

GUÍA SOBRE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA TOMADORES DE DECISIONES



MEDIO AMBIENTE

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



INECC

INSTITUTO NACIONAL
DE ECOLOGÍA Y
CAMBIO CLIMÁTICO

DIRECTORIO

Dra. Margarita Caso Chávez

Coordinadora General de Adaptación al Cambio Climático y Ecología

M. en Geo. Daniel Iura González Terrazas

Director de Análisis de Vulnerabilidad al Cambio Climático

COORDINADO POR

M. en C. Yusif Salib Nava Assad

Subdirector de Variabilidad Climática y Cambio Climático

Dra. Fanny López Díaz

Jefa de Departamento de Análisis de Eventos Extremos y Riesgos

Lic. en Geo. Marcia Rojas Barajas

Profesional Ejecutivo

Citar este reporte como:

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). 2022. López-Díaz F., Nava Assad Y.S., Rojas Barajas M, González Terrazas D.I. Guía de Escenarios de Cambio Climático para Tomadores de Decisiones. pp 65.

ACRÓNIMOS

AGCMs	Atmospheric General Circulation Models/Modelos de Circulación General de Atmósfera
ANVCC	Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático
AOGCMs	Atmosphere-Ocean General Circulation Model/Modelos de Circulación General Acoplados Océano-Atmósfera
AR4	Fourth Assessment Report/Cuarto Informe de Evaluación
AR5	Fifth Assessment Report/Quinto Informe de Evaluación
AR6	Sixth Assessment Report//Sexto Informe de Evaluación
CGACCE	Coordinación General de Adaptación al Cambio Climático y Ecología
CH₄	Metano
CMIP	Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados/Coupled Model Intercomparison Project
CMIP5	Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5/Coupled Model Intercomparison Project Phase 5
CMIP6	Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6/Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CNRM-CM5	National de Recherches Météorologiques-Climat Model version 5
CO₂	Dióxido de Carbono
EBMs	Energy Balance Models/ Modelos de Balance de Energía
ESMs	Earth System Models / Modelos del Sistema Terrestre

GCMs	Global Climate Models /Modelos de Circulación General
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory-Climate Model version 3
HADGEM2-ES	Hadley Centre Global Environment Model version 2-Earth-System
HFC	Hidrofluorocarbonos
IAM	Modelos Integrados de Evaluación/Integrated Assesment Models
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
LLGHGs	Long-Lived Greenhouse Gases/Gases de Efecto Invernadero de Larga Duración
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology-Earth System Model-Low Resolution
MRI-GCM3	Meteorological Research Institute-Atmospheric-General Circulation Model version 3
NASA	National Aeronautics and Space Administration /Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio
NF ₃	Trifluoruro de Nitrógeno
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
N ₂ O	Óxido Nitroso
OMM	Organización Meteorológica Mundial
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PLACCC	Plataforma de Cuencas y Cambio Climático
PFC	Perfluorocarbonos
RCM	Regional Climate Models/Modelos Climáticos Regionales

RCMs	Radiative Convective Models/ Modelos Radiativos Convectivos
RCPs	Representative Concentration Pathways/ Trayectorias de Concentraciones Representativas
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SF₆	Hexafluoruro de Azufre
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
SRES	Special Report on Emissions Scenarios/Reporte Especial sobre Escenarios de Emisiones
SSPs	Shared Socioeconomic Pathways/Trayectorias Socioeconómicas Compartidas
TAR	Third Assessment Report/Tercer Informe de Evaluación

ÍNDICE

ACRÓNIMOS.....	3
INTRODUCCIÓN	11
1. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO	13
1.1 SISTEMA CLIMÁTICO.....	13
1.2 TIEMPO Y CLIMA.....	14
1.3 VARIABILIDAD CLIMÁTICA	15
1.4 CAMBIO CLIMÁTICO	15
1.5 CAUSAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	16
1.5.1 BALANCE RADIATIVO	16
1.5.2 FORZAMIENTOS CLIMÁTICOS.....	17
1.5.3 EFECTO INVERNADERO	19
1.5.4 GASES DE EFECTO INVERNADERO	19
1.6 CALENTAMIENTO GLOBAL	21
1.7 CAMBIOS OBSERVADOS	23
2. PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO	25
2.1 MODELOS CLIMÁTICOS.....	25
2.2 RESOLUCIÓN DE UN MODELO	25
2.3 TIPOS DE MODELOS.....	26
2.4 ESCENARIOS DE EMISIONES.....	28
2.5 ESCENARIOS TRAYECTORIAS DE CONCENTRACIÓN REPRESENTATIVAS	29
2.6 PROYECTO DE INTERCOMPARACIÓN DE MODELOS ACOPLADOS.....	30
2.7 INCERTIDUMBRE EN LAS PROYECCIONES CLIMÁTICAS.....	34
3. INTEGRACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN HERRAMIENTAS PARA LA TOMA DE DECISIONES.....	36
3.1. REQUERIMIENTOS GENERALES.....	37
3.1.1 DESCARGA DE DATOS	37
3.1.2 TIPOS DE VARIABLES	38
3.1.3 ESCALA Y RESOLUCIÓN TEMPORAL.....	38
3.1.4 ESCALA ESPACIAL.....	39
3.2 REQUERIMIENTOS ESPECIFICOS.....	40

3.2.1 SELECCIÓN DE MODELOS CLIMÁTICOS.....	40
3.2.2 SELECCIÓN DEL PERIODO BASE	42
3.2.3 SELECCIÓN DE ESCENARIOS RCPs.....	46
3.2.4 SELECCIÓN DE HORIZONTES.....	47
3.2.5 RESOLUCIÓN ESPACIAL DE LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO	49
3.3 REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS CON INFORMACIÓN DEL INECC	50
3.3.1 REPRESENTACIÓN SIMPLE	50
3.3.2 REPRESENTACIÓN INTEGRAL	54
3.4 ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA INFORMACIÓN	58
BIBLIOGRAFÍA	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Sistema climático	13
Figura 2.	Diferencia entre tiempo y clima	14
Figura 3.	Con cambio climático la temperatura puede tener cambios en el promedio y sus extremos	16
Figura 4.	Representación gráfica del balance radiativo	17
Figura 5.	Comparación de los cambios de temperatura de la superficie global (línea roja) y la energía solar recibida por la Tierra (línea amarilla) en Wm^{-2} desde 1880. Las líneas delgadas muestran los niveles anuales, mientras que las líneas gruesas muestran las tendencias promedio de 11 años	18
Figura 6.	Gráfica basada en la comparación de muestras atmosféricas de núcleos de hielo y mediciones directas más recientes, proporciona evidencia de que el CO_2 atmosférico ha aumentado desde la Revolución Industrial	20
Figura 7.	Concentraciones actuales de algunos gases de efecto invernadero, partes por millón (ppm) para dióxido de carbono y partes por billón (ppb) para óxido nitroso y metano	21
Figura 8.	Anomalía de temperatura global respecto al periodo 1901-2000. Se puede observar que la mayor parte del calentamiento ha ocurrido desde 1976	22
Figura 9.	Evolución de la modelación climática	27
Figura 10.	Incremento de temperatura media global histórica y proyectada para los cuatro RCPs de CMIP5	29
Figura 11.	Interfaz de descarga de datos de CMIP5	31
Figura 12.	Principales diferencias entre CMIP5 y CMIP6	32
Figura 13.	Comparación de las emisiones de CO_2 en los antiguos escenarios de RCPs (líneas discontinuas) y sus nuevas contrapartes SSPs (líneas continuas). Los nuevos escenarios SSPs comienzan en el año 2014, mientras que los antiguos RCPs comenzaron en el año 2007	33
Figura 14.	Escenarios futuros de emisiones de CO_2 presentados en CMIP6, así como emisiones históricas de CO_2 (en negro). El área sombreada representa el rango de escenarios de referencia sin políticas	33
Figura 15.	Principales fuentes de incertidumbre en los modelos climáticos	34
Figura 16.	Modelos de Circulación General incluidos en la base de datos del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático	42
Figura 17.	Cartografía de clima actual o base (1950-2000). WorldClim-Global Climate Data, con resolución espacial de 30" de longitud por 30" de latitud	44
Figura 18.	Ejemplo de los horizontes temporales para la toma de decisiones en el sector agrícola	47

Figura 19.	Porcentaje de disminución de precipitación acumulada anual proyectada para el RCP8.5 y futuro lejano 2075-2099 respecto al clima histórico 1950-2000, para cuatro GCMs (CNRMCM5, GFDL-CM3, HADGEM2-ES, MPI-ESM-LR) por entidad federativa	50
Figura 20.	Mayor anomalía de temperatura media anual proyectada, para el RCP8.5 y futuro lejano 2075-2099 respecto al clima histórico 1950-2000, para cuatro GCMs (CNRMCM5, GFDL-CM3, HADGEM2-ES, MPI-ESM-LR) por entidad federativa	50
Figura 21.	Valores máximos y mínimos proyectados de la precipitación acumulada anual de los modelos CNRMCM5, GFDL-CM3, HADGEM2-ES, MPI-ESM-LR, respecto al clima base 1950-2000 por entidad federativa	51
Figura 22.	Valores máximos y mínimos proyectados de la temperatura media anual de los modelos CNRMCM5, GFDL-CM3, HADGEM2-ES, MPI-ESM-LR, respecto al clima base 1950-2000 por entidad federativa	52
Figura 23.	Representación en la plataforma PLACCC de la información de escenarios de cambio climático para diferentes pisos altitudinales en la cuenca de Armería	53
Figura 24.	Vulnerabilidades publicadas en el Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático del INECC	54
Figura 25.	Esquema para la componente de exposición de la vulnerabilidad de la población a la distribución potencial del dengue	54
Figura 26.	Exposición actual y futura para el municipio Tecpán de Galeana, Guerrero	55

ÍNDICE DE TABLAS Y CUADROS

Tabla 1.	Diferencias entre el calentamiento global y el cambio climático	23
Tabla 2.	Escenarios RCPs con su forzamiento radiativo y el valor de concentración de CO ₂ que alcanzarían para el año 2100 y su trayectoria de CMIP5	30
Cuadro 1.	Simulaciones de modelos versus observaciones climáticas	43

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es inequívoco, el acelerado incremento de la temperatura global ha conducido a experimentar un calentamiento global cuyas consecuencias han derivado en cambios en el clima. Las actividades humanas, como la emisión de gases de efecto invernadero, el creciente consumo de recursos naturales y el cambio de uso de suelo, por mencionar algunos, son los principales causantes de este cambio acelerado. Cada día, en diferentes puntos del espacio geográfico, el planeta está sufriendo transformaciones, desde cambios en los fenómenos meteorológicos y climáticos que amenazan la producción de alimentos; hasta el aumento del nivel del mar que incrementa el riesgo de inundaciones (ONU, 2021).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) afirma, que es posible que los costos netos de los daños derivados del cambio climático serán significativos y aumentarán con el tiempo. El alcance de los efectos del cambio climático en las distintas regiones del planeta variará con el tiempo, así como la capacidad de adaptarse de los diferentes sistemas sociales y ambientales (IPCC, 2007; IPCC, 2013), por lo que es necesario desarrollar medidas y acciones de adaptación, para disminuir la vulnerabilidad al cambio climático de los diferentes sistemas. Ante esta necesidad se requiere que los tomadores de decisiones aumenten sus capacidades de conocimiento y comprensión de la información climática, para que la integren como una herramienta de apoyo fundamental en las decisiones.

Es claro que, para los usuarios no expertos en la ciencia del clima, la información climática puede resultar un tanto compleja, por lo que existe una necesidad de proporcionar una base de conocimiento para el uso de la información climática en el contexto de cambio climático, lo que implica hablar de escenarios de cambio climático.

En ese contexto, se ha desarrollado esta la presente guía de escenarios de cambio climático, la cual tiene como objetivo fortalecer las capacidades de los tomadores de decisiones sobre el tema, para facilitar el uso y la interpretación de la información de escenarios de acuerdo a sus necesidades y para tener una visión amplia de sus alcances y limitaciones. Lo anterior fomentará un pensamiento crítico de la información disponible y facilitará su incorporación en la toma de decisiones.

En este mismo sentido esta guía no pretende presentar la información de una manera exhaustiva y estrictamente técnica o especializada, por lo que

únicamente contiene temas clave que ayudarán a encaminar al usuario a una mejor comprensión de los escenarios de cambio climático, a través de una visión y experiencia institucional, más que académica, sin dejar a un lado el rigor científico requerido.

El documento está conformado por tres capítulos, en el primero se presentan los conceptos básicos para entender el contexto del cambio climático, los cuales se describen de una manera general, lo cual es fundamental para poder entender conceptos utilizados en el segundo capítulo, el cual integra los elementos teóricos básicos para poder entender ¿qué es un escenario de cambio climático? Esta información es relevante para comprender el origen de la información de las proyecciones de cambio climático. Finalmente, en el tercer capítulo se refiere al proceso de la integración de escenarios de cambio climático en herramientas para la toma de decisiones, a través de una visión y experiencia institucional. En este capítulo se enfatiza la importancia de determinar el propósito de realizar un análisis con escenarios de cambio climático, para así tener una visión clara de lo que se quiere obtener, así como del uso que se le quiera dar a la información.

Es así que la información climática es un pilar fundamental para una toma de decisiones bien informada en el contexto de cambio climático. Esta información debe de integrarse desde una perspectiva multidimensional en combinación con otras herramientas de apoyo, para poder construir un panorama más amplio de las problemáticas relacionadas al cambio climático y guiar la toma de decisiones a la implementación de acciones en un territorio.

1. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO

En esta sección se describirán de manera simple y general los conceptos básicos que están relacionados con el tema de cambio climático, los cuales son fundamentales para la comprensión del tema de escenarios de cambio climático.

1.1 SISTEMA CLIMÁTICO

El sistema climático es un sistema altamente complejo integrado por cinco grandes componentes: la atmósfera, la hidrósfera, la criósfera, la superficie terrestre, la biósfera, y las interacciones entre ellos (Figura 1). El sistema climático evoluciona con el tiempo bajo la influencia de su propia dinámica interna, por forzamientos externos como las erupciones volcánicas, las variaciones solares y por los forzamientos inducidos por el ser humano, a través de cambios en la composición de la atmósfera y cambios en el uso de la tierra (IPCC, 2001).

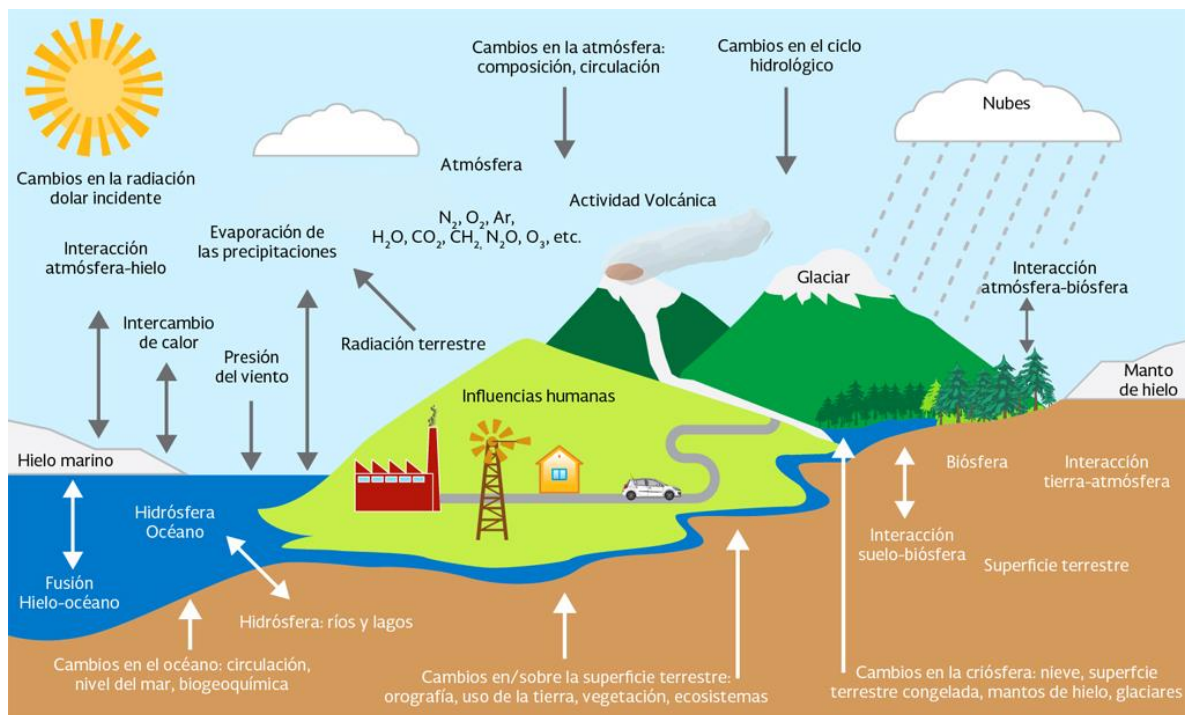


Figura 1. Sistema climático

Fuente: Tomado de Martínez Arroyo (2013) citado por INECC (2018)

1.2 TIEMPO Y CLIMA

Los fenómenos que ocurren en la atmósfera en un momento determinado se consideran “tiempo meteorológico”, este incluye, la dirección y la velocidad del viento, la precipitación, la presión barométrica, la temperatura y la humedad relativa. El estado del tiempo tiene variaciones a corto plazo, por ejemplo, minutos, horas, días, semanas o meses (Benavides y León, 2007; Meteorología y climatología de Navarra, s.f.) (Figura 2).

El clima se puede definir como el estado más frecuente de la atmósfera de un lugar de la superficie terrestre; es una descripción estadística de las condiciones meteorológicas más frecuentes de una región en cierto periodo de tiempo (INECC, 2018). Generalmente se explica en términos de la media y la variabilidad de la temperatura, la precipitación y el viento durante un periodo que va desde meses a millones de años. Las condiciones normales se describen a partir de un periodo de referencia de 30 años (1961-1990, 1971-2000, 1981-2010, 1991-2020), el cual es definido por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), (IPCC, 2013b).

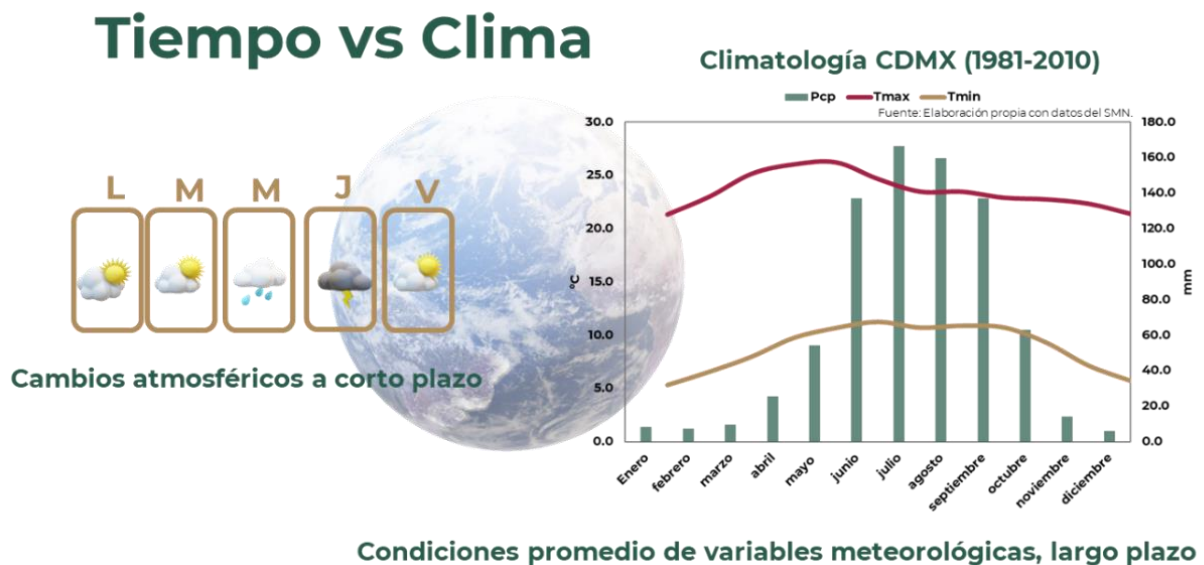


Figura 2. Diferencia entre tiempo y clima

Fuente: Elaborado por CGACCE-INECC. La gráfica fue elaborada con datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN)¹

¹ Los datos fueron descargados de la base de datos de resúmenes mensuales de temperatura y lluvia en <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias> consultada en 2021.

