

4. Una introducción de la modelación climática y los escenarios de cambio climático



MERCEDES ANDRADE VELÁZQUEZ*

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.319.04>

Resumen

En la actualidad, el tema de cambio climático es abordado en varias áreas del conocimiento y sectores de la sociedad para poder afrontar sus efectos, reducir la vulnerabilidad de las poblaciones y generar medidas de adaptación para el bienestar social. El presente capítulo abordará dos grandes temas relevantes para la comprensión del clima y el cambio climático. Estos son (1) Modelos globales del clima, donde se aborda su desarrollo a nivel mundial y sus usos en México y (2) Escenarios de cambio climático, donde se describen sus fases de desarrollo a nivel mundial y los generados en México, particularmente, para el sur-sureste del país.

Palabras clave: *software, clima, proyecciones, modelos globales, variables.*

Modelos globales del clima

El desarrollo tecnológico y científico ha permitido desarrollar herramientas para la comprensión del Clima, como son los modelos globales del Clima. Los resultados de estos modelos son empleados en la generación de proyec-

* Doctora en Ciencias. Investigadora en el Centro de Cambio Global y la Sustentabilidad, Tabasco, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9810-6003>

ciones de variables de temperatura, precipitación, presión, viento, nivel del mar, etc. a diferentes periodos de tiempo, desde la parte histórica, como presente y futura. Estos modelos generan los escenarios de cambio climático, cuya información se utiliza como parte de los programas y acciones, principalmente gubernamentales y académicas (IPCC, 2021; INECC, 2024).

El desarrollo de modelos del clima

El desarrollo de modelos climáticos va de la mano con el desarrollo tecnológico y del conocimiento climático. A inicios de los cincuenta se empiezan a generar las computadoras, que apenas podían procesar cerca de centenas o miles de procesos por segundo, esto ya es superado por los celulares actualmente. Los primeros pasos en el tema de modelación es el planteamiento de las ecuaciones de estado, conservación de energía, masa y *momentum* de manera discreta, con soluciones numéricas. El primer modelo del clima se concentraba en describir los procesos físicos en la atmósfera, a partir de la respuesta a la radiación proveniente del sol y que es la fuente de energía para que todos los procesos en el sistema climático se lleven a cabo. El sistema climático se conforma de cinco grandes componentes: hidrosfera, atmósfera, biosfera, litosfera y criosfera, que se encuentran en constante interacción mediante procesos como el ciclo hidrológico, el ciclo de carbono o el resto de los ciclos biogeoquímicos (figura 4.1). Por lo que simular el clima significa modelar a sus componentes e interacciones. Eso significa una gran complejidad en el cálculo de esos procesos y una gran demanda de supercómputo para lograrlo. Hemos de decir que México no cuenta con un modelo del clima global, Brazil es el único país en Latinoamérica que cuenta con uno y que forma parte del CMIP6 (Eyring, 2016; ver más adelante: sección de escenarios de cambio climático). Podemos decir que prácticamente los países del hemisferio norte del globo terráqueo, y que pertenecen a los países denominados como en desarrollo, son los que cuentan con un modelo del clima global. La tabla 4.1 lista las instituciones que cuentan con un modelo climático global y que forma parte del CMIP6.

Figura 4.1. Componentes del sistema climático



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.1. Instituciones internacionales de modelación del clima

No.	INSTITUCIÓN	PAÍS	No.	INSTITUCIÓN	PAÍS	No.	INSTITUCIÓN	PAÍS
1	AWI	ALEMANIA	12	DOE	E. U.	23	MRI	JAPÓN
2	BCC	CHINA	13	EC-EARTH-CONS	EUROPA	24	NASA-GISS	E. U.
3	BNU	CHINA	14	FGOALS	CHINA	25	NCAR	E. U.
4	CAMS	CHINA	15	FIO-RONM	CHINA	26	NCC	NORUEGA
5	CasESM	CHINA	16	INM	RUSIA	27	NERC	REINO UNIDO
6	CCCma	CANADA	17	INPE	BRASIL	28	NIMS-KMA	REPÚBLICA DE COREA
7	CCCR-IITM	INDIA	18	IPSL	FRANCIA	29	NOAA-GFDL	E. U.
8	CMCC	ITALIA	19	MESSY-CONS	ALEMANIA	30	NUIST	CHINA
9	CNRM	FRANCIA	20	MIROC	JAPÓN	31	TaiESM	TAIWAN, CHINA
10	CSIR-CSIRO	SUDAFRICA	21	MOHC	REINO UNIDO	32	THU	CHINA
11	CSIRO-BOM	AUSTRALIA	22	MPI-M	ALEMANIA	33	SEOULNAC. UNI.	REPÚBLICA DE COREA

Fuente: elaboración propia.

