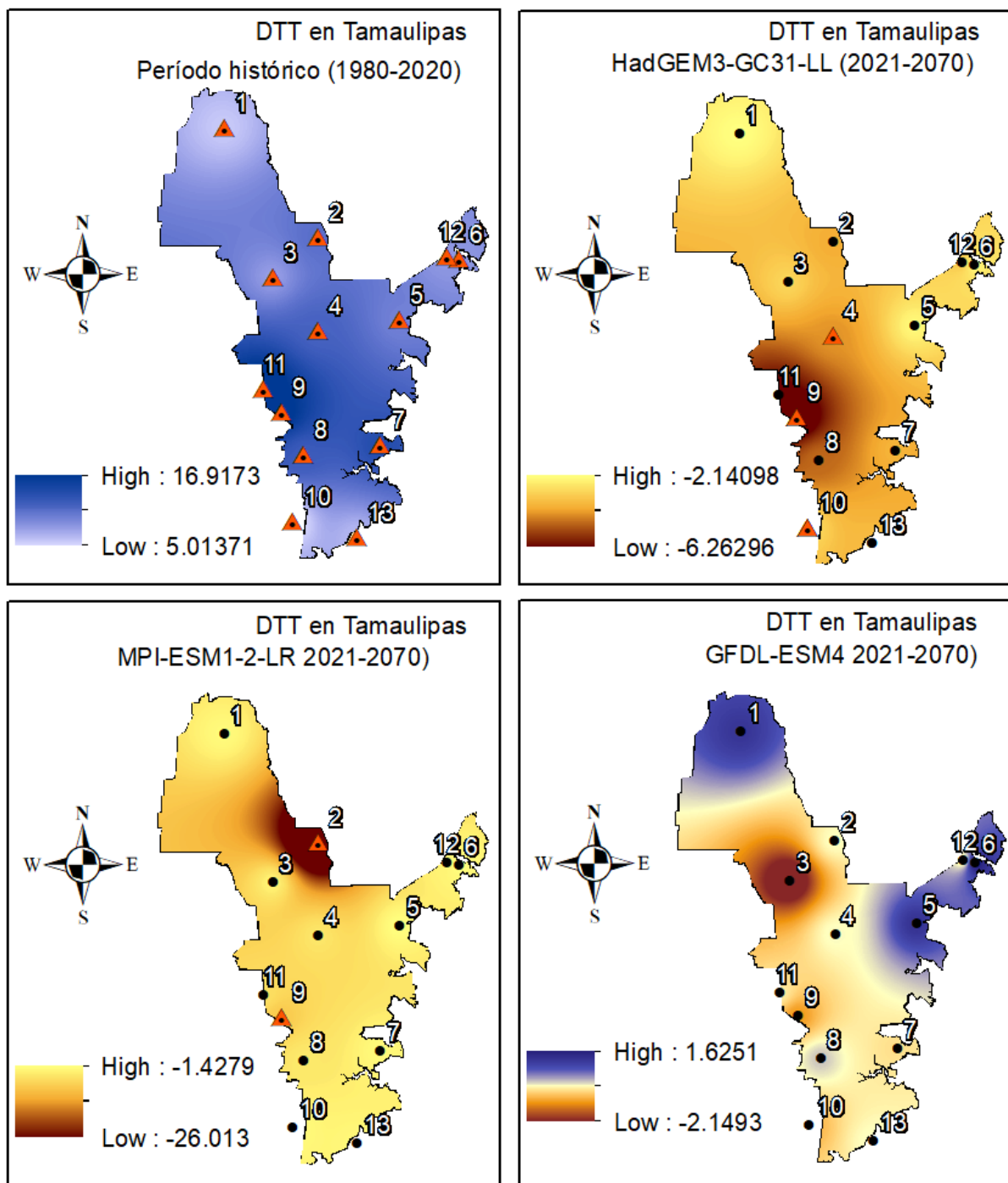


Figura 30. Tendencias de precipitación acumulada anual para los DTT ubicados en Tamaulipas

Fuente: Elaboración propia

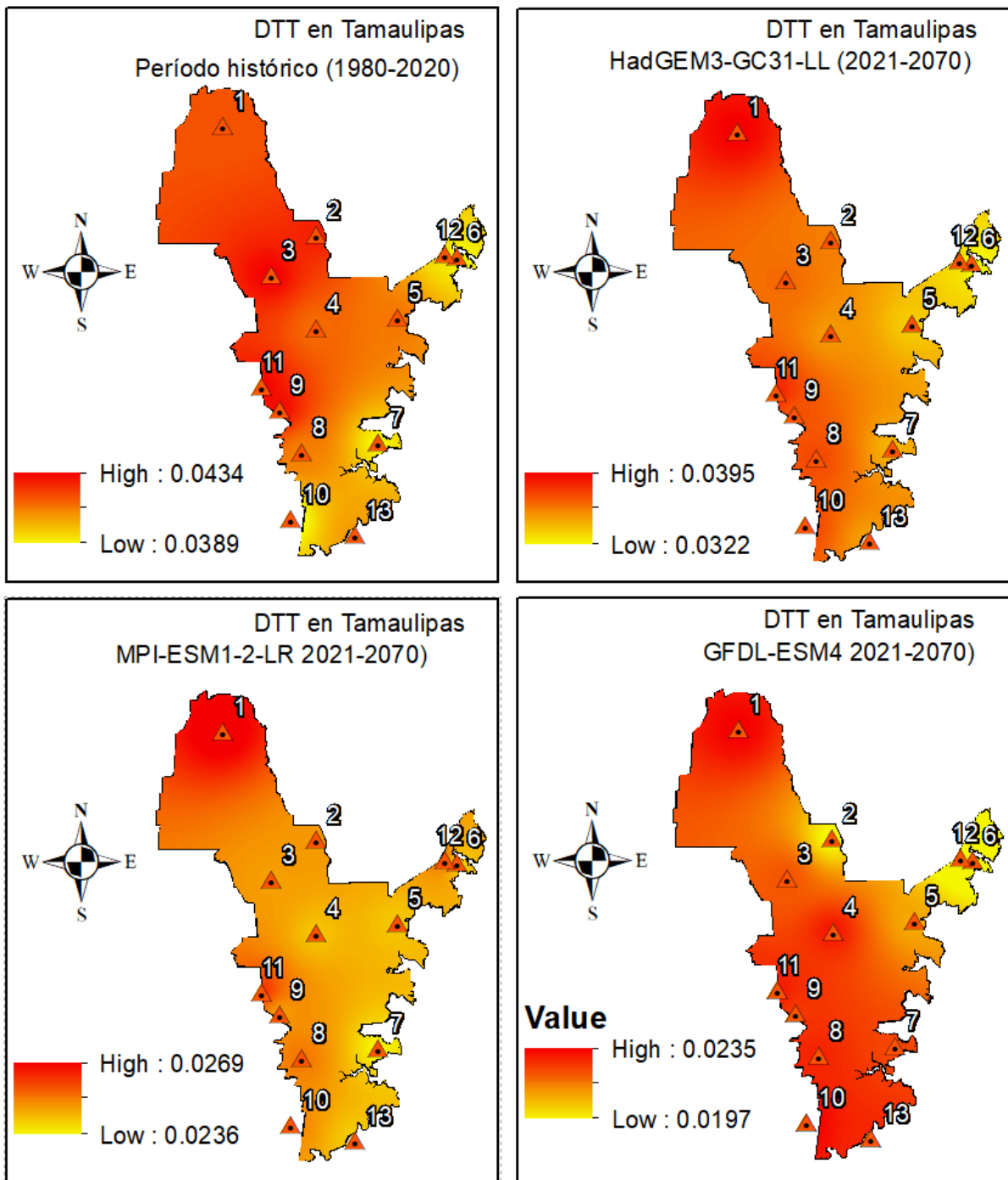


Figura 31. Tendencias de temperatura máxima media anual para los DTT ubicados en Tamaulipas

Fuente: Elaboración propia

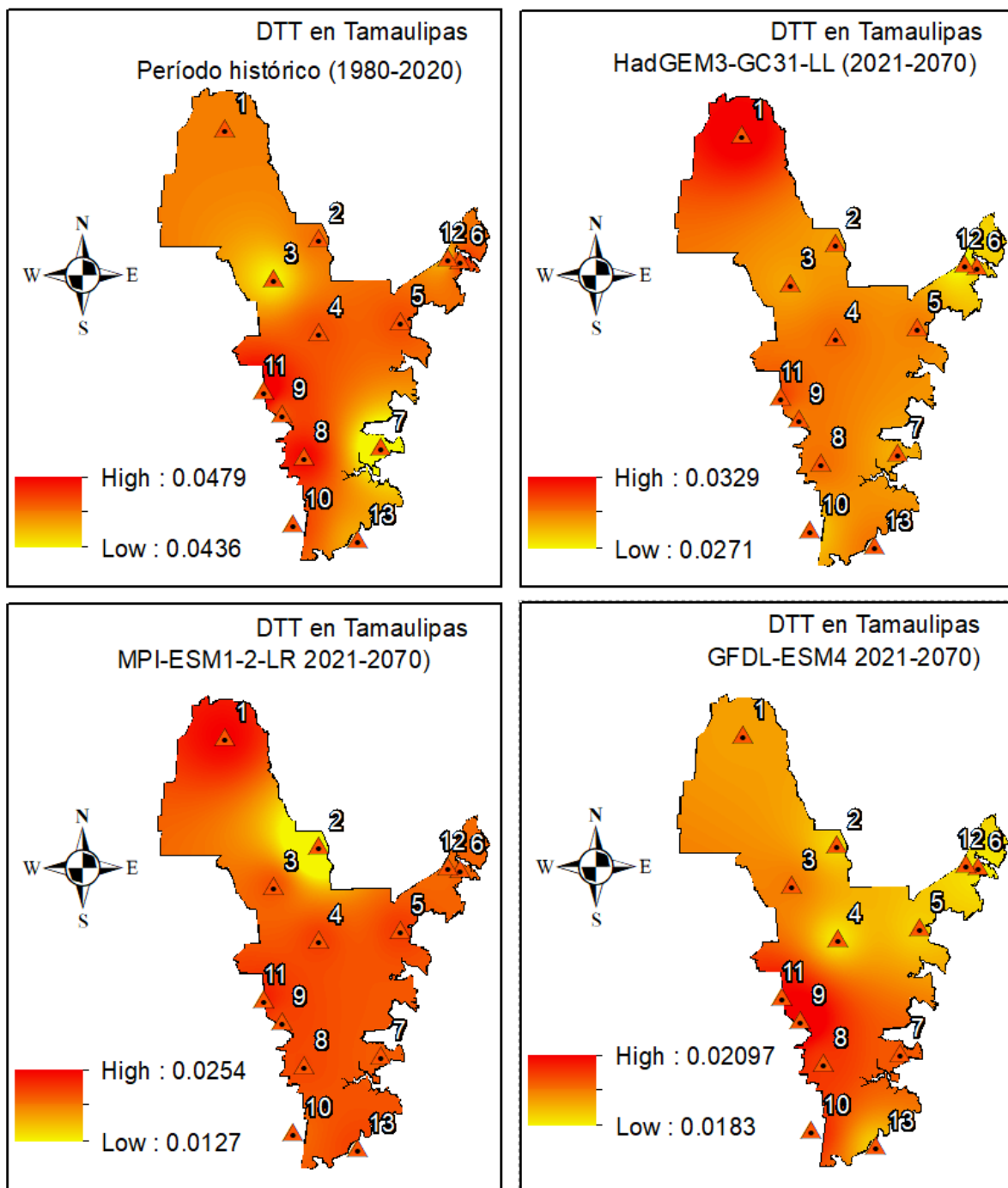


Figura 32. Tendencias de temperatura mínima media anual para los DTT ubicados en Tamaulipas

Fuente: Elaboración propia

Análisis de tendencias para los DTT ubicados en Tamaulipas: comparación histórica y proyecciones 2021-2070

Precipitación acumulada anual

En el análisis histórico de precipitación acumulada anual (1980–2020), la mayoría de las estaciones presentan tendencias al alza significativas ($p < 0.05$), con pendientes que oscilan entre 5 y 16.9 mm/año. Esto indica un incremento moderado de la precipitación anual, aunque con variabilidad espacial, donde algunas zonas experimentan aumentos más marcados y otras se mantienen relativamente estables.

Las proyecciones para 2021–2070 muestran comportamientos decrecientes para cada modelo de estudio. En HadGEM3-GC31-LL, algunas estaciones presentan decrementos significativos, mientras otras muestran disminución o tendencias no significativas. MPI-ESM1-2-LR evidencia un predominio de disminución en la precipitación, aunque ciertas estaciones mantienen tendencias no significativas. GFDL-ESM4, por su parte, proyecta un decremento más consistente, pero con pendientes generalmente menores que las observadas en el periodo histórico. En conjunto, estos resultados sugieren que la distribución espacial de la precipitación podría disminuir en el futuro, con implicaciones relevantes para la gestión hídrica y la agricultura.