1.3 VARIABILIDAD CLIMÁTICA

El concepto de variabilidad climática hace referencia a las variaciones del estado medio y a otras características estadísticas del clima (desviación típica, sucesos extremos, etc.) a mayor escala espacial y temporal que la de los fenómenos meteorológicos. La variabilidad puede deberse a procesos internos naturales del sistema climático (variabilidad interna) o a variaciones del forzamiento externo natural o antropogénico (variabilidad externa) (IPCC, 2018).

Es preciso no confundir el cambio climático con las fluctuaciones naturales del clima. Incluso en un período relativamente estable, los sistemas que conforman e influyen en el clima terrestre fluctúan de forma natural. Estas fluctuaciones u “oscilaciones”, pueden tener un impacto considerable en el clima, tanto a escala regional como global (SEMARNAT, 2016). Los fenómenos que producen esos contrastes son por ejemplo frentes fríos, células estacionarias secas, perturbaciones tropicales, huracanes y células con una humedad desproporcionada. Los eventos meteorológicos extremos pueden incluir tanto una precipitación pluvial excesiva como sequías prolongadas; estos fenómenos pueden estar relacionados con el Fenómeno de El Niño, el cual también forma parte de la variabilidad natural del clima (OAS, s.f.).

1.4 CAMBIO CLIMÁTICO

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), define el cambio climático como el:

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

Fuente: IPCC (2018)

La CMNUCC diferencia entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales (IPCC, 2018).

Los cambios en el clima pueden estar representados, por variaciones a largo plazo (30, 50, 100 años), en los valores medios y extremos de alguna variable climática. Incluso los cambios se pueden presentar con períodos de cientos o miles de años (IPCC, 2007; Casas y Alarcón, 1999).

En la **Figura 3** se observa un cambio en la de temperatura; en este caso se tiene un corrimiento hacia temperaturas más cálidas, modificándose los valores promedio y los extremos.

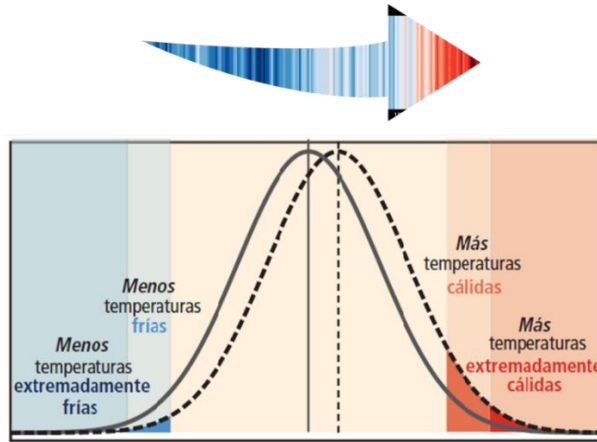


Figura 3. Con cambio climático la temperatura puede tener cambios en el promedio y sus extremos

Fuente: Tomado y modificado de IPCC (2012)

1.5 CAUSAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos, que influyen en el equilibrio radiativo de la Tierra. Es así que en esta sección se revisará de manera general **¿cuál es el origen del cambio climático?**

1.5.1 BALANCE RADIATIVO

La temperatura de la Tierra es resultado de un equilibrio entre la energía que recibe del Sol (radiación solar) y la energía que libera al espacio exterior; a dicha interacción se le conoce como balance radiativo.

Aproximadamente, la mitad de la radiación solar que recibe la Tierra y su atmósfera se absorbe en la superficie. La otra mitad es absorbida por la atmósfera o vuelve a emitirse al espacio a través de la interacción con las nubes, la nieve, el hielo y los desiertos en la superficie terrestre. Parte de la energía absorbida en la superficie terrestre vuelve a irradiarse (o es devuelta) a la atmósfera y al espacio en forma de energía calorífica o térmica (**Figura 4**).

La temperatura que se siente es una medida de esta energía calorífica. (UG, 2017). Por lo tanto, cualquier alteración en este balance de energía puede ocasionar cambios en el sistema climático y en el clima.

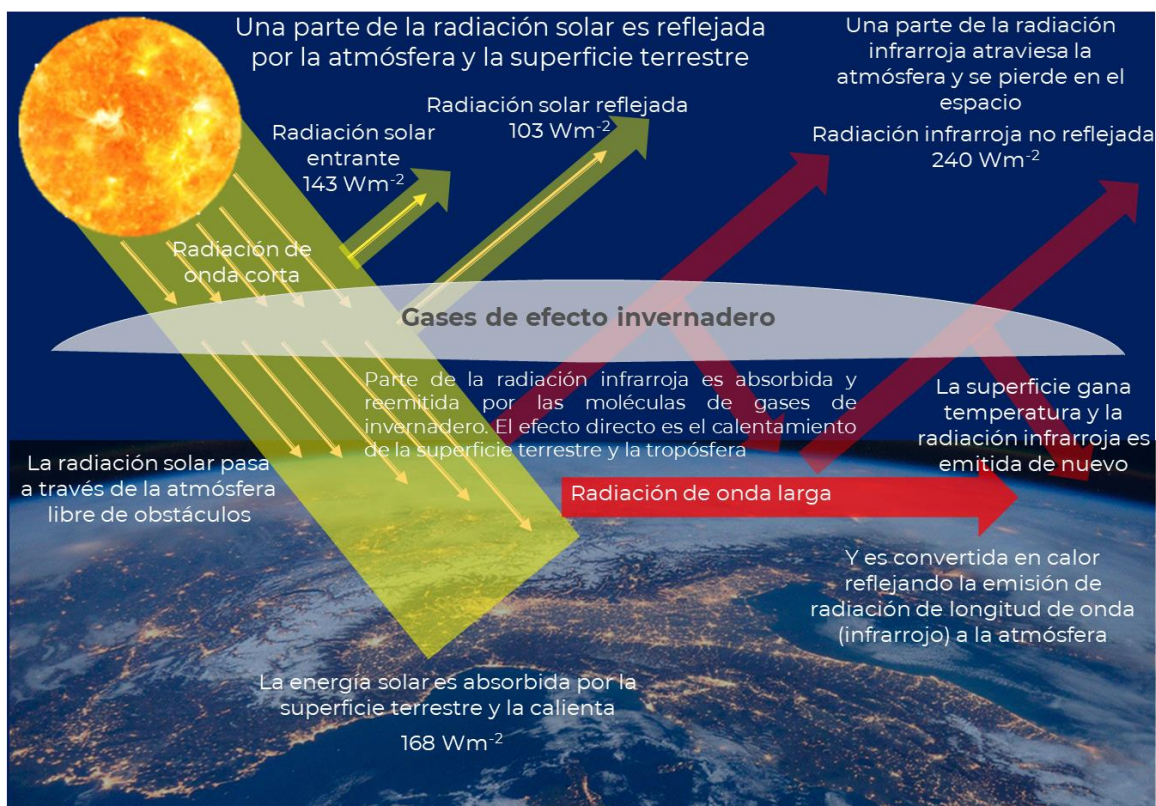


Figura 4. Representación gráfica del balance radiativo
Fuente: Elaborado por CGACCE-INECC basada en UG (2017)

1.5.2 FORZAMIENTOS CLIMÁTICOS

Los agentes externos que inducen cambios en el sistema climático por medio de la alteración del balance energético de la Tierra son llamados "forzamientos" (MMA, 2017). Existen tres formas fundamentales de cambiar el balance de radiación de la Tierra (IPCC, 2007):

1. Cambiando la radiación solar entrante (por ejemplo, por cambios en la órbita de la Tierra (precesión, oblicuidad y excentricidad) o por los ciclos solares).
2. Cambiando la fracción de radiación solar que se refleja (llamada "albedo"; por ejemplo, por cambios en la cubierta de nubes, partículas atmosféricas o vegetación).
3. Alterando la radiación de onda larga desde la Tierra hacia el espacio (por ejemplo, cambiando las concentraciones de gases de efecto invernadero).

La manera de cuantificar la potencia de los impulsores es a través del forzamiento radiativo, el cual se mide en unidades de Watt por metro cuadrado (Wm^{-2}). Se define como el cambio en el flujo neto de energía radiativa hacia la superficie de la Tierra medido en el borde superior de la troposfera (12,000 metros sobre el nivel del mar). Es el resultado de cambios internos en la composición de la atmósfera, o cambios en el aporte externo de energía solar. Un forzamiento radiativo positivo contribuye a calentar la superficie de la Tierra, mientras que uno negativo favorece su enfriamiento (Atmósfera, s.f.).

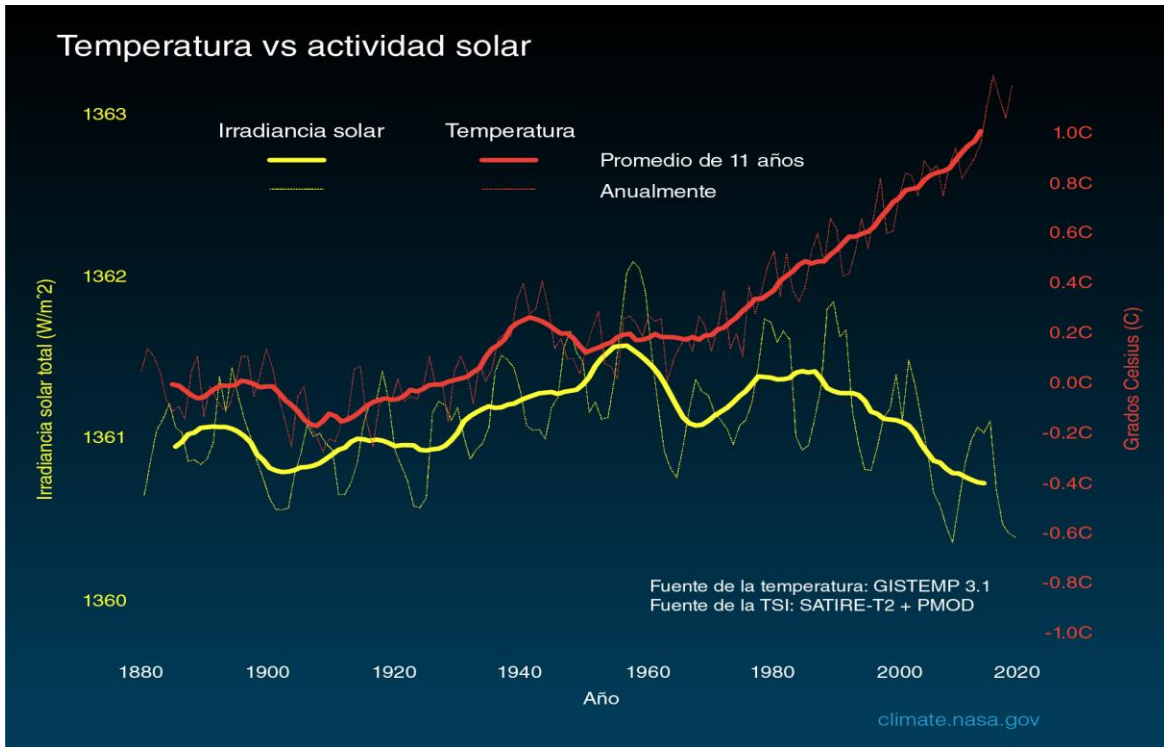


Figura 5. Comparación de los cambios de temperatura de la superficie global (línea roja) y la energía solar recibida por la Tierra (línea amarilla) en Wm^{-2} desde 1880. Las líneas delgadas muestran los niveles anuales, mientras que las líneas gruesas muestran las tendencias promedio de 11 años

Fuente: Tomado de NASA (2020)

Aunque la energía solar forma parte de los forzamientos climáticos, en la gráfica de la Figura 5, se muestra que la cantidad de energía solar recibida por la Tierra ha seguido el ciclo natural de 11 años del Sol, sin un aumento neto desde la década de 1950. Durante el mismo período, la temperatura global ha aumentado notablemente. Por lo tanto, no es posible que la energía solar haya causado la tendencia de calentamiento global de la temperatura observada durante el último medio siglo (NASA, 2020).

Durante el último milenio uno de los forzamientos más importantes ha sido el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, derivado de la actividad humana

Fuente: Solomon (2007)

1.5.3 EFECTO INVERNADERO

En la atmósfera, no toda la radiación térmica emitida por la Tierra alcanza el espacio exterior. Como parte del balance energético, parte de la radiación emitida es absorbida y reflejada de nuevo hacia la superficie de la Tierra por las moléculas de los gases como el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (NO₃), entre otros, y las nubes, los cuales absorben esa radiación, atrapando la energía emitida por la superficie de la Tierra y permitiendo que la temperatura del planeta aumente, dando lugar a una temperatura media global alrededor de 14°C, muy superior a la temperatura de -18°C que se tendría. A este fenómeno de retener calor en el planeta gracias a la composición de la atmósfera se le conoce como efecto Invernadero (Figura 4) (IDEAM, 2014).

La adición de más gases a la atmósfera, como el CO₂, intensifica el efecto invernadero y, por tanto, calienta la atmósfera de la Tierra, conduciendo así a cambios en el clima.

Por ejemplo, a medida que la atmósfera se calienta debido a los niveles crecientes de gases, la concentración de vapor de agua se incrementa, lo que provoca que se intensifique aún más el efecto invernadero. Esto, a su vez, causa un mayor calentamiento, que trae consigo un incremento adicional del vapor de agua, en un ciclo de auto-reforzamiento (IPCC, 2007).

1.5.4 GASES DE EFECTO INVERNADERO

Los gases de efecto invernadero (GEI) son gases traza (dióxido de carbono CO₂, metano CH₄, óxido nitroso N₂O) en la atmósfera que absorben y emiten radiación de onda larga (Benavides y León, 2007).

Cada uno de los GEI tiene una capacidad diferente de retener el calor en la atmósfera, a esta propiedad se le denomina "Potencial de Calentamiento Global". Todos ellos pertenecen al grupo de gases de efecto invernadero de larga duración (LLGHGs, por sus siglas en inglés), porque son químicamente estables y perduran en la atmósfera durante períodos que se extienden desde una década

a varios siglos, de manera que sus emisiones tienen una influencia a largo plazo sobre el clima.

Algunos GEI tienen un origen natural (p.ej. CO₂, CH₄ y N₂O), sin embargo, el aumento de sus concentraciones atmosféricas durante los últimos 250 años se debe en gran parte a la actividad humana (Figura 6).

Fuente: Gómez (2018)

Otros gases de efecto invernadero son resultado únicamente de la actividad humana, por ejemplo, los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC), el hexafluoruro de azufre (SF₆) y el trifluoruro de nitrógeno (NF₃), que son usados como refrigerantes, agentes extintores de incendios, disolventes y para la fabricación de espumas aislantes, entre otros (Gómez, 2018).

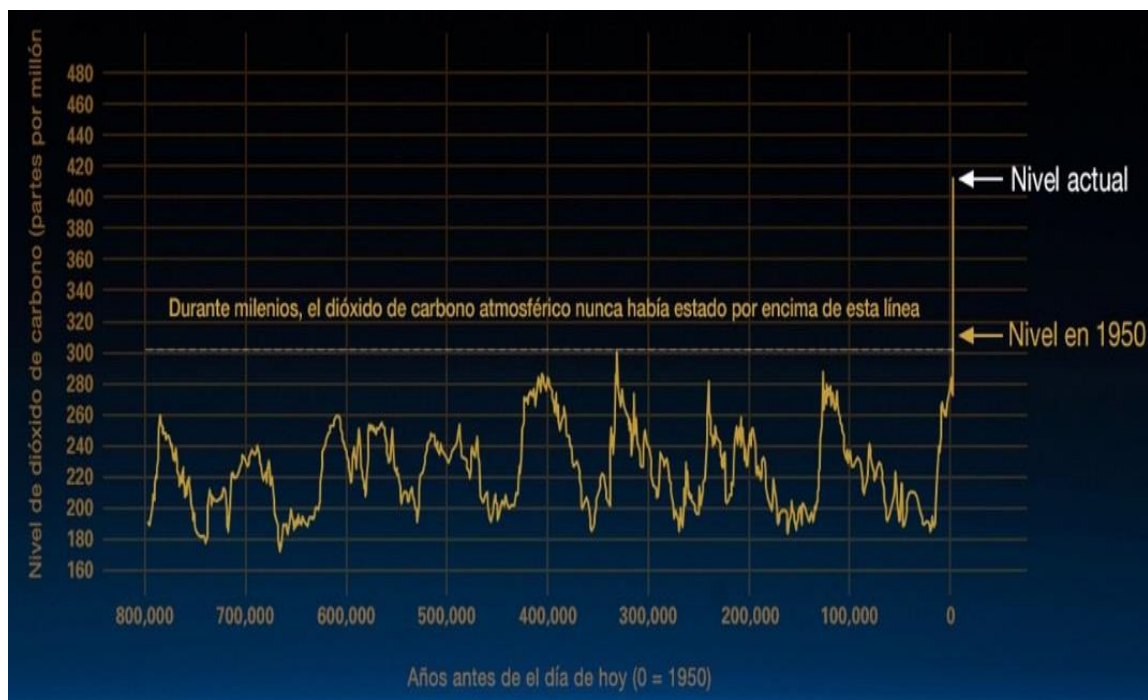


Figura 6. Gráfica basada en la comparación de muestras atmosféricas de núcleos de hielo y mediciones directas más recientes, proporciona evidencia de que el CO₂ atmosférico ha aumentado desde la Revolución Industrial

Fuente: Luthi, D., y colaboradores (2008); Etheridge, D.M., y colaboradores (2010); datos sobre el núcleo de hielo de Vostok /J.R. Petit y colaboradores; registro de CO₂-Mauna Loa, NOAA (Citado en NASA (2021b)).

En 2011, las concentraciones CO₂, CH₄ y N₂O eran de 391 ppm, 1,803 ppb y 324 ppb, respectivamente, valores que excedían los niveles preindustriales en aproximadamente el 40%, el 150% y el 20%, respectivamente (IPCC, 2013a). Sin embargo, en la actualidad ya se han superado esos niveles reportados (Figura 7). Es así que, las tasas promedio de aumento de las concentraciones atmosféricas de los GEI durante el siglo pasado no han tenido precedentes en los últimos 22,000 años (IPCC, 2013a).



Figura 7. Concentraciones actuales de algunos gases de efecto invernadero, partes por millón (ppm) para dióxido de carbono y partes por billón (ppb) para óxido nitroso y metano

Fuente: Elaborado por CGACC-INECC con datos de NOAA (2021b,2021c, 2021d)

1.6 CALENTAMIENTO GLOBAL

El aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera que se ha producido desde la Revolución Industrial, a finales del siglo XVIII, ha sido la causa principal del calentamiento global. Como consecuencia del aumento de los gases, que absorben y emiten radiación térmica, se retiene más calor en la atmósfera y, por consiguiente, aumenta la temperatura media global de la superficie (**Figura 8**) (Oceana, s.f.).

