

Análisis del cambio climático observado y proyectado para México.

Francisco Estrada, Óscar Calderón-Bustamante, Graciela Raga, Miguel Ángel Altamirano del Carmen, Víctor Torres, Jorge Zavala-Hidalgo¹

El clima es un sistema complejo que está determinado tanto por la variabilidad natural interna del sistema, que puede ser de muy corto plazo hasta de cientos de años, como por forzantes externos, tanto naturales como antropogénicos, y sus interacciones (Piexoto y Oort, 1992). En el análisis del cambio climático el interés se centra en identificar, caracterizar y entender los cambios de largo plazo en medidas tanto de tendencia central como de variabilidad de distintas variables climáticas. En este reporte se muestran algunos de los principales cambios en el clima de México, mostrando que este ya es considerablemente diferente al clima registrado a principios del siglo XX y se presentan algunas proyecciones de cambio climático para el país y por estado que provienen del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP, por sus siglas en inglés) en sus fases 5 y 6, así como por el modelo integrado para la estimación de costos y riesgos del cambio climático CLIMRISK, y el emulador para la generación de escenarios probabilísticos regionales de cambio climático e índices de riesgo AIRCC-Clim, del Programa de Investigación en Cambio Climático, el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM y la Universidad Libre de Ámsterdam. Los escenarios presentados aquí se basan en promedios de ensambles de realizaciones, lo cual es conveniente para ilustrar los posibles cambios, pero no representan la incertidumbre en modelación, ni debe interpretarse como un pronóstico. Se invita al lector a consultar el portal de datos [DATA PINCC](https://datapincc.unam.mx/datapincc/#) (<https://datapincc.unam.mx/datapincc/#>) para acceder a una amplia colección de escenarios de cambio climático.

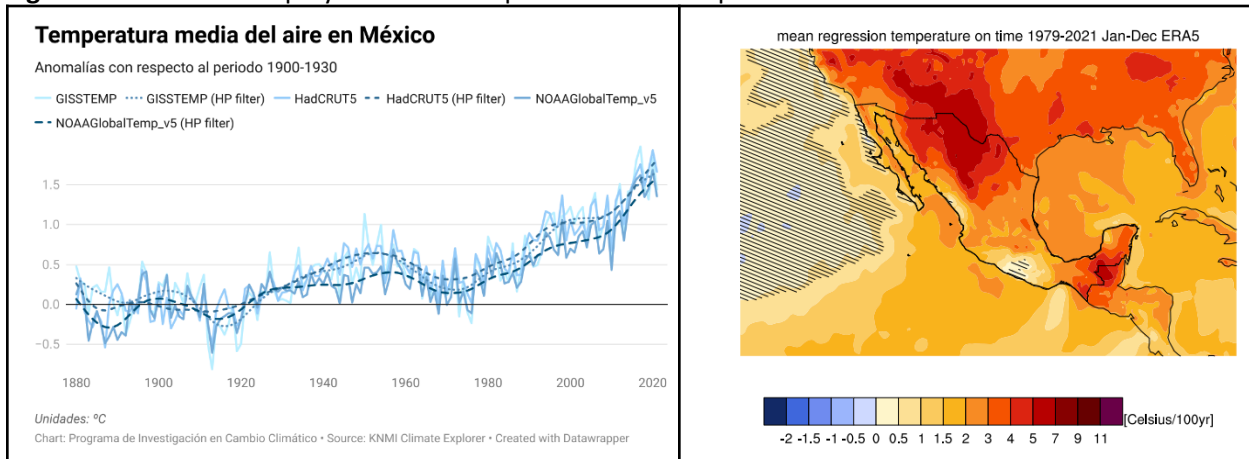
Temperatura

La temperatura media del aire en México ha aumentado alrededor de 1.69 °C (1.59 °C—1.81 °C) con respecto a inicios del siglo XX.

¹ Los autores son miembros del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAYCC), UNAM.

La incertidumbre en la magnitud de este incremento se debe, en gran medida, a los métodos de recuperación, control de calidad y procesamiento de datos que cada institución generadora realiza. Con respecto al periodo 1900-1930, el incremento en la temperatura media del aire para México fue de 1.59 °C a 1.81 °C, de acuerdo con las bases de datos NOAAGlobalTemp_v5 y HadCRUT5, respectivamente. Según la base de datos GISSTEMP de la NASA, dicho incremento es de 1.66 °C. Estos valores fueron obtenidos utilizando filtros de series de tiempo para aproximar el valor de la tendencia de la temperatura, (véase **Figura 1**).

Figura 1. Series de tiempo y tendencias espaciales de la temperatura media del aire en México.



El panel izquierdo muestra la [evolución temporal del cambio en la temperatura media anual \(°C\) para México](#) durante el periodo 1880-2021, con respecto al periodo 1900-1930. El panel derecho muestra las tendencias (°C por siglo) de la temperatura media anual para México estimadas para el periodo 1979-2021.

Fuente: Elaboración propia. Bases de datos GISSTEMP, HadCRUT5, NOAAGlobalTemp_v5, ERA5.

El calentamiento observado en México es debido al incremento de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero antropogénicos producido desde la revolución industrial.

La forma general de la tendencia mostrada por la temperatura media del aire en México es impartida por el forzamiento antropogénico de gases de efecto invernadero bien mezclados, mientras que otros forzantes y procesos de variabilidad natural la han modulado. Sin el efecto de enfriamiento de otros forzantes, el aumento en la temperatura del aire promedio anual en México hubiera sido cerca de un 70% mayor al registrado. La contribución del forzamiento solar al calentamiento observado representa alrededor del 6% del producido por los gases de efecto invernadero antropogénicos.

El aumento en la temperatura del aire anual promedio en México es mayor que el aumento promedio global.

Mientras que el aumento en la temperatura media del aire en México es de 1.69 °C (1.59 °C—1.81 °C), el incremento en la temperatura promedio global es de 1.23 °C. Durante el periodo 1975-2021, la temperatura global ha aumentado a una tasa de 1.90 °C (1.78 °C—1.97 °C) por siglo, dependiendo de la base de datos usada (HadCRUT5, GISSTEMP, NOAAGlobalTemp_v5). En México, la tasa de aumento en la temperatura para el mismo periodo es de 2.88 °C (2.77 °C — 3.03 °C) por siglo. Se espera que, durante las próximas décadas, el calentamiento continúe siendo más rápido en México en comparación con el promedio global.

El incremento en las temperaturas en México no es homogéneo entre las estaciones del año, siendo mayor en otoño y primavera y menor en invierno y verano.

De acuerdo con las distintas bases de datos, otoño y primavera son las estaciones con mayores aumentos en la temperatura media del aire. En primavera se muestra un aumento de 1.77 °C (1.61 °C—2.03 °C) con respecto al periodo 1900-1930, mientras que el incremento en la temperatura media en otoño es también de 1.77 °C (1.66 °C—1.85 °C). La temperatura media en invierno aumentó 1.51 °C (1.37 °C—1.77 °C), siendo la estación con menor calentamiento de acuerdo con las bases de datos NOAAGlobalTemp_v5 y GISSTEMP. En verano, el aumento de la temperatura fue de 1.53 °C (1.51 °C—1.56 °C).

El aumento en la temperatura media del aire es muy heterogéneo a lo largo del territorio nacional, con incrementos mucho más pronunciados en el norte y sureste del país.

El incremento en la temperatura media desde principio del siglo XX muestra gran variación espacial (diferencia entre los promedios de 2003-2021 y 1901-1930). De acuerdo con distintas bases de datos internacionales (HadCRUT5, GISSTEMP, CRUTS4.05), la región que ha mostrado mayor calentamiento es el noroeste del país y parte de la costa del Pacífico con incrementos en la temperatura cercanos a los 2 °C (1.4 °C—2.5 °C), mientras que gran parte del resto del país ha visto incrementos de alrededor de 1 °C (0.8 °C—1.7 °C).

El análisis de tendencias utilizando mínimos cuadrados ordinarios muestra que existen diferencias importantes tanto en los patrones espaciales como en la magnitud de los cambios, dependiendo de las bases de datos utilizadas. Parte de estas diferencias se debe a los métodos

de recuperación, control de calidad y procesamiento de datos que cada institución generadora realiza. En general, durante el periodo 1975-2021, el país mostró tasas de calentamiento de 2.0 °C a 4 °C por siglo en gran parte de su territorio. Las distintas bases de datos coinciden en que las tasas de calentamiento observadas han sido mayores en el norte del país. De acuerdo con la base CRU_TS4.05, que cuenta con una resolución espacial mayor (0.5 °x0.5 °), la región noroeste alcanza tasas de calentamiento de hasta 6 °C y 5 °C por siglo. De acuerdo con los datos de reanálisis ERA5, durante el periodo 1979-2021, la tasa de calentamiento en la parte norte del país alcanza valores superiores a los 6 °C y cercanos a los 5 °C en la región sureste (véase **Figura 1**).

El tiempo necesario para que las sociedades enfrenten a condiciones climáticas que serían consideradas extremas con respecto a un periodo de referencia se ha ido reduciendo de forma importante desde mediados del siglo XX.