Un modelo climático global debe considerar las siguientes procesos: (a) radiativos, los cuales se concentran en la radiación solar entrante y absorbida y que se transforma en radiación infrarroja; los dinámicos, aquellos que se basan en las ecuaciones de dinámica de fluidos (tanto de océano como atmósfera) y consideran los movimientos verticales, de turbulencia,

convención o capa profunda; los de procesos en superficie, el albedo, la vegetación, el hielo, etc.; los químicos, la composición química del océano, atmósfera, tierra y las interacciones entre ellas. Además de la resolución espaciotemporal de los procesos que pueden ser calculados por los modelos (McGuffie y Henderson-Sellers, 2014). Las ecuaciones que resuelve principalmente un modelo del clima son:

1. Conservación de momentum:

$$\frac{Dv}{Dt} = -2\Omega \times v - \rho^{-1} \nabla p + g + F \dots (1)$$

v = velocidad relativa a la rotación de la Tierra, t = tiempo, ρ = densidad atmosférica, g = aceleración gravitacional aparente, p = presión atmosférica, F = fuerza por unidad de masa, Ω = velocidad angular de la Tierra.

2. Conservación de la masa:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot v + C - E \dots (2)$$

E = tasa de destrucción de constituyentes atmosféricos, C = tasa de creación de constituyentes atmosféricos.

3. Conservación de energía:

$$\frac{DI}{Dt} = -p \frac{D\rho^{-1}}{Dt} + Q \dots (3)$$

I = energía interna por unidad de masa [= $c_p T$], Q = tasa de calor por unidad de masa, T = temperatura, c_p = calor específico del aire en presión constante.

4. Ley de gas ideal:

$$p = \rho RT \dots (4)$$

R = constante de los gases.

Usos en México

Estos modelos se desarrollan, principalmente, en países del hemisferio norte, donde se encuentran los grandes centros de investigación del clima a nivel mundial. Sin embargo, en México, no se ha podido desarrollar un modelo global del clima que permita estudiar y mejorar la comprensión de fenómenos climáticos regionales para fortalecer la ciencia climática, ya sea por falta de infraestructura, recursos humanos o espacios de desarrollo científico y técnico. Es por ello que solemos ser usuarios de la información internacional y adecuarla a escala regional o local, mediante técnicas estadísticas o dinámicas. En el caso de las últimas, se utilizan las salidas de los modelos globales como condiciones a la frontera de modelos regionales para poder calcular los estados de la atmósfera en zonas con dominios del tamaño del país, o del tamaño de cuencas hidrográficas, de estados o contenidos en ellos. Alcanzando resoluciones de hasta 8 km X 8 km, como es el caso del RegCM (IMTA, 2024). Por otro lado, con métodos estadísticos, se puede alcanzar resoluciones de hasta 25 km X 25 km. Sobre estos métodos se hablará más adelante en la sección de escenarios de cambio climático en el sureste de México. La reducción de escala estadística (SD, por sus siglas en inglés) se extiende a todos los lugares. Los requisitos computacionales podrían ser los de una computadora personal (UNFCCC, 2021), a diferencia de la reducción de escala dinámica que requiere de supercomputadoras o de muy alto rendimiento. Las ventajas de la SD son relativamente fáciles de producir y las variables relevantes para el impacto, no simuladas por los modelos climáticos, se pueden reducir utilizando la SD. Pero sus desventajas son que existen supuestos estacionarios entre la dinámica de gran y pequeña escala cuando se usa SD, la dinámica de pequeña escala y la retroalimentación climática no se reflejan cuando se usa SD (NASA, 2021).