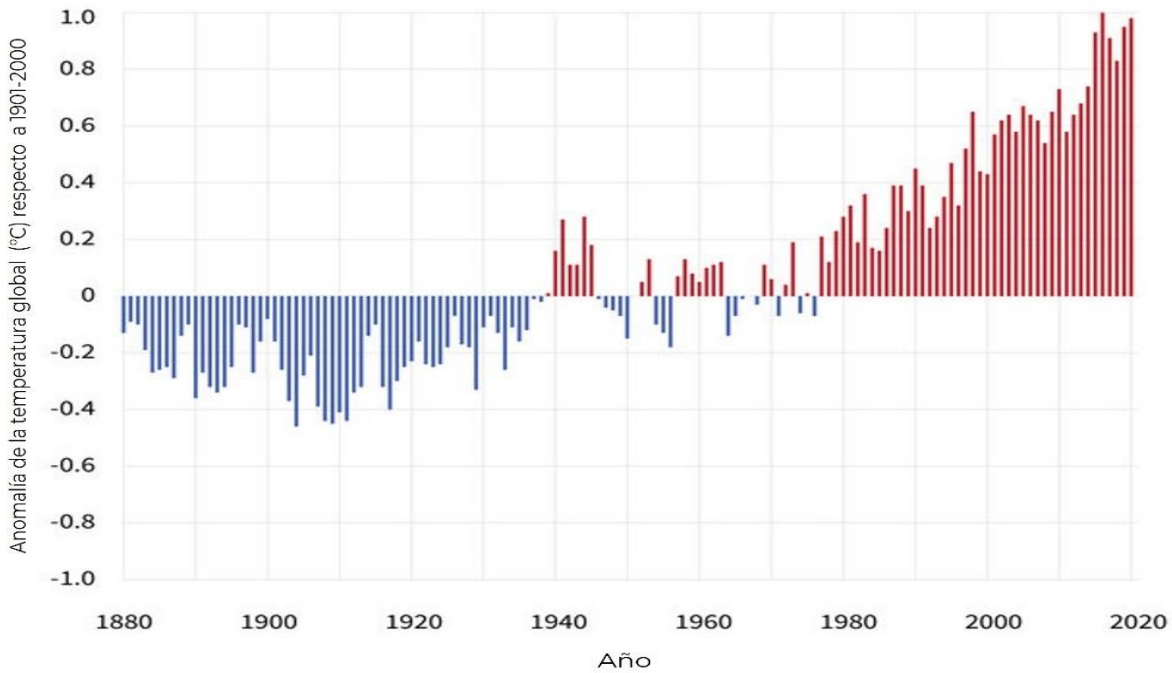


Figura 8. Anomalía de temperatura global respecto al periodo 1901-2000. Se puede observar que la mayor parte del calentamiento ha ocurrido desde 1976
Fuente: Tomado y modificado de NOAA (2021a)

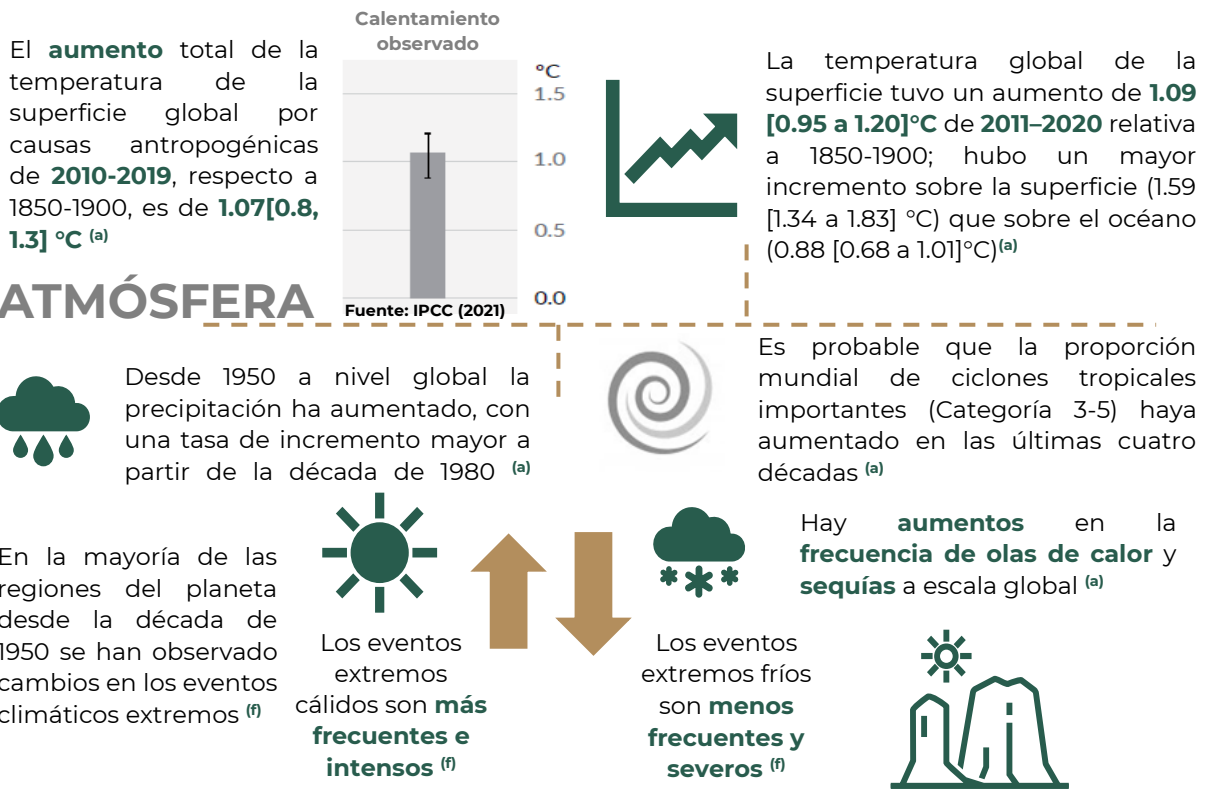
Los conceptos de calentamiento global y cambio climático no son sinónimos (**Tabla 1**). El calentamiento global se refiere únicamente al aumento de la temperatura global del planeta, mientras que el cambio climático es una consecuencia de ese calentamiento. Aunque hay un incremento de temperatura global, se debe considerar que no en todas las regiones del planeta va a existir un aumento de temperatura, sino que los cambios pueden ser diferenciados. Es decir, es posible que también se experimenten disminuciones de temperatura o incluso puede no haber cambios en dichos valores. Lo anterior dependerá de las condiciones climáticas y características regionales e incluso locales de cada sitio.

Tabla 1. Diferencias entre el calentamiento global y el cambio climático

Calentamiento global	Cambio climático
El calentamiento global es producido por el aumento en la temperatura, debido al incremento de la concentración de gases de efecto invernadero de origen antropogénico.	El cambio climático son las repercusiones en el sistema climático, manifestándose en diferentes cambios debido a este calentamiento.

1.7 CAMBIOS OBSERVADOS

El calentamiento en el sistema climático es inequívoco y, desde la década de 1950, muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios de años. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado (IPCC, 2013a).



CRIÓSFERA



Las **capas de hielo** de Groenlandia y la Antártida han **disminuido** ^(c)

Hielo marino Ártico



Última medición
3.92 millones de km² 2020

TASA DE CAMBIO
13.1
por ciento por década

Fuente: NASA (2021a)

Groenlandia perdió un promedio de 279,000 millones de toneladas de hielo por año entre 1993 y 2019, mientras que la Antártida perdió aproximadamente 148,000 millones de toneladas de hielo por año durante el mismo período ^(d)

Los **glaciares están menguando** de forma persistente en todo el mundo ^(f)




- Glaciares de Alaska
- Región ártica de Canadá
- Periferia del manto de hielo de Groenlandia
- Sur de los Andes
- Las montañas asiáticas (Himalaya)

OCÉANO


El aumento medio global del nivel ha sido provocado por el calentamiento del sistema climático ^(a)

1971-2018



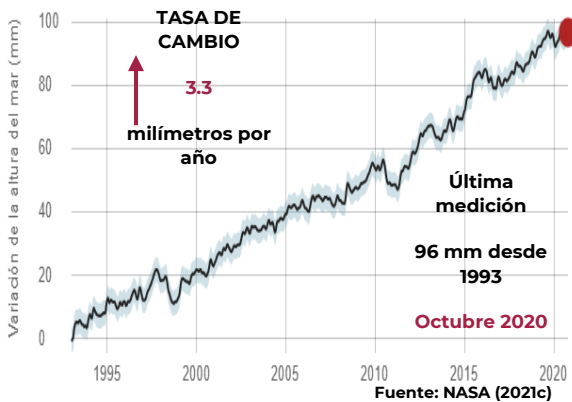
20% pérdida de la capa de hielo

Contribución



50% expansión térmica por el calentamiento del océano

El nivel del mar global subió alrededor de **20 cm** en el último siglo ^(c)



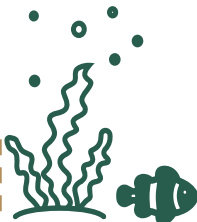
TASA DE CAMBIO
3.3
milímetros por año

Última medición
96 mm desde 1993

Octubre 2020

Fuente: NASA (2021c)

Si la capa de hielo de Groenlandia se derrite por completo, el **nivel del mar se elevaría en 5-7 m** ^(e)



La absorción por los océanos del CO₂ antropogénico emitido, ha provocado su **acidificación**. El pH ha disminuido en 0.1 desde el comienzo de la era industrial ^(f)

Fuente: Elaborado por CGACC-INECC con datos de: ^(a)IPCC (2021); ^(b)NASA (2021a); ^(c)NASA (2021b); ^(d)NASA (2021c); ^(e)NASA (2021d); ^(f)Stocker (2013).

2. PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

Antes de utilizar o manipular cualquier tipo de datos relacionado con escenarios de cambio climático, el usuario debe de comprender de dónde surge toda esta información, por lo tanto, en esta sección se describirán los elementos teóricos básicos para poder entender qué es un escenario de cambio climático.

2.1 MODELOS CLIMÁTICOS

La construcción de escenarios de cambio climático depende del uso de modelos numéricos, específicamente de un modelo climático. Los modelos climáticos son herramientas numéricas que se basan en ecuaciones matemáticas que tienen como objetivo representar los procesos del sistema climático. Por ejemplo, las ecuaciones de movimiento de fluidos de Navier-Stokes, son muy importantes porque capturan la velocidad, la presión, la temperatura y la densidad de los gases en la atmósfera. Los científicos traducen cada uno de estos principios físicos en ecuaciones que forman una línea tras otra de un código de computadora, con más de un millón de líneas para un modelo climático global (McWeeney y Hausfather, 2018).

De esta manera se describe el comportamiento y las interacciones entre la atmósfera, la litósfera, la hidrósfera, la criósfera y la biósfera, bajo forzamientos externos como la radiación solar, los aerosoles, así como las emisiones de gases de efecto invernadero naturales y antropogénicas (Charron, 2016).

2.2 RESOLUCIÓN DE UN MODELO

Dada la complejidad del sistema climático, un modelo no es capaz de calcular todos sus procesos. El modelo climático divide al planeta en cajas, celdas o rejillas, en forma de cuadrícula, y realiza los cálculos en cada celda, considerando la temperatura, la presión del aire, la humedad y la velocidad del viento (McWeeney y Hausfather, 2018).

El tamaño de las celdas de la cuadrícula, tanto horizontal como vertical, determina la resolución del modelo climático. Un modelo climático global relativamente “grueso” tiene generalmente en latitudes medias celdas cuadriculadas de aproximadamente 100 km de longitud y latitud. Dado que la

Tierra es un geoide, las celdas son más grandes en el ecuador y más pequeñas en los polos (Charron, 2016).

Un modelo de alta resolución tendrá un mayor número de celdas de menor tamaño. Cuanto mayor sea la resolución, más información climática específica se puede obtener para una región en particular; sin embargo, la demora en la ejecución computacional es mayor y se puede tener mayor incertidumbre, dado que las ecuaciones de los modelos no representan del todo a los procesos de escalas regionales o locales del sistema climático.

2.3 TIPOS DE MODELOS

Hay diversos tipos de modelos climáticos, que integran desde procesos sencillos hasta otros más complejos (**Figura 9**).

- **Modelos de Balance de Energía (Energy Balance Models, EBMs)**

Son los más antiguos y básicos, sólo consideran el equilibrio de la energía solar que ingresa a la atmósfera terrestre y el calor liberado al espacio. La única variable climática que calculan es la temperatura de la superficie (Lohmann, 2020).

- **Modelos Radiativos Convectivos (Radiative Convective Models, RCMs)**

Simulan la transferencia de energía, a través de la altura de la atmósfera, por ejemplo, por convección. Pueden calcular la temperatura y la humedad de diferentes capas de la atmósfera (McWeeney y Hausfather, 2018).

- **Modelos de Circulación General (Global Climate Models, GCMs)**

El dominio de cálculo de un GCMs cubre todo el planeta con una resolución horizontal (tamaño de celda) de aproximadamente 200 km. Los GCMs se dividen en tres categorías principales (Charron, 2016):

1. Modelos de Circulación General de Atmósfera (Atmospheric General Circulation Models, AGCMs), sólo incluyen la atmósfera y su interacción con la superficie terrestre continental;
2. Modelos de Circulación General Acoplados Océano-Atmósfera (Atmosphere-Ocean General Circulation Models, AOGCMs), acoplan las interacciones atmósfera y superficie terrestre con modelos físicos de océano; y
3. Modelos del Sistema Terrestre (Earth System Models, ESMs), incluyen ciclos e interacciones, así como cambios de vegetación y uso de suelo, que

afectan la forma en que el clima responde a las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por los humanos.

- **Modelos Climáticos Regionales (Regional Climate Models, RCM)**

Con los RCM se lleva la información climática global a una escala local, a una área o región específica. Proveen un amplio rango de salidas de variables que resuelven las características climáticas regionales para la evaluación de impactos climáticos. El tamaño de las celdas puede ser de 1 a 2 km o hasta de 10 a 50 km (Hayhoe et al., 2017).

- **Modelos Integrados de Evaluación (Integrated Assessment Models, IAMs).**

Este subconjunto de modelos agrega aspectos de la sociedad a un modelo climático simple, simulando cómo la población, el crecimiento económico y el uso de energía afectan e interactúan con el clima físico. En la investigación climática, los IAMs se usan típicamente para proyectar futuras emisiones de gases de efecto invernadero y los beneficios y costos de las opciones de políticas que podrían implementarse para abordarlos (McWeeney y Hausfather, 2018).

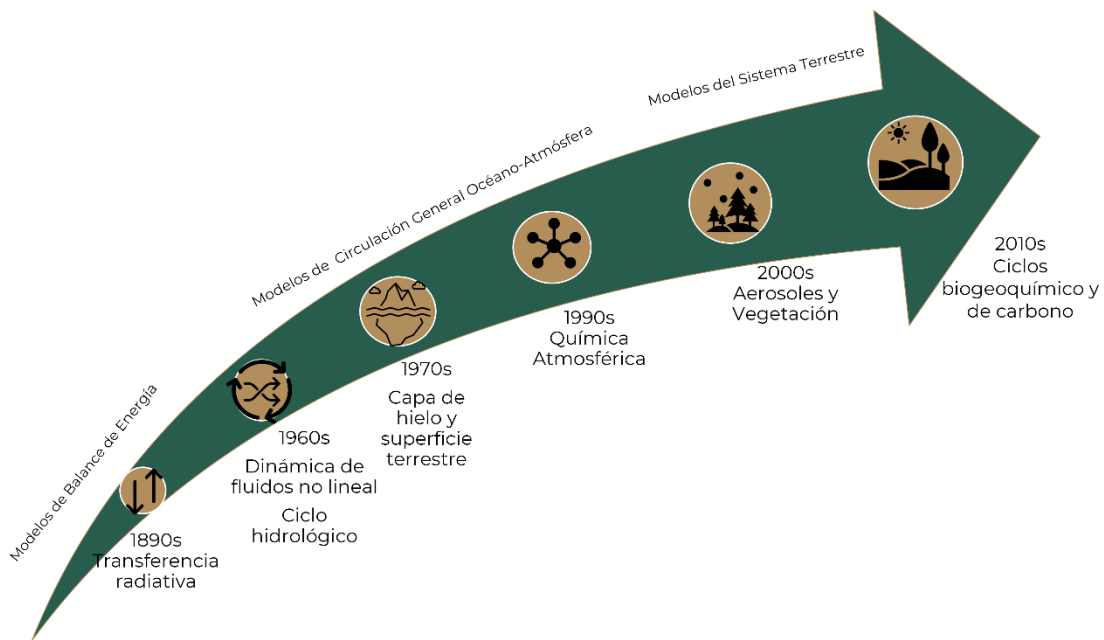


Figura 9. Evolución de la modelación climática

Fuente: Elaborado por CGACCE-INECC basado en Hayhoe et al. (2017)

2.4 ESCENARIOS DE EMISIONES

Los tomadores de decisiones requieren información sobre cambios futuros en el clima promedio y su variabilidad para actuar ante los posibles impactos del cambio climático. Por lo cual es necesario cuantificar el forzamiento radiativo de los gases de efecto invernadero y de esta manera saber cómo pueden influir en el clima. Sin embargo, hay muchos supuestos y factores que pueden incidir en las emisiones futuras de GEI como el crecimiento de la población, el uso de combustibles fósiles como fuente de energía, el desarrollo tecnológico y económico, la política, entre otros (IPCC-TGICA, 2007). Por lo tanto, los escenarios de emisiones describen las posibles emisiones futuras de gases de efecto invernadero, aerosoles y otros gases antropogénicos a la atmósfera, pero basándose en un conjunto de supuestos coherentes e internamente consistentes sobre fuerzas impulsoras, como el cambio tecnológico, el desarrollo demográfico y socioeconómico, y sus interacciones (IPCC, 2007).

El desarrollo de los escenarios de emisiones es un proceso que ocurre en paralelo con el desarrollo de modelos climáticos. Los equipos de investigación se dedican a evaluar cómo evolucionarán las emisiones en el futuro y así estos escenarios son utilizados para ejecutar modelos climáticos, con la finalidad de generar múltiples posibilidades de simulaciones del clima futuro, es decir se genera un escenario de cambio climático. Por ejemplo, cuando los resultados obtenidos con los Modelos de Circulación General se aplican en condiciones de cambio climático, dan lugar a escenarios de cambio climático para diversas variables proyectadas hacia diferentes horizontes (Conde y Gay, 2008).

En el contexto del cambio climático, los escenarios de cambio climático describen trayectorias plausibles de diferentes aspectos futuros que se construyen para investigar posibles consecuencias del cambio climático antropogénico, ya que los escenarios representan muchas de las principales fuerzas impulsoras, incluyendo procesos, impactos (físicos, ecológicos y socioeconómicos) y posibles respuestas que son importantes para la política de cambio climático. También se utilizan para explorar las implicaciones del cambio climático para la toma de decisiones (IPCC, 2014; Wayne, 2013).

En 1992 el IPCC publicó un primer conjunto de escenarios de cambio climático, denominado IS92, para el año 2000 lanzó una segunda generación de proyecciones con escenarios de emisión contenidos en su Reporte Especial sobre Escenarios de Emisiones (SRES, por sus siglas en inglés). Estos escenarios fueron utilizados en sus dos informes posteriores: el Tercer Informe de Evaluación (TAR, por sus siglas en inglés) en 2001 y el Cuarto Informe de Evaluación (AR4, por sus siglas en inglés) en 2007. Finalmente, en 2014, para el Quinto Informe de Evaluación (AR5, por sus siglas en inglés) se desarrollaron nuevos escenarios llamados Trayectorias de Concentraciones Representativas (Representative Concentration Pathways, RCPs) (IPCC, 2014; Wayne, 2013).

“El objetivo de trabajar con escenarios no es predecir el futuro, sino comprender mejor las incertidumbres y futuros alternativos, con la finalidad de considerar qué tan sólidas pueden ser las diferentes decisiones u opciones dentro de una amplia gama de futuros posibles.”