El tiempo social de emergencia (TSE) está definido como la fecha en la que una sociedad enfrente un valor en la tendencia de la temperatura media anual (u otra variable) superior a 2 veces la desviación estándar en dicho periodo. Esta métrica representa el momento en que una sociedad acondicionada al clima de un periodo de referencia enfrentaría un clima que se consideraría extremo para esa época. Para el caso de México y tomando como referencia el final del siglo XIX, una sociedad acondicionada al clima de ese periodo hubiera alcanzado el TSE a finales de la década de 1980. Con ello, dicha sociedad hubiera dispuesto de cerca de 100 años para adaptarse a un clima que se consideraría extremo para esa época. Para mediados del siglo XX, el TSE se alcanzó en la década de 2010 y la sociedad hubiera contado con 50 años para adaptarse. Tomando 2020 como periodo de referencia, se espera que el TSE se rebase en dos décadas, si no existen esfuerzos internacionales de mitigación mayores a los actuales.

Precipitación

El promedio de la precipitación anual en México ha aumentado a una tasa de 2.9 (1.9-3.8) mm/mes por siglo desde inicios del siglo XX. Cambio climático ha modificado la distribución de la precipitación entre las estaciones del año, con incrementos significativos en verano y otoño.

Las bases de datos analizadas (GPCC, CRUTS 4.05) coinciden en que la precipitación presenta una tendencia positiva constante durante todo el periodo. Sin embargo, existe incertidumbre

importante respecto a la magnitud de la tendencia. En el caso de la base de datos GPCC (1.9 mm/mes por siglo), la tendencia estimada es aproximadamente la mitad de aquella de los datos de CRUTS 4.05 (3.8 mm/mes por siglo). Las tendencias en la precipitación durante invierno y primavera no son estadísticamente significativas, pero tienen signo negativo en el caso de invierno para las dos bases de datos analizadas y signos opuestos en primavera. Tanto en verano y otoño se han registrado tendencias positivas significativas para ambas bases de datos, pero las magnitudes de cambio varían de manera importante entre ellas. En el caso de GPCC, la precipitación en México en otoño y verano han aumentado con tasas de 4.9 y 4.3 mm/mes por siglo, respectivamente. En contraste, de acuerdo con la base CRUTS 4.05, la precipitación en verano ha aumentado a una tasa de 8.8 mm/mes por siglo, mientras que en otoño la tasa es de 7.7 mm/mes por siglo.

El cambio observado en la precipitación en México es altamente heterogéneo en el espacio y en las estaciones del año. Sin embargo, a grandes rasgos, la precipitación ha disminuido en regiones del norte del país, mientras que ha aumentado en el centro y sur.

Durante el periodo 1975-2021, la precipitación anual muestra tendencias negativas en el noroeste de -0.2 hasta -1 mm/mes por siglo, e incrementos de entre 0.5 y 2 mm/mes por siglo en la mayor parte del centro y sur del país.

En invierno se observan tendencias negativas en la precipitación en todo el país, siendo más marcadas en las regiones noroeste y sureste del país, alcanzando valores de hasta 2 mm/día por siglo. Durante la primavera se presenta un patrón de reducción en el noroeste e incremento en la mayor parte del centro y sur del país, con magnitudes similares a aquellas en la precipitación anual. Las tendencias en verano muestran reducciones importantes en la parte norte y centro del país, alcanzando entre -0.5 a -2 mm/día por siglo, con decrementos máximos sobre Jalisco, Nayarit, Sinaloa, Tamaulipas y Nuevo León. Por el contrario, en el sureste y partes del centro del país, se observan incrementos entre 0.5 y más de 2 mm/día por siglo, con los incrementos máximos sobre Oaxaca y Chiapas. Con la excepción del noroeste, las tendencias son positivas para casi todo el país durante el otoño (entre 0.5 y 2 mm/día por siglo), alcanzando máximos superiores a los 2 mm/día por siglo en Tabasco, Veracruz, Chiapas y Jalisco, (véase **Figura 2**).

Figura 2. Tendencias de la precipitación en México por estación del año.

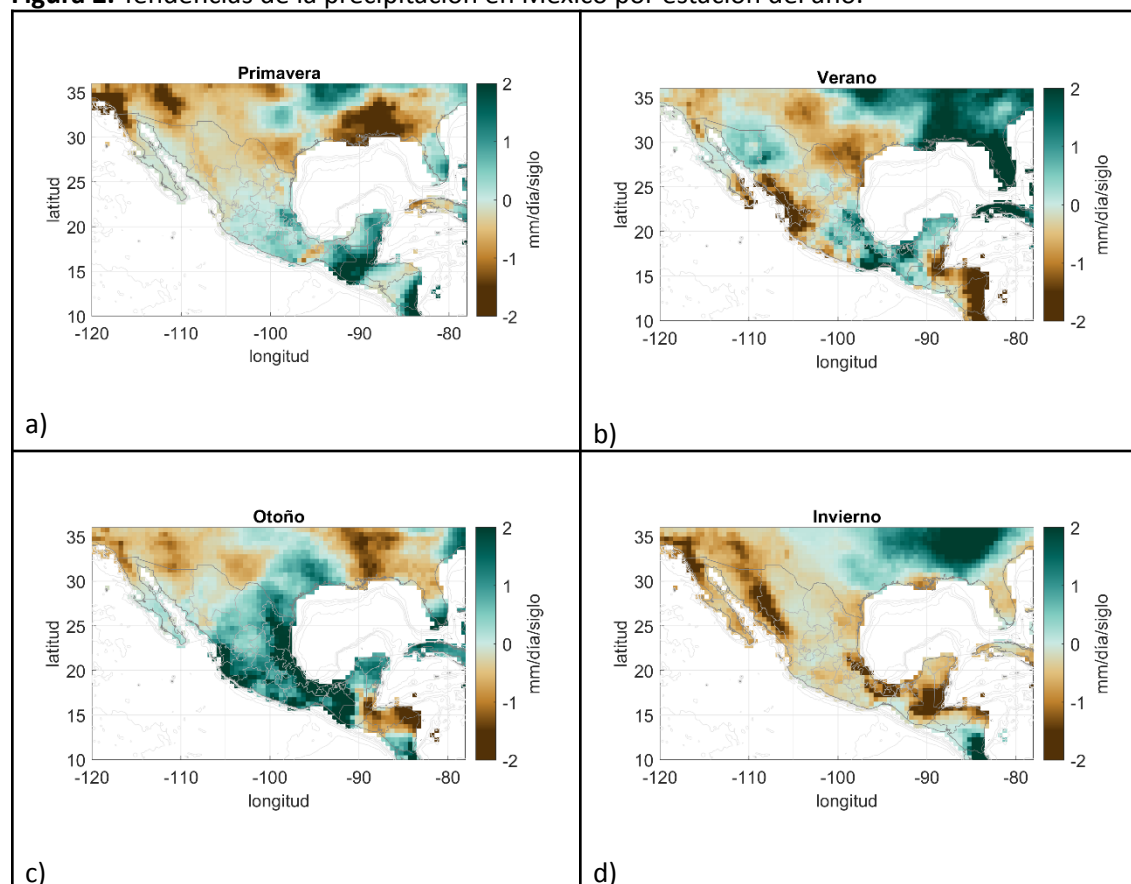


Figura 2. Tendencias de la precipitación en México por estación del año. Los paneles a), b) c) y d) muestran las tendencias en la precipitación para primavera, verano, otoño e invierno, respectivamente. Las unidades son mm/día por siglo.

Fuente: Elaboración propia. Base de datos CRUTS 4.05.

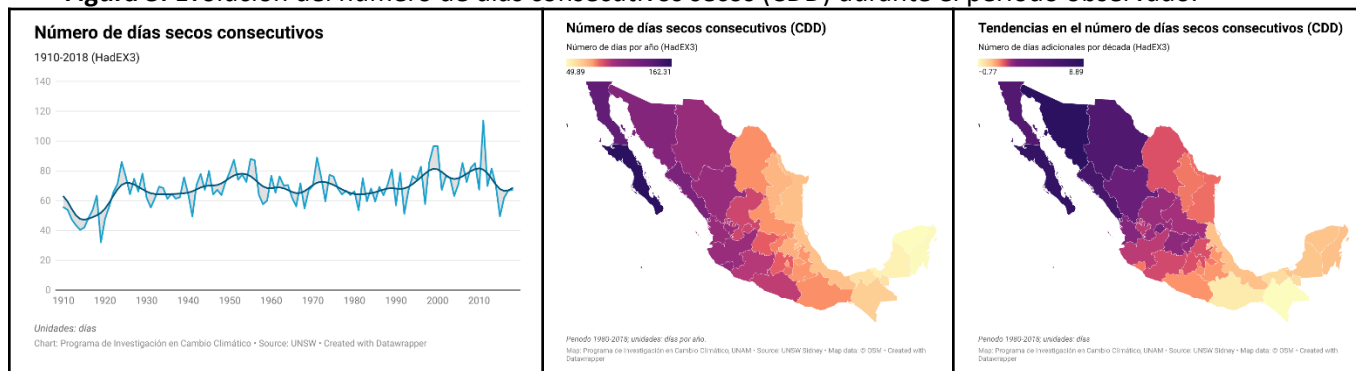
Eventos extremos

Desde principios de la década del 2000, el número de días consecutivos secos (CDD), ha aumentado de un promedio cercano a 70 días por año a cerca de 80.