Es importante mencionar que los principales grupos climáticos en México se ubican en instituciones públicas, como son el Centro de Investigación y C Educativos (CICESE), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Y que los primeros en generar escenarios para México fueron los investigadores del Centro de Ciencias de la Atmósfera, ahora Instituto de Ciencias de la

Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM. Sin embargo, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático en 2012 convocó a los principales expertos de dichas instituciones, sumando a los del Servicio Meteorológico Nacional, para establecer una metodología estándar para todo el país (Cavazos et al., 2013) y generar los nuevos escenarios del CMIP5 (Taylor et al., 2012; más adelante se hablará de esto). La metodología usada se tomó de Giorgio y Mearns (2002) y se conoce como REA, por sus siglas en inglés, corresponde a Confiabilidad de Ensamble Ponderado (Andrade-Velázquez y Montero-Martínez, 2019). No obstante, se migró a otras técnicas de reducción de escala (*downscaling*) y existen diferentes trabajos en México al respecto.

Escenarios de cambio climático

Fases

El Programa Mundial de Investigación en Modelos Acoplados, WCRP por sus siglas en inglés (WCRP, 2024). Está bajo la dirección de la Organización de las Naciones de Unidas, el Panel Intergubernamental ante el Cambio Climático y la Organización Meteorológica Mundial (McGuffie y Henderson-Sellers, 2014). WCRP es el encargado de llevar a cabo la generación de Escenarios de Cambio Climático, bajo el Proyecto de Intercomparación de Modelos, que en su inicio solo incluían a los Modelos Atmosféricos (AMIP por sus siglas en inglés; Gates et al., 1988), y ha evolucionado con la incorporación de Modelos Acoplados (CMIP por sus siglas en inglés) (Zhang y Moore, 2015). Este proyecto ha generado los escenarios de emisiones en su fase 3 (CMIP3, por sus siglas en inglés), clasificados en dos familias A y B, de acuerdo con las características de desarrollo bajo condiciones con uso de combustible fósil, o amigable con el ambiente. Estos se clasifican en A1, A2, A1F1, B1 y B2, descritos en la tabla 4.2 (IPCC, 2000). Con el avance de la tecnología y del conocimiento de la modelación climática, se mejoran los modelos, tomando en cuenta, un nivel de complejidad mayor, lo que permite una nueva generación de modelos globales del clima, los cuales son usados en el CMIP5 (por sus siglas en inglés). El enfoque con que se desarro-

lla el CMIP5, agrupa las múltiples trayectorias de los escenarios de emisiones, de acuerdo con el forzante radiactivo y las concentraciones de CO₂-eq para finales del siglo XXI (2100). Estas agrupaciones se clasifican en trayectorias representativas de concentración RCP, por sus siglas en inglés, véase tabla 3 (Moss et al., 2008).

Sin embargo, el enfoque del CMIP5 permite evolucionar en su diseño en simultaneidad con la mejora de los modelos globales del clima, para dar paso al CMIP6 (Eyring et al., 2016). Este diseño, crea un DECK (por sus siglas en inglés), Diagnóstico, Evaluación y Caracterización del Klima, a partir de un grupo núcleo de experimentos que permitirán responder las preguntas (1) ¿Cómo el sistema Tierra responde a los forzamientos? (2) ¿Cuáles son los orígenes y consecuencias de los sesos sistemáticos de los modelos? (3) ¿Cómo podemos evaluar los cambios futuros del clima, dadas la variabilidad climática interna, la predictibilidad y las incertidumbres en los escenarios? Y que se extrapolan a experimentos más específicos para responder preguntas asociadas al Paleoclima, a respuestas del Sistema Climático en condiciones de emisiones de CO₂-eq diferentes, a cuestiones específicas de la química atmosférica (tabla 4.1 y figura 4.2).