Fuente: IPCC Scenario Process for AR5 mencionado por Wayne (2013).

2.5 ESCENARIOS TRAYECTORIAS DE CONCENTRACIÓN REPRESENTATIVAS

Los escenarios denominados como Trayectorias de Concentración Representativas (Representative Concentration Pathways, RCPs), son conjuntos consistentes de proyecciones sólo de las componentes de forzamiento radiativo que sirven como insumos para la modelación climática. Proporcionan una descripción plausible del futuro, la cual se basa en escenarios socioeconómicos de cómo la sociedad crece, se desarrolla y cómo se utilizan las fuentes de energía. Estos escenarios son nombrados de acuerdo con el nivel de forzamiento radiativo hasta el año 2100. Las estimaciones de forzamiento radiativo están basadas en el forzamiento de gases de efecto invernadero y otros agentes de forzamientos (van Vuuren et al., 2011; RCP Database, 2009) (**Figura 10**).

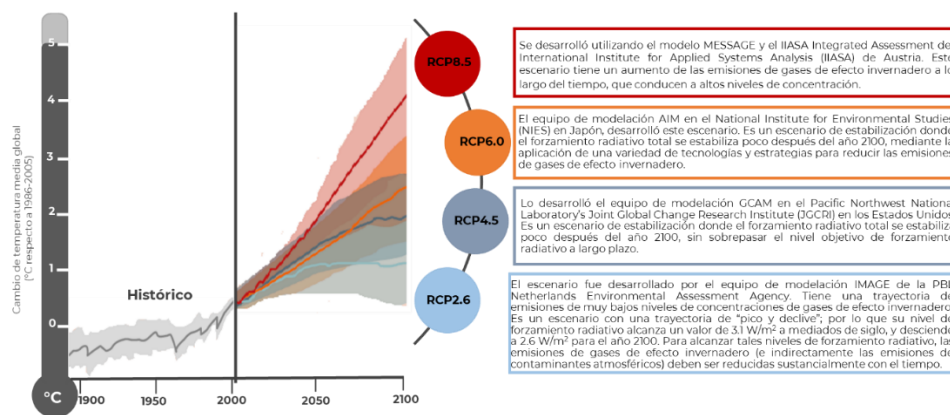


Figura 10. Incremento de temperatura media global histórica y proyectada para los cuatro RCPs de CMIP5²

Fuente: Elaborado y adaptado por CGACCE-INECC de Carabine y Lemma (2014), con información de Wayne (2013); RCP Database (2009)

² Ver sección 2.6 sobre el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (Coupled Model Intercomparison Project, CMIP)

En la **Tabla 2** se indican los cuatro escenarios RCPs, su forzamiento radiativo y el valor de concentración de CO₂ que alcanzarían para el año 2100 y la trayectoria que seguiría.

Tabla 2. Escenarios RCPs con su forzamiento radiativo y el valor de concentración de CO₂ que alcanzarían para el año 2100 y su trayectoria de CMIP5

Fuente: Tomado y modificado de van Vuuren et al. (2011)

Escenario	Forzamiento radiativo (W/m ²)	CO ₂ eq atmosférico (ppm)	Trayectoria
RCP8.5	8.5	>1370	En aumento después del año 2100
RCP6.0	6.0	850	Estabilización después del año 2100
RCP4.5	4.5	650	Estabilización después del año 2100
RCP2.6	2.6	490	Hay un pico antes del año 2100 y después declina

2.6 PROYECTO DE INTERCOMPARACIÓN DE MODELOS ACOPLADOS

Alrededor del mundo existen numerosos centros de modelación climáticos, cada uno de ellos desarrolla su propio modelo climático para llevar a cabo las simulaciones con los RCPs. Sin embargo, por practicidad los centros de modelación no ejecutan todos los modelos existentes con todos los RCPs, ya que se requiere de procesos computacionalmente complejos, por lo que las supercomputadoras de alto rendimiento pueden tardar varios meses en correr un modelo global para un determinado periodo de simulación (Charron, 2016; McWeeney y Hausfather, 2018).

Por lo tanto, para obtener el mayor conjunto posible de simulaciones, los centros de modelación han acordado ejecutar sus propios modelos con los diferentes RCPs y hacer disponibles las simulaciones resultantes al resto de la comunidad climática. Esta colaboración forma parte del Proyecto de Intercomparación de

Modelos Acoplados (Coupled Model Intercomparison Project, CMIP) (Charron, 2016), el cual surge desde el año 1995³.

El CMIP ha recopilado la información de la salida de los Modelos de Circulación General acoplados globales del océano y la atmósfera de diversos grupos de modelación en 5 fases: CMIP1, CMIP2, CMIP3, CMIP5 y CMIP6. Entre otros usos, estos modelos se utilizan para detectar efectos antropogénicos en los registros climáticos del siglo pasado, así como para proyectar cambios climáticos futuros debido al aumento de gases de efecto invernadero y aerosoles de origen antropogénico⁴



Figura 11. Interfaz de descarga de datos de CMIP5

Fuente: Captura de pantalla obtenida de <https://esgf-index1.ceda.ac.uk/search/cmip5-ceda/>; e información de Climateurope (2020)

Por medio de una interfaz web (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl/>; <https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/availability.html>), es posible acceder a diferentes simulaciones de los diferentes centros de modelación que forman parte de este proyecto (Figura 11). El conjunto CMIP es la columna vertebral de los resultados presentados en los informes del IPCC. A medida que se actualizan los modelos y escenarios de emisiones, también se actualiza el conjunto de simulaciones disponible a través de CMIP (Charron, 2016). Por ejemplo, para la publicación del Sexto Reporte del IPCC (AR6), los resultados presentados ya

³ <https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip/about-cmip.html>

⁴ https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip/overview_ms/ms_text.html

cuentan con los nuevos modelos de CMIP6 de última generación (<https://esgf-index1.ceda.ac.uk/search/cmip6-ceda/>). En CMIP6 comparado a CMIP5, hay un mayor número de grupos de modelación, de escenarios futuros, de experimentos realizados y hay diferencias en la sensibilidad climática⁵ (Figura 12).

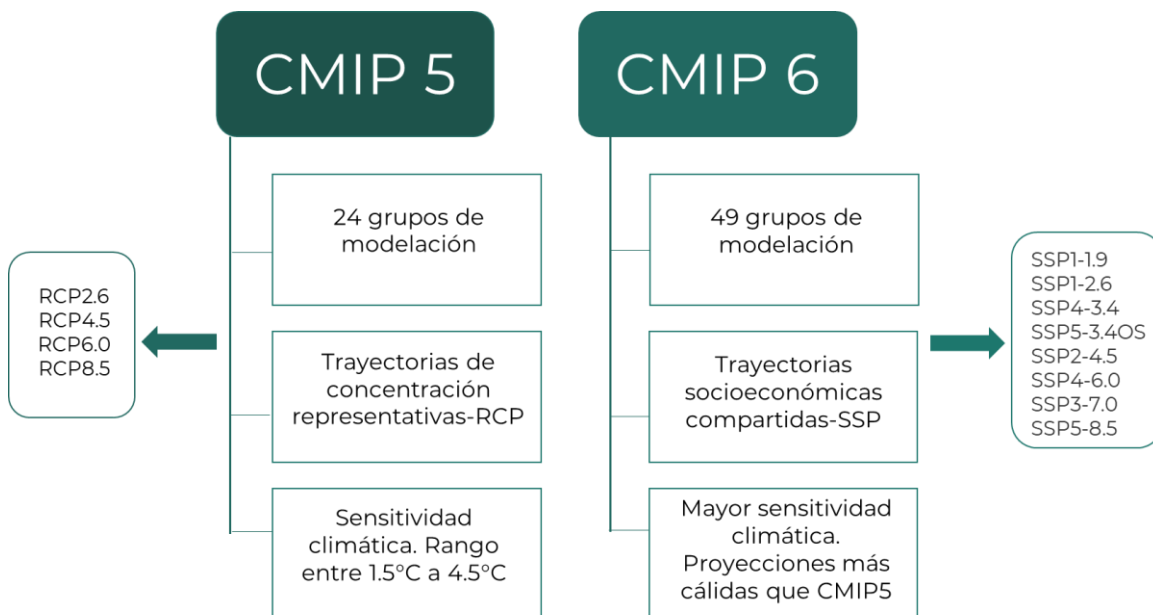


Figura 12. Principales diferencias entre CMIP5 y CMIP6

Fuente: Elaborado por CGACC-INECC con información de Hausfather (2019)

En AR5 se presentaron cuatro Trayectorias de Concentración Representativas; ahora estos escenarios tienen nuevas versiones en CMIP6 (Figura 13). Esta actualización de escenarios se denomina “Trayectorias Socioeconómicas Compartidas” (Shared Socioeconomic Pathways, SSPs). En CMIP6 las nuevas versiones de los escenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, y RCP8.5 ahora son llamados SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP4-6.0, y SSP5-8.5, cada uno de los cuales resulta en niveles de forzamiento radiativo similares para el año 2100 como sus predecesores en AR5. Asimismo, estos nuevos escenarios ofrecen una selección más amplia de futuros socioeconómicos posibles, al incluir nuevas posibles trayectorias los escenarios SSP3-7.0, SSP4-3.4, SSP5-3.4OS y el SSP1-1.9 (Hausfather, 2019) (Figura 14).

⁵La sensibilidad climática es el calentamiento esperado a largo plazo después de duplicar las concentraciones de CO₂ atmosférico. Es uno de los indicadores más importantes de qué tan severos serán los impactos del calentamiento futuro. La “sensibilidad” es algo que surge de las simulaciones físicas y biogeoquímicas dentro de los modelos climáticos; no es algo que se establezca explícitamente por los grupos de modelación (Hausfather, 2019).

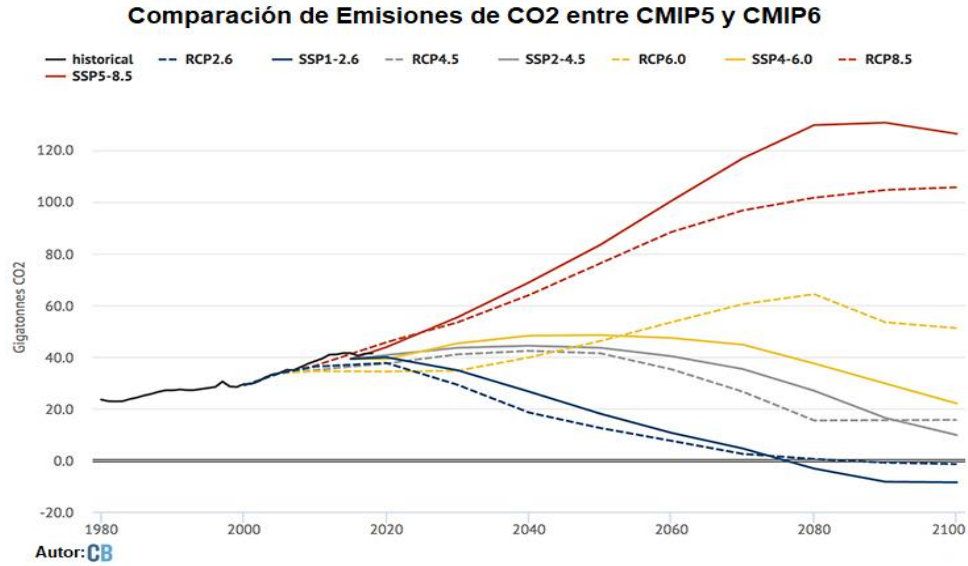


Figura 13. Comparación de las emisiones de CO₂ en los antiguos escenarios de RCPs (líneas discontinuas) y sus nuevas contrapartes SSPs (líneas continuas). Los nuevos escenarios SSPs comienzan en el año 2014, mientras que los antiguos RCPs comenzaron en el año 2007

Fuente: Tomada de Hausfather (2019)

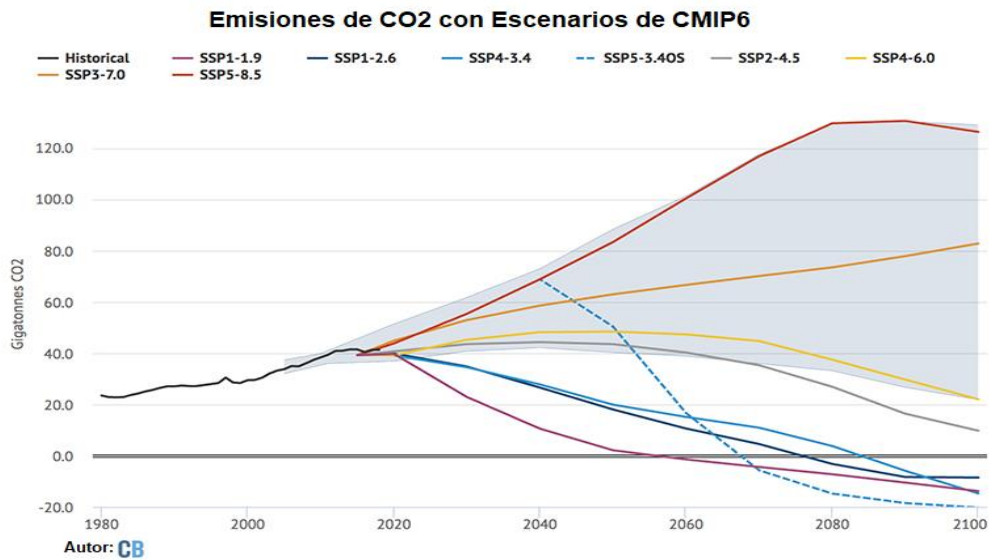


Figura 14. Escenarios futuros de emisiones de CO₂ presentados en CMIP6, así como emisiones históricas de CO₂ (en negro). El área sombreada representa el rango de escenarios de referencia sin políticas

Fuente: Tomada de Hausfather (2019)

2.7 INCERTIDUMBRE EN LAS PROYECCIONES CLIMÁTICAS

En general, las fuentes de incertidumbre de las proyecciones de los escenarios de cambio climáticos son múltiples. El sistema climático es complejo, lo cual hace poco posible representarlo en su totalidad por medio de un modelo numérico; dichas representaciones contienen una serie de supuestos y parametrizaciones que cada centro de modelación climática aborda de manera diferente (Santoso, Idinoba e Imbach, 2008). Es por esto que se debe de considerar que las proyecciones futuras del clima cuentan con diversos elementos de incertidumbre; existen tres fuentes principales de incertidumbre en las proyecciones climáticas: la variabilidad natural del clima, la generada por los modelos y la debida a las trayectorias de las emisiones futuras de gases de efecto invernadero (Figura 15).

La variabilidad interna es aproximadamente constante a lo largo del tiempo, y las demás incertidumbres aumentan con el tiempo, pero a ritmos diferentes (Charron, 2016; Hawkins, 2013; Benjamin y Budescu, 2018). Además, debido a las interacciones entre estas incertidumbres, los modelos generalmente se ejecutan varias veces con diferentes condiciones iniciales y parametrizaciones, lo que puede generar un amplio rango de resultados (Benjamin y Budescu, 2018).

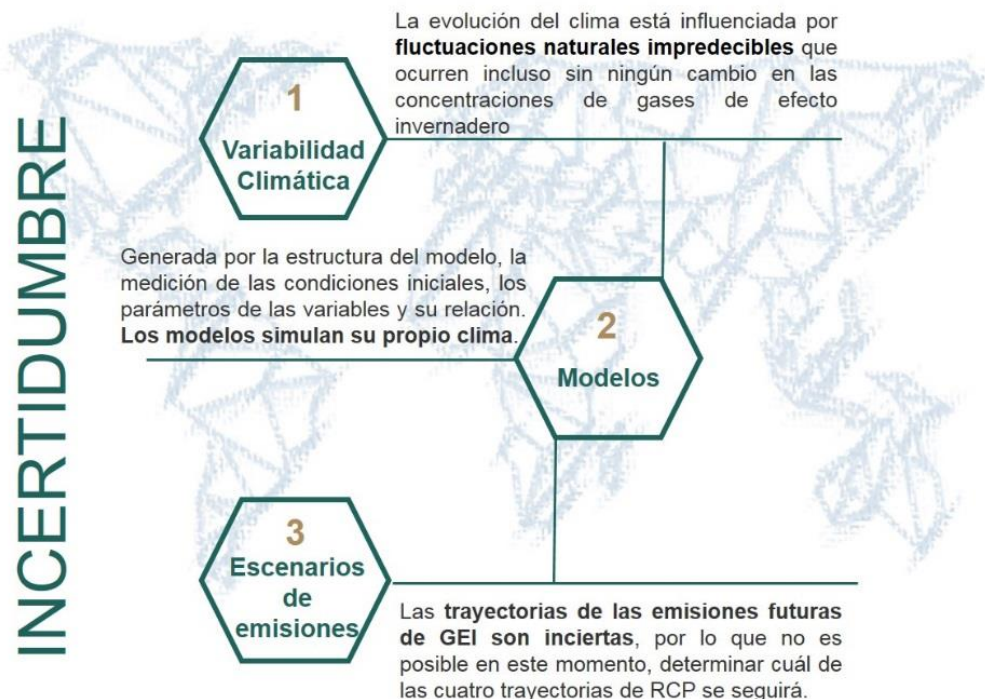


Figura 15. Principales fuentes de incertidumbre en los modelos climáticos
Fuente: Elaborado por CGACCE-INECC con información de Charron (2016); Puma y Gold (2011)

La importancia relativa de cada fuente de incertidumbre depende de la escala de tiempo considerada. A corto plazo, la variabilidad natural será la fuente de incertidumbre más importante, ya que puede ocultar la señal de cambio climático en décadas. A largo plazo la incertidumbre asociada a los escenarios de emisiones es más importante, puesto que se necesitan aproximadamente 30 años para que cualquier diferencia entre los escenarios de emisiones actuales tenga un impacto apreciable en el clima. Los escenarios divergen alrededor del año 2030, y para el año 2050 ya hay diferencias más claras; además dado el alto nivel de incertidumbre asociado con la evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero, se deben de considerar todos los futuros plausibles (Figura 14). Por otra parte, en el caso de los modelos la incertidumbre es considerable independientemente de la escala de tiempo en la que se tomen las decisiones (Charron, 2016).

3. INTEGRACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN HERRAMIENTAS PARA LA TOMA DE DECISIONES

En los capítulos anteriores se revisaron de manera general los conceptos básicos de cambio climático y escenarios de cambio climático, con la finalidad de que los tomadores de decisiones y usuarios en general comprendan esta información y la incluyan en su quehacer; de esta manera se podrán aumentar las capacidades para la evaluación de información climática en el contexto de cambio climático en los diversos ámbitos de interés.

La información generada con los insumos de los diferentes Modelos de Circulación General y RCPs se puede clasificar en dos tipos de formatos: simple e integral. El formato simple consiste en presentar los resultados de una manera espacial, utilizando cálculos poco complejos mediante Sistemas de Información Geográfica, así como gráficos. En este caso se podría realizar una visualización a través de mapas de la comparación entre la climatología histórica y las proyecciones de cambio climático, o bien hacer una comparación del ciclo anual histórico y bajo algún escenario. El formato integral, se refiere a la incorporación de las proyecciones a índices específicos, lo cual puede requerir un cálculo mayor; por ejemplo, el cálculo de índices bioclimáticos en condiciones históricas o bajo algún escenario.

La selección de las dos opciones de formatos serán el resultado de las preferencias y experiencia del usuario, es decir, del resultado final que se quiera obtener para la toma de decisiones. Hay que considerar que la elección de los productos a obtener y un formato de información adecuado, puede garantizar que la información sea comprensible por el usuario y, por tanto, sea utilizada de forma eficaz.

