

Tlamati Sabiduría



Análisis sobre las proyecciones de cambio climático en México

Martín José Montero-Martínez^{1*}

Mercedes Andrade-Velázquez²

¹*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso, 62550, Jiutepec, Morelos, México.*

²*CONAHCYT-Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad (CCGS). Calle Centenario del Instituto Juárez s/n, Colonia Reforma, Villahermosa, Tabasco, 86080, México.*

**Autor de correspondencia*

martin_montero@tlaloc.imta.mx

Resumen

El cambio climático es un fenómeno que se acelera en todo el mundo debido a la actividad humana, como la quema de combustibles fósiles, la deforestación y la agricultura intensiva. Las emisiones de gases de efecto invernadero están aumentando la temperatura del planeta y cambiando los patrones climáticos. Por lo tanto, se requiere de proyecciones climáticas confiables para las próximas décadas, con una resolución adecuada para realizar estudios de impacto a nivel regional y generar medidas de adaptación pertinentes. El presente trabajo llevará a cabo una exploración de los trabajos publicados sobre proyecciones climáticas en México, analizando su evolución a través de las diferentes fases del Proyecto de Intercomparación de Modelos Climáticos que han proporcionado información a los Reportes de Evaluación emitidos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático. Durante esta revisión, se analizará cómo y cuánto han variado las proyecciones de temperatura en superficie y precipitación reportadas en los diferentes Estudios de País, Comunicaciones Nacionales sobre Cambio Climático y Reportes de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático. El objetivo del presente trabajo es hacer una revisión del estado del arte sobre la generación de proyecciones de cambio climático en México para el presente siglo usando

Información del Artículo

Cómo citar el artículo:

Montero-Martínez, M.J., Andrade-Velázquez, M. (2024). Análisis sobre las proyecciones de cambio climático en México. *Tlamati Sabiduría*, 18, 7-22.

Editores Invitados: Dra. Rosalva Pérez-Gutiérrez, Dr. Oscar Frausto-Martínez, Dr. Julio Cesar Morales-Hernández.



bases de datos bibliográficas, gestores de referencias bibliográficas y motores de búsqueda académica, principalmente. Se espera que este trabajo dé apoyo a los estudiantes y científicos que se inician en este tema, así como a los tomadores de decisión encargados de la formulación o modificación de medidas de adaptación existentes, para enfrentar los retos climáticos actuales y futuros en las próximas décadas.

Palabras clave: Modelos climáticos globales, Modelos climáticos regionales, Reducción de escala.

Abstract

Climate change is a phenomenon that is accelerating worldwide due to human activity, such as the burning of fossil fuels, deforestation and intensive agriculture. Greenhouse gas emissions are increasing global temperatures and changing weather patterns. Therefore, reliable climate projections for the coming decades with an adequate resolution are required to perform impact studies at the regional level and generate relevant adaptation measures. This study will carry out an exploration of the published works on climate projections in Mexico, analyzing their evolution through the different phases of the Climate Model Intercomparison Project that have provided information to the Assessment Reports issued by the Intergovernmental Panel on Climate Change. During this review, we will analyze how and how much the surface temperature and precipitation projections reported in the different Country Studies, National Communications on Climate Change and Assessment Reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change have varied. The objective of this work is to review the state of the art on the generation of climate change projections in Mexico for the present century, mainly using bibliographic databases, bibliographic reference managers and academic search engines. Hopefully this work will provide support to students and scientists initiating their exploration of this topic, as well as decision-makers responsible for formulating or modifying existing adaptation measures to address current and future climate challenges in the coming decades.

Keywords: General climate models, Regional climate models, Downscaling.

Introducción

Las proyecciones de cambio climático globales son fundamentales para entender y prever los efectos del calentamiento en nuestro planeta. Estas proyecciones se basan en modelos climáticos globales (GCMs, por sus siglas en inglés) que simulan el comportamiento del clima en diferentes escenarios futuros, considerando factores como la emanación de gases de efecto invernadero (GHGs, por sus siglas en inglés), la actividad humana y las condiciones naturales del planeta.

Lo anterior es importante porque permiten anticipar cómo el clima cambiará en el futuro, y de esta forma tomar decisiones informadas para mitigar los efectos del cambio climático y adaptarnos a las condiciones cambiantes. Por ejemplo, estas proyecciones son útiles para

planificar infraestructuras, desarrollar políticas públicas, gestionar recursos hídricos y forestales, y diseñar estrategias de conservación de la biodiversidad.

Además, las proyecciones de cambio climático tienen implicaciones a nivel global, toda vez que el cambio climático no es un fenómeno aislado y sus efectos pueden presentarse en todo el mundo y en todos los sectores de la sociedad, así como en los diferentes sistemas del planeta Tierra. Por tanto, es necesario que los gobiernos, las empresas, las organizaciones y la sociedad en general trabajen juntos para abordar los desafíos del cambio climático y promover un futuro sostenible para todos.

Los escenarios para México se iniciaron a mediados de los 1990's, junto con el surgimiento del Proyecto de Intercomparación de Modelos

Acoplados (CMIP, por sus siglas en inglés), que se crea en 1995 por el Grupo de Trabajo sobre Modelación Acoplada. La serie inicial de experimentos estandarizados tenía como objetivo evaluar la respuesta del modelo a un escenario simplificado: un aumento constante e incremental logrado al aumentar los niveles de CO₂ en un 1% anual, hasta el doblamiento de bióxido de carbono preindustrial (Gay *et al.* 2001).

El objetivo principal del CMIP, a través de la utilización de varios modelos, es obtener una mejor comprensión de los cambios climáticos pasados, presentes y futuros, tanto aquellos causados por la radiación como aquellos causados por la naturaleza (CMIP, 2023). Este proyecto identifica los factores que contribuyen a la variabilidad en las proyecciones futuras y a evaluar el desempeño de los modelos en el contexto histórico. Para lograr esto, se realizan experimentos idealizados que ayudan a obtener una mejor comprensión de las respuestas de los modelos climáticos. Los experimentos se llevan a cabo para investigar la predictibilidad del sistema climático en diferentes escalas de tiempo y espacio, así como para hacer predicciones basadas en los datos históricos, además de analizar las respuestas a largo plazo. Asimismo, el CMIP pone a disposición los resultados de varios modelos en un formato estandarizado (CMIP, 2023). Esto último es quizás una de las razones por la cual la producción de resultados del CMIP ha ido de la mano de los más recientes cuatro reportes de evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés).

El presente manuscrito atiende a la problemática sobre conocer cuáles han sido los desarrollos más notables a nivel nacional en los cuales se haya proporcionado información sobre las proyecciones climáticas durante las tres décadas recientes, de tal manera que se crea un abanico de posibilidades. Por lo que el objetivo primordial de este trabajo es abordar esa problemática realizando una revisión del estado del arte sobre los trabajos que a nuestro criterio han tenido el mayor impacto en esta área, usando bases de datos bibliográficas, gestores de referencias bibliográficas y motores de búsqueda académica.