Tabla 4.2. Escenarios de emisiones conocidos como SRES

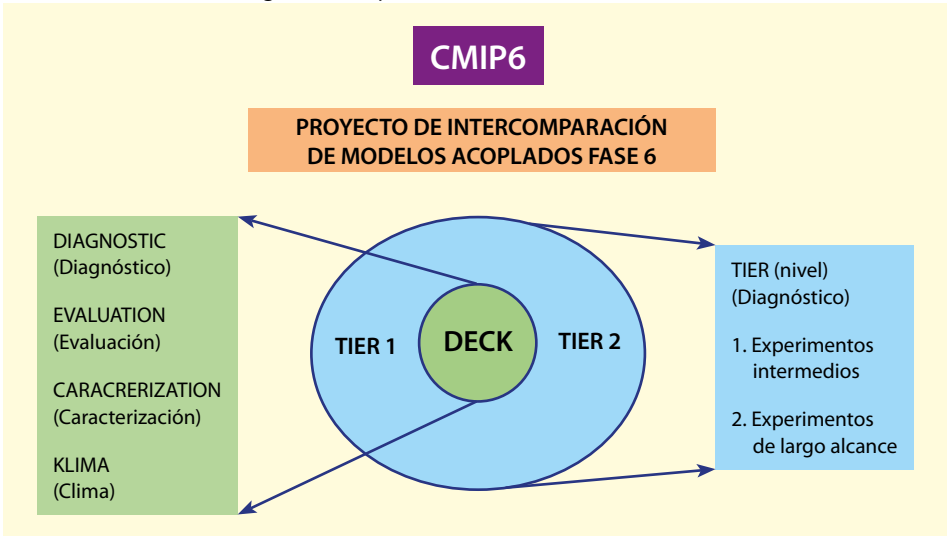
FAMILIA		A1			A2	B1	B2
Grupo de escenarios	1990	A1FI	A1B	A1T	A2	B1	B2
Población (en miles de millones)		5.3					
2020		7.6 (7.4-7.6)	7.4 (7.4-7.6)	7.6 (7.4-7.6)	8.2	7.6 (7.4-7.6)	7.6
2050		8.7	8.7	8.7	11.3	8.7 (8.6-8.7)	9.3
2100		7.1 (7.0-7.1)	7.1 (7.0-7.1)	7.0	15.1	7.0 (6.9-7.1)	10.4
Energía primaria (1018J/año)		351					
2020		669 (653-752)	711 (573-875)	649 (515-649)	595 (485-677)	606 (438-774)	566 (506-633)
2050		1431 (1377-1601)	1347 (968-1611)	1213 (913-1213)	971 (679-1059)	813 (642-1090)	869 (679-966)
2100		2073 (1988-2737)	2226 (1002-2683)	2021 (1255-2021)	171 (1304-2040)	514 (514-1157)	1357 (846-1625)

(Continuación).

Dióxido de carbono, combustibles de origen fósil (GtC/año)	6.0					
2020	11.2 (10.7-14.3)	12.1 (8.7-14.7)	10.0 (8.4-10.0)	11.0 (7.9-11.3)	10.0 (7.8-13.2)	9.0 (8.5-11.5)
2050	23.1 (20.6-26.8)	16.0 (12.7-25.7)	12.3 (10.8-12.3)	16.5 (10.5-18.2)	11.7 (8.5-17.5)	11.2 (11.2-16.4)
2100	30.3 (27.7-36.8)	13.1 (12.9-18.4)	4.3 (4.3-9.1)	28.9 (17.6-33.4)	5.2 (3.3-13.2)	13.8 (9.3-23.1)

Fuente: elaboración propia.

Figura 4.2. Representación del diseño del CMIP6



Fuente: elaboración propia.

Por lo que el CMIP6 cuenta con modelos más complejos que involucran varios componentes e interacciones en el Sistema Climático, además de contar con resoluciones temporales y espaciales más altas. Se resalta que los escenarios en esta fase son una combinación posible entre los escenarios socioeconómicos, conocidos como SSP por sus siglas en inglés (van Vuuren, et al. 2013) y los RCP, obteniendo así categorías como SSP2-4.5, SSP4-6.0 y SSP5-8.5, la tabla 4.3 muestra las características.

Tabla 4.3. *Escenarios de vías de concentración representativas (RCP, siglas en inglés) y escenarios de vías socioeconómicas compartidas (SSP, siglas en inglés) y su combinación*