Durante el periodo 1980-2018, la climatología de CDD muestra un patrón espacial en el que el menor número de días consecutivos secos (60-75 días por año) se centra a lo largo de las costas del Golfo de México y aumentan hacia las costas del Pacífico, con valores de 90 a 120 días para la parte sur y llegando a valores de hasta 135 a 150 días al norte del país. El aumento en el número de días consecutivos secos (CDD) es espacialmente heterogéneo, afectando en mayor medida el noroeste. Las tendencias de CDD durante el periodo 1980-2018 indican aumentos de 6 y hasta 8 días adicionales por década en el noroeste del país (Baja California, Sonora, Sinaloa,

Baja California y Chihuahua), así como de entre 2 y 4 días adicionales por década en la región central. El resto del país muestra tendencias de entre 0 y 2 días consecutivos secos adicionales por década, (véase **Figura 3**).

Figura 3. Evolución del número de días consecutivos secos (CDD) durante el periodo observado.



El panel izquierdo muestra la [evolución temporal de CDD promedio](#) para México (1910-2018). El panel central muestra la [climatología de CDD](#) (1980-2018) y el panel derecho muestra las [tendencias CDD](#) (1980-2018).

Fuente: Elaboración propia. Base de datos HadEX3.

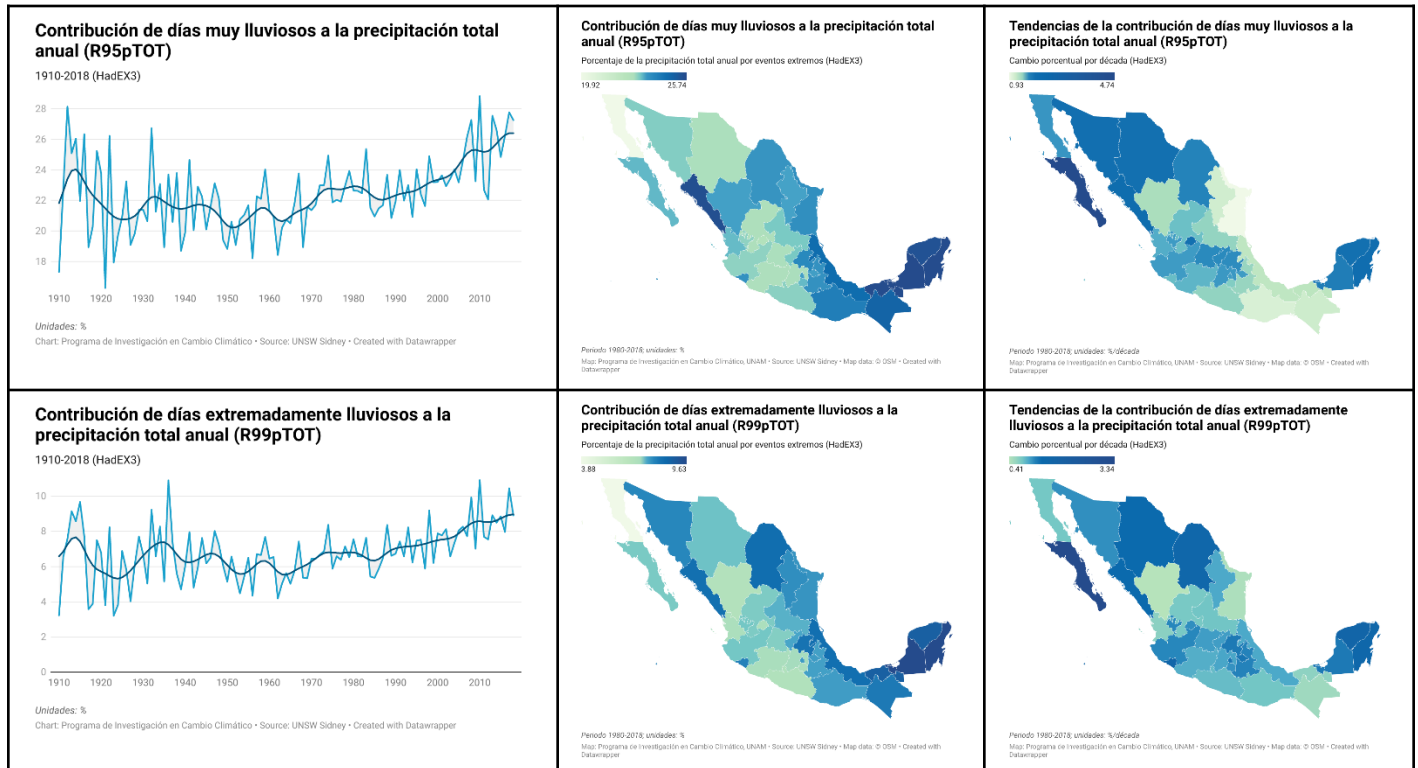
La contribución de días muy lluviosos (R95_PTOT) y extremadamente lluviosos (R99_PTOT) al total de la precipitación anual se ha incrementado en México desde mediados de la década de 1960.

En el caso de R95_PTOT, los días muy lluviosos pasaron de representar alrededor de un 21% a cerca de un 26% en los últimos años (aumento de casi 25%; Figura 4). La climatología de R95_PTOT durante el periodo 1980-2018 muestra que los eventos extremos contribuyen en mayor proporción a la precipitación anual (24-26%) en las regiones en las que típicamente se presentan ciclones tropicales y en la región del monzón de Norteamérica. En el resto del país, la contribución de eventos extremos de lluvia es cercana al 23%, con un valor mínimo de 20% en Baja California. Las tendencias registradas durante el periodo 1980-2018 muestran que la contribución de días muy lluviosos a la precipitación anual ha aumentado en gran parte del país. La región noroeste muestra aumentos entre 2-4% por década, mientras que el resto del país, con la excepción del noreste, muestra aumentos de 1-2% por década.

En comparación con mediados del siglo XX, en nuestro país los días extremadamente lluviosos (R99_PTOT) han pasado de contribuir en alrededor de 6% a la precipitación total anual a cerca de un 9% (aumento de 50%; Figura 4). Los estados con valores más altos en tendencias de R99_PTOT son Baja California Sur (3.34%), Yucatán (1.59%) y Colima (1.54%). La contribución de días

extremadamente lluviosos sigue un patrón temporal y espacial muy similar al de R95pTOT. Sin embargo, comparativamente y a nivel país, los aumentos en R99pTOT son aproximadamente el doble en comparación con aquellos de R95pTOT.

Figura 4. Evolución de la contribución de días muy lluviosos y extremadamente lluviosos a la precipitación total anual (R95pTOT, R99pTOT) durante el periodo observado.



El panel superior izquierdo muestra la [evolución temporal de R95pTOT promedio](#) para México. El panel central superior muestra la [climatología de R95pTOT](#) (1980-2018) y el panel superior derecho muestra las [tendencias R95pTOT](#) (1980-2018). El panel inferior izquierdo se muestra la [evolución temporal de R99pTOT promedio](#) para México. El panel central superior muestra la [climatología de R99pTOT](#) (1980-2018) y el panel superior derecho muestra las [tendencias R99pTOT](#) (1980-2018).

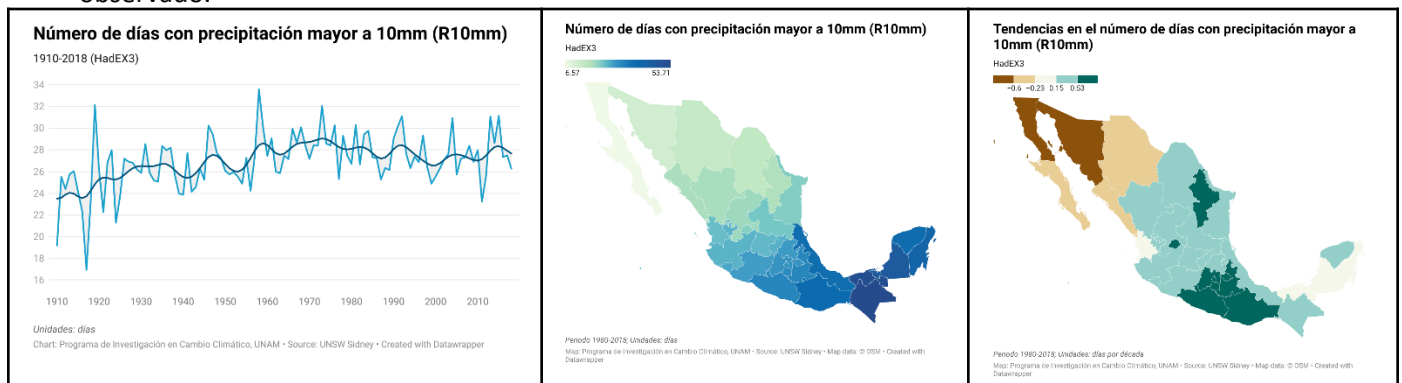
Fuente: Elaboración propia. Base de datos HadEX3.