Es importante mencionar que parte de este trabajo actualiza información previa por parte de los mismos autores en el capítulo “Cambio climático, proyecciones y predictibilidad”, del libro “Reporte Mexicano de Cambio Climático. Grupo I. Bases Científicas. Modelos y Modelación” (Montero-Martínez y Andrade-Velázquez, 2015). En el trabajo mencionado se reportaron los avances hasta el IPCC-AR4 (CMIP3) y ahora se ha extendido hasta el presente, pasando por el CMIP5 y CMIP6 (Proyectos de Intercomparación de Modelos Acoplado fase 5 y 6, respectivamente).

Además, también se ha incluido una pequeña descripción sobre las diferencias en cuanto a los conceptos de predicción y proyección climática, que muchas veces causa confusión en la sociedad, debido a una mala información por parte de los medios de comunicación masiva.

Diferencia entre predicción y proyección de clima

Predicción y proyección son dos conceptos distintos utilizados en el entorno de la ciencia climática para comprender y comunicar las posibles condiciones climáticas futuras. Si bien ambos implican estimar patrones climáticos futuros, difieren en sus metodologías, escalas de tiempo y niveles de incertidumbre. La Tabla 1 presenta una descripción de las diferencias principales entre predicción y proyección del clima.

Breve discusión sobre las predicciones de clima en México

A continuación, se expone cronológicamente los trabajos realizados en México en torno a la elaboración de predicciones del clima a nivel nacional para contextualizar los esfuerzos en la construcción de posibles escenarios para el país.

Es indudable la contribución del Prof. Julian Adem Chahín, quien hizo importantes aportaciones en los inicios de la climatología mundial (McGuffie y Henderson-Sellers, 2014; Ruiz-Barradas y Tejeda-Martínez, 2015). Adem (1962) presentó un modelo simplificado, mejor conocido como Modelo Termodinámico del

	Predicciones climáticas	Proyecciones climáticas
Definición	Se refieren a la estimación de las condiciones climáticas futuras basadas en nuestra comprensión actual del sistema climático, incorporando datos históricos, observaciones y modelos climáticos	Se refieren a estimaciones de las condiciones climáticas futuras basadas en diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros factores de forzamiento externo, representando una gama de posibles resultados futuros.
Escala de tiempo	Se centran generalmente en cambios climáticos a corto y mediano plazo, normalmente abarcando desde algunas semanas hasta varias décadas.	Generalmente abarcan horizontes de tiempo a largo plazo, desde varias décadas hasta siglos, y se utilizan con frecuencia para valorar los impactos del cambio climático y formular estrategias de adaptación y mitigación.
Metodología	Se basan en modelos numéricos de predicción del tiempo, modelos estadísticos y técnicas de pronóstico en conjunto para simular y analizar las complejas interacciones entre la atmósfera, los océanos, la superficie terrestre y otros componentes del sistema terrestre.	Utilizan GCMs o modelos del sistema terrestre (ESMs, por sus siglas en inglés) que simulan las interacciones entre la atmósfera, los océanos, la tierra, el hielo y la biosfera bajo diversos escenarios de emisiones. Estos modelos se basan en leyes físicas e incorporan conocimientos sobre los procesos del sistema terrestre.
Inicialización	Se inicializan utilizando observaciones actuales y datos climáticos históricos para crear un estado inicial. Estos modelos luego simulan la evolución del sistema climático hacia el futuro, teniendo en cuenta la dinámica atmosférica, las corrientes oceánicas y otros factores.	Consideran diferentes trayectorias de emisiones de GEI y rutas de desarrollo para explorar una gama de posibles resultados climáticos futuros. Estos escenarios representan diferentes suposiciones sobre las actividades humanas futuras y sus impactos en las concentraciones de GEI.
Incertidumbre	Conllevan incertidumbres inherentes debido a la naturaleza caótica del sistema climático, limitaciones en la calidad y cobertura de los datos, y errores en los modelos. El nivel de incertidumbre generalmente aumenta a medida que se pronostica a plazos más largos.	Involucran incertidumbres derivadas tanto de la complejidad inherente del sistema climático como de las incertidumbres asociadas con las acciones humanas futuras. El rango de resultados potenciales en las proyecciones refleja estas incertidumbres, y el nivel de incertidumbre generalmente aumenta a medida que se consideran horizontes de tiempo más largos.
Aplicaciones	Son valiosas para la programación y toma de decisiones a corto plazo, como la gestión agrícola, la preparación ante desastres y la previsión de la demanda energética. Ayudan a abordar preguntas como los patrones de lluvia estacional, las olas de calor o los eventos climáticos extremos en los próximos meses.	Se utilizan para valorar los posibles impactos del cambio climático en diversos sectores, como agricultura, recursos hídricos, áreas costeras y ecosistemas. Ayudan a los encargados de la formulación de políticas, investigadores y comunidades en la planificación a largo plazo, el desarrollo de infraestructuras y las estrategias de mitigación del cambio climático.

Tabla 1. Diferencias conceptuales entre las predicciones y proyecciones climáticas.

Clima (MTC), que considera los principios de conservación de energía, los mecanismos de calentamiento en la atmósfera y el acoplamiento entre los procesos dinámicos y termodinámicos. Se desarrollaron ecuaciones que describen la temperatura, el exceso de radiación y el viento zonal. La solución obtenida mostró una notable concordancia con las observaciones, aunque se apreciaron discrepancias durante algunos meses específicos. El estudio también señaló que la difusión turbulenta meridional facilitada por grandes torbellinos puede lograr el transporte de calor necesario. Los trabajos de Adem, también ampliaron el ámbito de los esquemas de predicción numérica del tiempo para derivar GCMs. El modelo termodinámico de baja resolución descrito por Adem (1965), es un interesante modelo climático, pues se encuentra en un punto intermedio de la pirámide de modelado climático (McGuffie y Henderson-Sellers, 2014), aunque su metodología es más simple que la de un GCM atmosférico.

Por otro lado, Adem *et al.* (2000) desarrollaron un modelo que se inicializaba con datos de temperatura de superficie del mar (SST, por sus siglas en inglés) y temperatura del aire a 700 mb del mes anterior. Los resultados revelaron que el modelo tenía cierta capacidad para predecir las anomalías de temperatura y precipitación. Además, se demostró la importancia de la SST en las predicciones climáticas, puesto que temperaturas por encima de lo normal en el Golfo de México y en el Océano Pacífico adyacente a México podrían ocasionar precipitaciones por debajo de lo normal en el país, e incluso favorecer condiciones de sequía.

Otro factor importante es, sin duda, la influencia del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) en la precipitación de Estados Unidos y México (Ropelewski y Halpert, 1986). Su impacto en la actividad de los ciclones tropicales en el Atlántico y el Pacífico oriental es relevante, y ejerce una enorme influencia en la precipitación mensual y estacional en ambos países (Ropelewski y Halpert 1986). Como resultado, ENSO constituye un factor importante en los pronósticos mensuales y estacionales a largo plazo.