Temperatura máxima media anual

En el caso de la temperatura máxima media anual, todas las estaciones históricas muestran incrementos significativos ($p < 0.05$), con pendientes promedio de 0.039–0.043 °C/año.

Las proyecciones CMIP6 para 2021–2070 confirman este comportamiento. HadGEM3-GC31-LL muestra incrementos consistentes en todas las estaciones, con pendientes de 0.0322–0.0395 °C/año. MPI-ESM1-2-LR también proyecta aumento positivo, aunque con algunas estaciones mostrando incrementos menores. GFDL-ESM4 indica un aumento uniforme y significativo en todas las estaciones, con pendientes algo más bajas (0.0197–0.0235 °C/año), manteniendo la tendencia de calentamiento sostenido.

Temperatura mínima media anual

Respecto a la temperatura mínima media anual, el análisis histórico revela incrementos significativos en todas las estaciones ($p < 0.05$), con pendientes promedio de $0.0436\text{--}0.0479\text{ }^{\circ}\text{C/año}$. Las proyecciones CMIP6 para 2021–2070 muestran un aumento continuo y significativo: HadGEM3-GC31-LL proyecta pendientes de $0.0271\text{--}0.0329\text{ }^{\circ}\text{C/año}$, MPI-ESM1-2-LR presenta incrementos más moderados ($0.0127\text{--}0.0254\text{ }^{\circ}\text{C/año}$), y GFDL-ESM4 evidencia incrementos uniformes ($0.0183\text{--}0.02097\text{ }^{\circ}\text{C/año}$) en todas las estaciones.

En síntesis, los resultados históricos y proyectados evidencian un patrón de calentamiento constante en las temperaturas máxima y mínima, mientras que la precipitación presenta tendencias decrecientes para las proyecciones futuras.

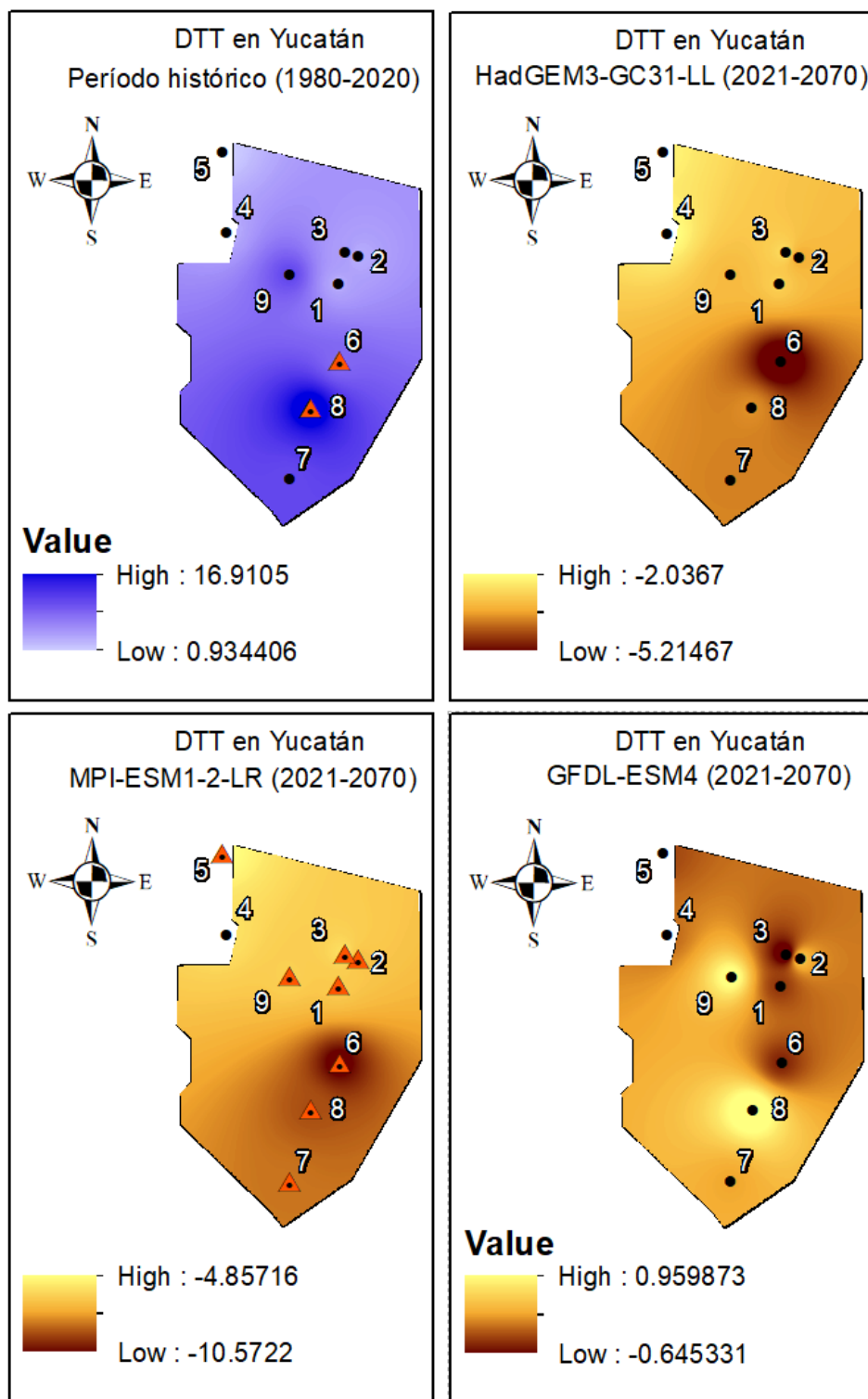


Figura 33. Tendencias de precipitación acumulada anual, DTT en Yucatán

Fuente: Elaboración propia

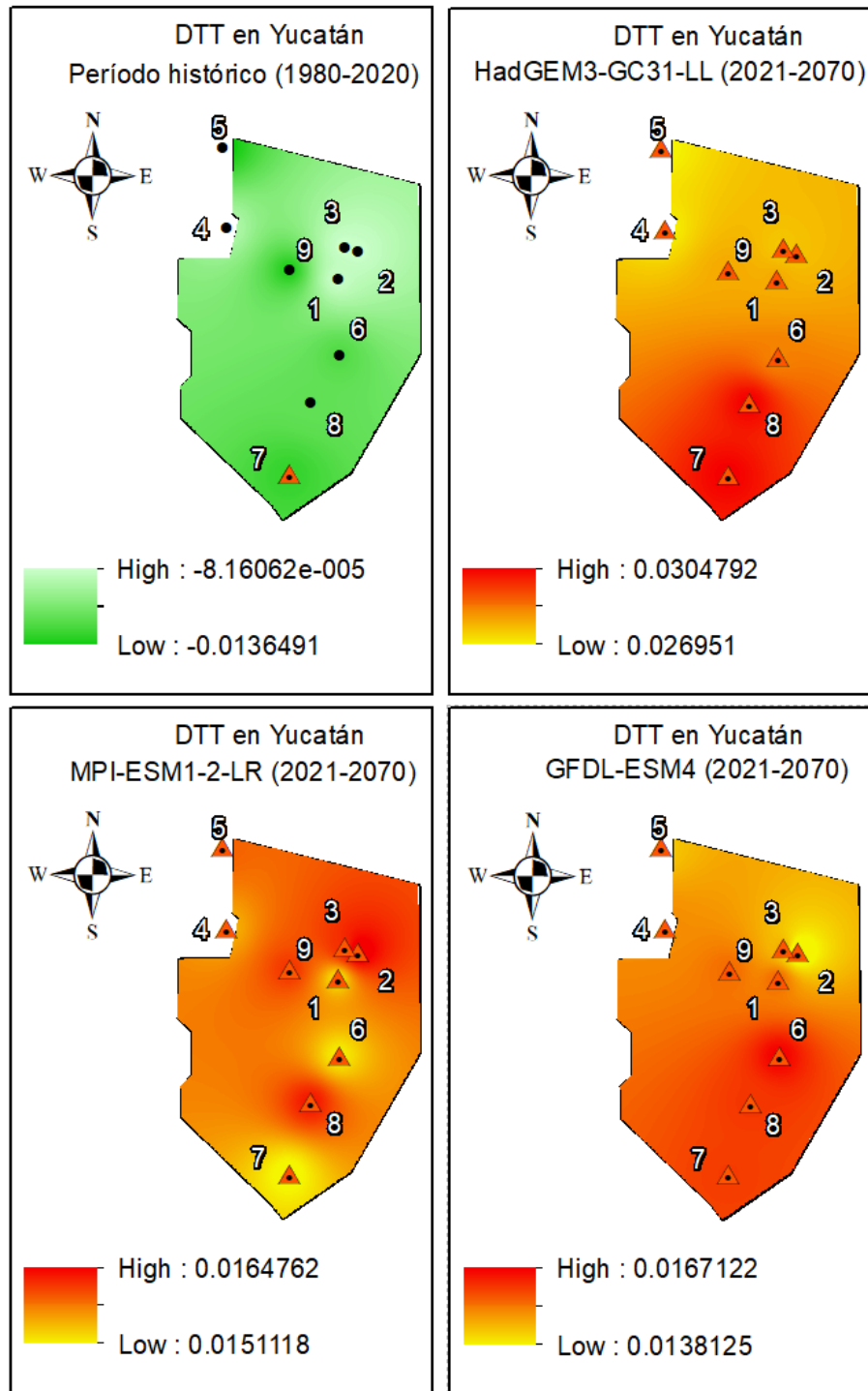


Figura 34. Tendencias de temperatura máxima media anual, en el DTT en Yucatán

Fuente: Elaboración propia

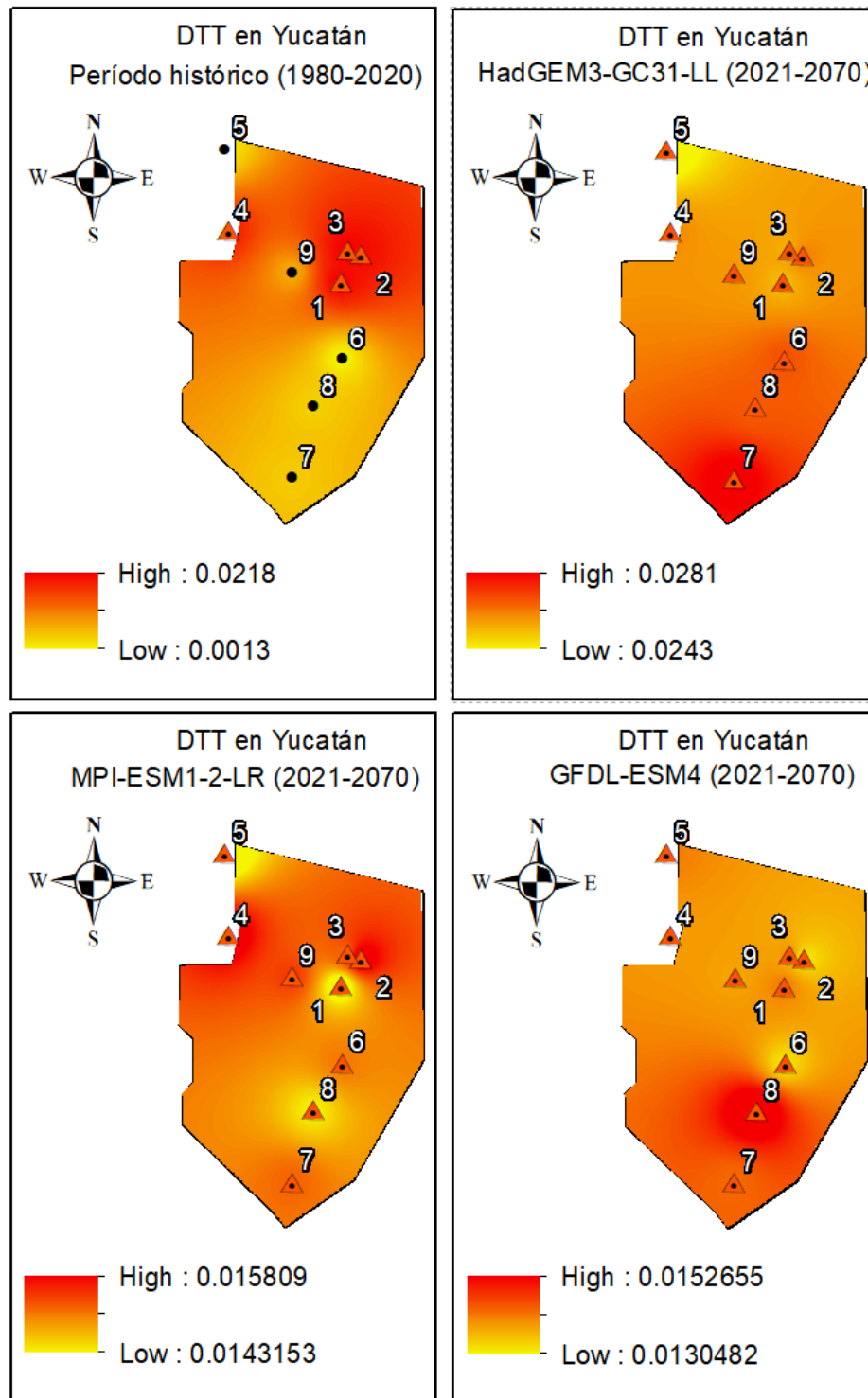


Figura 35. Tendencias de temperatura mínima media anual, en el DTT en Yucatán

Fuente: Elaboración propia

Análisis de tendencias para los DTT ubicados en Yucatán: comparación histórica y proyecciones 2021-2070

Precipitación acumulada anual

Las tendencias para el periodo 1980-2020 no fueron significativas en la mayoría de las estaciones, con algunas excepciones que muestran incrementos leves en la precipitación.