Si bien la información climática es fundamental para la toma de decisiones bien informada, ésta sólo es uno de muchos aspectos a considerar, puesto que existen otros factores como los cambios en el uso de suelo, cambios demográficos, los avances tecnológicos, los procesos sociales y económicos, la degradación diferenciada de los recursos naturales en el territorio, la vulnerabilidad social, entre otros. Por lo que la información climática debe de integrarse desde una perspectiva multidimensional en combinación con otras herramientas de apoyo; es así que, incluir un contexto integral permitirá abarcar un panorama más

amplio de las problemáticas relacionadas al cambio climático y de esta manera guiar la toma de decisiones a la implementación de acciones en el territorio.

Para el uso de la información de escenarios de cambio climático, se debe tomar en cuenta la selección y manejo de los insumos, así como su aplicación en las herramientas para la toma de decisiones. Lo anterior debe estar basado en el objetivo que se plantee, es decir, definir **¿cuál es el propósito de realizar un análisis o evaluación con escenarios de cambio climático?** y **¿qué utilidad se le quiere dar a esa información?**

En esta sección se proporcionará información metodológica básica para que el usuario incorpore los escenarios de cambio climático como un instrumento en el proceso de toma de decisiones ante problemáticas en el contexto de cambio climático. Dicha información se divide en dos tipos de recomendaciones metodológicas clave: 1) los requerimientos generales y 2) los requerimientos específicos.

3.1. REQUERIMIENTOS GENERALES

La información que aquí se presenta son los requerimientos iniciales que un usuario debe de tomar en cuenta para realizar un análisis con escenarios de cambio climático.

3.1.1 DESCARGA DE DATOS

El insumo principal para incorporar los escenarios de cambio climático son los datos de las distintas variables climáticas. Dichos datos pueden ser descargados de plataformas que contengan bases de datos procesados o sin procesar, pero se recomienda que sean de CMIP5, o los más recientes CMIP6, que son las fuentes oficiales a nivel mundial. Como se mencionó anteriormente, CMIP5⁶ es la plataforma donde convergen todos los resultados de los diferentes grupos de modelación; sin embargo, cada país o grupo de modelación puede procesar esos datos según su propósito.

En México, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) tiene disponible la base de datos procesada para México de CMIP5, la cual consta de: anomalías mensuales de cuatro Modelos de Circulación General (CNRM-CM5⁷, HADGEM2-ES⁸, MPI-ESM-LR⁹, GFDL-CM3¹⁰), para tres

⁶<https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl/>; <https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/availability.html>

⁷CNRM-CM5: Centre National de Recherches Météorologiques-Climate Model version 5

⁸HADGEM-ES: Hadley Centre Global Environment Model version 2-Earth-System

⁹MPI-ESM-LR: Max Planck Institute for Meteorology-Earth System Model-Low Resolution

¹⁰GFDL-CM3: Geophysical Fluid Dynamics Laboratory-Climate Model version 3

horizontes temporales (2015-2039, 2045-2069 y 2075-2099) y los RCP4.5 y RCP8.5, la liga del sitio es:

<https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/deltas-de-cambio-anomalias-de-4-modelos-de-circulacion-global>¹¹

Se tienen disponibles 1,152 capas climáticas mensuales (en los formatos “tif” y “txt”) las cuales están representadas en el Sistema de Referencia Geográfica, datum WGS84, con cobertura geográfica para el territorio continental comprendido al interior de las coordenadas geográficas extremas -75° de longitud -5° de latitud y -120° 30' de longitud -35° de latitud.

Es importante destacar que existen diversas fuentes de información para descarga de datos de los escenarios de cambio climático, por lo que se recomienda identificar las características útiles de la información para el propósito de cada usuario, y entender el origen y el procesamiento de dicha información.

3.1.2 TIPOS DE VARIABLES

Por lo general las variables básicas que se utilizan para realizar análisis de proyecciones climáticas para la toma de decisiones son la temperatura y la precipitación, aunque pueden existir otras variables; lo importante es que los datos para poder proyectarlas a futuro estén disponibles. En el caso de la variable de temperatura, generalmente se utiliza la temperatura media, sin embargo, un análisis de la temperatura máxima y la temperatura mínima proporcionará más información sobre el comportamiento de las temperaturas diurnas y nocturnas. Para el caso de la precipitación, generalmente se utiliza el acumulado o el promedio. Lo anterior dependerá de lo que se quiera comunicar y del tipo de análisis que se requiera realizar.

3.1.3 ESCALA Y RESOLUCIÓN TEMPORAL

Las escalas temporales abarcan desde períodos estacionales hasta geológicos de hasta cientos de millones de años (IPCC, 2013). Para la escala temporal se debe considerar que, para las variables climáticas los datos de los Modelos de Circulación General más comunes son de resolución anual y mensual, con los cuales se pueden realizar diferentes tipos de análisis; se puede llevar a cabo un análisis promediando los valores mensuales para los meses de secas o lluvias, o bien para representar el ciclo anual de un sitio para un periodo de 30 años. Aunque una resolución más específica, como la diaria se puede emplear, por

¹¹Cabe mencionar que en secciones siguientes se proporcionarán mayores especificaciones de esta base de datos.

ejemplo, en análisis de eventos climáticos extremos, sin embargo, este tipo de datos tiene una mayor incertidumbre que los promedios anuales o mensuales. Es importante recordar que la confiabilidad de los datos va disminuyendo conforme se tiene más detalle en las simulaciones de los modelos, debido a que se va adicionando la falta de conocimiento del sistema climático para ser reproducido, es decir hay una mayor incertidumbre.

Por otra parte, la escala temporal dependerá de lo que se quiera analizar y el nivel de detalle que se quiere obtener; sin embargo, hay que considerar que cuando se hace referencia a proyecciones futuras esto significa tener resultados para periodos de mínimo 30 años o hasta los próximos 70 u 80 años a futuro, pero no se pueden proyectar cambios futuros de semanas o meses, ya que eso sería una predicción o un pronóstico meteorológico o climatológico, respectivamente.

3.1.4 ESCALA ESPACIAL

Las escalas espaciales pueden abarcar distintas extensiones de superficie, desde locales, con una extensión de 100,000 km²; regionales entre 100,000 y 10 millones de km², o hasta continentales con extensiones de 10 a 100 millones de km² (IPCC, 2013). La selección de estos niveles de escalas dependerá de la evaluación que se requiera realizar en el contexto de cambio climático, por ejemplo, en unidades administrativas de un país como municipios o entidades federativas, unidades geográficas (cuencas, subcuencas, planicies, entre otros), zonas climáticas, zonas costeras, nichos ecológicos o comunidades marginales (Conde y Gay, 2008).

Es así, que las características físicas (el tamaño y la geografía) y su aplicación (recursos hídricos, agricultura, turismo, entre otros) desempeñan un papel en la determinación de las necesidades de desarrollo de los escenarios de cambio climático (Puma y Gold, 2011). Por ejemplo, debido a que las cuencas hidrográficas permiten entender espacialmente el ciclo hidrológico, así como cuantificar e identificar los impactos de las actividades humanas que afectan la calidad y cantidad de agua, la adaptación de los ecosistemas y la calidad de vida de sus habitantes (Cotler et al., 2013), éstas podrían ser la unidad territorial adecuadas para realizar un análisis de la gestión de los recursos hídricos en el contexto de cambio climático; y así comprender la complejidad entre el clima y la superficie terrestre.

No hay que olvidar que, por su resolución espacial, los Modelos de Circulación General tienen limitaciones por lo que no es viable realizar alguna proyección a futuro a una muy alta resolución espacial, por ejemplo, colonias o barrios.

3.2 REQUERIMIENTOS ESPECIFICOS

Los requerimientos específicos que se deben tomar en cuenta para los análisis con escenarios de cambio climático se ejemplificarán con una de las fuentes oficiales de datos de proyecciones futuras para México, la cual ha sido utilizada en el desarrollo de herramientas para la toma de decisiones como el Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático (ANVCC)¹² y es actualmente la utilizada por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático¹³. Este ejemplo, permitirá identificar mensajes clave que se recomiendan al utilizar escenarios de cambio climático para la toma de decisiones; las cuales se deben sumar a los requerimientos generales. Cabe mencionar que lo que se presenta aquí representa una visión institucional del manejo de información y es únicamente una opción más, de las diversas metodologías que existen en la literatura.

3.2.1 SELECCIÓN DE MODELOS CLIMÁTICOS

Uno de los desafíos de los escenarios de cambio climático es la selección del número de modelos climáticos disponibles (Ross y Najjar, 2019); ya que el número de GCMs ha aumentado con el paso del tiempo. Por ejemplo, CMIP3 contiene resultados de 25 diferentes GCMs, mientras que CMIP5 tiene 61 GCMs diferentes (Lutz et al., 2016). Además, todos los modelos simulan el sistema climático global con diferentes alcances (atmósfera, océano, hielo marino y componentes de la superficie terrestre), escalas (temporales y espaciales) y complejidad (esquemas de parametrización) (Fenech, Comer y Gough, 2007). Esto significa que, en general, responderán de manera diferente para un mismo RCP, es decir, dos GCMs diferentes pueden proporcionar diferentes valores de calentamiento global para el mismo escenario RCP (Giorgi, 2010). Entonces **¿cómo hacer una selección de modelos?**

Debido a la gran cantidad de modelos climáticos y los recursos computacionales disponibles, se hace casi imposible incluir todos los modelos para estudios en el contexto de cambio climático. Para efectos prácticos, se selecciona un modelo climático o un pequeño conjunto para hacer las evaluaciones. Aunque es importante utilizar un conjunto que sea representativo de la región de interés y así mostrar un amplio rango de incertidumbre, la selección de modelos que se incluirán en este conjunto no es sencilla y se puede basar en diferentes criterios (Lutz et al., 2016).

Los criterios de selección pueden estar en función del desempeño del modelo, es decir, su habilidad para simular el clima presente y del pasado cercano (Pierce et

¹²<https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx>

¹³<https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/deltas-de-cambio-anomalias-de-4-modelos-de-circulacion-global>

al., 2009; Biemans et al., 2013); o bien con base en la disponibilidad de las variables, o tomando en cuenta la independencia de los modelos para generar una selección de un conjunto mayor, donde los modelos seleccionados son representativos del conjunto más grande (Evans et al., 2013).

Al final, es importante resaltar que el propósito de generar resultados con uno o un conjunto de modelos es cubrir un amplio rango de incertidumbre en los escenarios de cambio climático, para proporcionar la mayor información posible, la cual puede ser crucial para la evaluación en el contexto de cambio climático, así como para la toma de decisiones. Es una forma de generar representatividad de resultados (Conde y Gay, 2008).

Para la selección de modelos, no se debe de perder el objetivo y el uso que se le dará a la información con escenarios de cambio climático; dicha selección debe estar justificada y consensuada (Knutti et al. 2010 citado en Ruane y McDermid, 2017), y así evitar una selección poco o nada útil.

Caso de México

México es usuario de los datos generados por los diferentes grupos de modelación climática, los cuales han evolucionado a lo largo del tiempo.

Como parte de la Quinta Comunicación Nacional, diversas instituciones nacionales llevaron a cabo una actualización de escenarios de cambio climático para México utilizando datos de 14 Modelos de Circulación General que fueron considerados en el Quinto Reporte del IPCC. En esta actualización se lograron identificar limitaciones de los modelos para reproducir algunos procesos físicos que modulan la variabilidad del clima regional de México (Cavazos et al., 2013). Partiendo de esos resultados Cavazos y De Grau (2014) evaluaron cuatro Modelos de Circulación General el CNRM-CM5, HADGEM2-ES, MPI-ESM-LR, MRI-CGCM3¹⁴ para México, los cuales reprodujeron diferentes aspectos de la climatología tropical relevante para el país. Cabe mencionar que este tipo de selección de modelos se ha utilizado, por ejemplo, en Fenech, Comer y Gough (2007) donde hubo una selección de cinco modelos de un grupo de 72, considerando el criterio de desempeño.

Actualmente para México, el INECC¹⁵ tiene disponibles resultados para cuatro Modelos de Circulación General, y variables de temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación, con una resolución de 30 segundos de longitud por 30 segundos de latitud (~1 x 1 km²) (Figura 16). Estos modelos forman parte de los estudios previos realizados en Comunicaciones Nacionales, como en Cavazos y De Grau (2014) quienes utilizaron el modelo francés, el inglés y el alemán; mientras que el modelo estadounidense ha sido seleccionado desde la Primera Comunicación Nacional (Conde y Gay, 2008). Este

¹⁴MRI-GCM3: Meteorological Research Institute-Atmospheric-General Circulation Model version 3

¹⁵<https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/deltas-de-cambio-anomalias-de-4-modelos-de-circulacion-global>

conjunto de modelos, en su mayoría, reproducen el clima regional de México (criterio de desempeño).

Es importante destacar que:

- En la selección de modelos se debe tener una consistencia en su uso a nivel regional, si no existe un consenso entre el uso de modelos, es posible que haya una amplia gama de resultados, pero que no son comparables entre sí, lo que podría complicar la toma de decisiones.
- Se recomienda el uso de más de un Modelo de Circulación General, ya que, si se utiliza uno sólo, es posible que los resultados con escenarios RCPs se tomen como un pronóstico, por lo que no se cubriría un amplio rango de incertidumbre para proporcionar la mayor información posible.

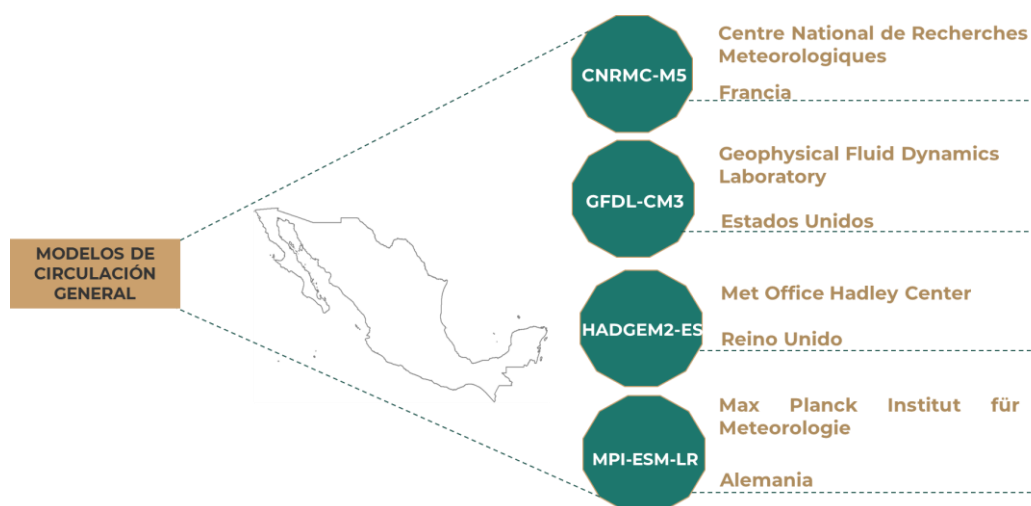


Figura 16. Modelos de Circulación General incluidos en la base de datos del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

Fuente: Elaborada por CGACCE-INECC

3.2.2 SELECCIÓN DEL PERIODO BASE

Después de la selección de los modelos, lo siguiente a responder es, **¿qué periodo de referencia debe utilizarse para comparar los resultados de las simulaciones futuras de los diferentes modelos?** (Liersch et al., 2020). Se define al periodo de referencia o base como el estado contra el cual se mide el cambio, es decir, es el período con el cual se calculan anomalías¹⁶. Una anomalía es la diferencia de una observación respecto a un periodo de referencia (observación menos el promedio respecto al periodo de referencia). Las anomalías positivas

¹⁶https://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/glossary/glossary_b.html

implicarán un incremento mientras que las anomalías negativas serán de decremento respecto al periodo de referencia¹⁷.

Los periodos de referencia se pueden elegir de manera arbitraria o basarse en estándares ya existentes. El IPCC recomienda utilizar un periodo de 20 años como referencia; en el Quinto Reporte se usó el periodo 1986-2005 y para el Sexto Reporte se está utilizando el periodo 1995-2014. Por otro parte, la Organización Meteorológica Mundial recomienda utilizar un período de 30 años como el clima normal y como referencia para monitorear la variabilidad y el cambio climático a largo plazo. Este periodo de referencia se actualiza cada 30 años, actualmente el periodo utilizado es el 1981-2010, y próximamente se transitará al 1991-2020. Sin embargo, el periodo de referencia no se debe confundir con las normales climatológicas extraídas de datos observados de estaciones meteorológicas (clima observado), los cuales se utilizan para caracterizar la climatología de un lugar o para definir anomalías del clima observado (Liersch et al., 2020; Charron, 2016) (ver Cuadro 1).

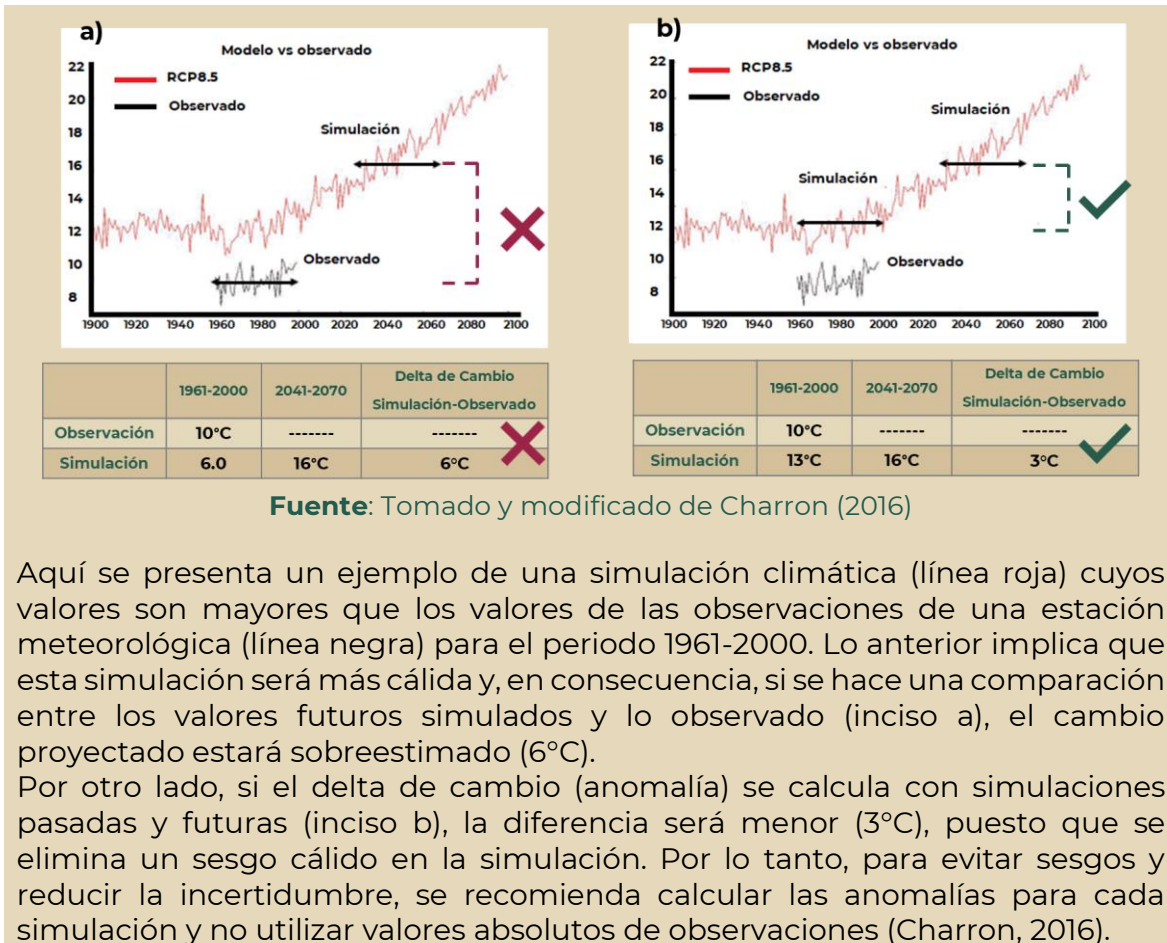
Aunque estos periodos de referencia estándar están bien definidos y son utilizados por diferentes investigadores a nivel global, no es estricto el uso de los mismos. De acuerdo con Liersch et al. (2020) definir periodos de referencia flexibles con más de 30 años, podría llevar a tener una perspectiva a más largo plazo para cuantificar con mayor confianza la variabilidad de referencia histórica al desarrollar estrategias de adaptación. El uso flexible de los periodos de referencia puede ser una solución para adaptar mejor la información a las necesidades de los tomadores de decisiones.

