

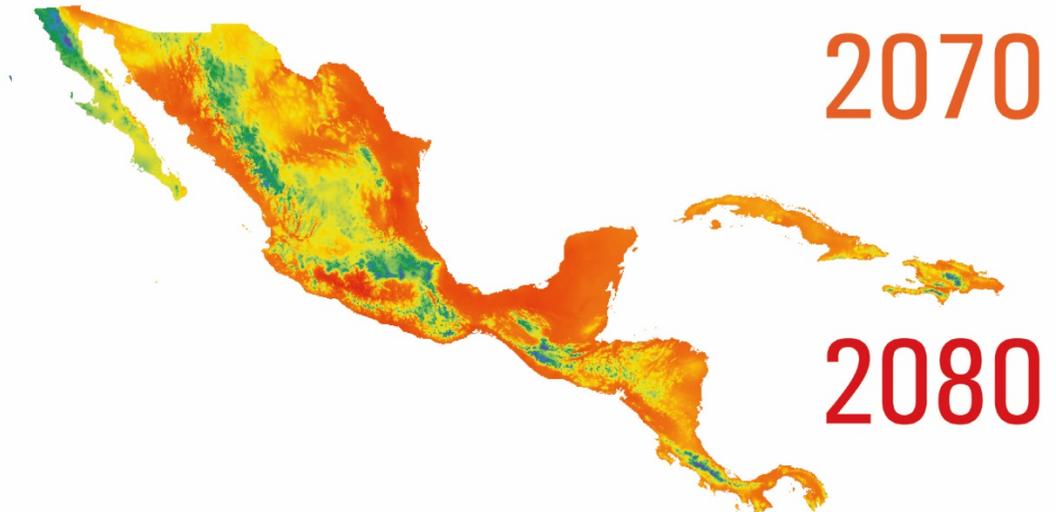
1960-1990



2030

**Análisis espacial
de datos históricos
y escenarios de cambio
climático en México,
Centroamérica, Cuba, Haití
y la República Dominicana**

2050



2070

2080



NACIONES UNIDAS

CEPAL



CAC



SICA

Sistema de la Integración
Centroamericana

Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.

 www.cepal.org/es/publications

 www.cepal.org/apps

**Análisis espacial de datos históricos y escenarios de cambio climático
en México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana**

Esta copublicación es el resultado del trabajo conjunto entre la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y el Consejo Agropecuario Centroamericano (CAC) de los Ministerios de Agricultura de los países miembros del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA). La publicación fue elaborada por Diana Ramírez y Jaime Olivares, funcionarios de la Unidad de Desarrollo Agrícola y Cambio Climático (UDACC) de la sede subregional de la CEPAL en México. Asimismo, contó con la supervisión de Julie Lennox, Jefa de la Unidad, y con la colaboración de Elliott Mengual (procesamiento de información), Paulina Smith, Lauren Juskelis y Verónica Quiroz, integrantes de la misma Unidad.

Se agradece todo el apoyo, cooperación y revisión de:

Secretaría Ejecutiva del Consejo de Ministros de Agricultura (SECAC): Roberto Harrison, Secretario Ejecutivo; Claudia Vallejo, Especialista en Políticas Agropecuarias; Ricardo Montero, Coordinador Técnico Regional; Manuel Jimenez y Gabriel Smith, Consultores Especialistas Externos.

Grupo Técnico de Cambio Climático y Gestión Integral del Riesgo de CAC: Victoriano Pascual (titular) y Clifford Martínez, (suplente) del Ministerio de Recursos Naturales y Agricultura (MRNA) de Belice; Xiomara González (titular) y Faviana Scorza (suplente) del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) de Costa Rica; Luis Napoleón Torres (titular) y Manuel Sosa (suplente) del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) de El Salvador; Martín Leonardo Leal (titular) y Benedicto Lucas (suplente) del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA) de Guatemala; Tirza Espinoza (titular) y Enid Cuellar (suplente) de la Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG) de Honduras; José Alejandro Pineda (titular) del Ministerio Agropecuario y Forestal (MAGFOR) de Nicaragua; Rodrigo Luque (titular) y Virgilio Salazar (suplente) del Ministerio de Desarrollo Agropecuario (MIDA) de Panamá, y Juan Mancebo (titular) y Dominga Zorrilla (suplente) del Ministerio de Agricultura (MA) de República Dominicana.