Esto sugiere que, históricamente, la precipitación en Yucatán se ha mantenido relativamente estable.

Mientras que las proyecciones 2021–2070 de los modelos CMIP6 muestran comportamientos diversos. HadGEM3-GC31-LL evidencia disminución de la precipitación en la mayoría de las estaciones, aunque todas mantienen cambios no significativos. MPI-ESM1-2-LR proyecta tendencias negativas, indicando una reducción significativa de la precipitación anual en la mayoría de estaciones.

Por su parte, GFDL-ESM4 proyecta tendencias decrecientes y no significativas, lo que sugiere un posible mantenimiento de los niveles de precipitación.

Temperatura máxima media anual

En la serie histórica, no se detectaron tendencias significativas en la mayoría de las estaciones, indicando que la temperatura máxima anual se ha mantenido relativamente estable.

Los tres modelos evaluados (HadGEM3-GC31-LL, MPI-ESM1-2-LR y GFDL-ESM4) muestran incrementos significativos en todas las estaciones. Las pendientes oscilan entre 0.014 y 0.030 °C/año, evidenciando un aumento sostenido de la temperatura máxima media anual en el futuro.

Temperatura mínima media anual

Algunas estaciones en el periodo 1980-2020 presentan incrementos significativos, mientras que otras no, lo que indica un aumento moderado de la temperatura mínima histórica.

Todos los modelos para el periodo 2021-2070 proyectan incrementos significativos en todas las estaciones, aunque con magnitudes distintas. HadGEM3-GC31-LL presenta pendientes de 0.0243–0.0281 °C/año; MPI-ESM1-2-LR muestra incrementos más moderados, con pendientes de 0.0143–0.0158 °C/año; y GFDL-ESM4 proyecta pendientes ligeramente menores, entre 0.013 y 0.015 °C/año.

3.6. Discusión

En Chiapas, las series históricas de precipitación acumulada anual (1980-2020) mostraron tendencias heterogéneas, con pendientes entre -13.43 y 85.18 mm/año, indicando un aumento progresivo en la precipitación anual. Sin embargo, las proyecciones futuras generadas por HadGEM3-GC31-LL, MPI-ESM1-2-LR y GFDL-ESM4, bajo la trayectoria socioeconómica SSP2-4.5, indican una disminución consistente de la precipitación acumulada anual en todas las estaciones meteorológicas analizadas, sugiriendo que este patrón decreciente podría persistir en las próximas décadas. Estos resultados señalan una reducción generalizada de las precipitaciones en regiones tropicales debido a los efectos del cambio climático (Dunne et al., 2020).

En cuanto a la temperatura mínima y máxima media anual en Chiapas, los registros históricos mostraron aumentos significativos en todas las localidades analizadas, lo que confirma un calentamiento sostenido. Este aumento es consistente con estudios regionales que documentan intensificación de noches cálidas y reducción de heladas (SEMAHN, 2022).

En Tamaulipas, la precipitación anual presentó tendencias al alza durante el periodo histórico, con pendientes positivas entre 5.014 y 16.917 mm/año, lo que indica un incremento moderado de la pluviosidad. Sin embargo, esta tendencia histórica contrasta con las proyecciones de los modelos utilizados del CMIP6. Estos modelos simulan escenarios futuros donde la precipitación disminuirá en una magnitud similar al aumento previamente observado. Esta tendencia se sustenta con los estudios del Conde et al. (2011), en la cual mencionan que, bajo diversos escenarios de emisiones, subraya la vulnerabilidad de una tendencia decreciente en la precipitación en Tamaulipas.

Para la temperatura mínima y máxima media anual, se observó un aumento sostenido en todas las localidades. Estos resultados reflejan un calentamiento significativo, particularmente durante la noche, coherente con los registros recientes de olas de calor observados en la región de Tamaulipas (INECC, 2024).

En Yucatán, la precipitación anual histórica mostró variabilidad regional, con algunas localidades sin tendencia significativa ($p > 0.05$), mientras que otras presentaron incrementos moderados de hasta 16.91 mm/año. No obstante, los modelos CMIP6 proyectan una disminución de la precipitación anual futura, con pendientes que oscilan entre -0.645 y -10.57 mm/año, sugiriendo un potencial déficit hídrico en las próximas décadas. Por otro lado, un análisis de las proyecciones climáticas para México, basado en los modelos CMIP6, indica que, en general, se espera una disminución de la precipitación anual en diversas regiones del país, incluyendo Yucatán, especialmente bajo escenarios de emisiones elevadas (World Bank, 2025).

Las series de temperatura mínima media anual evidenciaron incrementos significativos en todas las localidades, con pendientes de 0.014–0.030 °C/año, lo que confirma un calentamiento progresivo en la península de Yucatán. Este patrón es consistente con la literatura que reporta aumento de noches cálidas y reducción de periodos de frío (Gobierno del Estado de Yucatán, 2023).

Cabe mencionar que Gómez et al. (2016) reportaron evidencias de cambio climático en México para el periodo 2010-2099, indicando que estos cambios podrían generar un incremento en la frecuencia de eventos de temperaturas máximas extremas y una disminución de los eventos de temperaturas mínimas extremas, resultados que concuerdan con los hallazgos del presente estudio.

Estos hallazgos son consistentes con los reportes de CIMMYT (2024), los cuales señalan que en las próximas décadas predominarán escenarios climáticos caracterizados por un aumento del estrés térmico y una reducción en la disponibilidad hídrica, con impactos significativos en la productividad agrícola, así como en la planificación y gestión de los recursos hídricos.

3.7. Conclusiones

El análisis de las series históricas (1980–2020) y las proyecciones futuras (2021–2070) de precipitación acumulada anual, temperatura máxima media anual y temperatura mínima media anual en los Distritos de Temporal Tecnificado de Chiapas, Tamaulipas y Yucatán evidencia claras señales de cambio climático regional. En Chiapas, se observa un aumento significativo de las temperaturas máximas y mínimas, mientras que la precipitación anual presenta tendencias heterogéneas, con algunas disminuciones localizadas. En Tamaulipas, las temperaturas máximas y mínimas medias anuales presentan un incremento sostenido con una disminución progresiva de la precipitación acumulada anual. Por su parte, Yucatán experimenta incrementos en las temperaturas mínimas y máximas medias anuales, mientras que la precipitación anual registra disminuciones significativas en varias estaciones.

Estos hallazgos resaltan la necesidad de considerar los impactos regionales del cambio climático en la planificación agrícola y la gestión de recursos hídricos. La utilización de modelos CMIP6 permitió identificar diferencias en la magnitud de las tendencias según el escenario y el modelo, lo que subraya la importancia de implementar estrategias de adaptación localizadas y específicas para cada región.

3.8. Referencias

- CIMMYT. (2024). Informe sobre variabilidad climática y adaptación agrícola en México. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo.
- CONABIO. (2020). La biodiversidad en la agricultura mexicana. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- CONAGUA. (2024). Información estadística climatológica. Comisión Nacional del Agua.
- Conde, C., Gay, C., Estrada, F., Martínez, B., y González, C. (2017). Estimación de rendimientos potenciales con escenarios de cambio climático para diversos cultivos agrícolas en México. *Acta Universitaria*, 27(3), 77–89. <https://doi.org/10.15174/au.2017.1077>
- Dunne, J. P., Horowitz, L. W., Adcroft, A. J., Ginoux, P., Held, I. M., John, J. G., Krasting, J. P., Malyshev, S., Milly, P. C. D., Shevliakova, E., Winton, M., y Zhao, M. (2020). The GFDL Earth System Model Version 4.1 (GFDL-ESM4.1): Overall coupled model description and simulation characteristics. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(11), Article e2019MS002015. <https://doi.org/10.1029/2019MS002015>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., y Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Fricko, O., Havlik, P., Rogelj, J., Klimont, Z., Gusti, M., Johnson, N., Kolp, P., Strubegger, M., Valin, H., Amann, M., Ermolieva, T., Forsell, N., Herrero, M., Heyes, C., Kindermann, G., Krey, V., McCollum, D. L., Obersteiner, M., Pachauri, S., ... Riahi, K. (2017). The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 251–267. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.004>
- Ghahramani, A., Kokic, P., Crimp, S., y Howden, M. (2015). Validation of LARS-WG stochastic weather generator for generating daily weather data in southeast

- Australia. *Theoretical and Applied Climatology*, 122(3–4), 561–570.
<https://doi.org/10.1007/s00704-014-1310-2>
- Gobierno del Estado de Yucatán. (2023). *Atlas de escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán*. Secretaría de Desarrollo Sustentable.
- Gómez, J. D., Llamas, A., y Fernández, J. M. (2016). Escenarios regionales de cambio climático para la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda, Guanajuato, México. *Acta Universitaria*, 26(5), 3–13. <https://doi.org/10.15174/au.2016.1077>
- Guijarro, J. A. (2024). *Paquete Climatol en R*. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).
- Hamed, K. H. (2008). Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, 349(3–4), 350–363.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.009>
- INECC. (2024). *Informe Jornada Estatal Contra el Cambio Climático: Tamaulipas*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- INEGI. (2020). *Atlas de los Distritos de Temporal Tecnificado de México*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INIFAP. (2024). *Sistema de base de datos meteorológicos ESSENGER*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods* (4th ed.). Charles Griffin.
- Martínez, R., y Ramírez, L. (2018). Proyecciones de temperatura mínima y máxima en el sureste de México utilizando modelos CMIP6. *Climatic Change*, 147(3–4), 413–430. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2250-2>
- Martínez-Austria, P. F., y Patiño-Gómez, C. (2019). *Proyecciones regionales del cambio climático y sus impactos en México*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., y van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, 122(3), 387–400. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>
- Pohlert, T. (2020). trend: Non-parametric trend tests and change-point detection (R package version 1.1.4). <https://CRAN.R-project.org/package=trend>
- SAGARPA. (2017). Programa de apoyos para la agricultura de temporal. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- SEMAHN. (2022). Programa Estatal de Cambio Climático de Chiapas. Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural.
- Semenov, M. A., y Stratonovitch, P. (2015). Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*, 64(1), 1–14. <https://doi.org/10.3354/cr01319>
- Semenov, M. A., Brooks, R. J., Barrow, E. M., y Richardson, C. W. (1998). Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research*, 10(2), 95–107. <https://doi.org/10.3354/cr010095>
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- SHC. (2012). Programa Regional de Desarrollo. Secretaría de Hacienda Chiapas.
- Williams, K. D., Copsey, D., Bodas-Salcedo, A., Calvert, D., Comer, R., y Sellar, A. (2018). The Met Office Global Coupled Model 3.0 and 3.1 (GC3.0 and GC3.1) configurations. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10(2), 357–380. <https://doi.org/10.1002/2017MS001115>
- World Bank. (2025). Mexico - Mean projections (CMIP6). Climate Knowledge Portal. <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/mexico/climate-data-projections>

World Meteorological Organization. (2013). Guide to meteorological instruments and methods of observation. <https://www.wmo.int/es>

4. IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL REQUERIMIENTO HÍDRICO DEL MAÍZ EN REGIONES AGROCLIMÁTICAS DE MÉXICO

IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE WATER REQUIREMENT OF MAIZE IN AGROCLIMATIC REGIONS OF MEXICO

4.1. Resumen:

El cambio climático representa un desafío crítico para la sostenibilidad agrícola, particularmente en el cultivo de maíz (*Zea mays L.*) de secano, cuya productividad depende de la disponibilidad y distribución de la precipitación. Este estudio evaluó el impacto del cambio climático en el requerimiento hídrico del maíz en Distritos de Temporal Tecnificado (DTT) de Chiapas, Tamaulipas y Yucatán, mediante análisis histórico (1980–2020) y proyecciones futuras (2021–2070). Se emplearon series diarias de temperatura máxima, mínima y precipitación para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o), la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y los requerimientos hídricos conforme a la metodología del Boletín 56 de la FAO.