Engleheart y Douglas (2001) exploraron el papel que desempeñan las tormentas tropicales del este del Pacífico Norte en la climatología de las lluvias en el oeste de México. Sugieren claramente que mejorar las previsiones estacionales de las tormentas tropicales en el este del Pacífico Norte será fundamental para avanzar en la predicción climática estacional para México.

Por otro lado, Nicholas y Battisti (2008) utilizaron un enfoque estadístico para explorar la variabilidad de la lluvia y la sequía meteorológica en el Río Yaqui en México en diferentes escalas de tiempo, desde estacionales hasta decenales. La lluvia en verano parece no estar relacionada con patrones de variabilidad a gran escala, pero se observa una fuerte relación entre el fenómeno ENSO y la lluvia en el Yaqui durante los meses de invierno, lo que ofrece la posibilidad de realizar predicciones estadísticas significativas para la precipitación de esta temporada. Los autores encontraron que el análisis de datos históricos y reconstruidos de lluvia sugiere que las sequías meteorológicas tan severas como la sequía del Yaqui de 1994-2002 ocurren aproximadamente dos veces por siglo, y en el pasado han ocurrido sequías aún más intensas, generalmente asociadas con anomalías en invierno.

Fuentes-Franco *et al.* (2018) presentaron un esquema híbrido novedoso diseñado para predecir patrones estacionales de precipitación en México. El esquema utiliza pronósticos de SST del modelo acoplado del Sistema 4 del Centro Europeo de Pronóstico Meteorológico a Medio Plazo (ECMWF, por sus siglas en inglés) e identifica tres predictores claves: SST sobre el Pacífico occidental, el Pacífico oriental y el Atlántico tropical. Estos predictores luego se emplean en un modelo para pronosticar la precipitación en una cuadrícula de alta resolución. Concluyeron que su herramienta es útil para mejorar los pronósticos de precipitación estacional en México, brindando un medio para mejorar la precisión y confiabilidad de dichas predicciones.

Panorama general de las proyecciones de clima en México

Lamentablemente, en México aún no hemos logrado desarrollar nuestros propios GCMs. Por

consiguiente, hasta el momento, nos hemos limitado a ser meros usuarios de esta información para llevar a cabo investigaciones en nuestro país. La Tabla 2 presenta una amplia gama de estudios que proporcionan datos acerca de las proyecciones climáticas en México. Estas investigaciones se fundamentan en datos directamente extraídos de los GCMs, así como en métodos de reducción de escala que hacen uso de

modelos climáticos regionales (RCMs por sus siglas en inglés), o bien emplean métodos estadísticos que han sido reportados en la literatura. A continuación, se brindan detalles adicionales acerca de algunos de estos estudios.

Poco tiempo después de que se completara el IPCC-FAR en 1990, los modelos climáticos reportaron que México podría experimentar

Escenarios socioeconómicos		Utilizando salidas de GCMs	Realizando reducción de escala (con RCMs o métodos estadísticos)
IPCC-FAR (1990)	Escenario sin cambio (habitual)* (BAU, en inglés) (1xCO ₂ , 2xCO ₂)	Liverman y O'Brien (1991); Conde <i>et al.</i> (1994).	Magaña <i>et al.</i> (1997).
IPCC-SAR (1995)	Escenario sin cambio (BAU), (1xCO ₂ , 2xCO ₂)		Magaña y Conde (2000).
IPCC-TAR (2001) (CMIP2)	Reporte Especial en Escenarios de Emisión (SRES, por sus siglas en inglés), 1%/año incremento de CO ₂	Giorgi y Francisco, (2000); Giorgi (2006).	Giorgi y Mearns (2002).
IPCC-4AR (2007) (CMIP3)	SRES	Christensen <i>et al.</i> (2007); Rauscher <i>et al.</i> (2008); Fernández-Eguiarte <i>et al.</i> (2010); Prieto-González <i>et al.</i> (2011).	Montero-Martínez y Pérez-López (2008); Karkalmar <i>et al.</i> (2011); Conde <i>et al.</i> (2011); Cavazos y Arriaga-Ramírez (2012); Magaña <i>et al.</i> (2012); Montero-Martínez <i>et al.</i> (2013).
IPCC-5AR (2014) (CMIP5)	Vías de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés)	Cavazos <i>et al.</i> (2013); García-Cueto <i>et al.</i> (2014); Fernández-Eguiarte <i>et al.</i> (2015).	Fuentes-Franco <i>et al.</i> (2015); Cerezo-Mota <i>et al.</i> (2016); Colorado-Ruiz <i>et al.</i> (2018); Cavazos <i>et al.</i> (2019); Andrade-Velázquez <i>et al.</i> (2021).
IPCC-6AR (2021) (CMIP6)	Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP, por sus siglas en inglés)	Salinas <i>et al.</i> (2020); Almazroui <i>et al.</i> (2021); Hernandez y Chen (2022).	Coppola <i>et al.</i> (2021); Andrade-Velázquez y Montero-Martínez (2023); Pierce <i>et al.</i> (2023).

Tabla 2. Muestra de estudios en México de acuerdo con los resultados de modelos y escenarios proporcionados por cada Reporte de Evaluación del IPCC. Nomenclatura: Primer reporte de evaluación del IPCC (IPCC-FAR, por sus siglas en inglés), segundo reporte de evaluación del IPCC (IPCC-SAR, por sus siglas en inglés), y así sucesivamente para los siguientes reportes. De igual forma CMIP2 se refiere a la segunda fase del CMIP, CMIP3 a la tercera, etc.

condiciones más cálidas y secas (Liverman y O'Brien, 1991). No obstante, la evaluación de los efectos del cambio climático en México continuó siendo incierta debido a las variaciones significativas en las proyecciones de varios modelos, particularmente en lo que respecta a la precipitación, y a la falta de precisión de los modelos en la reproducción del clima observado en México.

Más adelante, Conde *et al.* (1994) llevaron a cabo investigaciones para generar escenarios climáticos en tres regiones: norte, centro y sur de México; considerando condiciones de 1xCO₂ (lo cual se refiere a la concentración en 1994 de CO₂, aunque lo más utilizado en la literatura es con base en la concentración de CO₂ preindustrial). Estos escenarios se desarrollaron utilizando el MTC y abarcaron el período de referencia 1951-1980 y resolución espacial de 2.5° x 2.5°. Bajo condiciones de 2xCO₂ (que se refiere al doblamiento de la concentración de 1994 de CO₂), los análisis manifestaron cambios en la variación anual de la temperatura. En la zona norte, se proyectaron aumentos de temperatura entre +2.4 y +5.4 °C, mientras que en la zona centro se esperaban incrementos de +1.6 a +3.6 °C. En la zona sur, los cambios oscilaron entre +1.8 y +2.9 °C. En cuanto a los cambios en la precipitación, se observó una amplia variabilidad, pero ninguna tendencia clara en el futuro.

Posteriormente, Magaña *et al.* (1997) señalaron las restricciones de la interpolación de datos como un método de reducción de escala. Un estudio posterior generó escenarios de cambio climático regionales empleando las simulaciones de GCMs, de tal forma que pudieron ser utilizados en los estudios de vulnerabilidad de cambio climático de aquella época (Magaña *et al.*, 2000).