Expertos: Hugo Hidalgo y Eric Alfaro de la Universidad de Costa Rica; Diego Pons del International Research Institute for Climate and Society (IRI); Edwin Castellanos de la Universidad de Guatemala, y Carlos Navarro del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) del Programa de Investigación sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS).

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la Organización.

Los límites y los nombres que figuran en los mapas de este documento no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

Diseño de portada: Andrea Jiménez.

Notas explicativas:

- La coma (,) se usa para separar los decimales.
- La palabra "dólares" se refiere a dólares de los Estados Unidos, salvo cuando se indique lo contrario.

Publicación de las Naciones Unidas

LC/MEX/TS.2020/43

Distribución: L

Copyright © Naciones Unidas, diciembre de 2020

Todos los derechos reservados

Impreso en Naciones Unidas, Ciudad de México, 2020-63

Esta publicación debe citarse como: CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe)/CAC-SICA (Consejo Agropecuario Centroamericano del Sistema de la Integración Centroamericana) (2020), *Análisis espacial de datos históricos y escenarios de cambio climático en México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana* (LC/MEX/TS.2020/43), Ciudad de México, 2020.

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Publicaciones y Servicios Web, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solamente se les solicita que mencionen la fuente e informen a las Naciones Unidas.

**Análisis espacial
de datos históricos
y escenarios de cambio
climático en México,
Centroamérica, Cuba, Haití
y la República Dominicana**



SICA
Sistema de la Integración
Centroamericana



Comisión Económica para América Latina y el Caribe Sede subregional en México

Blvd. Miguel de Cervantes Saavedra N° 193, piso 12
Col. Granada, Alcaldía Miguel Hidalgo
CP 11520 Ciudad de México, México

Tel. (52) 55.4170.5600 - uacc-mex@cepal.org
www.cepal.org/mexico - repositorio.cepal.org

[www.cepal.org/es/sedes-y-oficinas/
cepal-mexico/desarrollo-agricola](http://www.cepal.org/es/sedes-y-oficinas/cepal-mexico/desarrollo-agricola)



Consejo Agropecuario Centroamericano (CAC)

600 metros Noreste del Cruce de Ipis-Coronado
San Isidro Coronado, San José, Costa Rica, Centroamérica
Tel. (506) 2216-0303

www.cac.int/
www.facebook.com/SECAC/
twitter.com/secretaria_cac



Sistema de la Integración Centroamericana (SICA)

Final Bulevar Cancillería
Distrito El Espino, Ciudad Merliot
Antiguo Cuscatlán, La Libertad
El Salvador, Centroamérica

Tel.: (503) 2248-8800 y (503) 2248-6900
<https://www.sica.int/>
info@sica.int



Índice

Mensajes clave	15
Resumen	29
Introducción	31
I. Cambio climático	35
A. Contexto y conceptos.....	35
B. Escenarios de cambio climático.....	36
C. Trayectoria y meta de emisiones globales.....	43
II. Escenarios, fuentes de información y metodología	47
A. Descripción climática de México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana.....	48
1. Corredor Seco Centroamericano.....	49
2. Características de los principales fenómenos meteorológicos que tienen influencia en el clima regional.....	50
B. El cambio climático regional y fenómenos meteorológicos.....	52
C. Fuentes de información y proceso para obtener valores nacionales y subnacionales.....	55
1. Información histórica.....	56
2. Información de escenarios climáticos.....	62
3. Selección de modelos para la región.....	63
4. Incertidumbre.....	65
5. Escalas geográficas.....	65
6. Escenarios SRES y RCP.....	66
D. Trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP).....	68
E. Proyecto de intercomparación de modelos acoplados fase 6 (CMIP6).....	71
III. Temperatura	75
A. Análisis histórico de la temperatura.....	76
1. Evidencia global.....	76
2. Evidencia regional.....	79