Las tendencias se evaluaron mediante las pruebas de Mann-Kendall y la pendiente de Sen. Para las proyecciones futuras se usaron tres modelos climáticos del CMIP6 — HadGEM3-GC31-LL, MPI-ESM1-2-LR y GFDL-ESM4— analizados bajo la trayectoria socioeconómica SSP2-4.5, que representa un escenario intermedio de mitigación. En Chiapas se proyectan incrementos acumulados en el requerimiento hídrico del maíz de temporal de entre 40 y 75 mm (equivalentes a 0.8–1.5 mm año⁻¹). En Tamaulipas, los modelos climáticos prevén aumentos de 70 a 125 mm (1.4–2.5 mm año⁻¹), mientras que en Yucatán se estiman elevaciones de 60 a 90 mm (1.2–1.8 mm año⁻¹) hacia finales del periodo de proyección. Estos resultados sugieren una tendencia general al incremento de la demanda hídrica bajo escenarios de cambio climático, con variaciones regionales asociadas a las condiciones termo–pluviométricas locales.

Palabras clave: evapotranspiración, CMIP6, SSP2-4.5, Chiapas, Tamaulipas, Yucatán, Mann-Kendall, Sen.

4.2. Abstract

Climate change poses a critical challenge to agricultural sustainability, particularly for rainfed maize (*Zea mays* L.), whose productivity relies on the availability and distribution of precipitation. This study assessed the impact of climate change on maize water requirements in Technified Rainfed Districts (DTT) of Chiapas, Tamaulipas, and Yucatán through historical analysis (1980–2020) and future projections (2021–2070). Daily time series of maximum and minimum temperature and precipitation were used to estimate reference evapotranspiration (ET_o), crop evapotranspiration (ET_c), and water requirements according to the FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 methodology.

Trends were evaluated using the Mann-Kendall test and Sen's slope estimator. Future projections employed three CMIP6 climate models—HadGEM3-GC31-LL, MPI-ESM1-2-LR, and GFDL-ESM4—analyzed under the SSP2-4.5 socioeconomic pathway, which represents an intermediate mitigation scenario. In Chiapas, cumulative increases in rainfed maize water requirements are projected between 40 and 75 mm (equivalent to 0.8–1.5 mm year⁻¹). In Tamaulipas, climate models forecast increases of 70 to 125 mm (1.4–2.5 mm year⁻¹), while in Yucatán, rises of 60 to 90 mm (1.2–1.8 mm year⁻¹) are estimated by the end of the projection period. These results indicate a general trend toward increasing water demand under climate change scenarios, with regional variations linked to local temperature–precipitation conditions.

Keyword: evapotranspiration, CMIP6, SSP2-4.5, Chiapas, Tamaulipas, Yucatán, Mann-Kendall

4.3. Introducción

El cambio climático constituye una amenaza crítica para la seguridad alimentaria global, al inducir alteraciones significativas en los patrones biofísicos fundamentales. Estos incluyen la modificación de los regímenes de temperatura y precipitación, los cuales son la base del sustento y la productividad agrícola a nivel mundial. Además de reducir los rendimientos, el aumento de la frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos extremos (como sequías prolongadas, olas de calor e inundaciones) aumenta la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas, incrementando la incidencia de plagas y enfermedades y afectando la disponibilidad de agua para uso agrícola (IPCC, 2022). En México, el maíz (*Zea mays L.*) de secano para el ciclo Primavera – Verano cubre aproximadamente el 60 % de la superficie nacional dedicada a este cultivo estratégico, dependiendo exclusivamente de la lluvia para satisfacer sus requerimientos hídricos (SIAP, 2023).

La metodología FAO-56 (Allen et al., 1998), permite estimar con precisión la evapotranspiración del cultivo (ET_c) mediante coeficientes de cultivo (K_c) y series diarias de variables climáticas. Aplicaciones en el Medio Oeste de EE.UU. han reportado tendencias históricas de ETo con tasas de 0.8–2.5 mm año⁻¹, asociadas a incrementos de 0.03–0.05 °C año⁻¹ en temperatura máxima durante el verano (Kukal e Irmak, 2018). En España se ha identificado variabilidad pluvial decreciente durante fases críticas del maíz, incrementando el déficit hídrico en un 15–30 % por década en sistemas de secano (Moratíel et al., 2020). De manera similar, estudios en Italia han reportado tendencias equivalentes, con mayor vulnerabilidad en etapas de floración y llenado de grano bajo condiciones de secano (Webber et al., 2018).

El incremento en la ETo intensifica la demanda hídrica de los cultivos de secano y, combinado con una mayor frecuencia de sequías extremas, reduce la precipitación efectiva y eleva la vulnerabilidad del maíz de secano, particularmente durante las etapas de floración y llenado de grano (Bassu et al., 2014). A nivel global, el incremento de las temperaturas ha intensificado la sensibilidad del rendimiento del maíz, aumentando la vulnerabilidad del cultivo al estrés hídrico durante sus fases fenológicas críticas, como la floración y el llenado de grano. Estas condiciones de déficit de agua, combinadas con

temperaturas elevadas, pueden reducir significativamente la productividad y alterar los requerimientos hídricos del cultivo, constituyendo un desafío creciente para la planificación agrícola y la gestión sostenible del recurso hídrico bajo escenarios de cambio climático (Troy et al., 2015).

Este estudio evalúa el impacto del cambio climático en el requerimiento hídrico del maíz de secano en los Distritos de Temporal Tecnificado (DTT) de Chiapas, Tamaulipas y Yucatán, mediante un análisis histórico (1980–2020) y proyecciones futuras (2021–2070) del requerimiento hídrico del cultivo. Para ello, se aplican pruebas no paramétricas, como Mann-Kendall y la pendiente de Sen, con el fin de detectar tendencias en los requerimientos hídricos. Dicho análisis se realiza empleando tres modelos climáticos del CMIP6 (HadGEM3-GC31-LL, MPI-ESM1-2-LR y GFDL-ESM4) bajo la trayectoria socioeconómica intermedia SSP2-4.5.

4.4. Materiales y métodos

4.4.1. Área de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en los Distritos de Temporal Tecnificado (DTT) de Chiapas, Tamaulipas y Yucatán (Figura 4-1), que representan regiones clave para la producción de maíz de secano en México. Estos DTT constituyen unidades agroclimáticas que integran condiciones de suelo, clima y manejo agrícola, permitiendo una planificación más eficiente de la agricultura de secano en contextos de alta variabilidad climática (FAO & IIASA, 2012).

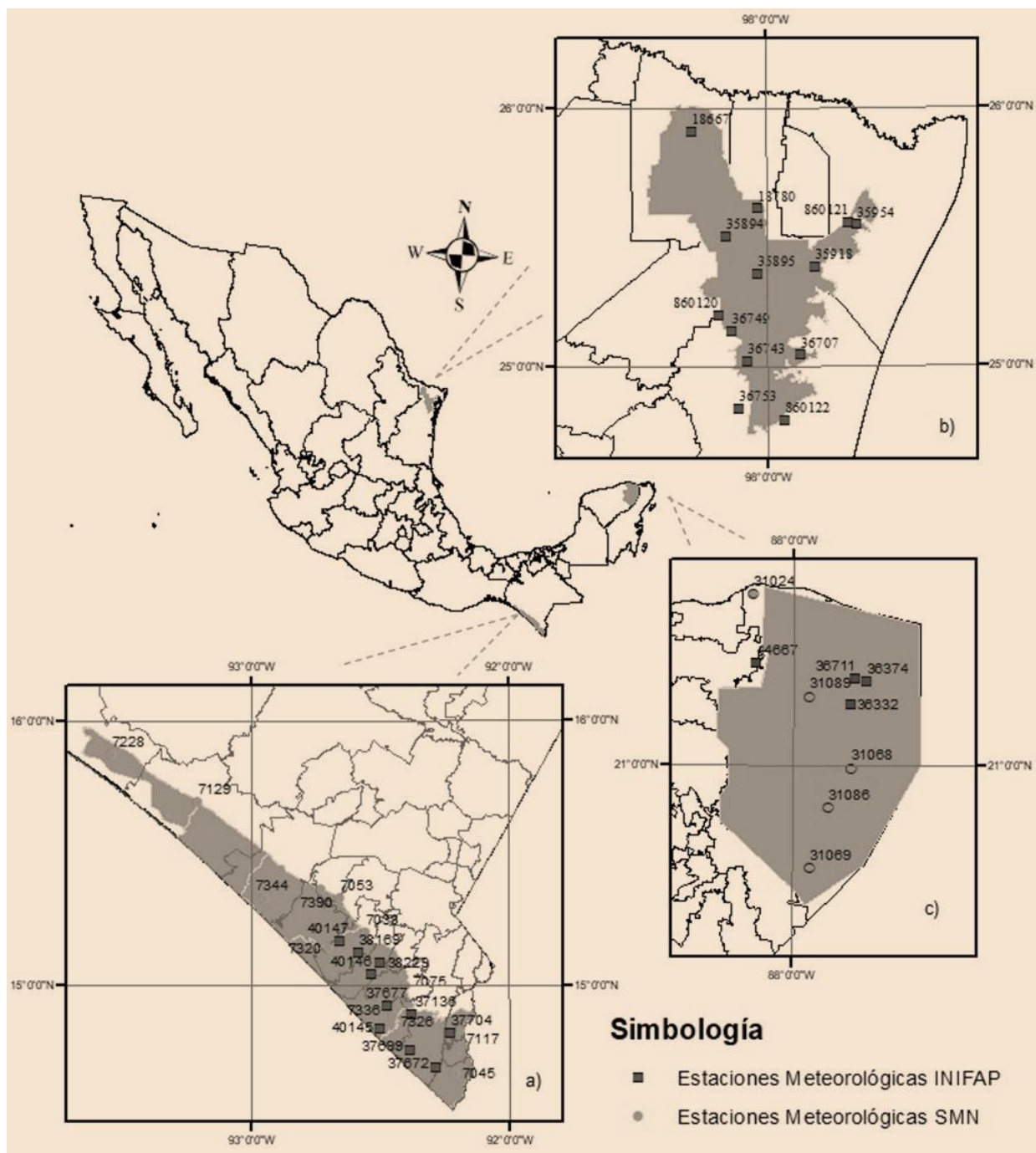


Figura 36. Área geográfica donde se ubican los Distritos de Temporal Tecnificado estudiados: a) Chiapas, b) Tamaulipas y c) Yucatán.

Fuente: Elaboración propia

Se seleccionaron siete Distritos de Temporal Tecnificado (DTT), clave para la producción de maíz de secano en México, cubriendo tres estados:

- Chiapas: Se analizaron cinco DTT (DTT 06 Acapetahua, DTT 17 Tapachula, DTT 18 Huixtla, DTT 19 Jesús Diego y DTT 20 Margaritas Pijijiapan) ubicados en las regiones Istmo-Costa y Soconusco. El clima es predominantemente cálido subhúmedo a cálido húmedo, con una precipitación anual que oscila entre 1,200 mm y 3,000 mm (SHC, 2012).
- Tamaulipas: Se seleccionó el DTT 010 San Fernando, en la región noreste del país. La zona se caracteriza por un clima semiárido a subhúmedo, con lluvias concentradas en el verano y una alta variabilidad climática (INEGI, 2020).
- Yucatán: Se incluyó el DTT 008 Oriente de Yucatán. Esta región oriental presenta un clima subhúmedo con lluvias de verano, donde la precipitación es abundante pero irregular, lo que conlleva una vulnerabilidad a sequías ocasionales (INEGI, 2020).

4.4.2. Datos climáticos

Se utilizaron datos de 44 estaciones meteorológicas distribuidas en las zonas de estudio (Tablas 1, 2 y 3). La información se obtuvo de dos fuentes principales: 17 estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de CONAGUA (2024) y 27 estaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP, 2024). El periodo de análisis comprendió registros diarios de precipitación (mm) y temperaturas máxima y mínima (°C). Se manejaron series de 36 años (1980–2015) para el SMN y 41 años (1980–2020) para el INIFAP. La selección de estaciones se rigió por criterios internacionales de calidad: se priorizaron aquellas con al menos el 80% de datos disponibles y con un máximo de tres años consecutivos de datos faltantes (OMM, 2013). Esta estrategia se adoptó para asegurar la robustez de las series temporales, siguiendo las recomendaciones metodológicas del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2021).