Escenario de cambio climático	Forzante radiativo	Concentraciones (ppm)	Escenario socioeconómico	Características Generales	Escenario combinado
RCP2.6	Pico de ~3 W m ⁻² antes de 2100 y declina después	Pico de ~490 CO ₂ -eq. antes de 2100 y declina después	SSP1	Desarrollo sustentable, bajos retos para mitigación y adaptación.	SSP1-2.6
RCP4.5	~4.5 W m ⁻² estabilización después de 2100	~650 CO ₂ -eq. Estabilización después de 2100	SSP2	Caso intermedio entre SSP1 y SSP3, retos moderados para mitigación y adaptación.	SSP2-4.5
RCP6.0	~6 W m ⁻² estabilización después de 2100	~850 CO ₂ -eq. Estabilización después de 2100	SSP3	Rápido crecimiento poblacional y moderado en económico. Retos altos para mitigación y adaptación.	SSP4-6.0
RCP8.5	>8.5 W m ⁻² en 2100	>1,370 CO ₂ -eq. en 2100	SSP4	Un mundo muy mezclado, con desarrollo tecnológico rápido, bajo consumo de energía sucia. Retos alto para adaptación y bajo para mitigación.	SSP5-8.5
			SSP5	Ausencia de políticas climáticas, alta demanda energética basada en carbono. Retos alto para mitigación y bajo para adaptación.	

Fuente: elaboración propia.

Escenarios para el sureste

Para conocer de manera global los esfuerzos en México para la generación de escenarios de cambio climático, y por ende sus proyecciones, les recomendamos consultar Montero-Martínez y Andrade-Velázquez (2024).

Algunos ejemplos para para todo el país, particularmente para el sureste de México, pueden ser encontrados en el Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el Cambio Climático, del IMTA,² el Atlas de Vulnerabilidad ante Cambio Climático del INECC,³ y el sitio oficial de Cambio Climático del gobierno de México.⁴ <https://cambioclimatico.gob.mx/>

Sin embargo, daré una descripción de las técnicas de reducción de escala estadísticas. Estas técnicas pueden clasificarse de manera general en dos, (1) Perfect Pronosis (PP) y Estadística de Salidas de Modelos (MOS por sus siglas en inglés; Bedia et al. 2020). Y en el sureste de México se han generado escenarios de cambio climático bajo el CMIP5 y el CMIP6, con el REA (Andrade-Velázquez et al., 2021) y con corrección de sesgo (Andrade-Velázquez y Montero-Martínez, 2023a, 2023b), respectivamente, para las variables de temperatura y precipitación.

Estos resultados en el sureste de México mantienen, en el caso de la temperatura, la tasa de calentamiento histórico en el periodo 1960-2016, la cual es de ~ 0.01 °C/year, y para las proyecciones en el futuro cercano (2015-2039 del CMIP5 y 2021-2040 del CMIP6) para el escenario RCP6 y SSP4-6.0 respectivamente son muy similares. Esto nos indica que existe consistencia en la generación de escenarios del CMIP5 al CMIP6. Además de señalar un panorama con condiciones socioeconómicas ponderantes en la zona que tienen una inercia a extrapolarse para el futuro cercano. Estas condiciones engloban acciones sustentables, dado que en la región existe gran parte de ecosistemas y cobertura de suelo no degradado, como es el caso de la cuenca del río Usumacinta, que engloba al sureste de Tabasco y parte de Chiapas. Esto determina que haya grandes sumideros de CO₂ y amortiguadores del calentamiento.

En el caso de los otros periodos de tiempo futuro, puede emplearse la misma técnica, como lo aplican Andrade-Velázquez y Montero-Martínez (2023a, 2023b), esto suponiendo que dichas condiciones se mantengan y se vinculen al SSP4. No obstante, los escenarios en el futuro cercano (2021-2040) son muy parecidas sus evoluciones, lo que resulta difícil discriminar entre los escenarios de cambio climático. Es por ello que la propuesta de

² https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/atlas-2016/files/assets/basic-html/index.html#1

³ <https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/>

⁴ <https://cambioclimatico.gob.mx/>

Andrade-Velázquez y Montero-Martínez proporciona una ventana de decisión entre los escenarios, de acuerdo a la tendencia que muestran los registros históricos. Para los futuros mediano y largo alcance, la tendencia de evolución de los escenarios diverge a mediados de siglo y a finales del mismo, indicando que hay otros factores que podrían cambiar la tendencia, es decir, intensificar el calentamiento o controlarlo, esto último si se opta por buenas estrategias para la mitigación de gases de efecto invernadero.

Agradecimientos

Al Programa de Investigadores por México de SECIHTI. A las redes y grupos de investigación RedesClim, LANRESC, LANCAC y a UGM. A los centros de investigación CCGS y CICG.