B.	Escenarios de cambio climático	98
1.	Climatología regional 1960-1990	99
2.	Escenario RCP4.5	100
3.	Escenario RCP8.5	113
C.	Comparación escenarios AR4 y AR5 de cambio climático de temperatura media en Centroamérica	125
IV.	Precipitación	127
A.	Análisis histórico de la precipitación	127
1.	Evidencia global.....	127
2.	Evidencia regional.....	129
B.	Escenarios de cambio climático	144
1.	Climatología base regional.....	147
2.	Escenarios RCP	148
3.	Escenario RCP4.5	150
4.	Escenario RCP8.5	160
C.	Comparación entre los escenarios AR4 y AR5 de cambio climático de temperatura media en Centroamérica.....	170
V.	Aridez	173
A.	Definición y clasificaciones climáticas del índice de aridez.....	173
B.	Evidencia: estudios previos para la región.....	176
C.	Elección de la metodología.....	179
D.	Índice de aridez por departamento: impacto histórico del cambio climático	180
E.	Índice de aridez por municipio: escenarios de cambio climático.....	186
1.	Período base 1960-1990	186
2.	Escenario RCP4.5	187
3.	Escenario RCP8.5	191
VI.	Meses secos	203
A.	Definición y clasificación de los meses secos	203
B.	Evidencia en estudios previos para la región	204
C.	Meses secos por departamento: impacto histórico del cambio climático	205
D.	Meses secos por municipio: escenarios de cambio climático.....	208
1.	Período base 1960-1990	208
2.	Escenario RCP4.5	209
3.	Escenario RCP8.5.....	212
4.	Comparativo de escenarios RCP4.5 y RCP8.5 por país.....	215

VII. Eventos extremos	225
A. Cambio climático y su atribución en los eventos extremos.....	226
B. Tendencia histórica de eventos climáticos extremos.....	233
1. Sequía	236
2. Tormentas y huracanes	238
3. Inundaciones	242
4. Extremos de temperatura	244
C. Eventos extremos: escenarios de cambio climático	246
1. Temperatura extrema	246
2. Precipitación extrema.....	249
3. Sequía	252
VIII. Conclusiones y recomendaciones	255
Bibliografía	265

Cuadros

Cuadro I.1	Cambios proyectados en la temperatura superficial media y en la elevación del nivel del mar, escenarios RCP, relativos al período 1986-2005.....	39
Cuadro I.2	Probabilidades en alza de temperatura asociada a los escenarios RCP	40
Cuadro I.3	Global: emisiones de GEI bajo diferentes escenarios, implicaciones para temperatura y brechas, 2030.....	44
Cuadro II.1	América del Norte, Centroamérica y el Caribe: resumen de los cambios proyectados en los fenómenos mayores y su impacto en el cambio del clima regional futuro	54
Cuadro II.2	Clasificación parcial y total de las simulaciones de los MCGAO para Centroamérica	64
Cuadro II.3	Desafíos socioeconómicos para la adaptación y mitigación	70
Cuadro III.1	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: temperatura media por país y por período, 1960-2018.....	87
Cuadro III.2	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: anomalías de la temperatura media por país y por mes, 2011-2018.....	91
Cuadro IV.1	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: promedio de la precipitación acumulada anual y desviación estándar por país y período, 1960-2018.....	133
Cuadro IV.2	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: departamentos por anomalía de la precipitación acumulada anual, 1991-2018.....	143
Cuadro IV.3	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios por anomalía de la precipitación acumulada anual, escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080	159