Cuadro 7. Estaciones meteorológicas distribuidas en los cinco DTT de Chiapas

Número	Clave	Estación meteorológica	Fuente	Longitud	Latitud	Altitud
1	37136	Buena Vista	INIFAP	-92.3797	14.8940	44
2	37672	Yunnuen (Rancho Alegre)	INIFAP	-92.2875	14.6910	13
3	37677	Carolina	INIFAP	-92.4743	14.9245	19
4	37699	La Norteña	INIFAP	-92.3863	14.7599	16
5	37704	Umoa 2 sección	INIFAP	-92.2313	14.8235	84
6	38169	Rancho san José	INIFAP	-92.5844	15.1291	24
7	38229	Ingenio Huixtla	INIFAP	-92.5039	15.0883	35
8	40145	Argelia	INIFAP	-92.5037	14.8397	8
9	40146	5 de marzo	INIFAP	-92.5333	15.0447	13
10	40147	Teziutlán	INIFAP	-92.6608	15.1695	13
11	7038	Despoblado	SMN	-92.5581	15.2025	63
12	7045	El Dorado	SMN	-92.2128	14.6728	35
13	7053	Escuintla	SMN	-92.6558	15.3308	92
14	7075	Huehuetan	SMN	-92.4003	15.0022	65
15	7117	Metapa de Domínguez	SMN	-92.1917	14.8311	98
16	7129	Pijijiapan	SMN	-93.2114	15.6978	57
17	7228	Tres Picos	SMN	-93.5458	15.8750	20
18	7320	Salvación	SMN	-92.7014	15.1439	8
19	7326	Mazatán	SMN	-92.4539	14.8864	15
20	7336	Plan de Iguala	SMN	-92.5042	14.9589	18
21	7344	Ejido Ibarra	SMN	-92.9522	15.3339	9
22	7390	Cacaluta	SMN	-92.7311	15.3650	80

Cuadro 8. Estaciones meteorológicas distribuidas en el DTT 010 San Fernando en Tamaulipas

Número	Clave	Estación meteorológica	Fuente	Longitud	Latitud	Altitud
1	18667	Galeana	INIFAP	-98.3211	25.9131	75
2	18780	El Avión	INIFAP	-98.0408	25.6144	53
3	35894	Martin Rocha	INIFAP	-98.1767	25.5056	65
4	35895	San Lorenzo	INIFAP	-98.0411	25.3592	23
5	35918	Los Ebanos	INIFAP	-97.7964	25.3853	6
6	35954	5 de Mayo	INIFAP	-97.6172	25.5500	4
7	36707	Ej. Pastores	INIFAP	-97.8571	25.0454	2
8	36743	Francisco Villa	INIFAP	-98.0866	25.0204	23
9	36749	Ej. 20 de Noviembre	INIFAP	-98.1528	25.1386	47
10	36753	San Fernando	INIFAP	-98.1218	24.8376	59
11	860120	La Peñita	INIFAP	-98.2074	25.1999	84
12	860121	Las Margaritas	INIFAP	-97.6540	25.5578	7
13	860122	Rancho Rospman	INIFAP	-97.9309	24.7934	16

Cuadro 9. Estaciones meteorológicas distribuidas en el DTT 08 Oriente de Yucatán

Número	Clave	Estación meteorológica	Fuente	Longitud	Latitud	Altitud
1	36332	Los Laureles	INIFAP	-87.7886	21.2117	15
2	36374	Sitio experimental Tizimín	INIFAP	-87.7267	21.2903	18
3	36711	Rancho Alegre	INIFAP	-87.7698	21.3030	12
4	44667	Santa Martha	INIFAP	-88.1344	21.3554	19
5	31024	Rio Lagartos	SMN	-88.1475	21.5897	4
6	31068	Chan Cenote	SMN	-87.7839	20.9908	30
7	31069	Chemax	SMN	-87.9350	20.6486	26
8	31086	Kuxeb	SMN	-87.8703	20.8550	21
9	31089	Dzonot Ake	SMN	-87.9369	21.2367	16

4.4.3. Escenarios de cambio climático

Para evaluar el impacto del cambio climático sobre el requerimiento hídrico del maíz de secano, se utilizaron proyecciones climáticas a 50 años (2021–2070), un horizonte temporal ampliamente adoptado en estudios sobre impactos climáticos en sistemas agrícolas, ya que permite capturar señales de cambio en variables termo-pluviométricas (IPCC, 2021) de tres modelos globales de circulación general del CMIP6: HadGEM3-GC31-LL, MPI-ESM1-2-LR y GFDL-ESM4. Estos modelos fueron seleccionados por su capacidad para representar de manera robusta la variabilidad climática en zonas tropicales y subtropicales de México, así como por su disponibilidad de escenarios futuros bajo trayectorias socioeconómicas coherentes (Monerie et al., 2020). De manera similar, el MPI-ESM1-2-LR ha sido destacado entre los modelos más utilizados del CMIP6 para representar variaciones históricas de precipitación y temperatura a escala regional como México (Gutjahr et al., 2019).

El análisis se centró en la trayectoria socioeconómica intermedia SSP2-4.5, la cual representa un escenario de emisiones moderadas que asume esfuerzos limitados de mitigación, pero con cambios tecnológicos y de uso de la tierra progresivos. Este escenario es ampliamente utilizado en estudios hidrológicos y agrícolas por su consistencia con proyecciones plausibles de temperatura y precipitación (O'Neill et al., 2016).

Se construyeron series temporales diarias de las variables climáticas clave, incluyendo precipitación y temperaturas máxima y mínima, para el periodo proyectado 2021–2070, con el fin de evaluar con precisión la evolución del requerimiento hídrico del maíz de secano.

4.4.4. Requerimiento hídrico del maíz (*Zea mays* L.)

El requerimiento hídrico del maíz (*Zea mays* L.) se define como la cantidad total de agua necesaria para compensar la evapotranspiración del cultivo (ET_c) a lo largo de su ciclo completo de desarrollo, integrando tanto la transpiración foliar —proceso fisiológico esencial para el crecimiento y la fotosíntesis— como la evaporación directa desde la superficie del suelo (Allen et al., 2006). Este parámetro es crítico en sistemas de secano,

donde la disponibilidad hídrica depende exclusivamente de la precipitación y de la humedad edáfica almacenada (Rockström et al., 2010). Estos sistemas resultan especialmente sensibles a las alteraciones climáticas que modifican la demanda atmosférica o la oferta pluvial, afectando directamente la productividad y la estabilidad de los rendimientos agrícolas (Lobell et al., 2011).

El requerimiento hídrico del maíz se estimó siguiendo la metodología estándar descrita en el Boletín de Riego y Drenaje No. 56 de la FAO (Allen et al., 2006), reconocida internacionalmente por su rigurosidad científica, precisión y amplia aplicabilidad en distintas condiciones agroclimáticas. La implementación del procedimiento se desarrolló en tres etapas secuenciales: (i) cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o), (ii) estimación de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y (iii) determinación del requerimiento hídrico del maíz de secano.

i. Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o)

La evapotranspiración de referencia (ET_o) se determinó mediante la ecuación FAO-56 Penman–Monteith, la cual integra variables meteorológicas diarias de radiación solar neta, temperatura máxima y mínima del aire, presión real de vapor, déficit de presión de vapor y velocidad del viento a 2 m de altura. Sin embargo, debido a que en varias estaciones meteorológicas de estudio únicamente disponían de registros diarios de temperatura máxima y mínima, se optó por mantener la homogeneidad en el cálculo utilizando exclusivamente dichas variables. Las variables faltantes fueron estimadas aplicando los procedimientos alternativos recomendados en los capítulos 3 y 4 del Boletín FAO-56, garantizando la consistencia metodológica entre estaciones y periodos de análisis.

Los datos de temperatura máxima y mínima utilizados para el cálculo de la ET_o provinieron de dos fuentes complementarias: (a) observaciones históricas (1980–2020) registradas en estaciones meteorológicas automáticas y convencionales ubicadas en los Distritos de Temporal Tecnificado (DTT), y (b) proyecciones climáticas futuras (2021–2070) generadas por tres modelos globales del CMIP6 (HadGEM3-GC31-LL, MPI-ESM1-2-LR y GFDL-ESM4), bajo la trayectoria socioeconómica compartida SSP2-4.5

ii. Cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ETc)

La evapotranspiración del cultivo (ETc) se estimó mediante el enfoque del coeficiente de cultivo, expresado como $ETc = Kc \times ETo$, donde Kc es el coeficiente de cultivo ajustado a las cinco etapas fenológicas del maíz: inicial, desarrollo, temporada media, temporada tardía y madurez. Los valores de Kc se definieron a partir de una revisión de literatura especializada para cada una de las regiones de los Distritos de Temporal Tecnificado (DTT) analizados (Chiapas, Tamaulipas y Yucatán), tal como se muestra en las Tablas 4, 5 y 6.

Cuadro 10. Fases de desarrollo, duración y Kc para los DTT en Chiapas

Etapas fenológica	Periodo estimado	Duración (días)	Kc	Características principales
Inicial	15 de mayo – 7 de junio	20–25	0.30–0.40	Emergencia y establecimiento; baja cobertura foliar.
Desarrollo	8 de junio – 10 de julio	25–30	0.40–1.10	Crecimiento activo del follaje; aumento progresivo de transpiración.
Intermedia	11 de julio – 31 de agosto	45–50	1.10–1.20	Floración y llenado de grano; máxima demanda hídrica.
Final	1 de septiembre – 15 de octubre	30–35	0.60–0.70	Maduración fisiológica y reducción gradual de ETc.

Fuente: Mesa Técnica Agroclimática Chiapas e INIFAP (2021)

Cuadro 11. Fases de desarrollo, duración y Kc para los DTT en Tamaulipas

Etapas fenológica	Periodo estimado	Duración (días)	Rango de Kc	Características principales
Inicial	15 de julio – 10 de agosto	25	0.30–0.40	Emergencia y establecimiento; cobertura vegetal limitada.
Desarrollo	11 de agosto – 10 de septiembre	30	0.40–1.15	Expansión foliar y desarrollo radicular; incremento progresivo de transpiración.
Intermedia	11 de septiembre – 31 de octubre	50	1.15–1.20	Floración y formación de grano; máxima transpiración y demanda hídrica.
Final	1 de noviembre – 25 de diciembre	35	0.60–0.70	Maduración fisiológica.

Fuente: INIFAP (2017)

Cuadro 12. Fases de desarrollo, duración y Kc para los DTT en Yucatán

Etapas fenológicas	Periodo estimado	Duración (días)	Rango de Kc	Características principales
Inicial	15 de julio – 10 de agosto	20–25	0.30–0.40	Germinación y establecimiento; baja demanda hídrica.
Desarrollo	11 de agosto – 10 de septiembre	25–30	0.40–1.10	Crecimiento vegetativo activo; aumento progresivo de la transpiración.
Intermedia	11 de septiembre – 31 de octubre	40–50	1.10–1.20	Floración y llenado de grano; máxima evapotranspiración y demanda de agua.
Final	1 de noviembre – 20 de diciembre	30	0.60–0.70	Maduración y senescencia; reducción gradual de la ETc.

Fuente: INIFAP (2015)

iii. Determinación del requerimiento hídrico del maíz de secano

El requerimiento hídrico del maíz de secano (Rh) se estimó a partir del balance hídrico anual correspondiente al ciclo agrícola primavera–verano, considerando la diferencia entre la evapotranspiración del cultivo (ETc) y la precipitación efectiva (Pe), de acuerdo con la metodología descrita por Allen et al. (2006).

La precipitación efectiva (Pe) se estimó mediante el método desarrollado por el *United States Department of Agriculture Soil Conservation Service* (USDA, 1970), el cual permite calcular la porción de la precipitación total potencialmente disponible para el cultivo. De acuerdo con Dastane (1974), la precipitación efectiva corresponde a la fracción de la lluvia total que el cultivo realmente aprovecha, una vez descontadas las pérdidas por escorrentía superficial, percolación profunda y evaporación directa desde la superficie del suelo húmedo.

Este procedimiento se aplicó tanto a las series históricas (1980–2020) como a las proyecciones climáticas futuras (2021–2070), lo que permitió estimar con mayor precisión el requerimiento hídrico del maíz de secano y analizar su variabilidad temporal bajo distintos escenarios de cambio climático.

4.4.5. Tendencias del requerimiento hídrico del maíz (*Zea mays* L.)

El análisis de tendencias del requerimiento hídrico se llevó a cabo en dos fases temporales: histórica (1980–2020) y proyectada (2021–2070) para los Distritos de Temporal Tecnificado (DTT) de Chiapas, Tamaulipas y Yucatán. La prueba de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) se utilizó para evaluar la significancia de la tendencia ($\alpha = 0.05$), mientras que el estimador de pendiente de Sen (Sen, 1968) permitió estimar la magnitud del cambio del requerimiento hídrico (mm año^{-1}).