Para el IPCC-TAR, no se encontraron trabajos de investigadores nacionales en esta época, sin embargo, se destaca que las proyecciones regionales se obtuvieron mediante la recopilación de simulaciones de GCMs, o grupo de datos multi-modelo. Este enfoque dividió el mundo en diferentes subregiones para su análisis posterior (Giorgi y Francisco, 2000). Una de estas regiones es conocida como América Central y México (CAM, por sus siglas en inglés), que abarca desde los 10 °N hasta los 30 °N y desde las longitudes

de 83 °W hasta 116 °W. Según las simulaciones realizadas por el grupo de datos multi-modelo bajo el escenario SRES -A1B, se observa un calentamiento mayor en CAM en comparación con el calentamiento promedio a nivel mundial, tanto durante el verano como en invierno en el hemisferio boreal. Durante este tiempo también se introdujo el método de “promedio de confiabilidad en conjunto” (REA, por sus siglas en inglés) para calcular el promedio, el rango de incertidumbre y una medida de confiabilidad de los cambios climáticos simulados a escala subcontinental a partir de conjuntos de simulaciones de GCMs diferentes (Giorgi y Mearns, 2002). Este método en particular fue muy citado a nivel mundial y también utilizado por algunos otros trabajos a nivel nacional como se reportará más adelante. Otra contribución de Giorgi (2006) fue la de generar un índice llamado Índice Regional de Cambio Climático que se basó en los cambios proyectados en la temperatura media y la variabilidad de la lluvia a nivel regional. Este índice comparativo reveló que la CAM podría considerarse un "punto caliente" potencial, que ninguna otra zona en latitudes tropicales mostró.

Para el cuarto reporte de evaluación del IPCC (IPCC-4AR, por sus siglas en inglés), parte del punto anterior fue explicado por el calentamiento medio anual en la región CAM de 1.8 a 5.0 °C entre 1980 y 1999, y entre 2080 y 2099, con la mitad de los modelos entre 2.6 y 3.6 °C y una mediana de 3.2 °C (Christensen *et al.*, 2007). El mismo estudio reportó que la gran mayoría de los GCMs coinciden en el cambio de tendencia en la lluvia, proyectándose una disminución de ésta bajo el escenario SRES-A1B. Por otro lado, Rauscher *et al.* (2008) encontraron que varios modelos del CMIP3 fueron capaces de representar la sequía de medio verano (o intraestival) en la región del CAM. Al comparar las simulaciones del escenario climático futuro SRES-A1B (2061-2090) con las del período de referencia 20c3m (1961-1990), se observó una reducción en las precipitaciones, principalmente en junio y julio, justo antes y durante el comienzo de la sequía de medio verano. Los autores argumentaron que esos cambios pudieron ser forzados por un calentamiento tipo El Niño del

Pacífico oriental tropical y un incremento en los contrastes de calentamiento tierra-océano sobre el continente norteamericano. En cuestión de datos de proyecciones disponibles a nivel nacional, [Fernández-Eguiarte et al. \(2010\)](#) pusieron a disposición la versión 1 del Atlas Climático Digital de México, el cual se ha ido actualizando posteriormente. Finalmente, [Prieto-González et al. \(2011\)](#) concluyeron que las predicciones de eventos de sequía superaron en duración, magnitud y frecuencia a los eventos modelados en la segunda mitad del Siglo XX, utilizando el índice de precipitación estandarizado de 12 meses.

En cuanto a la generación de datos de proyecciones climáticas a mayor resolución [Montero-Martínez y Pérez-López \(2008\)](#) utilizaron el método REA para generar proyecciones de temperatura y precipitación para el presente siglo con base en un ensamble ponderado de modelos del CMIP3 a una resolución de $0.5 \times 0.5^\circ$. Posteriormente, estos resultados se pusieron a disposición de la comunidad en un sistema de proyecciones climáticas regionalizadas para México ([Montero-Martínez et al., 2013](#)). [Karkalmar et al. \(2011\)](#) utilizaron el RCM *Providing Regional Climates for Impacts Studies* (PRECIS) para mostrar que el aumento de temperatura proyectado bajo el escenario SRES-A2 es mayor en la estación lluviosa que en la seca, y la Península de Yucatán experimenta el mayor calentamiento. Además, se proyecta una gran reducción de la precipitación en la estación húmeda para la región, mientras que partes de América Central que reciben una cantidad considerable de humedad en forma de precipitación orográfica muestran disminuciones significativas en la precipitación en la estación seca. Por otro lado, el Centro de Ciencias de la Atmósfera presentó proyecciones de precipitación y temperatura para los horizontes 2030 y 2050 ([Conde et al., 2011](#)). Para ello utilizaron las salidas de tres modelos bajo cuatro escenarios SRES, utilizando el software *Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change, a regional climate SCENario GENerator* (MAGICC/SCENGEM) versión 4.1. Finalmente, [Cavazos y Arriaga-Ramírez \(2012\)](#) indicaron que después de 2050 se prevé una

disminución significativa de las precipitaciones en el noroeste de México y el suroeste de los Estados Unidos, al sur de 35°N , con temperaturas que superen los 2°C .

El primer estudio que puso a disposición del público los resultados de proyecciones climáticas con el CMIP5 que reportaron al IPCC-5AR fue el de [Cavazos et al. \(2013\)](#) en un Informe Final de proyecto al entonces Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Este estudio fue muy importante para la comunidad climática mexicana porque representó el esfuerzo de varias instituciones académicas y gubernamentales para mostrar estos primeros resultados de proyecciones de clima para la comunidad. Posteriormente, utilizando datos interpolados de seis GCMs, [García-Cueto et al. \(2014\)](#) proyectaron incrementos de temperatura en el rango de $(2-3^\circ\text{C})$ para el escenario radiativo bajo, y de $(4-5^\circ\text{C})$ para el alto, en cinco ciudades de la frontera norte del país hacia finales de siglo. Así también se realizó una actualización de los escenarios de cambio climático por parte de la UNAM ([Fernández-Eguiarte et al., 2015](#)).

Durante este período, [Fuentes-Franco et al. \(2015\)](#) utilizaron un ensamble de proyecciones climáticas del CMIP5 llevada a cabo con el modelo regional del *International Centre for Theoretical Physics Regional Climate Model* versión 4 (RegCM4) para evaluar los cambios en la variabilidad interanual de precipitación sobre el sureste de México y Centroamérica. Ellos mostraron que el RegCM4 realizó una mejor labor que los correspondientes GCMs. [Cerezo-Mota et al. \(2016\)](#) analizaron la salida de cuatro RCMs del Experimento de Reducción de Escala Climático Regional Coordinado (CORDEX, por sus siglas en inglés) en la región de América del Norte (NA), durante el período de 1990 a 2008, con un interés particular en los mecanismos asociados con los años húmedos y secos en la región central del Monzón Norteamericano (NAM, por sus siglas en inglés). Sus resultados mostraron que la mayoría de los RCMs capturaron bien el ciclo anual de precipitación y superaron a ERA-Interim, que es más seco que las observaciones.