Cuadro IV.4	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios por anomalía de la precipitación acumulada anual, escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080	170
Cuadro V.1	Clasificación climática del índice de aridez de Lang.....	174
Cuadro V.2	Clasificación climática del índice de aridez de De Martonne	175
Cuadro V.3	Clasificación del índice de aridez del Atlas Mundial de Desertificación.....	176
Cuadro V.4	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios con menor y mayor variación del índice de aridez por país, escenarios RCP4.5 y RCP8.5, corte 2080 con respecto al período 1960-1990.....	201
Cuadro VI.1	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios con mes seco, por país y por mes, período base 1960-1990 y escenarios RCP4.5 y RCP8.5, cortes 2030 y 2080	223

Gráficos

Gráfico I.1	Emisiones antropogénicas anuales totales de GEI por gases, 1970-2010.....	36
Gráfico I.2	Escenarios de emisiones antropogénicas de CO ₂ anuales, 1950-2100	37
Gráfico I.3	Mundo: concentración de CO ₂ eq y CO ₂ en la atmósfera e incremento anual de concentraciones de CO ₂ eq, 1979-2019.....	41
Gráfico I.4	Mundo: emisiones de CO ₂ eq sin cambio de uso de suelo, 1990-2018.....	42
Gráfico I.5	Mundo: emisiones de CO ₂ eq con CUS de acuerdo con diversos escenarios y brecha, 2015-2050	45
Gráfico II.1	Comparación de los escenarios SRES y RCP	67
Gráfico II.2	Espacio de desafíos que identifica el dominio de los SSP.....	69
Gráfico II.3	Comparación de Escenarios RCP y Escenarios-MIP (SSP y RCP).....	72
Gráfico III.1	Mundo: anomalía de la temperatura global por año y década, 1850-2019 con respecto a la climatología 1850-1900	76
Gráfico III.2	Mundo: anomalía de la temperatura superficial terrestre por año y década con respecto a la climatología 1850-1900, 1850-2019.....	77
Gráfico III.3	Belice: anomalía de la temperatura por año y década, 1900-2018 con respecto a la climatología 1960-1990.....	80
Gráfico III.4	Costa Rica: anomalía de la temperatura por año y década, 1900-2018 con respecto a la climatología 1960-1990.....	81
Gráfico III.5	Cuba: anomalía de la temperatura por año y década, 1900-2018, con respecto a la climatología 1960-1990.....	81
Gráfico III.6	El Salvador: anomalía de la temperatura por año y década, 1900-2018, con respecto a la climatología 1960-1990.....	82
Gráfico III.7	Guatemala: anomalía de la temperatura por año y década, 1900-2018, con respecto a la climatología 1960-1990.....	82

Gráfico III.8	Haití: anomalía de la temperatura por año y década, 1900-2018, con respecto a la climatología 1960-1990	83
Gráfico III.9	Honduras: anomalía de la temperatura por año y década, 1900-2018, con respecto a la climatología 1960-1990	83
Gráfico III.10	México: anomalía de la temperatura por año y década, 1900-2018, con respecto a la climatología 1960-1990	84
Gráfico III.11	Nicaragua: anomalía de la temperatura por año y década, 1900-2018, con respecto a la climatología 1960-1990	84
Gráfico III.12	Panamá: anomalía de la temperatura por año y década, 1900-2018, con respecto a la climatología 1960-1990	85
Gráfico III.13	República Dominicana: anomalía de la temperatura por año y década, 1900-2018, con respecto a la climatología 1960-1990	85
Gráfico III.14	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: anomalía de la temperatura por década y país, 1991-2018, con respecto a la climatología 1960-1990	86
Gráfico III.15	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: temperatura media por país, por mes y por período, 1960-2018	88
Gráfico III.16	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios con temperatura más baja al final del siglo por país, climatología 1960-1990 y escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080	104
Gráfico III.17	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios con temperatura más alta al final del siglo por país, climatología 1960-1990 y escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080	105
Gráfico III.18	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios con anomalía de temperatura media más baja al final del siglo por país, escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080	108
Gráfico III.19	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios con anomalía de temperatura media más alta al final del siglo por país, escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080	109
Gráfico III.20	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: climatología base de temperatura media y sus anomalías, por municipios, 1960-1990 y escenario RCP4.5, corte 2080	110
Gráfico III.21	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: temperatura media de municipios seleccionados, por mes, climatología 1960-1990 y escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080	111