No hay que olvidar que el periodo de referencia también debe de estar sujeto a las necesidades de lo que se tenga como objetivo, o bien definirlo con base en la comparación de resultados.

Cuadro 1. Simulaciones de modelos versus observaciones climáticas

Los escenarios de cambio climático se construyen a partir de simulaciones climáticas, por lo que se van a comparar valores simulados para el pasado (periodo de referencia o periodo base) con valores simulados para el futuro. Por lo tanto, las proyecciones climáticas **NO** se deben de comparar directamente con datos observados de estaciones meteorológicas, ya que las simulaciones son diferentes o tienen sesgos en comparación con lo “actual” y no reproducen en su totalidad al clima observado (Charron, 2016).

¹⁷<https://www.ncdc.noaa.gov/monitoring-references/dyk/anomalies-vs-temperature>



Aquí se presenta un ejemplo de una simulación climática (línea roja) cuyos valores son mayores que los valores de las observaciones de una estación meteorológica (línea negra) para el periodo 1961-2000. Lo anterior implica que esta simulación será más cálida y, en consecuencia, si se hace una comparación entre los valores futuros simulados y lo observado (inciso a), el cambio proyectado estará sobreestimado (6°C).

Por otro lado, si el delta de cambio (anomalía) se calcula con simulaciones pasadas y futuras (inciso b), la diferencia será menor (3°C), puesto que se elimina un sesgo cálido en la simulación. Por lo tanto, para evitar sesgos y reducir la incertidumbre, se recomienda calcular las anomalías para cada simulación y no utilizar valores absolutos de observaciones (Charron, 2016).

Para México, por ejemplo, el INECC cuenta con la cartografía de clima actual o base de 1950-2000 por mes (**Figura 17**), con base en el WorldClim-Global Climate Data¹⁸, con resolución espacial de 30 segundos de longitud por 30 segundos (~1 x 1 km²) de latitud en formatos “tif” y “txt”, con el cual se obtuvieron anomalías de cambio. Este periodo base es mayor a 30 años, lo cual garantiza una caracterización de la variabilidad climática histórica (Liersch et al., 2020).

Este insumo ha sido la base para diferentes herramientas como el Atlas Nacional de Vulnerabilidad y Cambio Climático y diversos instrumentos de la política pública en la toma de decisiones para México.

¹⁸<https://www.worldclim.org/>

Cartografía de clima actual o base (1950- 2000), WorldClim Global Climate Data, con resolución espacial de 30" de longitud por 30" de latitud

VARIABLES MENSUALES DE:			
Precipitación	Temperatura máxima	Temperatura media	Temperatura mínima
ENERO	ENERO	ENERO	ENERO
FEBRERO	FEBRERO	FEBRERO	FEBRERO
MARZO	MARZO	MARZO	MARZO
ABRIL	ABRIL	ABRIL	ABRIL
MAYO	MAYO	MAYO	MAYO
JUNIO	JUNIO	JUNIO	JUNIO
JULIO	JULIO	JULIO	JULIO
AGOSTO	AGOSTO	AGOSTO	AGOSTO
SEPTIEMBRE	SEPTIEMBRE	SEPTIEMBRE	SEPTIEMBRE
OCTUBRE	OCTUBRE	OCTUBRE	OCTUBRE
NOVIEMBRE	NOVIEMBRE	NOVIEMBRE	NOVIEMBRE
DICIEMBRE	DICIEMBRE	DICIEMBRE	DICIEMBRE

Figura 17. Cartografía de clima actual o base (1950-2000). WorldClim-Global Climate Data¹⁹, con resolución espacial de 30" de longitud por 30" de latitud
Fuente: Modificado de INECC (2017)

Por ejemplo, para conocer cuál será la temperatura media en el mes de febrero para el modelo CNRMC-M5, escenario RCP8.5 y horizonte 2015-2039, es decir la Proyección total para CNRMC-M5_RCP8.5_2015-2039, se tendría que hacer el siguiente cálculo:

$$T_{med_{feb1950-2000}} + \Delta T_{med_{febCNRMC-M5_RCP8.5_2015-2039}} = \text{Proyección Total}_{CNRMC-M5_RCP8.5_2015-2039}$$

Donde:

$T_{med_{feb1950-2000}}$ es el clima actual (reanálisis²⁰ de alta resolución) y $\Delta T_{med_{febCNRMC-M5_RCP8.5_2015-2039}}$ es la anomalía (delta de cambio) de la proyección seleccionada. En la anomalía ya está incluido el cálculo que se realizó entre el periodo de referencia histórico simulado (1950-2000) y el clima futuro, ambos con el modelo seleccionado. De esta manera, únicamente al clima actual se le suma la delta de cambio para saber cuál será la temperatura en el mes de febrero: $21^{\circ}\text{C} + 2^{\circ}\text{C} = 23^{\circ}\text{C}$.

¹⁹WorldClim es una base de datos de datos meteorológicos y climáticos globales de alta resolución espacial. Estos datos se pueden utilizar para mapeo y modelado espacial. Se puede descargar datos meteorológicos y climáticos en rejillas para conocer las condiciones históricas (casi actuales) y futuras (<http://www.worldclim.org/>).

²⁰Los reanálisis combinan observaciones pasadas con modelos para generar series de tiempo consistentes de múltiples variables climáticas, y proporcionan una descripción completa del clima observado. Para construir un reanálisis se utilizan datos de informes de radiosondas, estaciones, satélites, boyas, aeronaves y barcos (<https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis;https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/atmospheric-reanalysis-overview-comparison-tables>, consultado en diciembre de 2021)

Cabe señalar que para generar esta información es necesario descargar y utilizar los datos de las anomalías por modelo²¹ y del clima actual²².

3.2.3 SELECCIÓN DE ESCENARIOS RCPs

Después de la selección de modelos y del periodo de referencia, es necesario determinar **¿qué escenario RCP utilizar?** Es fundamental reconocer que los escenarios no se perciban como predicciones, ya que no están asociados con probabilidades, si no que los escenarios sean utilizados para presentar a los tomadores de decisiones posibles resultados de una amplia gama de opciones plausibles, con la finalidad de que elaboren decisiones informadas (Schwalm, Glendon, y Duffy, 2020). En CMIP5, se cuenta con cuatro posibles trayectorias RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 (ver sección 2.5). Estos escenarios se consideran representativos de la literatura científica; incluyen un escenario de mitigación (RCP2.6), dos escenarios de estabilización media (RCP4.5/RCP6) y un escenario de emisión más agresivo (RCP8.5) (van Vuuren et al., 2011).

Aunque el escenario RCP2.6 es técnicamente factible, uno de sus supuestos clave es la participación de todos los países para tomar acciones de mitigación, lo cual puede estar alejado de la realidad. Dado que es necesario desarrollar escenarios de cambio climático robustos y realistas para planificar las medidas de adaptación es posible descartar este RCP (Lutz et al., 2016), a menos que se requiera incluirlo al llevar a cabo algún análisis con escenarios de cambio climático. Por lo tanto, los RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 quedan como opciones para utilizarse.

En el caso de México, el INECC muestra resultados de los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, lo cual se traduce en tener un escenario de estabilización media y un escenario de altas emisiones, respectivamente. La selección anterior es suficiente, ya que como lo indica Lutz et al. (2016), con estos escenarios se cubre todo el rango de posibles trayectorias (incluida la del RCP6.0), incluso éstos son los más utilizados por la comunidad climática (Joyce y Coulson, 2020; San José et al., 2016). Sin embargo, este mismo Instituto ha desarrollado herramientas basadas únicamente en el RCP8.5, como el Atlas Nacional de Vulnerabilidad y Cambio Climático, lo cual resulta igualmente factible; ya que, aunque este es el escenario más extremo en el uso de combustibles fósiles, de acuerdo con Schwalm, Glendon, y Duffy (2020), es una herramienta útil para las políticas de corto y mediano plazo; puesto que las emisiones de RCP8.5 son consistentes con las emisiones históricas totales acumuladas de CO₂. Por lo tanto, es la mejor combinación para mediados de siglo bajo las políticas actuales y declaradas con niveles aun altamente plausibles de emisiones de CO₂ al año 2100.

²¹<https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/deltas-de-cambio-anomalias-de-4-modelos-de-circulacion-global>

²²<https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/cartografia-de-clima-actual-o-base-1950-2000>

Comunicar los resultados de los escenarios de cambio climático no es una tarea fácil en el ámbito de tomadores de decisiones, ante un amplio rango de posibles resultados; sin embargo, para subsanar este problema se puede optar por proporcionar resultados a través de estimaciones de rangos (Lutz et al., 2016), utilizando valores máximos y mínimos (Fenech, Comer y Gough, 2007) de los resultados de modelos y para cada escenario. Los rangos pueden mejorar la interpretación de los resultados y mejorar la idoneidad de las medidas adoptadas para abordar los posibles impactos relacionados con el clima (Joslyn y LeClerc, 2012 citado en Lutz et al., 2016). En este caso no sólo es un valor para un modelo y un escenario, sino que son posibles valores acotados.

3.2.4 SELECCIÓN DE HORIZONTES

Dentro de un marco de toma de decisiones, se debe considerar la escala de tiempo del horizonte de planificación para considerar la importancia de las diferentes fuentes de incertidumbre; ya que tendrá un gran impacto en el tipo de información climática que sería más apropiada (Lutz et al., 2016). El IPCC, reconoce dos horizontes temporales de importancia del orden de 20 años o hasta de 100 años o más, y destaca que el horizonte temporal adecuado para los escenarios depende del uso que se les dé, puede ser por ejemplo un horizonte cercano (2030), medio (2050) o lejano (2100)²³, lo cual nuevamente obliga a recordar el objetivo que se persigue y la información que se pretende transmitir ante un análisis con escenarios de cambio climático.

Para la toma de decisiones es necesario responder a problemáticas inmediatas o bien planificar el futuro a corto plazo, que pueden ser días, meses o algunos años. Una gestión a corto plazo es relevante, sobre todo en aquellos países en desarrollo, como México, por lo que es necesario generar capacidades adaptativas ante impactos en el contexto de cambio climático. Sin embargo, hay situaciones que necesitan una visión a largo plazo, por ejemplo, proyectos de infraestructura, como embalses de riego, desarrollos costeros y defensas contra inundaciones, entre otras (Nissan et al., 2019).

La investigación sobre el cambio climático a más largo plazo ayuda a priorizar políticas que influyan en el discurso sobre ese mismo tema (Nissan y Conway, 2018) y también puede implicar la toma de decisiones a más corto plazo, es decir para un horizonte cercano. Los horizontes de tiempo para la mayoría de las decisiones a más largo plazo consideran desde varios años hasta dos o tres décadas. Por ejemplo, en la [Figura 18](#) se muestran los horizontes temporales aproximados de la toma de decisiones en el sector agrícola.

²³<https://archive.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg2/index.php?idp=129>



Figura 18. Ejemplo de los horizontes temporales para la toma de decisiones en el sector agrícola

Fuente: Elaborado por CGACCE-INECC con base en Nissan et al. (2019)

El horizonte de tiempo está relacionado con el periodo de tiempo entre el momento de la toma de decisión y hasta el tiempo en que se puede tomar como válida. En un periodo de 1 a 2 semanas se pueden llevar a cabo una serie de actividades en campo, mientras que de 2 a 3 meses es clave la selección de cultivos antes de la siembra con base en los rendimientos esperados. En cambio, el establecer la dirección de políticas, educación, capacitación, investigación y desarrollo que se llevan a cabo a nivel gubernamental, requieren una visión a largo plazo de 10 a 30 años, que en el contexto de cambio climático correspondería a un horizonte cercano o incluso un horizonte medio (Nissan et al., 2019).

Por lo anterior, es importante resaltar que **“la incertidumbre en las proyecciones climáticas no es un impedimento para tomar decisiones, para objetivos a corto plazo es necesaria una visión a largo plazo”** (Lutz et al. 2016).

Es así que el INECC en su base de datos cuenta con los periodos 2015-2039 (cercano), 2045-2069 (medio) y 2075-2099 (lejano); se espera que estos horizontes reflejen las necesidades de los responsables de la toma de decisiones. Cabe mencionar que el consenso de utilizar algún horizonte de proyecciones permitiría la comparación de resultados, dada la consistencia de los resultados obtenidos en estudios con diferentes necesidades y por tanto fortalecería la toma de decisiones.

3.2.5 RESOLUCIÓN ESPACIAL DE LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

La resolución de los Modelos de Circulación General puede no ser suficiente para la evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático, debido a que se requiere un mayor detalle a una escala regional (SEMARNAT-INECC, 2018). Los procesos de reducción de escala (downscaling) conducen a tener resoluciones de escala espacial menores a 100 km x 100 km y escalas temporales menores a la mensual. En este sentido existen dos tipos de downscaling: el dinámico y el estadístico.

El downscaling dinámico se refiere al uso de modelos similares a los GCMs, pero con una resolución mayor (20-50 km, por ejemplo), es decir del uso de Modelos Climáticos Regionales (ver sección 2.3); aunque estos modelos generan información climática detallada (USAID, 2014), requieren de una alta demanda computacional, por lo que la disponibilidad de resultados es menor a la de los GCMs (Copernicus Climate Change Service, 2021).

Por otra parte, para el downscaling estadístico, se utilizan diversos métodos basados en la estadística (análogos, generadores estocásticos, regresiones lineales) para determinar la relación entre un patrón climático a gran escala derivado de los GCMs y las respuestas observadas locales (GFDL, s.f.). Los métodos estadísticos son fáciles de implementar e interpretar, además de que requieren recursos computacionales mínimos, sin embargo, dependen de las observaciones climáticas históricas y la suposición de que las relaciones observadas actualmente se mantendrán en el futuro, lo cual no es necesariamente cierto (USAID, 2014).

Aunque con estos dos métodos se puede obtener información climática con mayor resolución, este proceso implica un requerimiento de datos y suposiciones adicionales, lo que genera mayor incertidumbre y limitaciones de los resultados, una consecuencia que no se hace explícita a los usuarios finales. Además, puede ser información altamente técnica y especializada para su comprensión y para una aplicación e interpretación adecuada de los resultados en la toma de decisiones (USAID, 2014).

En este sentido, una alternativa que se ha desarrollado en México es llevar a cabo, no una regionalización, pero si una interpolación para aumentar la escala espacial de los GCMs. El método es conocido como de factor de cambio (o método delta), y consiste en aplicar el cambio proyectado por el modelo de clima a una climatología observada utilizando métodos de interpolación (bilineal, por ejemplo), o bien directamente a la climatología histórica (SEMARNAT-INECC, 2018). En el INECC, se aplicó la climatología de WorldClim (1950-2000) para reducir la escala a píxeles de 30 km x 30 km.

En este caso, con lo único que se debe de contar es con una base de datos del clima base (de reanálisis, por ejemplo) validada, con la resolución espacial que se desee obtener.

3.3 REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS CON INFORMACIÓN DEL INECC

Para representar los escenarios de cambio climático, lo que se debe de tomar en cuenta es **¿qué resultados se están presentando?** y **¿qué se quiere transmitir, visualizar y representar con la información?** Por lo tanto, se proponen dos formas de representar la información: simple e integral.

3.3.1 REPRESENTACIÓN SIMPLE

No se requiere de cálculos avanzados y el insumo son las anomalías que se encuentran en formato “tif” del sitio <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/deltas-de-cambio-anomalias-de-4-modelos-de-circulacion-global>. Las anomalías se pueden utilizar para obtener el valor de la proyección total (ver la sección 3.4.2), también se puede hacer una comparación entre los valores históricos (clima base) versus los valores futuros del ciclo anual, visualizar el aumento o disminución de meses lluviosos, cálidos, fríos, secos o húmedos.

Por ejemplo, en la Figura 19 se tiene el mapa de porcentaje de cambio de la precipitación acumulada anual, donde se muestra la mayor disminución de precipitación acumulada anual proyectada (RCP8.5, del futuro lejano 2075-2099) en porcentaje relativo al clima histórico para cada entidad federativa. Mientras que en la Figura 20 se tiene el mapa de “anomalía de la temperatura media anual” que muestra la mayor anomalía de temperatura media anual proyectada (RCP8.5, del futuro lejano 2075-2099) con respecto al clima histórico, para cada entidad federativa. En ambos casos se utilizaron los resultados de los cuatro Modelos de Circulación General (CNRMC-M5, GFDL-CM3, HADGEM2-ES, MPI-ESM-LR) y únicamente se seleccionó el mayor valor para ser representado en los mapas.

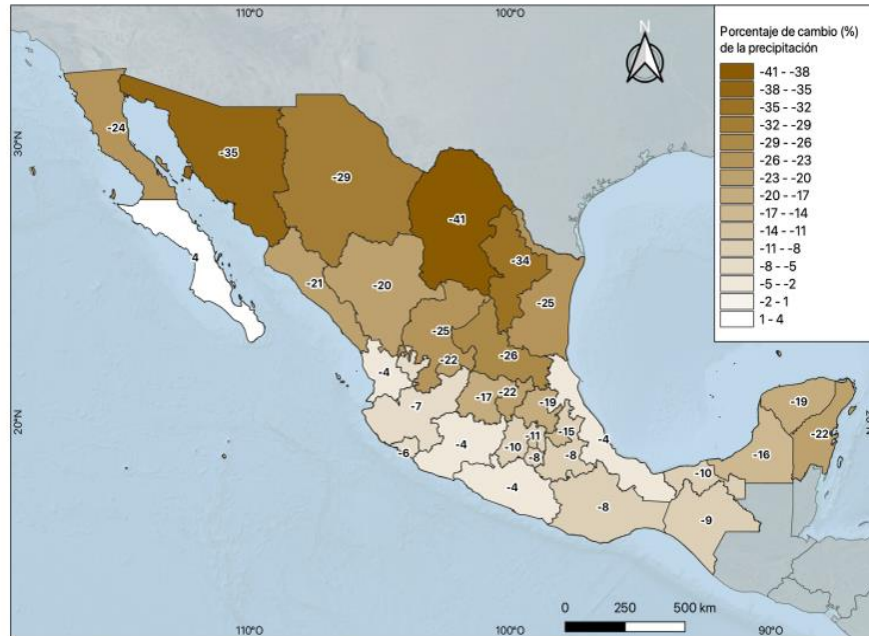


Figura 19. Porcentaje de disminución de precipitación acumulada anual proyectada para el RCP8.5 y futuro lejano 2075-2099 respecto al clima histórico 1950-2000, para cuatro GCMs (CNRMCM5, GFDL-CM3, HADGEM2-ES, MPI-ESM-LR) por entidad federativa

Fuente: Elaborado por CGACCE-INECC

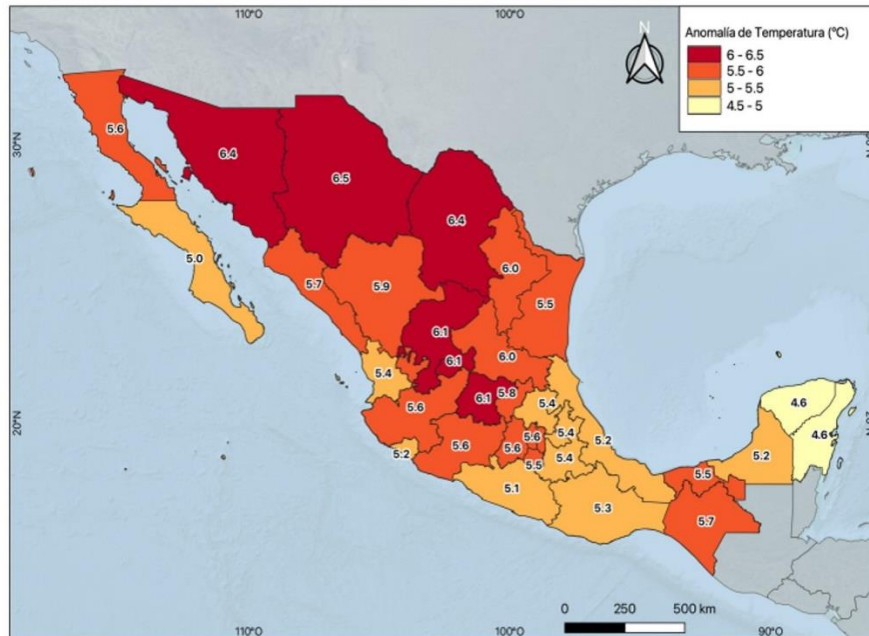


Figura 20. Mayor anomalía de temperatura media anual proyectada, para el RCP8.5 y futuro lejano 2075-2099 respecto al clima histórico 1950-2000, para cuatro GCMs (CNRMCM5, GFDL-CM3, HADGEM2-ES, MPI-ESM-LR) por entidad federativa

Fuente: Elaborado por CGACCE-INECC

Incluso se pueden hacer comparaciones por medio de gráficas entre los valores históricos y los proyectados para diferentes modelos y variables, para un periodo anual, por mes, por temporadas, entre otros.