Los RCMs subestimaron (sobrestimaron) la precipitación sobre las planicies costeras

(montañas) y tuvieron algunos problemas para reproducir la variabilidad interanual del monzón.

Colorado-Ruiz *et al.* (2018) emplearon dos variantes del método REA (el original y una variante llamada Rea-Xu) mencionado anteriormente, junto con una media no ponderada, para generar conjuntos de múltiples modelos a partir de 14 GCMs pertenecientes al CMIP5. Esto se realizó tanto para un período de referencia (1971-2000) como para escenarios futuros (RCP4.5 y RCP8.5) correspondientes al Siglo XXI. Los autores encontraron que las métricas de los ensambles de REA fueron muy similares entre ellas en cada región de México estudiada y mostraron un mejor desempeño que el ensamble multi-modelo no ponderado. Además de que la precipitación invernal en el NAM es sobreestimada generalmente por la mayoría de los GCMs, y no lograron reflejar con precisión el final del monzón en otoño. Sin embargo, los conjuntos generados mediante el método REA ayudaron a reducir esta sobreestimación. Todos los conjuntos de modelos capturaron correctamente el patrón bimodal de lluvia de la sequía intraestival, pero subestimaron la cantidad de precipitación durante el verano.

Cavazos *et al.* (2019) realizaron una comparación entre tres RCMs PRECIS-HadRM3P, RCA4 y RegCM4 dentro del marco CORDEX en la región CAM. El objetivo fue evaluar su capacidad para reproducir las tendencias observadas de temperatura y precipitación durante el período de 1980-2010. Se hizo hincapié en las regiones del NAM y la sequía de medio de verano en el centro y sur del país. Los tres RCMs mostraron sesgos negativos (positivos) de temperatura (precipitación) en las zonas montañosas, donde las observaciones presentaron más problemas debido a la escasa cobertura de datos. Por otro lado, Andrade-Velázquez *et al.* (2021) llevaron a cabo un estudio histórico y futuro sobre cambio climático regional en la región de Mesoamérica, América Central y el Caribe. Para el futuro cercano (2015-2039), los tres RCPs analizados mostraron la misma tendencia de aumento de temperatura que los registros históricos. El RCP 6.0 presentó tendencias similares a los registros históricos para América Central, sureste de México y Península

de Yucatán, mientras que el Caribe correspondió al RCP 4.5. En cuanto al futuro lejano (2075-2099), el RCP 6.0 es más adecuado para el sureste de México-Península de Yucatán, y el RCP 8.5 corresponde a América Central.

Para el último reporte de evaluación del IPCC (IPCC-AR6), el primer estudio a nivel nacional que reportó resultados con el ensamble de modelos de CMIP6 fue el llevado a cabo por Salinas *et al.* (2020). Posteriormente, Almazroui *et al.* (2021) llevaron a cabo un estudio importante utilizando el conjunto de datos del CMIP6 para examinar los cambios proyectados en la temperatura y precipitación sobre Estados Unidos, América Central y el Caribe. Los cambios se calcularon utilizando un conjunto de 31 modelos para tres períodos de tiempo futuros (2021-2040, 2041-2060 y 2080-2099) en comparación con el período de referencia (1995-2014), bajo tres Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5). Los autores estiman que la temperatura aumente en todo el dominio bajo las tres SSP, alcanzando hasta 6 °C bajo SSP5-8.5, y con incrementos más pronunciados en las latitudes septentrionales sobre las regiones que actualmente reciben nieve. Las proyecciones de precipitación anual para finales del presente siglo presentan más incertidumbre, y muestran un patrón similar a un dipolo meridional, con un aumento de la precipitación del 10% al 30% en gran parte de Estados Unidos y una disminución del 10% al 40% en América Central y el Caribe, especialmente en la región del monzón. Otro estudio reciente discute los cambios de precipitación futura en la región del NAM usando CMIP5 y CMIP6 (Hernandez y Chen, 2022). Los autores estiman que las proyecciones futuras del clima según la SSP5-8.5 manifiesten reducciones en la precipitación que persisten durante los inicios de la temporada del monzón (junio-agosto), pero son compensadas por aumentos en la precipitación durante la última parte de la temporada monzónica (septiembre-octubre), aunque no se muestran en las proyecciones de CMIP5.

En cuanto a las proyecciones regionales, Coppola *et al.* (2021) calcularon proyecciones de índices de peligro climáticos a nivel mundial

basados en ensambles de *CORDEX Coordinated Output for Regional Evaluations* (CORDEX-CORE), CMIP5 y CMIP6. Entre lo más relevante reportado en este estudio para la región CAM está el que se observó una relación lineal entre los cambios del número de ondas de calor y la frecuencia de sequía basada en el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI, por sus siglas en inglés) de seis meses, con un cambio mediano del número de ondas de calor en el futuro lejano de alrededor de 6 (excepto por un valor de 8 en CMIP6). Los autores estiman que el número de sequías aumente en 2 eventos por año en ambos conjuntos regionales de CORDEX, con CMIP5 cayendo a solo 1 y CMIP6 con un valor medio de 4 con la mayor dispersión.

Por otro lado, Estrada *et al.* (2022) presentaron el desarrollo de AIRCC-Clim, un programa de simulación de GCMs que genera proyecciones regionales de cambios probables en la temperatura y precipitación, tanto mensuales como anuales, así como medidas de riesgo. Estas proyecciones se basan en escenarios de emisión estándar, simula la salida de 37 GCMs acoplados océano-atmósfera, y ofrece una interfaz de usuario con requisitos técnicos y computacionales mínimos. El software ha sido diseñado para diversas aplicaciones, como evaluaciones de impacto, análisis de políticas climáticas y modelado de evaluación integrada.

Otro estudio reciente tuvo como objetivo determinar las tendencias de la temperatura media en la región sur-sureste de México durante el período histórico 1980-2014, así como durante los períodos futuros 2021-2040, 2041-2060 y 2081-2100, según lo recomendado por el IPCC-AR6 (Andrade-Velázquez y Montero-Martínez, 2023). Se aplicó un método de corrección de sesgo para llevar a cabo una reducción de escala a de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ y se realizó un análisis de las tendencias históricas para el período 1980-2014 con ERA5 y cuatro modelos CMIP6, extendiéndose hacia el futuro. Los modelos indicaron diferencias de temperatura inferiores a 0.5°C con respecto a ERA5. Además, se calcularon las tendencias futuras para la región sur-sureste utilizando tres de los escenarios CMIP6 (SSP2-4.5, SSP4-6.0 y SSP5-8.5).

Finalmente, un estudio muy reciente realizó reducción de escala a un conjunto de datos de 27 modelos del CMIP6 (SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5) utilizando el método estadístico de análogos contruados localmente (LOCA, por sus siglas en inglés), que cubre desde el sur de Canadá hasta la mitad de México con una resolución de 6 km (Pierce *et al.*, 2023). Los autores estiman que los incrementos estacionales sobre México sean mayores en agosto ($\sim 15\%$). Las mejoras respecto de los datos reducidos de escala del CMIP5 resultan en extremos de precipitación diaria más altos, lo cual tiene importantes implicaciones sociales y económicas.