Los incrementos acumulados en el requerimiento hídrico se obtuvieron a partir de las pendientes de Sen estimadas mediante la prueba de tendencia aplicada a cada serie anual proyectada (2021–2070). La pendiente (expresada en mm año^{-1}) representa la magnitud del cambio anual en el requerimiento hídrico del cultivo, mientras que el valor acumulado se calculó como el producto de dicha pendiente por la duración del horizonte temporal analizado (50 años).

4.5. Resultados

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas de Mann-Kendall y de la pendiente de Sen aplicadas a las series temporales del requerimiento hídrico del cultivo de maíz en las tres regiones agroclimáticas analizadas (Chiapas, Tamaulipas y Yucatán).

El análisis de tendencias se realizó en dos horizontes temporales: histórico (1980–2020) y proyectado (2021–2070), con el objetivo de caracterizar la evolución del requerimiento hídrico neto del maíz de secano, calculado anualmente para cada año del período histórico y estimado de forma anual para el período futuro, en los Distritos de Temporal Tecnificado (DTT) de las regiones de estudio. Para ello, se aplicó la prueba no paramétrica de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, mientras que el estimador de pendiente de Sen (Sen, 1968) permitió cuantificar la magnitud del cambio en el requerimiento hídrico del cultivo, expresada en mm año^{-1} .

La simbología empleada distingue entre tendencias significativas y no significativas de la siguiente manera:

- ▲ Tendencia significativa
- Tendencia no significativa

La pendiente de Sen se representa mediante una escala de colores graduada. Este enfoque visual facilita la interpretación espacial y temporal de los patrones de cambio en cada región y periodo analizado.

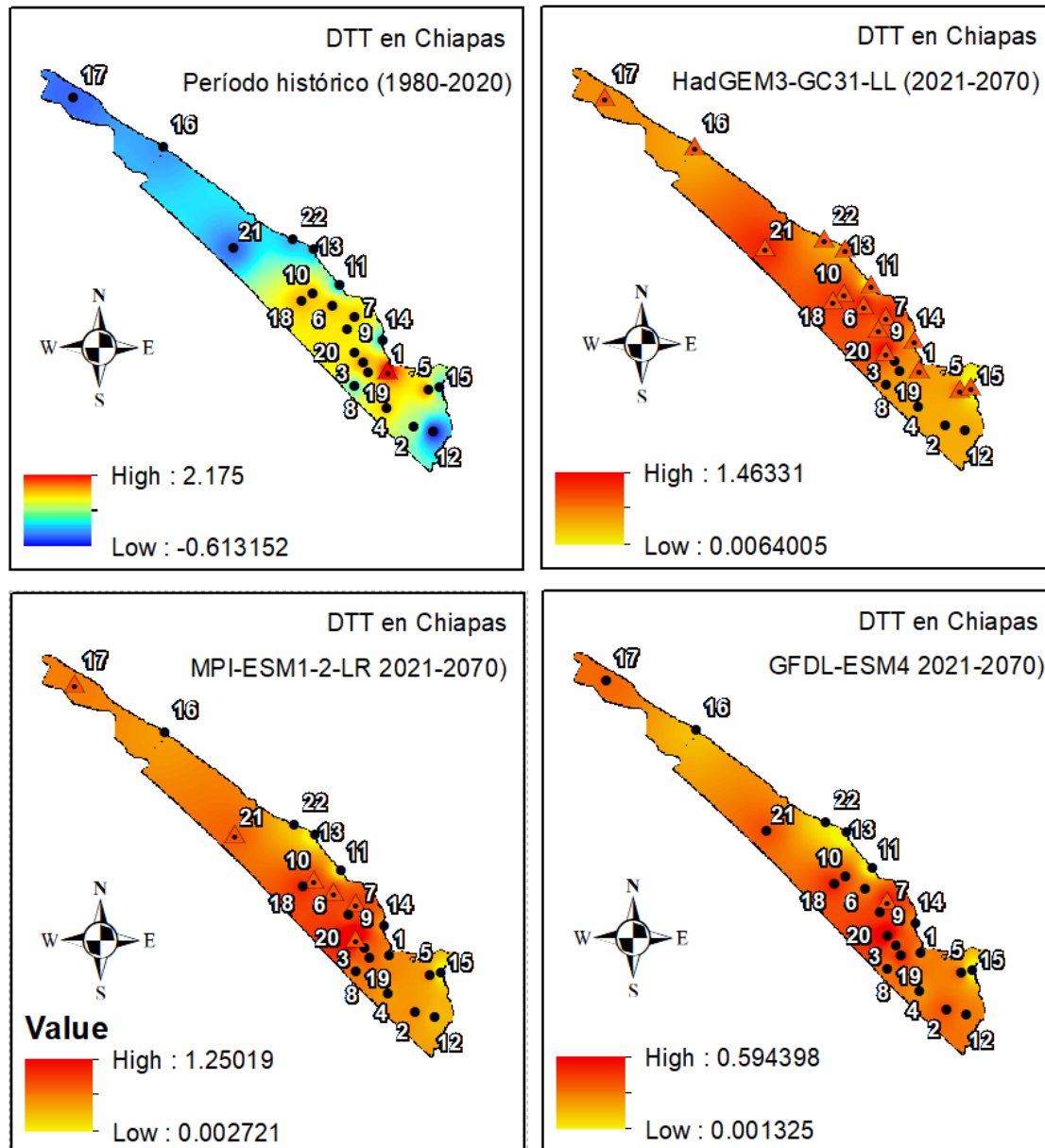


Figura 37. Tendencias de requerimiento hídrico anual para el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en los DTT en Chiapas

Fuente: Elaboración propia

Periodo histórico (1980–2020)

Durante el periodo histórico, los resultados muestran una marcada estabilidad en los requerimientos hídricos anuales del maíz. Solo una estación (1) presentó una tendencia positiva significativa ($p < 0.05$), mientras que la mayoría no registró cambios estadísticamente relevantes. La pendiente de Sen promedio fue de aproximadamente 0.7 mm año^{-1} , con un rango entre -0.3 y 2.2 mm año^{-1} . Estos valores sugieren que, en las últimas cuatro décadas, la demanda hídrica del cultivo se ha mantenido prácticamente constante, sin evidencias de aumentos sostenidos a nivel regional.

Escenario HadGEM3-GC31-LL (2021–2070)

Bajo este escenario, se identificó un incremento generalizado y significativo en los requerimientos hídricos. Aproximadamente 64 % de las estaciones (14 de 22) mostraron tendencias positivas con significancia estadística ($p < 0.05$). La pendiente de Sen promedio fue de 0.95 mm año^{-1} , alcanzando valores máximos de 1.4 mm año^{-1} en las estaciones 6 y 7. Ninguna estación presentó tendencias negativas significativas. Este modelo proyecta un aumento sostenido en la demanda de agua, lo que sugiere una intensificación del estrés hídrico agrícola en el futuro cercano.

Escenario MPI-ESM1-2-LR (2021–2070)

El modelo MPI-ESM1-2-LR proyecta incrementos más moderados. Solo 5 de las 22 estaciones (aproximadamente del 23 %) evidenciaron tendencias crecientes significativas. La pendiente de Sen promedio fue de 0.45 mm año^{-1} , con máximos de 1.25 mm año^{-1} . Aunque de menor magnitud que el HadGEM3, este modelo también indica un incremento gradual del requerimiento hídrico. Las estaciones con tendencias significativas coinciden parcialmente con las identificadas en el HadGEM3 (6, 7, 19 y 21), lo que refuerza la consistencia espacial de la señal de aumento en determinadas regiones.

Escenario GFDL-ESM4 (2021–2070)

En este caso, únicamente la estación 7 mostró una tendencia positiva significativa ($p = 0.05$). La pendiente promedio fue de 0.3 mm año^{-1} , con intervalos amplios y límites inferiores negativos, lo cual refleja una alta variabilidad y menor magnitud del cambio. En conjunto, el modelo GFDL-ESM4 sugiere un comportamiento más estable, sin

incrementos significativos en la mayoría de los puntos de análisis, y con una proyección general de estabilidad o incremento leve en los requerimientos hídricos futuros.

Incrementos acumulados de requerimientos hídricos del cultivo de maíz (*Zea mays* L.)

En el caso de los DTT en Chiapas, las pendientes medias estimadas por los modelos climáticos oscilaron entre 0.8 y 1.5 mm año⁻¹, lo que equivale a incrementos acumulados de aproximadamente 40 a 75 mm hacia finales del periodo de proyección (2070). Este cálculo permitió cuantificar de manera integrada la magnitud del cambio en la demanda hídrica del maíz, expresando los resultados tanto en tasas anuales como en valores acumulados a lo largo del horizonte futuro.

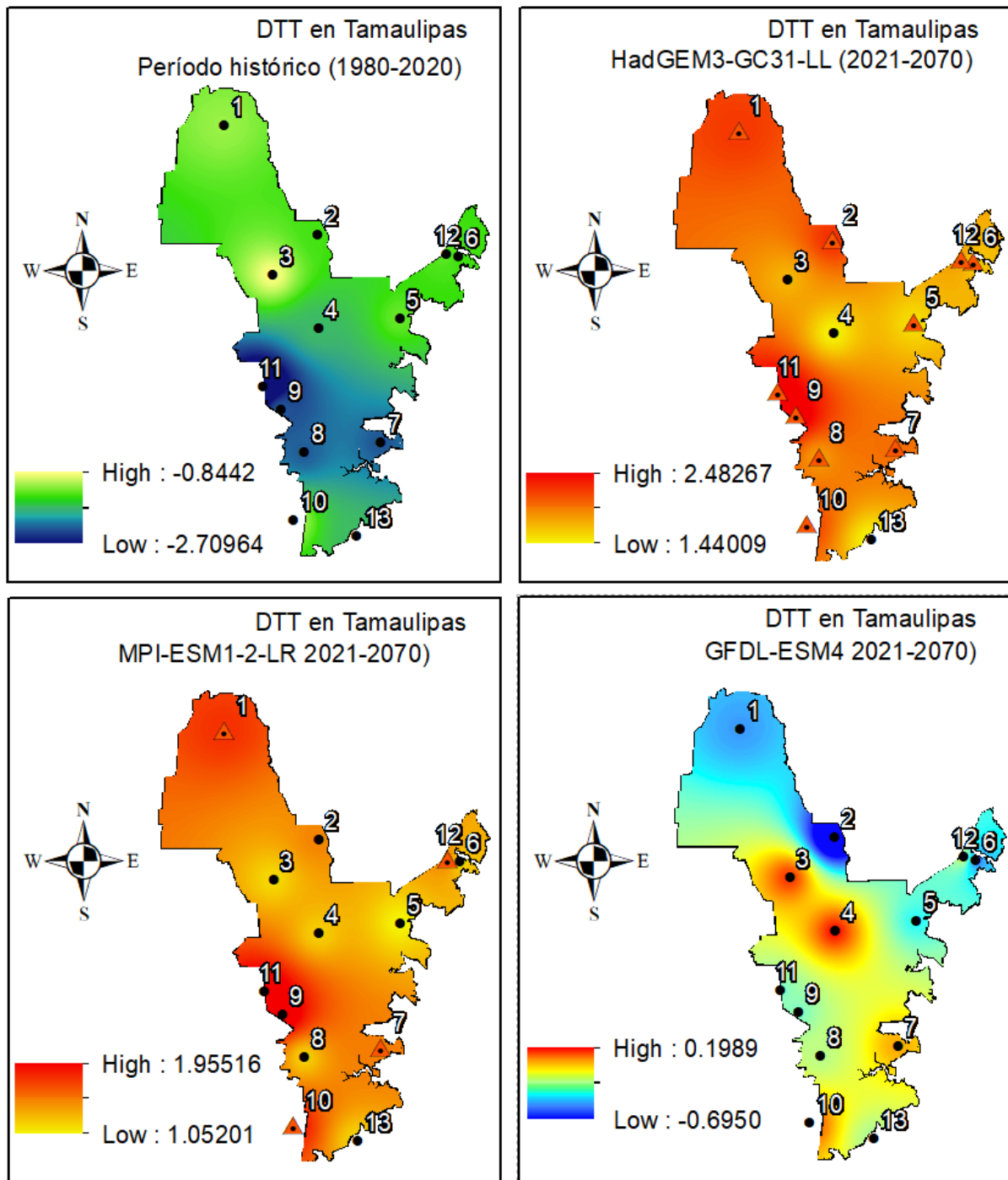


Figura 38. Tendencias de requerimiento hídrico anual para el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en los DTT en Tamaulipas

Fuente: Elaboración propia

Periodo histórico (1980–2020)

Durante el periodo histórico, ninguna de las 13 estaciones mostró tendencias estadísticamente significativas ($p \geq 0.05$) según el test de Mann–Kendall. Sin embargo, la pendiente media de Sen fue negativa ($-1.48 \text{ mm año}^{-1}$), lo que sugiere una leve reducción promedio en el requerimiento hídrico del maíz. Las pendientes individuales oscilaron entre -0.8 y -2.7 mm año^{-1} , reflejando una posible disminución de la demanda hídrica asociada a condiciones climáticas históricamente más húmedas.