Por ejemplo, con el escenario de cambio climático RCP8.5, futuro lejano 2075-2099 y el resultado de los cuatro Modelos de Circulación General, se obtienen los valores de precipitación acumulada anual y temperatura media anual proyectados versus clima base (1950-2000). Las proyecciones corresponden a los valores mínimos y máximos de los cuatro Modelos de Circulación General disponibles; es decir, el rango de valores (maxproyectado, minproyectado) para cada entidad federativa (**Figura 21** y **Figura 22**).

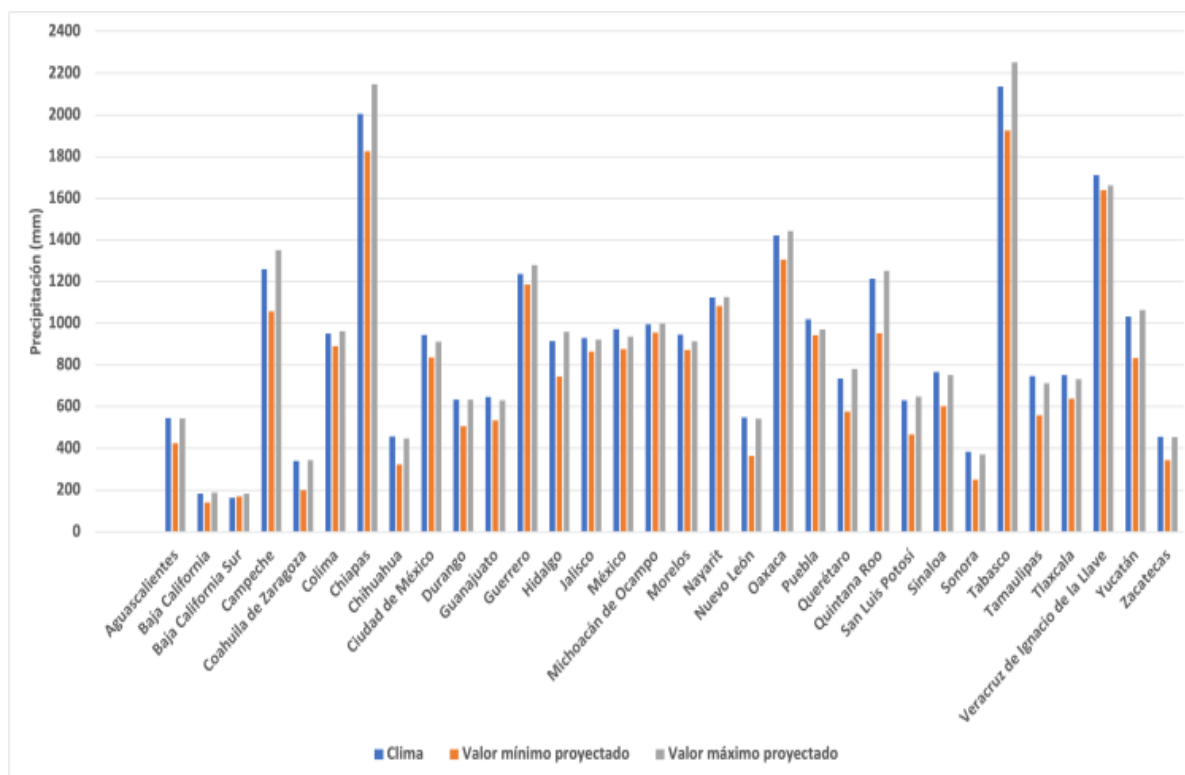


Figura 21. Valores máximos y mínimos proyectados de la precipitación acumulada anual de los modelos CNRMC-M5, GFDL-CM3, HADGEM2-ES, MPI-ESM-LR, respecto al clima base 1950-2000 por entidad federativa

Fuente: Elaborado por CGACCE-INECC

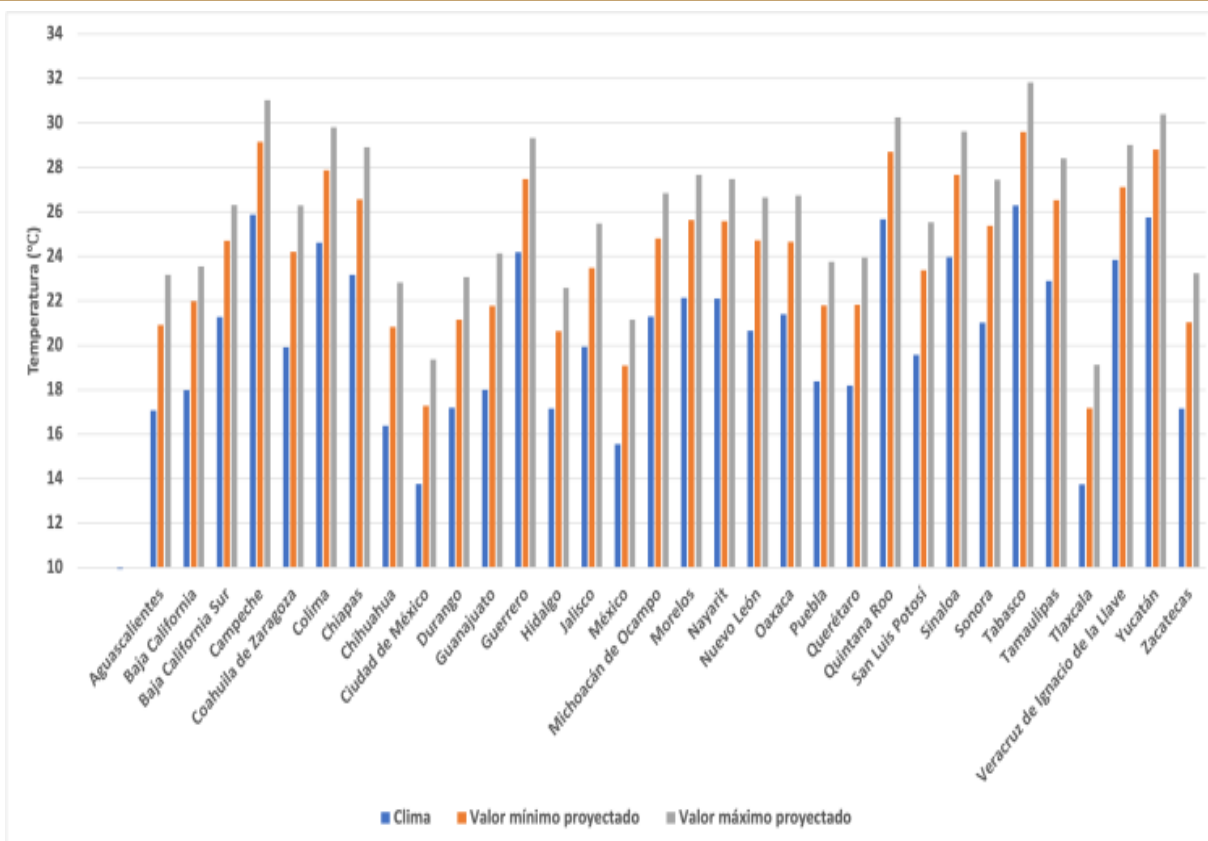


Figura 22. Valores máximos y mínimos proyectados de la temperatura media anual de los modelos CNRMC-M5, GFDL-CM3, HADGEM2-ES, MPI-ESM-LR, respecto al clima base 1950-2000 por entidad federativa

Fuente: Elaborado por CGACCE-INECC

Una representación más de la información es a través de la selección de unidades básicas espaciales de análisis y de su integración. Esto se refiere a definir espacialmente el territorio que se requiere analizar, lo que conduce a realizar un recorte de la representación geográfica de las bases de datos de la zona de interés. Así, posteriormente implementar estadísticas zonales de las variables de temperatura y precipitación, o de la integración en pisos altitudinales a diferentes niveles. Por ejemplo, un recorte de los pixeles de todo un piso altitudinal en una cuenca o bien un promedio de los valores de los pixeles para obtener un valor medio para los diferentes pisos altitudinales en esa misma cuenca.

En la **Figura 23** se muestra un ejemplo de la información de escenarios de cambio climático aplicada a las cuencas de México, los resultados que aquí se presentan son de la Plataforma de Cuencas y Cambio Climático (PLACCC)²⁴, la cual integra información de las cuencas hidrológicas de México (757) y las proyecciones de cambio climático. Esta plataforma aporta información sobre el cambio potencial de variables climáticas regionalizadas en cuatro pisos altitudinales (0 a 500, 501 a 1000, 1001-2000, más de 2000 msnm) de las cuencas.

²⁴ <https://placcc.inecc.gob.mx/>

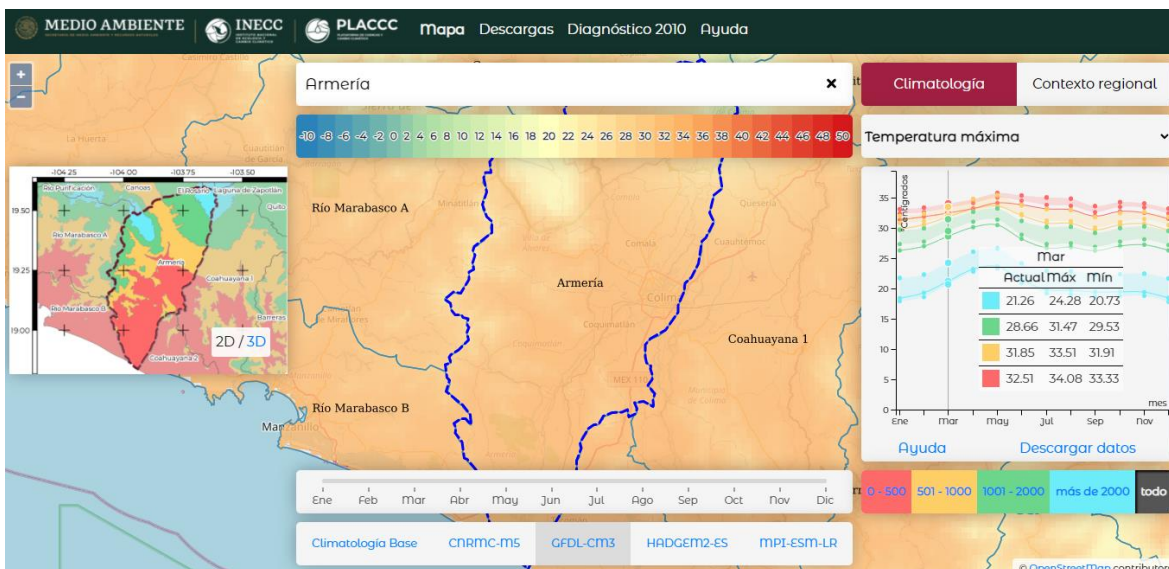


Figura 23. Representación en la plataforma PLACCC de la información de escenarios de cambio climático para diferentes pisos altitudinales en la cuenca de Armería

Fuente: Captura de pantalla recuperada de <https://placcc.inecc.gob.mx/>

3.3.2 REPRESENTACIÓN INTEGRAL

En esta representación intervienen cálculos complejos, utilizando la información en el cálculo de índices o indicadores. Al utilizar la información del sitio del INECC²⁵, se tiene que considerar que los cálculos que se deseen realizar tengan una resolución temporal mensual o anual, y únicamente para las variables de precipitación, temperatura media, temperatura máxima y temperatura mínima. A pesar de esta limitante, los datos se pueden incorporar en todo tipo de índices que contemplen estas variables y resoluciones temporales como los índices bioclimáticos (mes más lluvioso del año de todo el país, los tres meses más calurosos del año, etc.), el índice de estacionalidad de la precipitación, las variables de exposición para la evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático, entre otros.

Un ejemplo que representa este tipo de información se incluye en el Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático²⁶, el cual contiene seis vulnerabilidades hasta ahora publicadas en esta primera etapa (INECC, 2019) las cuales se indican en la **Figura 24**.

²⁵<https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/deltas-de-cambio-anomalias-de-4-modelos-de-circulacion-global>

²⁶<https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx>

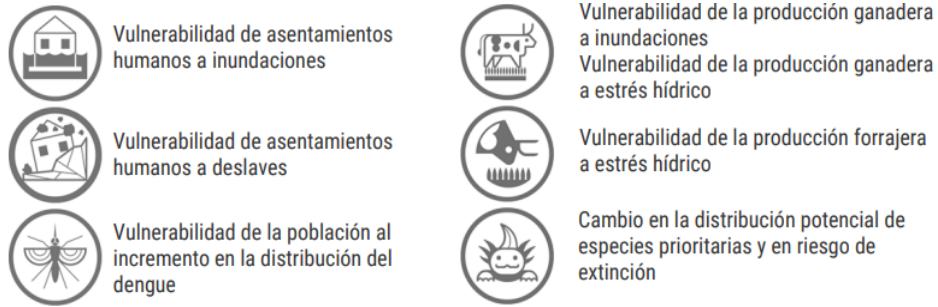


Figura 24. Vulnerabilidades publicadas en el Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático del INECC

Fuente: Tomado de

<https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/page/fichas/marcoConceptual.pdf>

Donde la vulnerabilidad se define como:



$$\text{Vulnerabilidad} = \text{Exposición} + \text{Sensibilidad} - \text{Capacidad Adaptativa}$$

En cuya componente de exposición se integra la información climática actual (clima base 1950-2000) y futura (modelos CNRMC-M5, GFDL-CM3, HADGEM2-ES, MPI-ESM-LR, con el RCP8.5 y horizonte cercano 2015-2039), por lo tanto, es una componente únicamente de carácter climático.

Como ejemplo se muestra el caso de la vulnerabilidad de la población a la distribución potencial del dengue, en su componente de exposición. La exposición en esta vulnerabilidad está compuesta por dos criterios: endemismo y brote (Figura 25) (INECC, 2019).

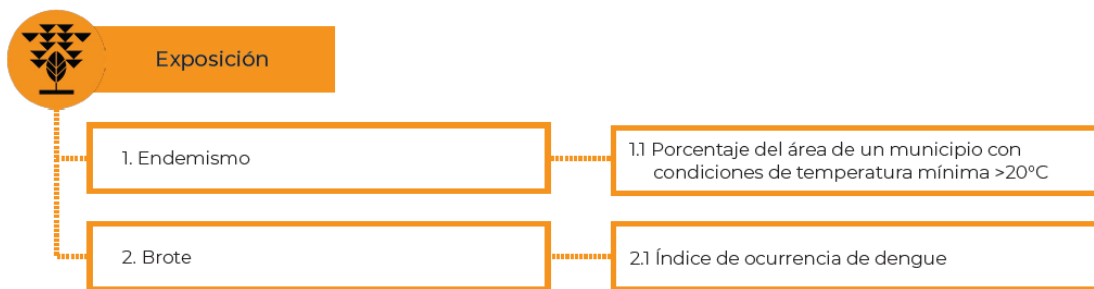


Figura 25. Esquema para la componente de exposición de la vulnerabilidad de la población a la distribución potencial del dengue

Fuente: Tomado de INECC (2019)

Para endemismo se consideró que a mayor porcentaje de área con condiciones de temperatura mínima >20°C, mayor exposición a la presencia del dengue. Por lo que se calculó el porcentaje de área con temperatura promedio mínima anual mayor a 20°C. En el caso de brote se obtuvo que, a mayor número de meses con temperatura mínima cálida y meses lluviosos, mayor exposición a la presencia de dengue. Este índice se construyó con dos condiciones:

Se consideraron aquellos meses donde ocurren:

1. Temperatura mínima mensual >20°C
2. $\frac{P}{P_m} \geq 1$

Donde:

P es la precipitación anual

Pm es la precipitación media anual = $\frac{\text{Precipitación acumulada anual}}{12}$

Los criterios fueron calculados con los datos observados en el periodo base de 1950-2000 y con escenarios de cambio climático (modelos: CNRMC-M5, MPI-ESM-LR, HADGEM2-ES y GFDL-CM3 con RCP8.5 y el horizonte cercano 2015-2039), agregados y estandarizados a nivel municipal (INECC, 2019).

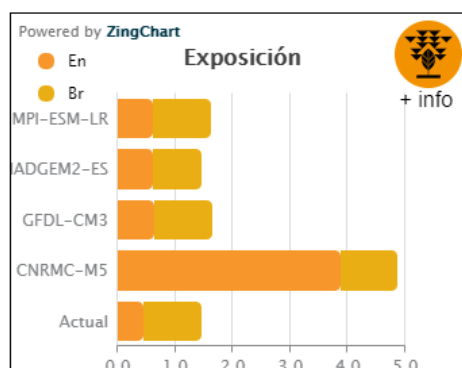


Figura 26. Exposición actual y futura para el municipio Tecpán de Galeana, Guerrero
Fuente: Captura de pantalla recuperada de <https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/>

Como ejemplo, para el municipio de Tecpán de Galeana, Guerrero, se puede observar que con el modelo CNRMC-M5 se tiene una mayor exposición, siendo el criterio de endemismo el que aporta más a esta componente (Figura 26).

En la definición de los índices utilizados, se incluyen variables de temperatura y precipitación en escalas temporales mensuales y anuales, ya que son los datos que se tienen disponibles. La interpretación de los resultados a través de rangos, de valor mínimo y máximo, permitió la incorporación de distintos futuros

posibles, y no sólo tener un valor que se puede interpretar como una predicción climática.

En caso de que se requiera utilizar otro tipo de índices con variables diferentes o en alguna otra escala temporal, se recomienda consultar directamente la base de datos de CMIP5 y buscar las variables que se deseen, así como la escala temporal que se requiera, el procesamiento de datos se debe realizar con el conocimiento de expertos.