Sumario

En resumen, las predicciones climáticas se centran en las variaciones a corto y mediano plazo, basadas en observaciones actuales y modelos, mientras que las proyecciones exploran escenarios a largo plazo de cambio climático bajo diferentes trayectorias de emisiones y condiciones socioeconómicas. Las predicciones son utilizadas para la toma de decisiones a corto plazo, mientras que las proyecciones informan la planificación a largo plazo y las estrategias de adaptación. Ambas están sujetas a incertidumbres debido a la complejidad del sistema climático y las limitaciones en datos y modelos.

En cuanto a la información de las proyecciones climáticas a nivel nacional, se ha observado un aumento significativo en la producción de datos relacionados con este tema, especialmente en la última década. Ahora se tiene un conocimiento mucho más sólido sobre cómo se espera que cambien las variables climáticas clave, como la precipitación y la temperatura superficial, en diferentes regiones de nuestro país en las décadas futuras. Estos resultados son de gran importancia, en el sentido de que permiten calcular índices de cambio climático que proporcionan una mejor comprensión de cómo evolucionarán los fenómenos climáticos extremos en el corto, mediano y largo plazo.

Además, es destacable el crecimiento en el uso y desarrollo de técnicas de reducción de escala, tanto dinámicas (mediante modelos regionales del clima) como estadísticas. Esto ha posibilitado

realizar estudios de impacto con mayor nivel de detalle, lo cual contribuirá a mejorar la implementación de estrategias de adaptación

frente a los cambios climáticos que ya están afectando y que continuarán en las próximas décadas.

Estudio	Contribución
Adem (1962)	Presentó la creación del Modelo Termodinámico del Clima (MTC), uno de los primeros modelos radiativos-convectivos a nivel mundial.
Ropelewski y Halpert (1986)	Mostraron la importancia de ENSO en los pronósticos mensuales y estacionales a largo de México y Estados Unidos.
Liverman y O'Brien (1991)	Presentaron el primer estudio sobre proyecciones de cambio climático para México.
Conde <i>et al.</i> (1994)	Presentaron el primer estudio de cambio climático para México a nivel de subregiones (norte, centro y sur).
Adem <i>et al.</i> (2000)	Mostraron que el MTC tiene cierta capacidad para realizar pronóstico climático de anomalías de temperatura y precipitación, así como la importancia de las SST en este tipo de pronóstico.
Englehart y Douglas (2001)	Mencionaron la importancia de las previsiones estacionales de tormentas tropicales para avanzar en la predicción climática estacional de México.
Giorgi y Mearns (2002)	Desarrollaron el método REA, el cuál fue utilizado posteriormente por varios autores para el análisis de cambio climático en México.
Giorgi (2006)	Desarrolló el Índice Regional de Cambio Climático y mostró que la región CAM es un “punto caliente” a nivel mundial.
Montero-Martínez y Pérez-López (2008)	Aplicaron el método REA para generar proyecciones climáticas de mayor resolución para México utilizando un ensamble de GCMs.
Fernández-Eguiarte <i>et al.</i> (2010)	Presentaron la versión 1 del Atlas Climático Digital de México.
Karkalmar <i>et al.</i> (2011)	Utilizaron por primera vez un RCM (el PRECIS) para proyectar cambios en el clima de México y América Central del presente siglo.

Conde <i>et al.</i> (2011)	Utilizaron por primera vez MAGICC/SCENGEN para la generación de proyecciones climáticas en México.
Cavazos <i>et al.</i> (2013)	Presentaron el primer trabajo sobre resultados del CMIP5 para proyecciones de cambio climático en México. Este sigue siendo el único estudio multinstitucional sobre este tema en nuestro país.
Cerezo-Mota <i>et al.</i> (2016)	Mostraron que la mayoría de cuatro RCMs de CORDEX-NA superaron el desempeño de ERA-Interim en capturar el ciclo anual de la región NAM, excepto en regiones montañosas.
Fuentes-Franco <i>et al.</i> (2018)	Presentaron un esquema híbrido diseñado para predecir patrones estacionales de precipitación en México. El esquema utiliza pronósticos de SST del modelo ECMWF.
Colorado-Ruíz <i>et al.</i> (2018)	Aplicaron dos variantes del método REA a un ensamble de modelos del CMIP5 y mostraron que las variantes del REA tuvieron un mejor desempeño que el ensamble multi-modelo no ponderado.
Cavazos <i>et al.</i> (2019)	Mostraron que tres RCMs del experimento CORDEX-CAM tuvieron sesgos negativos (positivos) de temperatura (precipitación) en las zonas montañosas, donde las observaciones presentaron más problemas debido a la escasa cobertura de datos.
Andrade-Velázquez <i>et al.</i> (2021)	Realizaron una comparativa de tendencias entre modelos del CMIP5 y observaciones para Mesoamérica y el Caribe mostrando que las tendencias históricas y futuras del escenario RCP 6.0 fueron más parecidas a las observadas para el sureste de México y península de Yucatán.
Almazroui <i>et al.</i> (2021)	Realizaron un estudio con datos del CMIP6 para examinar los cambios proyectados en la temperatura y precipitación sobre Estados Unidos, América Central y el Caribe. Se estima que la temperatura aumente en todo el dominio bajo las tres SSP, alcanzando hasta 6 °C bajo SSP5-8.5.
Coppola <i>et al.</i> (2021)	Calcularon proyecciones de índices de peligro climáticos a nivel mundial basados en ensambles de CORDEX-CORE, CMIP5 y CMIP6.
Estrada <i>et al.</i> (2022)	Presentaron el desarrollo de AIRCC-Clim, un programa de simulación de GCMs que genera proyecciones regionales de cambios probables en la temperatura y precipitación, así como medidas de riesgo.
Andrade-Velázquez y Montero-Martínez (2023)	Aplicaron un método de corrección de sesgo para reducir la escala de cuatro modelos del CMIP6 en la región sur-sureste de México encontrando diferencias de temperatura inferiores a 0.5 °C con respecto a ERA5.

Tabla 3. Breve resumen de algunas contribuciones relevantes en las líneas de predicción climática y proyección de cambio climático en México.

La Tabla 3 presenta un breve resumen de las contribuciones de algunas de las referencias citadas anteriormente que consideramos de mayor relevancia en el desarrollo de los estudios de proyecciones de cambio climático en México.

El presente estudio ha intentado proporcionar una visión general de la literatura más relevante sobre este tema. Reconocemos que es posible que hayamos omitido trabajos importantes sin intención, los cuales deberían haber sido referenciados. Sin embargo, consideramos que este trabajo sirve como punto de partida.