Escenario HadGEM3-GC31-LL (2021–2070)

El modelo HadGEM3-GC31-LL proyecta un incremento generalizado y significativo en los requerimientos hídricos del maíz. De las 13 estaciones analizadas, 10 (aproximadamente el 76.9%) presentaron tendencias positivas significativas ($p < 0.05$), con pendientes de Sen entre 1.4 y 2.5 mm año^{-1} . Las estaciones más representativas de este aumento fueron 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12.

Escenario MPI-ESM1-2-LR (2021–2070)

El modelo MPI-ESM1-2-LR también indica una tendencia ascendente, aunque más moderada. Cuatro estaciones (aproximadamente el 30.8%) —1, 7, 10 y 12— registraron tendencias positivas significativas ($p < 0.05$), con pendientes de Sen entre 1.1 y 1.9 mm año^{-1} . Las coincidencias con el modelo HadGEM3 en estas cuatro estaciones fortalecen la señal de incremento en los requerimientos hídricos bajo escenarios futuros más cálidos. La pendiente media global del modelo fue de $+1.40 \text{ mm año}^{-1}$, reflejando un aumento moderado y sostenido del consumo de agua del cultivo.

Escenario GFDL-ESM4 (2021–2070)

El modelo GFDL-ESM4 no mostró tendencias estadísticamente significativas ($p > 0.4$ en todos los casos). La pendiente media de Sen fue de $-0.15 \text{ mm año}^{-1}$, valor cercano a cero, lo que indica estabilidad en el modelo proyectado.

Incrementos acumulados de requerimientos hídricos del cultivo de maíz (*Zea mays* L.)

En el caso del DTT ubicado en Tamaulipas, los incrementos proyectados se derivaron igualmente de las pendientes de Sen obtenidas a partir de las series anuales de

requerimiento hídrico simuladas para el periodo 2021–2070. Las pendientes promedio calculadas oscilaron entre 1.4 y 2.5 mm año⁻¹, lo que representa una tasa de incremento sostenido en la demanda hídrica del maíz a lo largo de las cinco décadas de proyección. Al multiplicar estas tasas anuales por la duración del periodo de análisis (50 años), se estimaron incrementos acumulados de entre 70 y 125 mm hacia 2070.

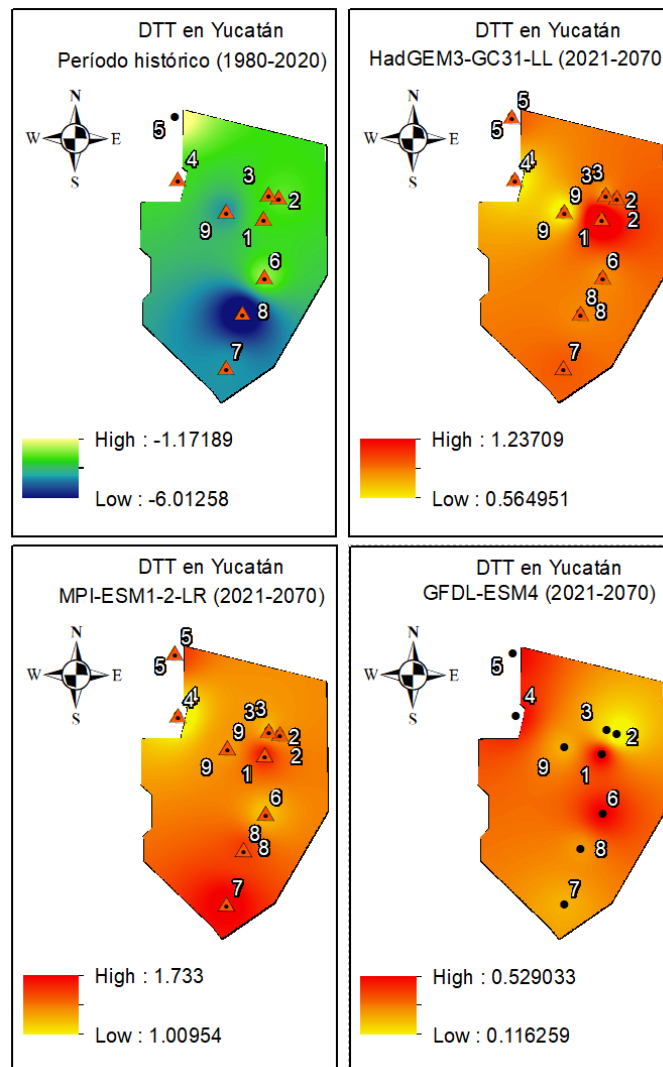


Figura 39. Tendencias de requerimiento hídrico anual para el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en los DTT en Yucatán

Fuente: Elaboración propia

Periodo histórico (1980–2020)

Durante el periodo histórico, los resultados del test de Mann-Kendall mostraron predominio de tendencias negativas significativas ($p < 0.05$) en la mayoría de las estaciones analizadas. En particular, las estaciones 1, 2, 3, 4, 7, 8 y 9 presentaron pendientes de Sen entre -2.6 y -6.0 mm año^{-1} , lo que indica una reducción sostenida en los requerimientos hídricos del maíz a lo largo de periodo histórico de estudio.

Escenario HadGEM3-GC31-LL (2021–2070)

En el escenario HadGEM3-GC31-LL, la tendencia general observada fue ligeramente positiva, aunque solo una estación (7) mostró una tendencia significativa ($p = 0.02$). Las pendientes de Sen oscilaron entre 0.59 y 1.24 mm año^{-1} , indicando un incremento leve y no generalizado en los requerimientos hídricos.

Escenario MPI-ESM1-2-LR (2021–2070)

El modelo MPI-ESM1-2-LR proyecta un panorama de incrementos más marcados y estadísticamente significativos. Cinco de las nueve estaciones analizadas (1, 5, 6, 7, 8 y 9) registraron tendencias ascendentes significativas ($p < 0.05$), con pendientes de Sen entre 1.2 y 1.7 mm año^{-1} , cuyos intervalos de confianza permanecen en rangos positivos.

Escenario GFDL-ESM4 (2021–2070)

En el modelo GFDL-ESM4, ninguna estación presentó tendencias significativas ($p > 0.4$). Las pendientes de Sen fueron reducidas (entre 0.12 y 0.53 mm año^{-1}) y los intervalos de confianza incluyeron valores negativos, lo que indica una alta estabilidad futura en los requerimientos hídricos del maíz.

Incrementos acumulados de requerimientos hídricos del cultivo de maíz (*Zea mays* L.)

En el DTT ubicado en Yucatán, las proyecciones de incremento en el requerimiento hídrico se obtuvieron a partir del análisis de tendencias mediante la prueba de Mann-Kendall y la estimación de la pendiente de Sen aplicada a las series anuales del periodo 2021–2070. Las pendientes obtenidas variaron entre 1.2 y 1.8 mm año^{-1} , lo que indica un aumento progresivo y sostenido en la demanda de agua para el maíz de temporal. Al multiplicar dichas pendientes por la duración del horizonte de análisis (50 años), se

estimaron elevaciones acumuladas de entre 60 y 90 mm hacia finales del periodo de proyección.

4.6. Discusión

El análisis de tendencias del requerimiento hídrico del maíz (*Zea mays L.*) mediante las pruebas de Mann-Kendall y la pendiente de Sen permitió identificar comportamientos diferenciados entre las regiones agroclimáticas de Chiapas, Tamaulipas y Yucatán, así como entre los periodos histórico (1980–2020) y proyectado (2021–2070). En general, los resultados evidencian una transición hacia mayores demandas hídricas bajo los escenarios climáticos futuros. Este incremento está en correspondencia con las proyecciones de aumento de temperatura y variabilidad pluviométrica en México reportadas por el IPCC (2021), que anticipa un calentamiento sostenido en regiones tropicales y subtropicales. De manera complementaria, Magaña et al. (2020) destacan que tales cambios climáticos podrían intensificar la evapotranspiración y modificar los patrones de disponibilidad de agua en el país, afectando directamente la sostenibilidad agrícola.

En los DTT ubicados en Chiapas, el periodo histórico mostró estabilidad en los requerimientos hídricos del maíz, con una pendiente media de 0.7 mm año^{-1} y solo una estación con tendencia significativa. Estos resultados concuerdan con los reportados por Ruiz-Alvarado et al. (2019), quienes observaron una relativa estabilidad en la evapotranspiración de cultivos de temporal en regiones húmedas del sureste de México. Sin embargo, los escenarios futuros revelan un cambio importante: el modelo HadGEM3-GC31-LL proyecta un incremento generalizado (64 % de estaciones con tendencias significativas), mientras que MPI-ESM1-2-LR sugiere aumentos moderados (23 %). Estas proyecciones coinciden con lo señalado por CONAGUA (2020), donde se anticipan incrementos de la demanda evapotranspirativa entre 1 y 2 mm año^{-1} en el sur del país debido al aumento térmico. Por su parte, el modelo GFDL-ESM4 muestra una menor sensibilidad climática, lo que podría atribuirse a diferencias estructurales en la representación de la circulación atmosférica tropical, como lo indican Eyring et al. (2016).

En el DTT de Tamaulipas, los resultados históricos muestran pendientes negativas no significativas ($-1.48 \text{ mm año}^{-1}$ en promedio), lo que sugiere una ligera reducción en la

demanda hídrica del cultivo asociada a condiciones más húmedas en décadas pasadas. Este comportamiento histórico ha sido documentado también por Medina et al. (2021), quienes reportaron disminuciones en la evapotranspiración potencial durante los años ochenta y noventa. Sin embargo, las proyecciones futuras muestran un claro incremento: el modelo HadGEM3-GC31-LL estima un aumento sostenido (pendiente media de 1.8 mm año⁻¹), con el 76.9 % de las estaciones mostrando tendencias significativas. El MPI-ESM1-2-LR confirma esta tendencia, aunque con magnitudes más moderadas (1.4 mm año⁻¹). Estos resultados son consistentes con los hallazgos de Lobell et al. (2014), quienes señalaron que las regiones semiáridas del norte y noreste de México son particularmente vulnerables a la intensificación del déficit hídrico agrícola bajo escenarios de calentamiento global.

Por otro lado, en el DTT de Yucatán, los resultados históricos reflejan reducciones significativas en los requerimientos hídricos (pendientes entre -2.6 y -6.0 mm año⁻¹), lo que puede asociarse a condiciones climáticas históricamente más húmedas y menor radiación neta, como también señalan Pavía et al. (2018). En contraste, los escenarios futuros, especialmente el MPI-ESM1-2-LR, proyectan incrementos significativos (1.2 a 1.7 mm año⁻¹) en la mayoría de las estaciones, lo que sugiere un cambio hacia condiciones de mayor estrés hídrico. Este resultado coincide con las proyecciones de aumento de temperatura en la Península de Yucatán reportadas por el IPCC (2021), que prevé un incremento térmico regional acompañado de mayor variabilidad climática. Asimismo, el INECC (2020) señala una tendencia hacia la disminución de la humedad del suelo y un incremento en la frecuencia de periodos secos prolongados, lo que refuerza la evidencia de un posible aumento en los requerimientos hídricos del cultivo.

En contraste, el modelo GFDL-ESM4 presenta un comportamiento más conservador, sin mostrar tendencias significativas, lo que evidencia la incertidumbre entre modelos y es consistente con las características propias de los conjuntos CMIP6 (Eyring et al., 2016).

De manera general, los tres modelos climáticos evaluados muestran una coherencia espacial en las tendencias positivas proyectadas, especialmente en las estaciones donde se repiten las señales de incremento (p. ej., estaciones 6 y 7 en

Chiapas, 1 y 7 en Tamaulipas, y 5–9 en Yucatán). Esta convergencia entre modelos fortalece la confiabilidad de los resultados y sugiere un aumento regional de los requerimientos hídricos del maíz de entre 0.3 y 2.5 mm año⁻¹, dependiendo del escenario. Este rango se alinea con los incrementos estimados por la FAO (2022), que proyecta un aumento progresivo en los requerimientos hídricos de los cultivos de secano debido al incremento de la temperatura y la evaporación potencial. De manera consistente, el IPCC (2021) indica que bajo escenarios de emisiones intermedias (SSP2-4.5) se prevé un incremento generalizado de la demanda evaporativa en las zonas agrícolas tropicales y subtropicales.