3.4 ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA INFORMACIÓN

- El alcance lo proporciona el objetivo del uso de la información, es preciso tener claro qué es lo que se tiene y **qué es lo que se quiere obtener**.
- Los escenarios de cambio climático **no son pronósticos**, sino que son múltiples posibilidades futuras del comportamiento del clima.
- No existe el mejor modelo global, cada modelo tiene características propias; por lo que el **uso de un conjunto de simulaciones** es crucial.
- La información de escenarios de cambio climático se puede presentar o adaptar utilizando diferentes formatos, se debe de elegir el que mejor se adapte a las **necesidades del usuario**.
- La información climática de cualquier tipo es **igualmente valiosa**, no por ser compleja una información será la mejor.
- Se debe de considerar el **rango en las proyecciones de escenarios**, para cubrir la incertidumbre del conjunto de modelos, lo cual se debe de integrar en la toma de decisiones.
- El uso de rangos para la interpretación de resultados incorpora los **futuros posibles** con el uso de **diferentes modelos**.
- **No siempre se requiere la mayor resolución espacial disponible**, ya que no siempre se obtiene una mejor información para los objetivos planteados.
- Las proyecciones de cambio climático deben usarse con un principio precautorio al definir políticas de adaptación al cambio climático, ya que cuentan con diferentes fuentes de incertidumbre, **no es una verdad absoluta**.
- La información de los escenarios de cambio climático está **acotada a la disponibilidad** de datos, a la escala espacial y temporal.
- No existe una única metodología para el uso de la información de los escenarios de cambio climático, por lo tanto, no son soluciones únicas, sino son **diversas posibilidades**, de acuerdo con las **necesidades** y uso para **propósitos específicos**.

BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCIÓN

1. IPCC. (2007). Summary for Policymakers, in *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 17.
2. IPCC. (2013). “Resumen para responsables de políticas. En: *Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*” [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. Recuperado el 4 de octubre de 2021 de http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_brochure_es.pdf
3. ONU. (2021). Cambio Climático. Recuperado el 03 de febrero de 2022 de <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>

CAPÍTULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO

- 4.
5. *Atmósfera*. (s.f). *Atmósfera Meteorología Interactiva*. Recuperado el 9 de diciembre de 2021 de http://www.atmosfera.cl/HTML/temas/temas_02.html
- 6.
7. Benavides Ballesteros, H. O., y León Aristizabal, G. E. (2007). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. Recuperado el 28 de agosto de 2021 en <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf>
- 8.
9. Casas C. M. C y Alarcón J.M. (1999). *Meteorología y Clima*. Ediciones UPC, 162 pp.
- 10.
11. Gómez Collazo, H. G. (2018). Programa de Educación No Formal para el Cambio Climático en el Municipio de Chihuahua. Tesina presentada para obtener el grado de Maestro en Ecología y Medio Ambiente. Universidad Autónoma de Chihuahua. Marzo de 2018. Repositorio digital, Universidad Autónoma de Chihuahua. Recuperado el 11 de mayo de 2021 en <http://repositorio.uach.mx/177/1/Tesis%20completa.pdf>
- 12.

13. IDEAM. (2014). Conceptos básicos de cambio climático. IDEAM-Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Recuperado el 25 de agosto de 2021 en <http://www.cambioclimatico.gov.co/otras-iniciativas>
- 14.
15. INECC. (2018). ¿Qué es el clima? Recuperado el 26 de agosto de 2021 en <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/que-es-el-clima>
- 16.
17. IPCC. (2001). Cambio climático 2001: Informe de síntesis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Recuperado el 7 de diciembre de 2021 en <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/wg1sumspanish.pdf>
- 18.
19. IPCC. (2007). Pregunta Frecuente 1.1: ¿Qué factores determinan el clima de la Tierra? en Informe del Grupo de Trabajo I - Base de las Ciencias Físicas. Recuperado el 25 de septiembre de 2021 en https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/faq-1-1.html
- 20.
21. IPCC. (2012). “Resumen para responsables de políticas” en el Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático [edición a cargo de C. B. Field, C. B., V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G. -K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor, y P. M. Midgley]. Informe especial de los Grupos de trabajo I y II del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Nueva York, Estados Unidos de América, 1-19 pp. Disponible en https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/IPCC_SREX_ES_web.pdf
- 22.
23. IPCC. (2013a). “Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático” [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. Recuperado el 4 de octubre de 2021 de http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_brochure_es.pdf
- 24.
25. IPCC. (2013b). Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. Disponible en https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_ES.pdf
- 26.
27. IPCC. (2018). Anexo I: Glosario [Matthews J.B.R. (ed.)]. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza [Masson-Delmotte V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou,

- M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield (eds.)). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/10/SR15_Glossary_spanish.pdf
- 28.
 29. IPCC. (2021). Summary for Policymakers. In: 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.)]. In Press.
 - 30.
 31. Martínez Arroyo, A. (Coord). (2013). Cambio climático. Agenda ciudadana de ciencia, tecnología e innovación. Academia Mexicana de Ciencias A.C., México, D. F., 16 pp.
 - 32.
 33. Meteorología y climatología de Navarra. (s.f) Recuperado el 2 de agosto de 2021 en Navarra. es: <http://meteo.navarra.es/definiciones/elementosFactores.cfm>
 - 34.
 35. OAS. (s.f). Variabilidad climática. Recuperado el 23 de agosto de 2021 de <http://www.oas.org/sanjuan/spanish/documentos/dialogo/dialogo/01-characterization/05-climate.html>
 - 36.
 37. MMA. (2017). Guía de apoyo al docente en cambio climático. Ministerio del Medio Ambiente de Chile. Recuperado el 17 de octubre de 2021 en <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/08/Guia-de-apoyo-docente-en-Cambio-Climatico.pdf>
 - 38.
 39. NASA. (2020). Gráfica de Temperatura versus Actividad Solar. Recuperado el 01 de diciembre de 2021 en https://climate.nasa.gov/climate_resources/189/graphic-temperature-vs-solar-activity/
 - 40.
 41. NASA. (2021a). Arctic Sea Ice Extent Recuperado el 21 de agosto de 2021 en <https://climate.nasa.gov/vital-signs/arctic-sea-ice/>
 - 42.
 43. NASA. (2021b). Cambio climático: ¿Cómo sabemos lo que sabemos? Recuperado el 21 de agosto de 2021 en <https://climate.nasa.gov/evidencia/>
 - 44.
 45. NASA (2021c). Sea Level. Recuperado el 21 de agosto de 2021 en <https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/>
 - 46.
 47. NASA (2021d). Climate Time Machine: Sea Level. Recuperado el 15 de diciembre de 2021 en <https://climate.nasa.gov/interactives/climate-time-machine>
 - 48.
 49. NOAA. (2021a). Global Climate Dashboard. Recuperado el 13 de diciembre de 2021 en <https://www.climate.gov/>
 - 50.
 51. NOAA. (2021b). Laboratorio de Monitoreo Global (GML). Recuperado el 2 de septiembre de 2021 de <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>
 - 52.
 53. NOAA. (2021c). Laboratorio de Monitoreo Global (GML). Recuperado el 23 de septiembre de 2021 de https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/
 - 54.

55. NOAA. (2021d). Laboratorio de Monitoreo Global (GML). Recuperado el 20 de septiembre de 2021 de https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_n2o/
- 56.
57. Oceana. (s.f.). Cambio Climático. Oceana, protegiendo los océanos del mundo. Recuperado el 26 de agosto de 2021 en <https://europe.oceana.org/es/cambio-climatico>
- 58.
59. SEMARNAT. (2016). Adaptación al cambio climático, fundamentos desde el manejo de cuencas y del proceso de fortalecimiento de capacidades. Recuperado el 26 de abril de 2021 en https://www.remexcu.org/documentos/cuadernos/CD-2016-002470-Adaptacion_CC.pdf
- 60.
61. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood and D. Wratt. (2007). Resumen Técnico. En: Cambios Climáticos 2007: Base Física de la Ciencia. Aportes del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambios Climáticos [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos.
- 62.
63. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, L.V. Alexander, S.K. Allen, N.L. Bindoff, F.-M. Bréon, J.A. Church, U. Cubasch, S. Emori, P. Forster, P. Friedlingstein, N. Gillett, J.M. Gregory, D.L. Hartmann, E. Jansen, B. Kirtman, R. Knutti, K. Krishna Kumar, P. Lemke, J. Marotzke, V. Masson-Delmotte, G.A. Meehl, I.I. Mokhov, S. Piao, V. Ramaswamy, D. Randall, M. Rhein, M. Rojas, C. Sabine, D. Shindell, L.D. Talley, D.G. Vaughan y S.-P. Xie, (2013). Resumen técnico. En: Cambio climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- 64.
65. UG. (2017). Efecto Invernadero. Universidad de Guanajuato (UG). 11 p. Recuperado el 13 de diciembre de 2021 en <https://nodo.ugto.mx/wp-content/uploads/2017/03/Gases-de-efecto-invernadero-y-el-cambio-clim%C3%A1tico.pdf>

CAPÍTULO 2. PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

1. Benjamin D.M., y Budescu D.V. (2018), The Role of Type and Source of Uncertainty on the Processing of Climate Models Projections. *Front. Psychol.* 9:403. Doi: 10.3389/fpsyg.2018.00403
2. Carabine E., y A. Lemma. (2014). El Quinto Reporte de Evaluación del IPCC. ¿Qué implica para Latinoamérica? Resumen Ejecutivo. Alianza Clima y Desarrollo, Overseas Development Institute (ODI). 40 pp.
3. Climateurope. (2020). A Short Introduction to Climate Models–CMIP & CMIP6. Recuperado el 09 de diciembre de 2021 en <https://www.climateurope.eu/a-short-introduction-to-climate-models-cmip-cmip6/>
4. Conde C. y C. Gay (Coordinadores). (2008). Guía para la Generación de Escenarios de Cambio Climático a Escala Regional. Primera Versión. Noviembre. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. 105 pp.
5. Charron, I. (2016). A Guidebook on Climate Scenarios: Using Climate Information to Guide Adaptation Research and Decisions, 2016 Edition. Ouranos, 94 p. ISBN (Impression): 978-2-923292-19-9/ISBN (PDF online): 978-2-923292-21-2
6. Hausfather Z. (2019). CMIP6: the next generation of climate models explained. Carbonbrief clear on climate. Recuperado el 09 de diciembre de 2021 en <https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained>
7. Hawkins E. (2013). Sources of uncertainty in CMIP5 projections. Recuperado de Climate Lab Book el 14 de diciembre de 2021 en www.climate-lab-book.ac.uk/2013/sources-of-uncertainty/
8. Hayhoe, K., J. Edmonds, R.F. Kopp, A.N. LeGrande, B.M. Sanderson, M.F. Wehner, and D.J. Wuebbles. (2017). Climate models, scenarios, and projections. In: *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* [Wuebbles, D.J., D.W. Fahey, K.A. Hibbard, D.J. Dokken, B.C. Stewart, and T.K. Maycock (eds)]. U.S. Global Change Research Program, Washington, D.C., USA, 133-160 pp. Doi:10.7930/J0WH2N54
9. IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S. D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
10. IPCC-TGICA. (2007). *General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 2.* Prepared by T.R. Carter on Behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment. 66 pp.

11. IPCC, (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 pp.
12. Lohmann, G. (2020). Temperatures from energy balance models: the effective heat capacity matters, *Earth Syst. Dynam.*, 11, 1195–1208 pp. Disponible en <https://doi.org/10.5194/esd-11-1195-2020>
13. McWeeney R. y Hausfather Z. (2018). Q&A: How do climate models work? CarbonBrief Clear on Climate. Recuperado el 18 de junio de 2021 de <https://www.carbonbrief.org/qa-how-do-climate-models-work>
14. Puma M.J. y Gold S. (2011). Formulando Escenarios de Cambio Climático para Contribuir con Estrategias de Desarrollo Adaptadas al Clima. Una Guía para Practicantes, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Nueva York, NY, Estados Unidos.
15. RCP Database. (2009). RCP Database (version 2.0). Recuperado el 09 de diciembre de 2021 en <https://tntcat.iiasa.ac.at/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=welcome>
16. Santoso, H., M. Idinoba y P. Imbach. (2008). Climate Scenarios: What we need to know and how to generate them. Working Paper No 45. Center for International Forestry Research (CIFOR). 32 pp.
17. van Vuuren D.P., Edmonds J., Kainuma M., Riahi K., Thomson A., Hibbard K., Hurtt G.C., Kram T., Krey V., Lamarque J-F., Masui T., Meinshausen M., Nakicenovic N., Smith S.J. y Rose S.K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109:5. Disponible en <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-011-0148-z>
18. Wayne, G.P. (2013). The Beginner's Guide to Representative Concentration Pathways. Skeptical Science. Version 1.0, Agosto de 2013. 25 pp.

CAPÍTULO 3. PROCESO PARA LA INTEGRACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN HERRAMIENTAS PARA LA TOMA DE DECISIONES

1. Biemans H., Speelman L.H., Ludwig F., Moors E.J., Wiltshire A.J., Kumar P., Gerten D., y Kabat P. (2013). Future water resources for food production in five South Asian river basins and potential for adaptation – a modeling study. *Sci. Total Environ.* 468–469: S117–S131. Disponible en <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23928370/>
2. Cavazos, T. y De Grau P. (2014). Parte I Análisis de Variables Atmosféricas (históricas y escenarios de cambio climático). Reporte Final Estudio para la

- incorporación de nuevas variables en los escenarios de cambio climático para México utilizados en la Quinta Comunicación Nacional. 28 de noviembre de 2014. Convenio INECC/A1-007/2014. 58 pp.
3. Cavazos, T., J. A. Salinas, B. Martínez, G. Colorado, P. de Grau, R. Prieto, C. Conde, A. Quintanar, J. Santana, R. Romero, M. E. Maya, J. G. Rosario, M. R. Ayala, H. Carrillo, O. Santiesteban, y M. E. Bravo. (2013). Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional.
 4. Charron, I. (2016). A Guidebook on Climate Scenarios: Using Climate Information to Guide Adaptation Research and Decisions, 2016 Edition. Ouranos, 94 pp. ISBN (Impression): 978-2-923292-19-9/ISBN (PDF online). Recuperado el 9 de diciembre de 2021 en <https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/Guidebook-2016.pdf>978-2-923292-21-2
 5. Conde C. y Gay C. (Coordinadores). (2008). Guía para la Generación de Escenarios de Cambio Climático a Escala Regional. Primera Versión. Noviembre. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. 105 pp.
 6. Copernicus Climate Change Service. (2021). What is Statistical and Dynamical Downscaling? Recuperado el 11 de noviembre de 2021 en <https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/2021-01/infosheet8.pdf>
 7. Cotler, A. H., Galindo, A. A., González, M. I. D., Pineda, L. R. F. y Ríos, P. E. (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. Cuadernos de divulgación ambiental. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado el 10 de noviembre de 2021 en https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/Cuencas_final_2014.pdf
 8. Evans JP, Ji F, Abramowitz G, Ekstrom M. (2013). Optimally choosing small ensemble members to produce robust climate simulations. Environ. Res. Lett. 8(4):1-4, Disponible en <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/4/044050>
 9. Fenech, N. Comer y Gough B. (2007). Paper 5: Selecting a Global Climate Model for Understanding Future Projections of Climate Change. Linking Climate Models to Policy and Decision-Making. UPEI Climate Lab. Recuperado el 25 de noviembre de 2021 en https://projects.ypei.ca/climate/files/2012/10/Book-1_Paper-5.pdf
 10. GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory). (s.f.). Climate Model Downscaling. Recuperado el 31 de octubre de 2021 de <https://www.gfdl.noaa.gov/climate-model-downscaling/>
 11. Giorgi, F. (2010). Uncertainties in climate change projections, from the global to the regional scale. EPJ Web of Conferences, 9:115-129. Recuperado el 21 de noviembre de 2021 en https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/abs/2010/08/epjconf_erca2010_09009/epjconf_erca2010_09009.html
 12. INECC. (2017). Cartografía de clima actual o base (1950-2000). Recuperado el 14 de diciembre de 2021 en <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/cartografia-de-clima-actual-o-base-1950-2000>

13. INECC. (2019). Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático México. 1ª. Edición (libro electrónico). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México. Recuperado el 10 de abril de 2021 en https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/page/fichas/ANVCC_LibroDigital.pdf
14. IPCC. (2013). Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. Disponible en https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_ES.pdf
15. Joyce, L.A., y Coulson D. (2020). Climate Scenarios and Projections: A technical document supporting the USDA Forest Service 2020 RPA Assessment. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-413. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 85 pp. Disponible en <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-413>
16. Liersch, S., Drews M., Pilz T., Salack S., Sietz D., Aich V., Larsen M.A.D., Gadeke A., Halsnæ K., Thiery W., Huang S., Lobanova A., Koch H. y Hattermann F.F. (2020). One simulation, different conclusions—the baseline period makes the difference! *Environ. Res. Lett.* 15, 104014.
17. Lutz, AF, ter Maat, HW, Biemans, H., Shrestha, AB, Wester, P. e Immerzeel, WW. (2016). Selecting representative climate models for climate change impact studies: an advanced envelope-based selection approach. *Int. J. Climatol.* 36: 3988-4005. Disponible en <https://doi.org/10.1002/joc.4608>
18. Nissan, H., y Conway, D. (2018). From advocacy to action: Projecting the health impacts of climate change. *PLoS Medicine*, 15(7), e1002624. Disponible en <https://journals.plos.org/plosmedicine/article?id=10.1371/journal.pmed.1002624>
19. Nissan, H., L Goddard, E Coughlan de Perez, J Furlow, W Baethgen, MC. Thomson, y S J. Mason. (2019). On the use and misuse of climate change projections in international development. *WIREs Clim Change.* e579. Disponible en <https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wcc.579>
20. Pierce DW, Barnett TP, Santer BD, y Gleckler PJ. (2009). Selecting global climate models for regional climate change studies. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 106(21): 8441–8446. Disponible en <https://www.pnas.org/content/106/21/8441>
21. Puma M.J. y Gold S. (2011). *Formulando Escenarios de Cambio Climático para Contribuir con Estrategias de Desarrollo Adaptadas al Clima. Una Guía para Practicantes*, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Nueva York, NY, Estados Unidos.
22. Ross, A.C., y Najjar, R.G. (2019). Evaluation of methods for selecting climate models to simulate future hydrological change. *Climatic Change.* 157:407–428. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02512-8>

23. Ruane, A.C., y McDermid, S.P. (2017). Selection of a representative subset of global climate models that captures the profile of regional changes for integrated climate impacts assessment. *Earth Perspectives* 4(1), 20 pp. Disponible en <https://doi.org/10.1186/s40322-017-0036-4>
24. San José R., Pérez J.L., González R.M., Pecci J., Garzón A., y Palacios M. (2016). Impacts of the 4.5 and 8.5 RCP global climate scenarios on urban meteorology and air quality: Application to Madrid, Antwerp, Milan, Helsinki and London. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. Volume 293. 192-207 pp. ISSN 0377-0427. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.cam.2015.04.024>
25. Schwalm C.R, Glendon S., y Duffy P.B. (2020). RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117:(33), 19656-19657; Disponible en <https://www.pnas.org/content/117/33/19656>
26. SEMARNAT-INECC. (2018). México. Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México. Recuperado el 20 de noviembre de 2021 en https://www.redicomar.com/wp-content/uploads/2018/12/6a_Comunicacion_libro_digital-1.pdf
27. van Vuuren D.P., Edmonds J., Kainuma M., Riahi K., Thomson A., Hibbard K., Hurtt G.C., Kram T., Krey V., Lamarque J-F., Masui T., Meinshausen M., Nakicenovic N., Smith S.J. y Rose S.K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109:5. Disponible en <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-011-0148-z>
28. USAID (U.S. Agency for International Development). (2014). A Review of Downscaling Methods for Climate Change Projections. African and Latin American Resilience to Climate Change Project (ARCC). 56 pp. Washington, DC. Recuperado el 1 de noviembre de 2021 http://www.ciesin.org/documents/Downscaling_CLEARED_000.pdf



MEDIO AMBIENTE

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



INECC

INSTITUTO NACIONAL
DE ECOLOGÍA Y
CAMBIO CLIMÁTICO