Referencias

- Andrade-Velázquez, M., y Montero-Martínez, M. J. (2019). Fiabilidad de los modelos del CMIP5 para la cuenca del río Usumacinta bajo el método REA. *Digit. Cience*, 12, 14–21. Available online: <http://ciencia.uaq.mx/index.php/ojs/article/view/26>
- Andrade-Velázquez, M., Medrano-Pérez, O.R., Montero-Martínez, M. J., y Alcudia-Aguilar, A. (2021). Regional Climate Change in Southeast Mexico-Yucatan Peninsula, Central America and the Caribbean. *Appl. Sci.*, 11, 8284. <https://doi.org/10.3390/app11188284>
- Andrade-Velázquez, M., y Montero-Martínez, M. J. (2023a). 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>
- (2023b). Statistical Downscaling of Precipitation in the South and Southeast of Mexico. *Climate*, 11, 186. <https://doi.org/10.3390/cli11090186>
- Bedia, J., Baño-Medina, J., Legasa, M. N., Iturbide, M., Manzananas, R., Herrera, S., Casanueva, A., San-Martín, D., Cofiño, A. S., y Gutiérrez, J. M. (2020). Statistical downscaling with the downscaleR package (v3.1.0): Contribution to the VALUE intercomparison experiment. *Geosci. Model Dev.*, 13, 1711–1735
- Cavazos, T., Salinas, J.A., Martínez, B., Colorado, G., De Grau, P., Prieto, R., Conde, C., Quintanar, A., Santana, J. S., Romero-Centeno, R. et al. (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, pp. 150]. Ciudad de México. <https://www.researchgate.net/publication/321274898>

- 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. *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937-1958.
- Gates, W. L., Boyle, J., Covey, C., Dease, C., Doutriaux, C., Drach, R., Fiorino, M., Gleckler, P., Hnilo, J., Marlais, S., Phillips, T., Potter, G., Santer, B., Sperber, K., Taylor, K., y Williams, D. (1998). An Overview of the Results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP I). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 73, 1962-1970.
- Giorgi, F., y 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. *J. Clim.*, 15, 1141-1158.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2000) – Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds.) Cambridge University Press, UK. pp 570 Available from Cambridge University Press, The Edinburgh Building Shaftesbury Road, Cambridge CB2 2RU ENGLAND. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/emissions-scenarios/>
- (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 [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom y Nueva York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2024). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. RegCM Model. México: IMTA. Recuperado en junio de 2024, de <http://cortex.imta.mx/views/regcm/regcm>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2024). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México: INECC, Recuperado en junio de 2024, de <https://www.inecc.gob.mx/>
- NASA. (2021). Regional Climate Model Evaluation System. Jet Propulsion Laboratory. NASA. <https://rcmes.jpl.nasa.gov/content/statistical-downscaling>
- McGuffie, K., y Henderson-Sellers, A. (2014). *The Climate Modelling Primer*, (4ª ed). John Wiley & Sons, Ltd.
- Montero-Martínez, M., J. y Andrade-Velázquez, M. (2024). Análisis sobre las proyecciones de cambio climático en México. *Tlamati Sabiduría*, 18, 7-22.
- Moss, R., Mustaf, B., Sander, B., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I., Emori, S., Erda, L., Hibbard, K., Jones, R., Kainuma, M., Kelleher, J., Lamarque, J. F., Manning, M., Matthews, B., Meehl, J., Meyer, L., Mitchell, J., ... Nakicenovic, N. (2008). *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Technical Summary* (pp. 25.). Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., y Meehl, G. A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 485–498, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>

- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2021). Statistical downscaling. United Nation. UNFCCC. https://unfccc.int/files/adaptation/methodologies_for/vulnerability_and_adaptation/application/pdf/statistical_downscaling.pdf
- Van Vuuren, Kriegler, E., O'Neill, B. C., Kristie L., Keywan Riahi, E., Carter, T. R., Edmonds, J., Hallegatte, S., Kram, T., Mathur R., y Winkler. H. (2013). A new scenario framework for Climate Change Research: scenario matrix architecture. *Climatic Change*, 122, 373-386. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0906-1>
- World Climate Research Programme. (2024). World Climate Research Programme. WCRP. Recuperado en junio de 2024, de <https://www.wcrp-climate.org/about-wcrp/wcrp-overview>
- Zhang, Z., y Moore, J. C. (2015). Climate and Earth System Models. *Mathematical and Physical Fundamentals of Climate Change*, 457–472. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-800066-3.00014-0>