Desde inicios del siglo XX, el número de días con precipitación mayor a 10mm (R10MM) en México ha aumentado en cerca de 4 días.

El incremento más pronunciado en R10MM se presentó en el periodo 1910-1970, llegando a un valor promedio máximo de 29 días al año. Desde la década de 1970 se ha registrado una ligera tendencia negativa llevando a un promedio de 28 días por año (véase **Figura 5**). La climatología de R10mm (1980-2018) muestra que los estados con menor número de días al año con precipitación mayor a 10mm son Baja California y Baja California Sur (7 días), seguidos por

Sonora, Chihuahua, Coahuila y Nuevo León (12-18 días). La región centro-occidental tiene un promedio de 20-30 días con precipitación mayor a 10mm, mientras que el sureste del país presenta los valores más elevados, llegando en Chiapas y Tabasco a más de 50 días por año. Las tendencias en R10mm registradas durante el periodo 1980-2018 muestran cinco estados con disminuciones en el número de días con precipitación, siendo Sonora el estado con la mayor reducción (un día por década), seguido por Baja California, Sinaloa, Baja California Sur y Chihuahua. Los mayores incrementos en R10mm se presentan en la región sur de la costa del Pacífico y en la zona central del país. Oaxaca y Puebla presentan las mayores tendencias con casi un día adicional por década, mientras que la zona centro muestran incrementos de entre 0.6 y 0.7 días adicionales por década. Nuevo León y Aguascalientes registraron aumentos cercanos a 0.6 días adicionales por década, mientras que la mayor parte del resto del país presentó aumentos de entre 0.2 y 0.5 días adicionales por década.

Figura 5. Evolución del número de días con precipitación superior a 10mm (R10mm) durante el periodo observado.



El panel izquierdo muestra la [evolución temporal de R10mm promedio](#) para México. El panel central muestra la [climatología de R10mm](#) (1980-2018) y el panel derecho muestra las [tendencias R10mm](#) (1980-2018).

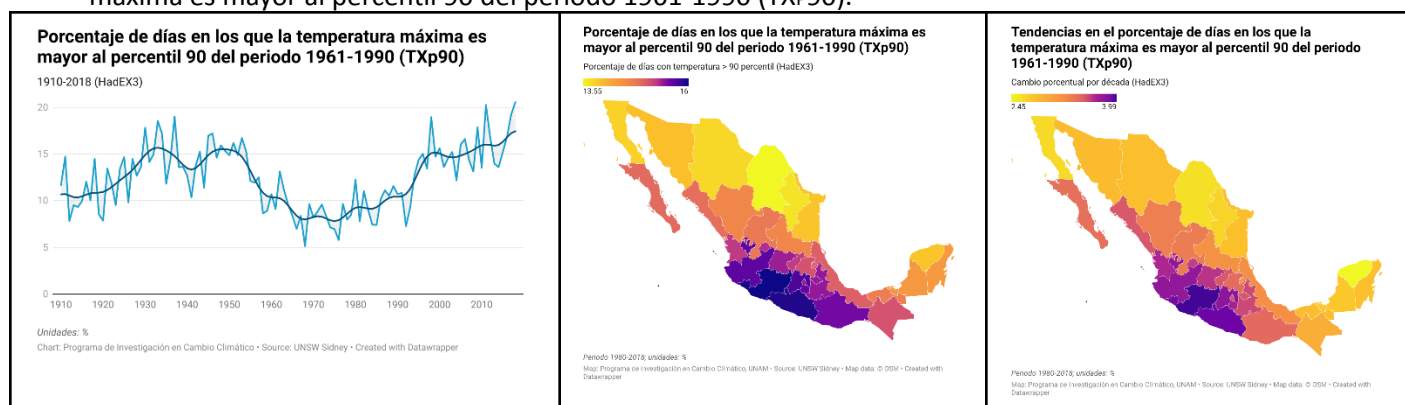
Fuente: Elaboración propia. Base de datos HadEX3.

El porcentaje de días con temperaturas máximas superiores al percentil 90 (TX90p) se ha casi duplicado desde 1970.

El porcentaje de días con temperaturas máximas superiores al percentil 90 observado durante el periodo de referencia (1961-1990) ha aumentado considerablemente desde inicios de la década de 1980, (véase **Figura 6**). Durante esa década el TX90p promedio para México era cercano a 9%, y durante los últimos años este valor se ha casi duplicado (17%). Sin embargo, es notable que este índice tuvo valores similares durante el periodo 1930-1950, lo cual sugiere el efecto de

alguna oscilación de baja frecuencia que modula la tendencia de largo plazo. Durante el periodo 1980-2018, la climatología de TX90_P muestra valores más altos a lo largo de las costas del Pacífico y valores decrecientes hacia el noreste del país. Los máximos en esta variable son superiores al 14.5% de los días por año y ocurren en Oaxaca, Guerrero, Michoacán y Jalisco. Las tendencias estimadas para el periodo 1980-2018 muestran incrementos superiores al 4% por década en Michoacán y Jalisco, de 3 a 4% en la región centro y noroeste del país y de entre 2 a 3% en el noreste.

Figura 6. Evolución durante el periodo observado del porcentaje de días en los que la temperatura máxima es mayor al percentil 90 del periodo 1961-1990 (TX_P90).



El panel izquierdo muestra la [evolución temporal de TX_P90 promedio](#) para México. El panel central muestra la [climatología de TX_P90](#) (1980-2018) y el panel derecho muestra las [tendencias TX_P90](#) (1980-2018).

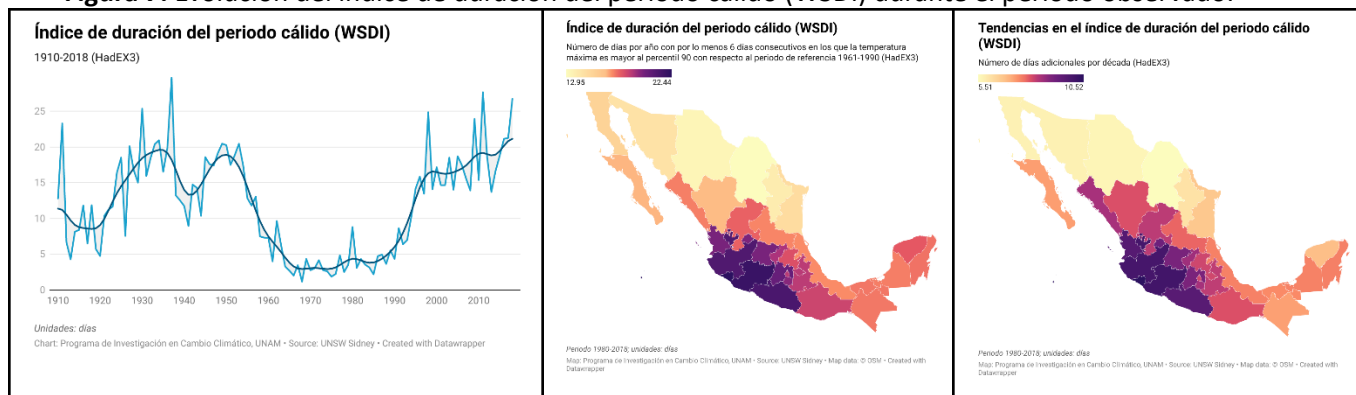
Fuente: Estrad Elaboración propia. Base de datos HadEX3.

Durante las últimas tres décadas, la duración del periodo cálido (WSDI) en México ha aumentado, alcanzando los niveles más altos en el registro que ocurrieron entre 1930 y 1960.

Para medir la duración del periodo cálido se utiliza la variable WSDI que consiste en el número de días por año con por lo menos 6 días consecutivos en los que la temperatura máxima es mayor al percentil 90 con respecto al periodo de referencia 1961-1990. El incremento en la duración del periodo cálido registrado desde mediados de la década de 1980 se da después de una etapa de casi treinta años, con las duraciones más cortas registradas para esta variable en México (1960-1990). Al igual que en el caso de TX90_P, este comportamiento sugiere el efecto de alguna oscilación de baja frecuencia que modula la tendencia de largo plazo en esta variable. La climatología de WSDI muestra que los estados con mayores duraciones del periodo cálido son aquellos en las regiones centro y occidente del país (Colima, Michoacán, Guerrero y Jalisco) con alrededor de 22 días al año, mientras que las duraciones más cortas se presentan en el norte

con entre 12 y 15 días por año. Las tendencias observadas durante el periodo 1980-2018 indican que estos patrones espaciales se han reforzado, con la región centro-occidental mostrando incrementos cercanos a 10 días adicionales por década y el norte del país presentando incrementos cercanos a 5 días adicionales por década. En el resto del país se han observado tendencias cercanas a los 7-8 días adicionales por década.