Además, el estudio ha presentado las diferentes líneas de investigación en torno a las proyecciones de cambio climático y su contribución a las acciones de adaptación. Se han discutido las ventajas y desventajas de los diversos estudios históricos relacionados con estas proyecciones. No obstante, también se ha señalado que aún falta el desarrollo de un Modelo Climático Global específico para México, lo que refleja una brecha en la investigación climática a nivel nacional que requiere fortalecimiento.

Referencias

- Adem, J. (1962). On the theory of the general circulation of the atmosphere. *Tellus*, 14A, 102-115.
<https://doi.org/10.3402/tellusa.v14i1.9532>
- Adem, J. (1965). Experiments aiming at monthly and seasonal numerical weather prediction. *Monthly Weather Review*, 93, 495-503.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1965\)093%3C0495:EAAMAS%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1965)093%3C0495:EAAMAS%3E2.3.CO;2)
- Adem, J., Mendoza, V.M., Ruiz, A., Villanueva, E.E., Garduño, R. (2000). Recent numerical experiments on three-months extended and seasonal weather prediction with a thermodynamic model. *Atmósfera*, 13, 53-83.
<https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8460>
- Almazroui, M., Islam, M.N., Saeed, F., Saeed, S., Ismail, M., Ehsan, M.A., Diallo, I., O'Brien, E., Ashfaq, M., Martínez-Castro, D., Cavazos, T., Cerezo-Mota, R., Tippet, M.K., Gutowski Jr, W.J., Alfaro, E.J., Hidalgo, H.G., Vichot-Llano, A., Campbell, J.D., Kamil, S., Rashid, I.U., Sylla, M.B., Stephenson, T., Taylor, M., Barlow, M. (2021). Projected changes in temperature and precipitation over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 GCMs. *Earth Systems and Environment*, 5, 1-24.
<https://doi.org/10.1007/s41748-021-00199-5>
- Andrade-Velázquez, M., Medrano-Pérez, O.R., Montero-Martínez, M.J., Alcudia-Aguilar, A. (2021). Regional Climate Change in Southeast Mexico-Yucatan Peninsula, Central America and the Caribbean. *Applied Sciences*, 11, 8284.
<https://doi.org/10.3390/app11188284>
- Andrade-Velázquez, M., Montero-Martínez, M.J. (2023). Historical and Projected Trends of the Mean Surface Temperature in South-Southeast Mexico Using ERA5 and CMIP6. *Climate*, 11, 111.
<https://doi.org/10.3390/cli11050111>
- Cavazos, T., Arriaga-Ramírez, S. (2012). Downscaled climate change scenarios for Baja California and the North American monsoon during the twenty-first century. *Journal of Climate*, 25, 5904-5915.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00425.1>
- Cavazos, T., Salinas-Prieto, J.A., Martínez, B., Colorado, G., de Grau, P., Prieto-González, R., Conde-Álvarez, C., Quintanar-Isaías, A., Santana-Sepúlveda, J.S., Romero-Centeno, R., Maya-Magaña, M.E., Rosario-de La Cruz, J.G., Ayala-Enríquez, M.R., Carrillo-Tlaczazanatz, H., Santiesteban, O., Bravo, M.E. (2013). Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como Parte de los Productos de la Quinta Comunicación Nacional; Informe Final del Proyecto al INECC: Ciudad de México, México, 150p.
[CavazosEtal_2013_ReporteFinal_escenariosC_C_Mexico.pdf](https://www.inecc.gob.mx/documentos/2013/Informe-Final-del-Proyecto-al-INECC-Ciudad-de-Mexico)
- Cavazos, T., Luna-Niño, R., Cerezo-Mota, R., Fuentes-Franco, R., Méndez, M., Pineda-Martínez, L.F., Valenzuela, E. (2019). Climatic trends and regional climate models intercomparison over the CORDEX-CAM (Central America, Caribbean, and Mexico) domain. *International Journal of Climatology*, 40, 1396-1420.
<https://doi.org/10.1002/joc.6276>
- Cerezo-Mota, R., Cavazos, T., Arritt, R., Torres-Alavez, A., Sieck, K., Nikulin, G., Moufouma-

- Okia, W., Salinas-Prieto, J.A. (2016). CORDEX-NA: factors inducing dry/wet years on the North American Monsoon region. *International Journal of Climatology*, 36, 824-836.
<https://doi.org/10.1002/joc.4385>
- Christensen, J.H., Carter, T.R., Rummukainen, M., Amanatidis, G. (2007). Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. *Climatic Change*, 81, 1-6.
<https://doi.org/10.1007/s10584-006-9211-6>
- CMIP (2023). Climate Model Intercomparison Project.
<https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip>
- Colorado-Ruiz, G., Cavazos, T., Salinas-Prieto, J.A., De Grau, P., Ayala, R. (2018). Climate change projections from Coupled Model Intercomparison Project phase 5 multi-model weighted ensembles for Mexico, the North American monsoon, and the mid-summer drought region. *International Journal of Climatology*, 38, 5699-5716.
- Conde, C., Sánchez, O., Gay, C. (1994). Escenarios básicos y regionales. Estudio de País: México. En México ante el cambio climático. Primer Taller Estudio de País: México (pp. 39-44). Cuernavaca, Morelos, México.
<https://www.pincc.unam.mx/wp-content/uploads/2021/08/mexico-cambio-climatico-parte-1.pdf>
- Conde, C., Estrada, F., Martínez, B., Sánchez, O., Gay, C. (2011). Regional climate change scenarios for Mexico. *Atmósfera*, 24, 125-140.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-62362011000100009&script=sci_arttext&tlng=en
- Coppola, E., Raffaele, F., Giorgi, F., Giuliani, G., Xuejie, G., Ciarlo, J.M., Sines, T.R., Torres-Alavez, J.B., Das, S., di Sante, F., Pichelli, E., Glazer, R., Müller, S.K., Omar, S.A., Ashfaq, M., Bukovsky, M., Im, E.-S., Jacob, D., Teichmann, C., Remedio, A., Remke, T., Kriegsmann, A., Bülow, K., Torsten W., Buntmeyer, L., Siek, K., Rechid, D. (2021). Climate hazard indices projections based on CORDEX-CORE, CMIP5 and CMIP6 ensemble. *Climate Dynamics*, 57, 1293-1383.
<https://doi.org/10.1007/s00382-021-05640-z>
- Englehart, P.J., Douglas, A.V. (2001). The role of eastern North Pacific tropical storms in the rainfall climatology of western Mexico. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 21, 1357-1370.
<https://doi.org/10.1002/joc.637>
- Estrada, F., Calderón-Bustamante, O., Botzen, W., Velasco, J.A., Tol, R.S. (2022). AIRCC-Clim: A user-friendly tool for generating regional probabilistic climate change scenarios and risk measures. *Environmental Modelling & Software*, 157, 105528.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105528>
- Fernández-Eguiarte A., Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R. (2010). Atlas Climático Digital de México. Versión 1.0. Evaluado positivamente por pares académicos en 2009 y 2010, dentro del marco del megaproyecto SIBA-IMPULSA-UNAM. Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS), Centro de Ciencias de la Atmósfera. Coordinación de la Investigación Científica, UNAM. INDAUTOR 04-2011-120915512800-203.
<https://atlasclimatico.unam.mx/acdm/visualizador>
- Fernández-Eguiarte, A., Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., Conde-Álvarez, A.C., Trejo-Vázquez, R. I. (2015). Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS), Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. INDAUTOR 04-2011-120915512800-203.
<https://atlasclimatico.unam.mx/cmip5/visualizador>
- Fuentes-Franco, R., Coppola, E., Giorgi, F., Pavia, E.G., Diro, G.T., Graef, F. (2015). Inter-annual variability of precipitation in southern Mexico and Central America and its relationship to sea surface temperature from a set of future