En términos de gestión, estos hallazgos implican una mayor presión sobre los recursos hídricos agrícolas, especialmente en regiones donde el incremento proyectado coincide con limitaciones actuales de disponibilidad de agua, como en el DTT de Tamaulipas. Ello refuerza la necesidad de promover estrategias de adaptación, como el ajuste de fechas de siembra, la selección de genotipos de maíz más eficientes en el uso del agua y la mejora en la infraestructura de captación de agua de lluvia (Ojeda et al., 2020). En suma, el análisis confirma la vulnerabilidad diferenciada de las regiones agrícolas ante el cambio climático, siendo Chiapas y Tamaulipas las más propensas a incrementos significativos en la demanda hídrica del maíz hacia el periodo proyectado (2021-2070).

4.7. Conclusiones

El análisis de tendencias del requerimiento hídrico del maíz (*Zea mays* L.) en los Distritos de Temporal Tecnificado (DTT) de Chiapas, Tamaulipas y Yucatán permitió identificar cambios diferenciados entre el periodo histórico (1980–2020) y las proyecciones futuras (2021–2070). En general, los resultados muestran una transición hacia mayores demandas hídricas bajo escenarios de cambio climático, coherente con el incremento proyectado de la temperatura y la variabilidad de la precipitación.

Durante el periodo histórico, las tendencias fueron estables o ligeramente negativas, lo que indica que las condiciones climáticas pasadas no generaron cambios significativos en la demanda de agua del cultivo. En contraste, los escenarios futuros

evidencian incrementos acumulados notables en los requerimientos hídricos del maíz de temporal:

- En Chiapas, se proyectan aumentos de entre 40 y 75 mm (equivalentes a 0.8–1.5 mm año⁻¹).
- En Tamaulipas, los modelos climáticos prevén incrementos de 70 a 125 mm (1.4–2.5 mm año⁻¹).
- En Yucatán, se estiman elevaciones de 60 a 90 mm (1.2–1.8 mm año⁻¹) hacia finales del periodo de proyección.

Estas cifras confirman una tendencia general hacia el incremento progresivo del requerimiento hídrico del cultivo, particularmente bajo los escenarios HadGEM3-GC31-LL y MPI-ESM1-2-LR, que proyectan los cambios más pronunciados. La magnitud de las pendientes y la consistencia espacial entre modelos refuerzan la confiabilidad de los resultados, evidenciando un posible incremento de la evapotranspiración y del estrés hídrico agrícola.

Las diferencias regionales reflejan la heterogeneidad climática del país: el DTT de Tamaulipas muestra las mayores tasas de incremento y, por tanto, una mayor vulnerabilidad futura; los DTT ubicados en Chiapas presentan aumentos moderados concentrados en zonas del norte; y el DTT de Yucatán registra una inversión de tendencia, pasando de reducciones históricas a incrementos futuros en la demanda de agua.

Ante este panorama, se requiere fortalecer las estrategias de adaptación agrícola, se recomienda el ajuste de fechas de siembra, la selección de genotipos tolerantes a sequía, la implementación de prácticas de conservación de humedad del suelo, y el uso más eficiente del agua en los DTT. Asimismo, se recomienda integrar estos resultados en los procesos de planificación hidrológica y agrícola, con el fin de anticipar los efectos del cambio climático sobre la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de los sistemas de producción de maíz en México.

En conclusión, los resultados confirman que el cambio climático generará incrementos acumulados de 40 a 125 mm en el requerimiento hídrico del maíz hacia

2070, lo que implica una mayor presión sobre los recursos hídricos agrícolas y la necesidad urgente de acciones adaptativas diferenciadas por región.

4.8. Referencias

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (Estudio FAO Riego y Drenaje No. 56). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma, Italia.
- Bassu, S., Brisson, N., Durand, J.-L., Boote, K., Lizaso, J., Jones, J. W., Rosenzweig, C., Ruane, A. C., Adam, M., Baron, C., Basso, B., Biernath, C., Boogaard, H., Conijn, S., Corbeels, M., Deryng, D., De Sanctis, G., Gayler, S., Grassini, P., ... Asseng, S. (2014). How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors? *Global Change Biology*, 20(7), 2301–2320. <https://doi.org/10.1111/gcb.12520>
- CONAGUA. (2020). Atlas del Agua en México 2020. Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2024). Información Estadística Climatológica. Comisión Nacional del Agua. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Dastane, N.G. (1974). *Effective rainfall in irrigated agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 25. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- FAO. (2022). The State of Food and Agriculture 2022: Leveraging automation for transforming agrifood systems. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

- FAO & IIASA. (2012). Global Agro-Ecological Zones (GAEZ v3.0): Model documentation. Food and Agriculture Organization of the United Nations and International Institute for Applied Systems Analysis. https://www.gaez.iiasa.ac.at/docs/GAEZ_Model_Documentation.pdf
- Gutjahr, O., Putrasahan, D., Lohmann, K., Jungclaus, J. H., von Storch, J.-S., Brüggemann, N., Haak, H., & Stössel, A. (2019). Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2) for the High-Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP). *Geoscientific Model Development*, 12(7), 3241-3281. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3241-2019>
- INEGI. (2020). Atlas de los Distritos de Temporal Tecnificado de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INECC. (2020). Estrategia Nacional de Cambio Climático: Visión 10-20-40. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- INIFAP. (2015). Agenda Técnica Agrícola de Yucatán 2015. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- INIFAP. (2017). Agenda Técnica Agrícola de Tamaulipas 2017. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- INIFAP. (2024). Sistema de base de datos meteorológicos ESSENGER. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Kendall, M. G. (1975). Rank correlation methods (4th ed.). Charles Griffin.

- Kukal, M. S., & Irmak, S. (2018). Climate-driven trends in evapotranspiration reference and crop evapotranspiration over 1961–2013 in the United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, 262, 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.06.025>
- Magaña, V., Amador, J., & Medina, S. (2020). Climate change and water resources in Mexico: Implications for agriculture. *Atmósfera*, 33(2), 123–140.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Medina, G., Ruiz, J., & Chávez, A. (2021). Variabilidad climática y requerimientos hídricos agrícolas en regiones semiáridas de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(6), 987–1002.
- Mesa Técnica Agroclimática Chiapas & INIFAP. (2021). Boletín Agroclimático del Estado de Chiapas. Chiapas, México.
- Monerie, P.-A., Chevuturi, A., Cook, P., Klingaman, N. P., & Holloway, C. E. (2020). Role of atmospheric horizontal resolution in simulating tropical and subtropical South American precipitation in HadGEM3-GC3.1. *Geoscientific Model Development*, 13(10), 4749–4771. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-4749-2020>
- Moratiel, R., Martínez-Cob, A., Tarquis, A. M., & Snyder, R. L. (2020). Trends in climatic variables and future reference evapotranspiration in the Iberian Peninsula. *Agricultural Water Management*, 242, 106424. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106424>
- Ojeda-Bustamante, W., Rojano, A., & Sifuentes, I. (2020). Estrategias de adaptación para el manejo eficiente del agua en agricultura de temporal. *Agrociencia*, 54(4), 513–527.
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., ... van Vuuren, D. P. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>

- OMM. (2013). Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Organización Meteorológica Mundial. <https://wmo.int/es>
- Pavía, E. G., Hernández, A., & Magaña, V. (2018). Precipitation variability in the Yucatán Peninsula and its relation to ENSO. *International Journal of Climatology*, 38(S1), e1233–e1245.
- Rockström, J., Karlberg, L., Wani, S. P., Barron, J., Hatibu, N., Oweis, T., Bruggeman, A., Farahani, J., & Qiang, Z. (2010). Managing water in rainfed agriculture—The need for a paradigm shift. *Agricultural Water Management*, 97(4), 543–550. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.09.009>
- Ruane, A. C., Vautard, R., Knox, J., Ciais, P., Elliott, J., Ewert, F., Ittersum, M. K. van, & Webber, H. (2022). Climate change impacts on agricultural systems: A review of CMIP6 projections. *Agricultural Systems*, 196, 103327. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2021.103327>
- Ruiz-Alvarado, C., Escalante, E., & García, E. (2019). Tendencias climáticas y requerimiento hídrico de cultivos en el sureste mexicano. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25(2), 215–229.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- SHC. (2012). Programa Regional de Desarrollo. Secretaría de Hacienda Chiapas.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2023). Atlas agroalimentario 2023. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. https://nube.siap.gob.mx/atlas_agroalimentario/
- Troy, T. J., Kipgen, C., & Pal, I. (2015). The impact of climate extremes and irrigation on US crop yields. *Environmental Research Letters*, 10(5), 054013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/5/054013>
- Webber, H., Ewert, F., Olesen, J. E., Müller, C., Fronzek, S., Ruane, A. C., Bourgault, M., Martre, P., Ababaei, B., Bindi, M., Ferrise, R., Finger, R., Gaiser, T., Gabaldón-

Leal, C., Giglio, L., Hlavinka, P., Hoogenboom, G., Kersebaum, K. C., Nendel, C., ... Asseng, S. (2018). Diverging importance of drought stress for maize and winter wheat in Europe. *Nature Communications*, 9(1), 4249. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06525-2>

Zampieri, M., Ceglar, A., Dentener, F., & Toreti, A. (2019). Wheat yield loss attributable to heat waves, drought and water excess at the global, national and subnational scales. *Environmental Research Letters*, 14(6), 064006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa723b>

5. Conclusiones generales

La presente investigación permitió caracterizar la variabilidad y las tendencias climáticas en tres Distritos de Temporal Tecnificado (DTT) representativos de tres regiones agroclimáticas de México (Chiapas, Tamaulipas y Yucatán), así como estimar sus implicaciones sobre el requerimiento hídrico del cultivo de maíz (*Zea mays L.*) bajo condiciones históricas y escenarios climáticos futuros.

El análisis histórico (1980–2020) evidenció una tendencia generalizada al incremento de las temperaturas máximas y mínimas, particularmente durante los meses del ciclo agrícola (junio a septiembre). La precipitación acumulada mensual mostró una alta variabilidad interanual, con reducciones en los meses iniciales del ciclo (mayo-junio) y ligeros aumentos hacia el final (septiembre-octubre), lo que podría modificar las condiciones de establecimiento y desarrollo del maíz de temporal.

Las proyecciones climáticas derivadas de los modelos HadGEM3-GC31-LL, MPI-ESM1-2-LR y GFDL-ESM4 del CMIP6, bajo la trayectoria socioeconómica SSP2-4.5, confirman una tendencia hacia mayores temperaturas y una mayor variabilidad pluviométrica en los tres DTT analizados. El uso del generador estocástico LARS-WG 8.0 permitió regionalizar los escenarios y estimar valores consistentes con los registros observados, fortaleciendo la confiabilidad de las proyecciones.

En términos de impacto sobre el recurso hídrico agrícola, los resultados indican un incremento sostenido en el requerimiento hídrico del maíz a lo largo del horizonte de análisis (2021–2070). Las pendientes calculadas mediante la prueba de Mann–Kendall y el estimador de Sen reflejan aumentos anuales de entre 0.8 y 2.5 mm año⁻¹, equivalentes a incrementos acumulados de 40 a 125 mm dependiendo de la región. Específicamente, en Chiapas se proyectan incrementos de 40–75 mm, en Tamaulipas de 70–125 mm, y en Yucatán de 60–90 mm hacia finales del periodo de proyección.

Estos resultados evidencian una transición hacia mayores demandas hídricas bajo escenarios climáticos futuros, lo que implicará mayores riesgos de déficit hídrico en regiones de temporal. La magnitud del incremento es diferencial: más acentuada en zonas semiáridas del norte (Tamaulipas) y más moderada en regiones húmedas del sur

(Chiapas y Yucatán), lo cual resalta la importancia de estrategias de adaptación específicas por región.

Desde la perspectiva de la Ingeniería Agrícola y el Uso Integral del agua, los hallazgos subrayan la necesidad de:

- Reforzar la gestión del agua en sistemas de temporal, mediante la implementación de prácticas de conservación de humedad y cosecha de agua.
- Actualizar los calendarios agrícolas y la zonificación de cultivos, considerando los cambios proyectados en temperatura y precipitación.
- Desarrollar modelos locales de balance hídrico que integren las proyecciones climáticas con la demanda del cultivo.
- Promover la diversificación de cultivos y la adopción de variedades tolerantes al estrés hídrico, como medida preventiva ante el aumento de la evapotranspiración.

En conjunto, esta tesis demuestra que el cambio climático modificará significativamente los requerimientos hídricos del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) de secano en México. La cuantificación de las tendencias de requerimientos hídricos representa una herramienta estratégica para orientar políticas públicas, diseñar programas de adaptación agrícola para los Distritos de Temporal Tecnificado en México y fortalecer la planificación integral del recurso hídrico a nivel regional.