Figura 7. Evolución del índice de duración del periodo cálido (WSDI) durante el periodo observado.



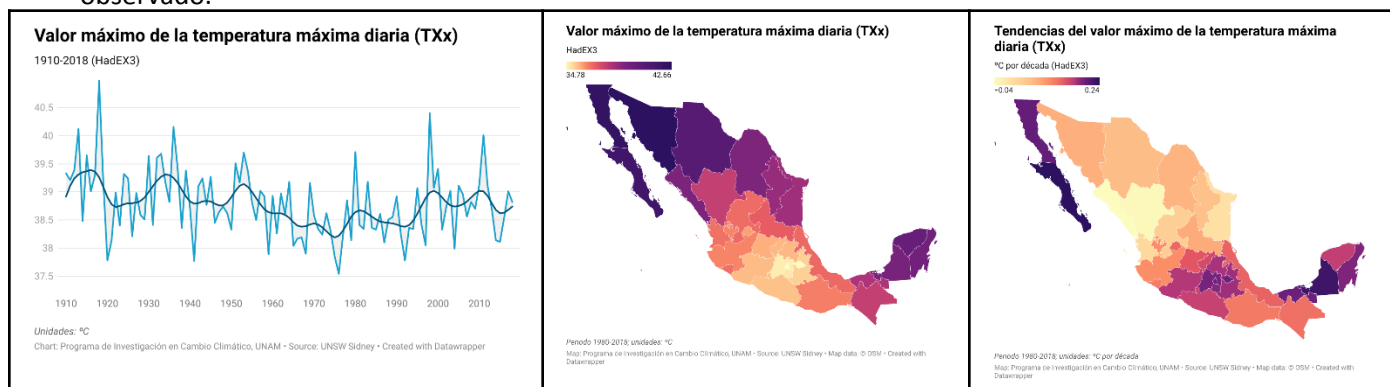
El panel izquierdo muestra la [evolución temporal de WSDI promedio](#) para México. El panel central muestra la [climatología de WSDI](#) (1980-2018) y el panel derecho muestra las [tendencias WSDI](#) (1980-2018).

Fuente: Elaboración propia. Base de datos HadEX3.

El valor máximo de la temperatura máxima diaria (TXx) en México ha aumentado desde mediados de la década de 1970. Sin embargo, en la primera mitad del siglo XX se registraron valores ligeramente mayores a los actuales.

De acuerdo con la climatología de TXx durante el periodo 1980-2018 (véase **Figura 8**), los valores máximos de la temperatura diaria se presentan en el norte del país con valores cercanos a los 42 °C en Sonora, Baja California, Baja California Sur y valores entre 38 °C y 40 °C en la parte noreste (Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas) y en la península de Yucatán (Yucatán, Campeche y Quintana Roo). La región centro del país que corresponde a la megalópolis del Valle de México registra los valores de TXx menos elevados de todo el país (cercanos a 35 °C). Las tendencias de cambio en TXx son muy heterogéneas geográficamente, distinguiéndose tres zonas con los mayores incrementos: la península de Baja California y la península de Yucatán, con aumentos de hasta 0.24 °C por década, y la zona del Valle de México, con aumentos cercanos a 0.20 °C por década. En contraste, la parte centro-norte registra tendencias cercanas a cero.

Figura 8. Evolución del valor máximo de la temperatura máxima diaria (TXx) durante el periodo observado.



El panel izquierdo muestra la [evolución temporal de TXx promedio](#) para México. El panel central muestra la [climatología de TXx](#) (1980-2018) y el panel derecho muestra las [tendencias TXx](#) (1980-2018).

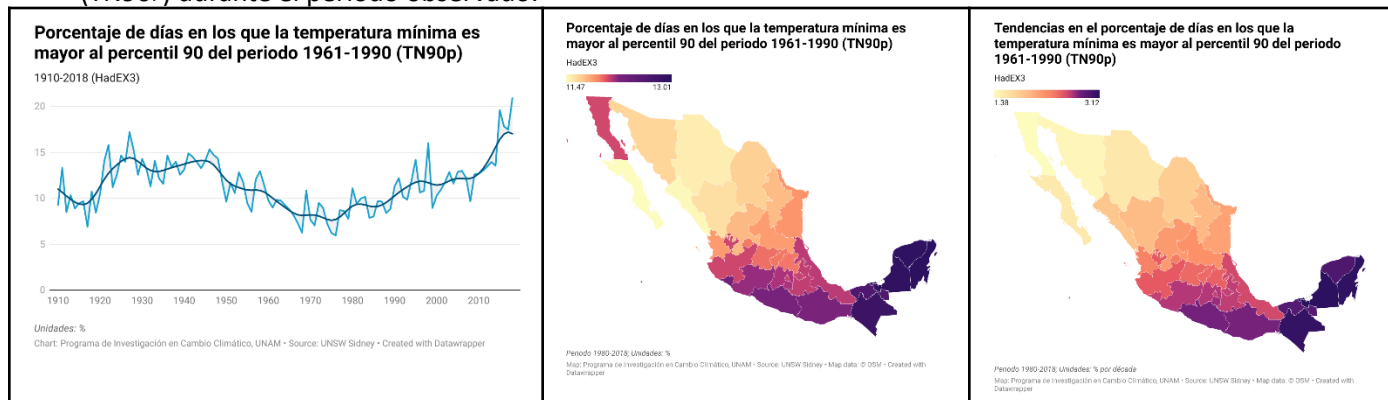
Fuente: Elaboración propia. Base de datos HadEX3.

El porcentaje de días en los que la temperatura mínima supera el percentil 90 (TN90_P) del periodo de referencia (1961-1990) en México ha aumentado desde mediados de la década de 1970 y se ha acelerado a partir de la década de 2010. En los últimos años, ha alcanzado su máximo histórico, llegando a cerca de 20% de los días con temperaturas mínimas superando este umbral.

Si bien TN90_P muestra la existencia de ciclos de largo plazo probablemente relacionados con los efectos de oscilaciones naturales de baja frecuencia, los valores observados a partir de la década de 2010 son mayores que los valores registrados desde inicios del siglo XX (véase **Figura 9**). La climatología de TN90_P durante el periodo 1980-2018 muestra un claro patrón geográfico en que el porcentaje de días que superan el 90 percentil obtiene sus valores máximos en la península de Yucatán y el sureste (12-13% de los días), seguido por la región centro-sur del país (incluyendo Michoacán, Jalisco, Estado de México, CDMX y Puebla, Tlaxcala y Veracruz; 12% de los días), y disminuyendo hacia el norte con valores de 11-12%. Las tendencias en TN90_P indican que el porcentaje de días que supera el percentil 90 del periodo de referencia ha aumentado más rápidamente en los estados que ya tienen los mayores porcentajes de días con temperaturas superiores a dicho umbral. Para la península de Yucatán y el sureste del país se registran tendencias de aumento cercanas al 3% por década en TN90_P, mientras que en la región centro este valor es de 2.5% por década, y en la región norte se observaron las menores

tendencias con valores de alrededor de 1.5% por década. En ningún estado se registran disminuciones en TN90p.

Figura 9. Evolución del porcentaje de días en los que la temperatura mínima es mayor al percentil 90 (TN90p) durante el periodo observado.



El panel izquierdo muestra la [evolución temporal de TN90p promedio](#) para México. El panel central muestra la [climatología de TN90p](#) (1980-2018) y el panel derecho muestra las [tendencias TN90p](#) (1980-2018).

Fuente: Elaboración propia. Base de datos HadEX3.

Escenarios futuros

Los cambios en el clima de México que se presenten durante la segunda parte de este siglo, y en horizontes más lejanos, dependen de la trayectoria socioeconómica que el planeta en conjunto decida.

Bajo una trayectoria de muy altas emisiones de gases de efecto invernadero (SSP585), la temperatura del aire anual promedio en México podría incrementarse a finales de este siglo en cerca de 6 °C con respecto al periodo 1986-2005; (véase **Figura 10**). Bajo un escenario de emisiones similar a las tendencias actuales sin esfuerzos de mitigación internacional considerables (SSP370), dicho aumento podría rebasar los 5 °C en el 2100. Por el contrario, en un escenario similar a que se cumplieran estrictamente los compromisos expresados por los países participantes en las Contribuciones Determinadas a nivel Nacional (CDN; similar al SSP245), la temperatura anual promedio en México podría limitarse a 3 °C. Finalmente, si los objetivos expresados en el Acuerdo de París se lograran (SSP126), la temperatura media en México podría estabilizarse en alrededor de 2 °C para finales de este siglo.