- projections from CMIP5 GCMs and RegCM4 CORDEX simulations. *Climate Dynamics*, 45, 425-440.
<https://doi.org/10.1007/s00382-014-2258-6>
- Fuentes-Franco, R., Giorgi, F., Pavia, E.G., Graef, F., Coppola, E. (2018). Seasonal precipitation forecast over Mexico based on a hybrid statistical–dynamical approach. *International Journal of Climatology*, 38, 4051-4065.
<https://doi.org/10.1002/joc.5550>
- García-Cueto, O.R., Cavazos, M.T., de Grau, P., Santillán-Soto, N. (2014). Analysis and modeling of extreme temperatures in several cities in northwestern Mexico under climate change conditions. *Theoretical and Applied Climatology*, 116, 211-225.
<https://doi.org/10.1007/s00704-013-0933-x>
- Gay, C. Conde, C., Pérez, J.L. (2001). Escenarios climáticos regionales para estudios de cambio y variabilidad climáticas en México. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM.
[0008_PU-SA-II-2001-C_GAY.pdf \(aemet.es\)](https://www.aemet.es/0008_PU-SA-II-2001-C_GAY.pdf)
- Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33, L08707.
<https://doi.org/10.1029/2006GL025734>
- Giorgi, F., Francisco, R., (2000). Evaluating uncertainty in the prediction of regional climate change. *Geophysical Research Letters*, 27, 1295-1298.
<https://doi.org/10.1029/1999GL011016>
- Giorgi, F., Mearns, L.O. (2002). Calculation of Average, Uncertainty Range, and Reliability of Regional Climate Changes from AOGCM Simulations via the “Reliability Ensemble Averaging” (REA) Method. *Journal of Climate*, 15, 1141-1158.
[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015%3C1141:COAURA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015%3C1141:COAURA%3E2.0.CO;2)
- Hernandez, M., Chen, L. (2022). Future land precipitation changes over the North American monsoon region using CMIP5 and CMIP6 Simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2021JD035911.
<https://doi.org/10.1029/2021JD035911>
- Karmalkar, A.V., Bradley, R.S., Diaz, H.F. (2011). Climate change in Central America and Mexico: regional climate model validation and climate change projections. *Climate Dynamics*, 37, 605–629.
<https://doi.org/10.1007/s00382-011-1099-9>
- Liverman, D.M., O’Brien, K.L. (1991). Global warming and climate change in Mexico. *Global Environmental Change*, 1, 351-364.
[https://doi.org/10.1016/0959-3780\(91\)90002-B](https://doi.org/10.1016/0959-3780(91)90002-B)
- Magaña, V.O., Conde, C. (2000). Climate and freshwater resources in northern Mexico: Sonora, a case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 61, 167-185.
<https://doi.org/10.1023/A:1006399025537>
- Magaña, V., Conde, C., Sánchez, O., Gay, C. (1997). Assessment of current and future regional climate scenarios for Mexico. *Climate Research*, 9, 107-114.
<https://doi.org/10.3354/cr009107>
- Magaña, V., Zermeño, D., Neri, C. (2012). Climate change scenarios and potential impacts on water availability in northern Mexico. *Climate Research*, 51, 171-184.
<https://doi.org/10.3354/cr01080>
- McGuffie, K., Henderson-Sellers, A. (2014). *The Climate Modelling Primer*. 4th Edition. John Wiley & Sons, 464p.
- Montero-Martínez, M.J., Pérez-López, J.L. (2008). Regionalización de proyecciones de precipitación y temperatura en superficie aplicando el método REA para México, en *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México, Volumen II*. Eds. P.F. Martínez Austria y A. Aguilar Chávez, 118 pp., IMTA, México, 11-21.
<https://nautilo.iib.unam.mx/Record/000613772>
- Montero-Martínez, M.J., W. Ojeda-Bustamante, W., J.S. Santana-Sepúlveda, J.S., R. Prieto-González, R., Lobato- Sánchez, R., (2013). Sistema de consulta de proyecciones regionalizadas de cambio climático para México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4, 113-128.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353531982007>
- Montero Martínez, M.J., Andrade-Velázquez, M. (2015). Cambio climático, proyecciones y predictibilidad. *Reporte Mexicano de Cambio Climático*. Grupo I. Bases Científicas. Modelos y Modelación. Coords. C. Gay, C. Rueda y B.

- Martínez. ISBN 978-607-02-7522-7. UNAM, (pp. 247-259).
<https://www.pincc.unam.mx/publicaciones/rep-orte-mexicano/>
- Nicholas, R.E., Battisti, D.S. (2008). Drought recurrence and seasonal rainfall prediction in the Rio Yaqui basin, Mexico. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47, 991-1005.
<https://doi.org/10.1175/2007JAMC1575.1>
- Pierce, D.W., Cayan, D.R., Feldman, D.R., Risser, M.D. (2023). Future Increases in North American Extreme Precipitation in CMIP6 downscaled with LOCA. *Journal of Hydrometeorology*, 24, 951-975
<https://doi.org/10.1175/JHM-D-22-0194.1>
- Prieto-González, R., Cortés-Hernández, V.E., Montero-Martínez, M.J. (2011). Variability of the standardized precipitation index over Mexico under the A2 climate change scenario. *Atmósfera*, 24, 243-250.
- Rauscher, S.A., Giorgi, F., Diffenbaugh, N.S., Seth, A. (2008). Extension and intensification of the Meso-American mid-summer drought in the twenty-first century. *Climate Dynamics*, 31, 551-571.
<https://doi.org/10.1007/s00382-007-0359-1>
- Ropelewski, C.F., Halpert, M.S. (1986). North American precipitation and temperature patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation (ENSO). *Monthly Weather Review*, 114, 2352-2362.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1986\)114%3C2352:NAPATP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1986)114%3C2352:NAPATP%3E2.0.CO;2)
- Ruiz-Barradas, A., Tejeda-Martínez, A. (2015). Aportaciones de Julián Adem a la ciencia mundial. *Ciencia y Luz*. Universidad Veracruzana.
<https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/48497/081-CYL-131015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Salinas, J.A., Maya, M.E., Hernández, C., Montero-Martínez, M.J. (2020). Informe Final del Proyecto de Investigación Interno “Evaluación de Modelos Atmosféricos Globales del Experimento CMIP6 para México. Cuantificación de Impactos de Eventos Extremos y Cambio Climático”; Instituto Mexicano de Tecnología del Agua: Jiutepec, México.