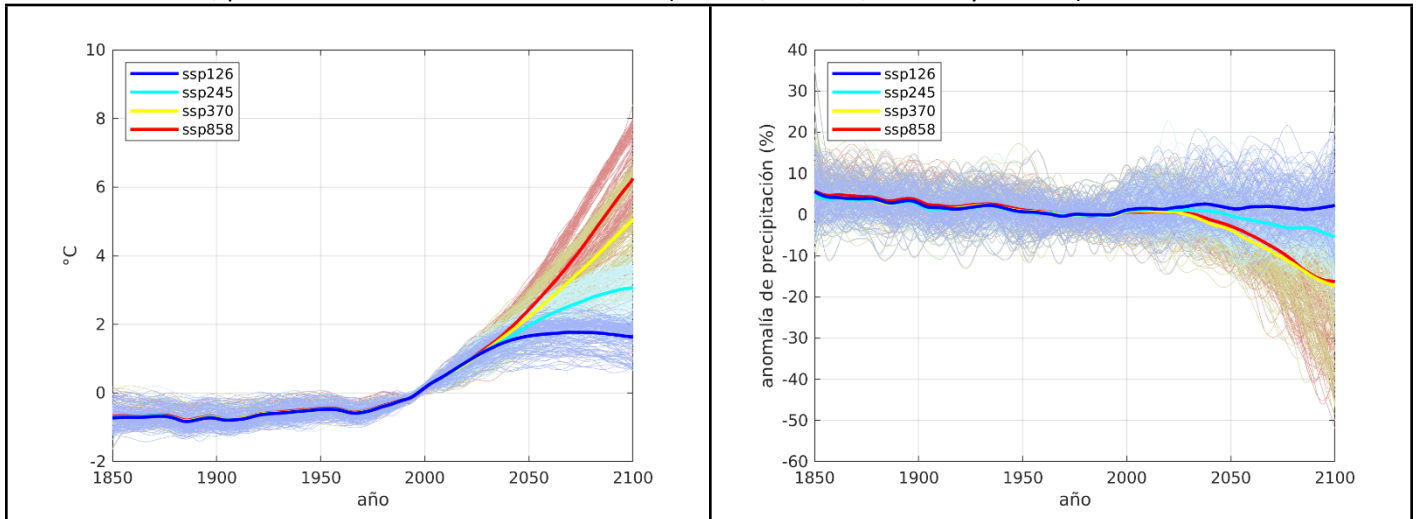
A pesar de la gran incertidumbre en las proyecciones de precipitación, los escenarios con emisiones altas de gases de efecto invernadero sugieren importantes reducciones en la precipitación anual promedio para el país. Por el contrario, las proyecciones basadas en escenarios de emisiones intermedias y bajas sugieren cambios en el nivel de la precipitación promedio del país, no muy distintas a las observadas en el periodo de referencia.

De acuerdo con el promedio del ensamble de todas las realizaciones incluidas en el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6, por sus siglas en inglés), los escenarios de altas emisiones (SSP585 y SSP370) implicarían una reducción de alrededor de un 15% (8%) para finales (mediados) del siglo. Escenarios de emisiones intermedias como el SSP245 proyectan cambios mucho menores en la precipitación anual promedio para el país (5% o menos) durante este siglo y un escenario consistente con el Acuerdo de París (SSP126) podría implicar un ligero aumento.

Hasta antes de la segunda mitad de este siglo, los cambios en el clima del país (y el mundo) están determinados casi en su totalidad por las emisiones y decisiones de política tomadas en décadas anteriores y por la larga memoria del sistema climático.

Los cambios previstos hasta 2030-2040 en su mayoría no son evitables por medio de políticas de mitigación convencionales y sugieren fuertemente la necesidad de ampliar y reforzar las estrategias de adaptación, el involucramiento y trabajo conjunto entre gobierno, sociedad y academia para el co-diseño de las mismas. El fortalecimiento de la ciencia y conocimiento del cambio climático, así como el de las instituciones públicas y privadas, son fundamentales para orientar la política pública y las decisiones de distintos sectores y grupos sociales, con el fin de reducir los riesgos de este fenómeno implica.

Figura 10. Evolución de la temperatura media anual y de la precipitación promedio anual para el periodo 1850-2100, para cuatro escenarios de emisiones (SSP585, SSP370, SSP245 y SSP126).



El panel izquierdo muestra el promedio anual de la temperatura del aire para México. El panel derecho muestra la precipitación anual promedio para México. Las líneas gruesas denotan los promedios de los ensambles para cada escenario de emisiones (rojo: SSP585; amarillo: SSP370; azul claro: SSP245; azul oscuro: SSP126). Todas las realizaciones se muestran con suavizamiento con el filtro Hodrick-Prescott.

Fuente: Elaboración propia. Base de datos CMIP6.

Simulaciones de modelos climáticos de última generación sugieren que el país podría enfrentar condiciones más secas y mucho más cálidas durante este siglo. Los cambios proyectados son muy heterogéneos en el espacio y entre las estaciones del año. Estas diferencias tienden a acentuarse en escenarios de altas emisiones de gases de efecto invernadero y para horizontes de tiempo largos.

Existen importantes diferencias entre las proyecciones de distintos modelos climáticos, en particular en cuanto a la precipitación y en escalas espaciales reducidas. En esta sección se utiliza la mediana del ensamble de los modelos del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6, por sus siglas en inglés) para representar los posibles cambios en el clima de México durante este siglo.

Bajo un escenario de emisiones de GEI muy alto (RCP8.5), en el 2050 el incremento en la temperatura para los estados del país podría ser entre 2.0 °C y 2.5 °C y de entre 3.83 °C a 5.38 °C a finales del siglo. Los mayores aumentos en la temperatura media anual se presentarían en la región norte del país, con estados como Coahuila, Chihuahua, Sonora, con aumentos de hasta 2.5 (2050) y 5.38 (2090), mientras que Yucatán y Quintana Roo tendrían los menores incrementos (cerca de 1.80 °C en 2050 y de 3.9 °C en 2090). Para finales del siglo, en el

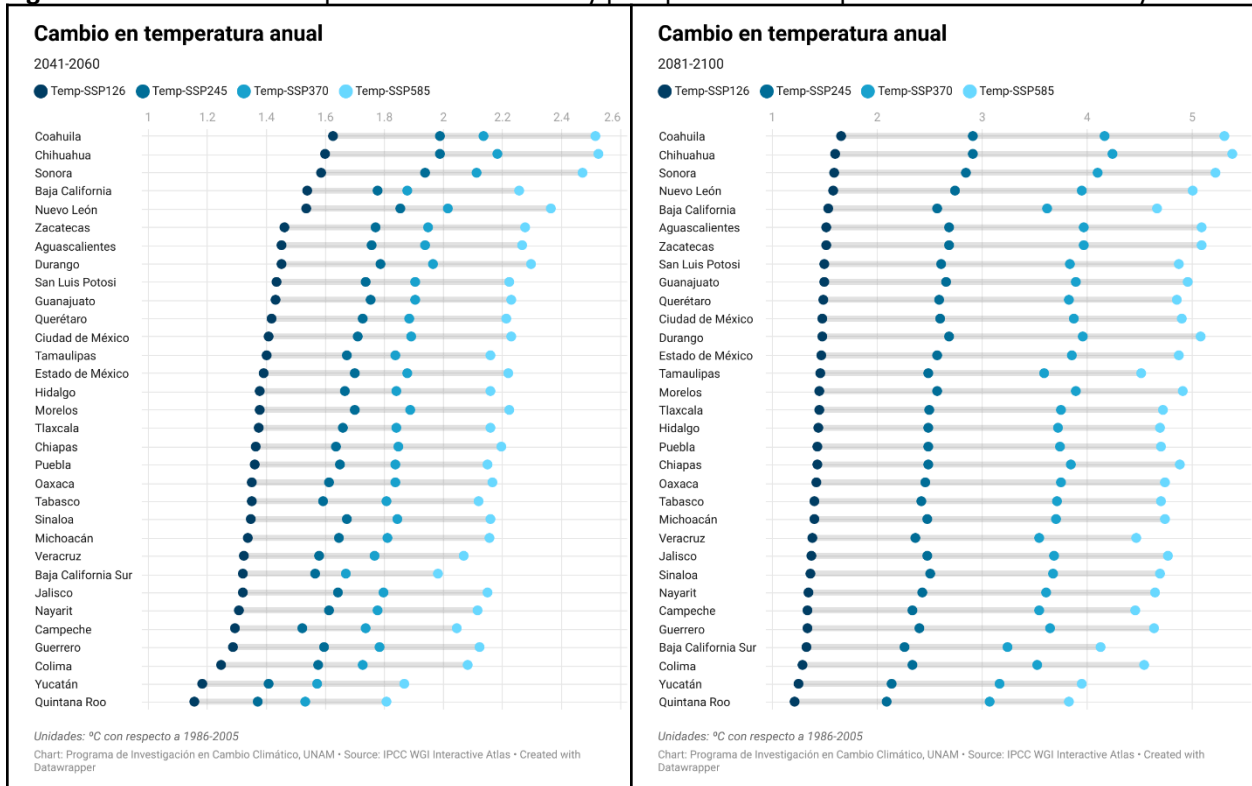
escenario SSP585, el incremento en la temperatura anual en 27 estados podría rebasar los 4.5 °C y, en el caso de 7 estados del norte, el aumento podría ser superior a los 5 °C.

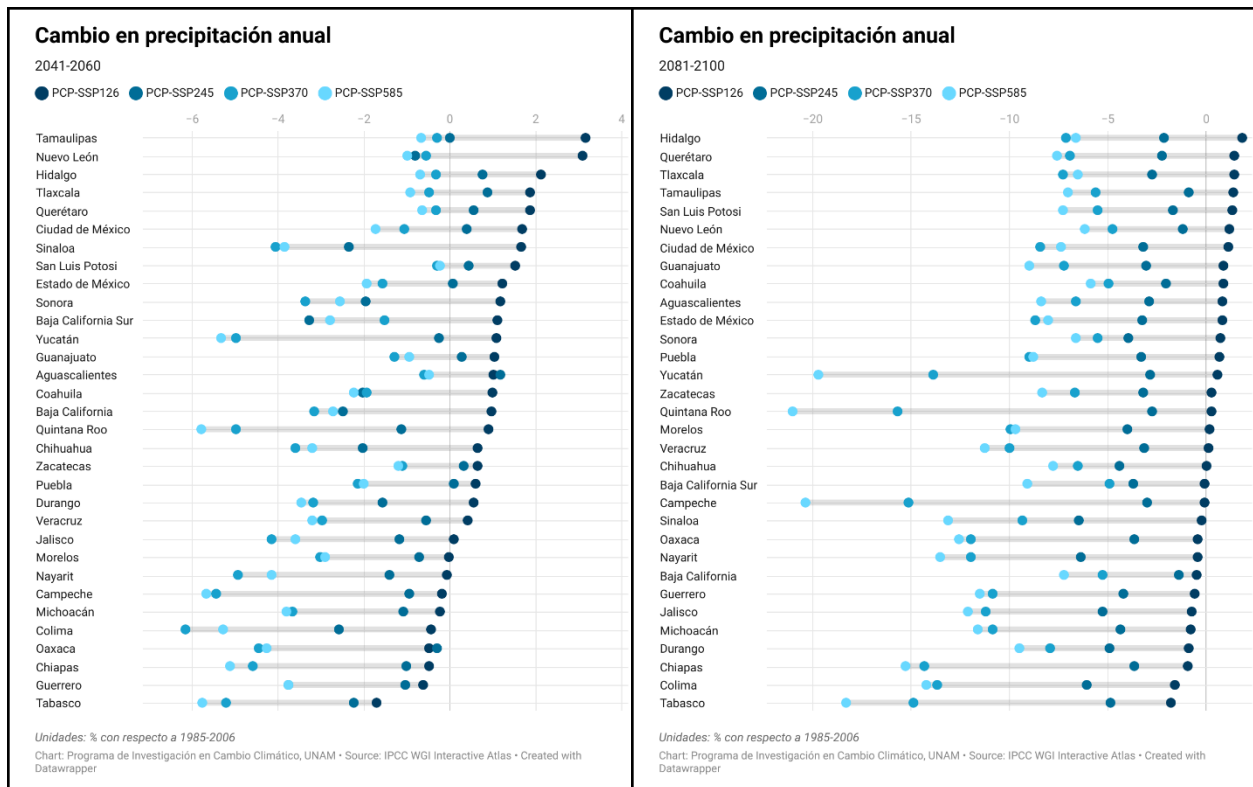
En contraste, bajo un escenario en el que se siguiera una trayectoria de emisiones de GEI consistente con el Acuerdo de París (SSP126), el aumento en la temperatura podría limitarse por abajo de 2 °C durante todo el siglo y para todos los estados del país. Inclusive escenarios que representan esfuerzos intermedios de mitigación internacional, tal como el cumplimiento estricto de las CDN actuales (similar al SSP245), podrían restringir los aumentos en la temperatura media anual estatal a menos de 3 °C en este siglo. En el horizonte corto, los aumentos en las temperaturas de otoño e invierno son ligeramente menores que aquellas de invierno y primavera. Los menores aumentos en la temperatura se presentan en el periodo de invierno, en el que las proyecciones no superan los 5 °C (1.6 °C) bajo el escenario SSP858 (SSP126). El patrón general de calentamiento a nivel estatal es muy similar para todas las estaciones y los escenarios de emisiones. En general, son los estados del norte del país los que muestran los mayores niveles de aumento en las temperaturas (Coahuila, Chihuahua, Sonora, Durango), aunque en verano Chiapas y Tabasco se encuentran entre los primeros 5 estados con mayor calentamiento. Los estados que muestran el menor calentamiento en todas las estaciones del año son típicamente aquellos en la península de Yucatán y en la península de Baja California (excepto en invierno).

La mediana del ensamble de simulaciones del CMIP6 sugiere que, para niveles bajos de aumento en la temperatura del planeta, la precipitación podría aumentar para la mayor parte de los estados del país. Esto ocurre únicamente para los escenarios más bajos de emisiones y hasta mediados del siglo. En particular, bajo el escenario SSP126, 23 de los 32 estados tendrían ligeros aumentos en la precipitación hasta el 2050. Sin embargo, para todos los demás escenarios que implican mayores emisiones de gases de efecto invernadero (SSP245, SSP370, SSP585) se prevé una disminución generalizada de la precipitación, especialmente en la segunda parte de este siglo. Las mayores disminuciones en la precipitación se esperan en la península de Yucatán, con valores que pueden superar -20% en el periodo 2081-2100. En general, para todos los estados se proyectan disminuciones en todas las estaciones del año, con la excepción de otoño. Bajo el SSP585 y en el horizonte 2050, los mayores incrementos (>10%) se dan en la región centro del país. Dichos aumentos varían de forma importante para los estados bajo los distintos escenarios de emisiones; las respuestas a distintos niveles de forzamiento son no lineales y

varían en signo y magnitud entre los diferentes SSP, particularmente en el horizonte corto. En primavera, las mayores reducciones en precipitación (>30% en el horizonte 2090) se presentan en las zonas centro y norte de las costas del Pacífico (Colima, Jalisco, Nayarit, Sonora y Michoacán) y las menores reducciones se presentan en la península de Yucatán y el sureste del país. En contraste, las mayores reducciones en la precipitación de verano se presentan en la península de Yucatán y gran parte del sureste de México y las menores reducciones se encuentran en el norte del país. En casos como Yucatán, Campeche y Quintana Roo, las reducciones en precipitación serían cercanas al 50% bajo el escenario SSP585. Las reducciones en la precipitación de invierno serían mayores en la zona centro de las costas del Pacífico (Colima, Jalisco, Michoacán y Nayarit) con magnitudes de al menos 20% en el corto plazo y 40% en el largo plazo.

Figura 11. Cambios en temperatura media anual y precipitación anual para los horizontes 2050 y 2090.





Las gráficas muestran la mediana del ensamble de simulaciones del CMIP6 para los estados de México y cuatro escenarios de emisiones SSP126, SSP245, SSP370 y SSP585. Los paneles superiores muestran los cambios en la temperatura media del aire (°C) para los horizontes 2041-2060 ([izquierda](#)) y 2081-2100 ([derecha](#)). Los paneles inferiores muestran los cambios en la precipitación anual (%) para los horizontes 2041-2060 ([izquierda](#)) y 2081-2100 ([derecha](#)). Todos los cambios se muestran con respecto al periodo de referencia 1986-2005.

Fuente: Elaboración propia. Base de datos CMIP6.

Se proyecta que durante el presente siglo los patrones de precipitación se vuelvan más extremos, particularmente bajo los escenarios de mayores emisiones de gases de efecto invernadero.

La mayor parte de los estados del país experimentarían un clima con importantes modificaciones en los patrones de precipitación, con periodos secos más largos y aumentos en la precipitación del día más lluvioso del año.

El promedio del ensamble de los modelos físicos del clima incluidos en el CMIP5 indica que, para cualquiera de los escenarios de emisiones analizados, casi todos los estados del país experimentarían un mayor número de días consecutivos secos (CDD), con respecto al periodo 1970-2000. En particular, bajo el escenario RCP8.5, estados como Baja California Sur y Colima, los días consecutivos secos podrían aumentar más de 10 y 21 días al año para el 2050 y 2090,

respectivamente. Estados como Durango, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Sinaloa y Sonora, podrían experimentar más de 7 días consecutivos secos adicionales al año para el 2050 y más de dos semanas adicionales para finales del siglo. Para la mayoría de los estados y escenarios de emisiones, se proyecta una disminución en el número de días con precipitación extrema (R10_{MM}) y un aumento en la precipitación del día más lluvioso del año (Rx1_{DAY}), lo cual sugiere un número de eventos extremos de precipitación al año, pero de mayor intensidad.

Se proyecta que los eventos extremos en temperatura aumenten en intensidad durante este siglo, incluso bajo los escenarios de mitigación internacional más ambiciosos, y particularmente para los escenarios con altas emisiones.

Durante este siglo y para todos los escenarios de emisiones, se espera que el valor de la temperatura máxima del día más caliente del año (TX_x) aumente para todo el país. Para mediados de siglo, los cambios más pequeños se presentarían bajo el escenario RCP2.6 y en la península de Yucatán, con incrementos menores a los 1.5 °C con respecto al periodo 1970-2000, (véase **Figura 12**). Bajo este mismo escenario de emisiones, el aumento promedio en TX_x para todos los estados sería de 1.77 °C, y una quinta parte de los estados tendrían aumentos mayores a 2.0 °C (por ejemplo, Chihuahua, Guanajuato, San Luis Potosí). En contraste, bajo el escenario de muy altas emisiones RCP8.5, para el 2050 todos los estados experimentarían incrementos en TX_x de al menos 2.0 °C, con 7 estados superando los 3 °C, (véase **Figura 12**). Para finales del siglo, en el escenario de emisiones más bajo (RCP2.6) el aumento promedio en TX_x para los estados se mantendría cerca de 1.70 °C. Esto subraya la gran importancia de diseñar e implementar medidas de adaptación que permitan reducir los riesgos e impactos que persistirán aún en los escenarios más optimistas de mitigación internacional. En un escenario de muy altas emisiones (RCP8.5), el aumento promedio para los estados en TX_x es de 5.34 °C, con 7 estados con incrementos cercanos o superiores a 6 °C con respecto al periodo 1970-2000 (véase **Figura 12**).

Por su parte, las proyecciones de cambio en la temperatura mínima del día más frío del año (TN_N) muestran incrementos en esta variable para todos los estados, escenarios de emisiones y ambos horizontes de tiempo. El escenario de emisiones que produce el incremento promedio más pequeño es el RCP2.6. Sin embargo, dada la gran variabilidad de TN_N y a lo cercanas que

pueden ser las trayectorias de emisiones en el horizonte 2040-2060, en algunos estados los incrementos más pequeños se dan bajo el escenario RCP6.0. Los aumentos de menor magnitud (1.2 °C) tienden a presentarse en el sureste del país, mientras que los mayores aumentos (1.7 °C y 2.5 °C) ocurren en el norte y en el escenario RCP8.5. A finales de este siglo, los incrementos para casi la mitad de los estados del país podrían rebasar los 4.0 °C en el escenario RCP8.5, con aumentos de 4.7 °C en Baja California y 4.6 °C en Sonora. En contraste, bajo el escenario RC2.6 a finales del siglo los incrementos en T_N a nivel estatal se encontrarían en el rango de 1.2 °C a 1.8 °C.

Los escenarios de mitigación internacional más optimistas en los que se cumplen las metas del Acuerdo de París proveen una primera aproximación de los requerimientos de adaptación mínimos en tiempo y espacio necesarios para diversos sistemas humanos y naturales.

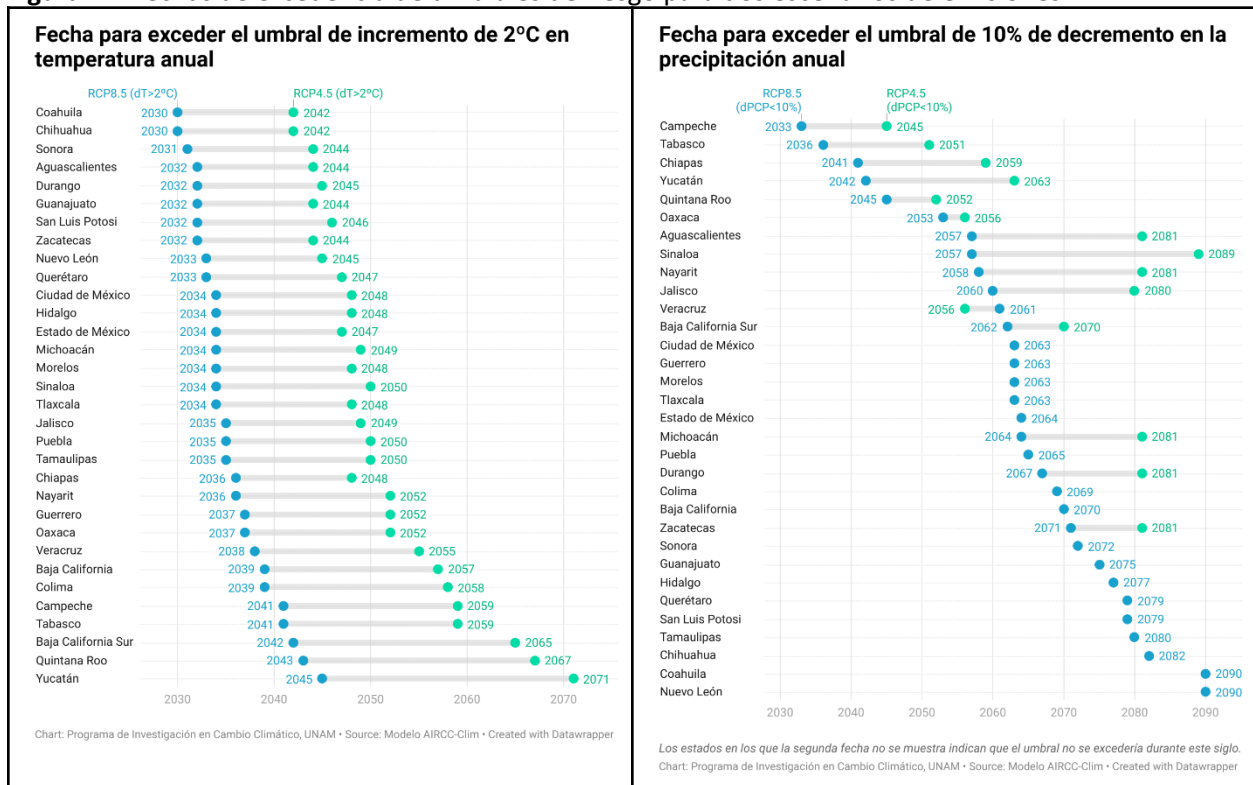
Los riesgos e impactos residuales son aquellos que un determinado esfuerzo de mitigación no puede evitar y para los cuales se requerirían estrategias de adaptación y reducción de riesgos. Las proyecciones de cambio climático basadas en esfuerzos de mitigación progresivamente ambiciosos pueden ayudar a formular requerimientos mínimos de adaptación y reducción de riesgo para distintos horizontes de tiempo, ubicaciones geográficas y para distintos sistemas humanos y naturales.

Incluso esfuerzos de mitigación internacionales poco ambiciosos pueden reducir algunos de los riesgos que cambio climático implica para el país y proporcionar tiempo para la adaptación.

Se ha mostrado utilizando simulaciones de modelos de emulación que las probabilidades de excedencia de diversos umbrales de riesgo pueden reducirse de manera importante aún bajo esfuerzos internacionales de mitigación limitados. De la misma forma, las fechas esperadas para rebasar estos umbrales de riesgo pueden retrasarse, dando mayor tiempo para la implementación de medidas de adaptación. Este es el caso de las Contribuciones Determinadas a nivel Nacional (CDN) actualmente acordadas por la mayor parte de países del mundo. Si bien las CDN actuales son insuficientes para limitar el aumento de la temperatura global por debajo de los 2 °C para finales del siglo, sí permiten reducir/retrasar la excedencia de umbrales de riesgo.

Por ejemplo, pasar de un escenario de inacción y muy altas emisiones (RCP8.5) a uno similar a lo que se lograría con las CDN actuales (RCP4.5) resultaría en retrasar 15 (12 a 26) años en promedio la fecha en que los estados del país rebasarían aumentos superiores a 2°C con respecto al periodo de referencia 1986-2005. De la misma forma, este esfuerzo de mitigación internacional lograría retrasar la excedencia de reducción de al menos 10% por cerca de 15-20 años en muchos estados, y en algunos de ellos se evitaría que este umbral se rebasara durante este siglo.

Figura 12. Fechas de excedencia de umbrales de riesgo para dos escenarios de emisiones.



El panel izquierdo muestra las [fechas estimadas de excedencia de 2°C](#) en la temperatura del aire anual para un escenario de muy altas emisiones (SSP585) y uno similar al cumplimiento estricto de las CDN actuales (SSP245). El panel derecho muestra las [fechas estimadas de excedencia de disminuciones mayores al 10%](#) en la precipitación anual para un escenario de muy altas emisiones (SSP585) y uno similar al cumplimiento estricto de las CDN actuales (SSP245). Estimaciones obtenidas del modelo AIRCC-CLIM.

Fuente: Elaboración propia. Base de datos CMIP6.

Actualmente, existen diversos recursos en línea para explorar el clima presente y futuro, así como para la elaboración de proyecciones basadas en escenarios de emisiones definidos por el usuario.

Existe una creciente oferta en línea de información, datos, códigos de cómputo y modelos sobre observaciones y proyecciones de clima y cambio climático que son de libre acceso. En ellas, los

usuarios pueden construir sus propios experimentos sobre el clima, explorar las simulaciones de diversos modelos climáticos de última generación, así como obtener bases de datos de diversas variables climáticas en el periodo observado. Invitamos a los lectores a consultar una selección de aquellas desarrolladas por la UNAM, así como por otras instituciones nacionales e internacionales en <https://www.pincc.unam.mx/recursos/>.