Gráfico III.22	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios con temperatura más alta al final del siglo por país, climatología 1960-1990 y escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	116
Gráfico III.23	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios con temperatura más baja al final del siglo por país, climatología 1960-1990 y escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	117
Gráfico III.24	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios con anomalía de temperatura media más baja al final del siglo por país y escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	121
Gráfico III.25	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios con anomalía de temperatura media más alta al final del siglo por país, escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	121
Gráfico III.26	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: climatología base de temperatura media y sus anomalías, por municipios, 1960-1990 y escenario RCP8.5, corte 2080.....	122
Gráfico III.27	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: temperatura media de municipios seleccionados, por mes, climatología 1960-1990 y escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	123
Gráfico IV.1	Mundo: precipitación global por año, media y desviación estándar de la precipitación por década, 1901-2018	128
Gráfico IV.2	Mundo: anomalía de la precipitación global por año con respecto a la climatología 1961-1990, 1901-2018	129
Gráfico IV.3	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: precipitación acumulada anual, promedio y desviación estándar por década y país, 1901-2018	131
Gráfico IV.4	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: precipitación acumulada por país, mes y período, 1960-2018	135
Gráfico IV.5	Alajuela (Costa Rica) y Quezaltenango (Guatemala): precipitación acumulada, por mes y período, 1960-2018.....	138
Gráfico IV.6	Costa Rica: precipitación acumulada por mes y período, climatología 1960-1990 y diferentes modelos RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	150
Gráfico IV.7	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: precipitación acumulada por país, mes, período, climatología 1960-1990 y escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	151
Gráfico IV.8	Municipios seleccionados de México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: precipitación acumulada, por mes, período, climatología 1960-1990 y escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	153

Gráfico IV.9	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: precipitación acumulada por país, mes, período, climatología 1960-1990 y escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	161
Gráfico IV.10	Municipios seleccionados de México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: precipitación acumulada, por mes, período, climatología 1960-1990 y escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	163
Gráfico V.1	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: departamentos en cada rango del índice de aridez, por período, 1960-2018.....	184
Gráfico V.2	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios en cada rango del índice de aridez, período 1960-1990 y escenarios RCP4.5 y RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	198
Gráfico V.3	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: promedio por municipio del índice de aridez por país, período 1960-1990 y escenarios RCP4.5 y RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	199
Gráfico VI.1	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios por número de meses secos por país, período 1960-1990 y escenarios RCP4.5 y RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	217
Gráfico VII.1	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: número de eventos extremos, 1930-2019.....	234
Gráfico VII.2	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: distribución de los eventos extremos climáticos, 1930-2019.....	234
Gráfico VII.3	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: evolución temporal de los eventos extremos registrados, 1930-2019.....	235
Gráfico VII.4	Océano Atlántico norte: número de huracanes, tormentas tropicales y subtropicales, 1878-2020.....	238
Gráfico VII.5	Océano Atlántico norte: número de huracanes, tormentas tropicales y subtropicales por mes, 1852-2019 y 2000-2019.....	239
Gráfico VII.6	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: tormentas registradas, por país, 1980-2019 ^a	240
Gráfico VII.7	Océano Atlántico norte: número de huracanes, tormentas tropicales y subtropicales por mes, 1980-2019.....	242
Gráfico VII.8	México Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: temperatura máxima anual, 1900-2018.....	245
Gráfico VII.9	Temperatura media: cambios en la media y en la varianza.....	247
Gráfico VII.10	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: distribución de la temperatura máxima, climatología 1960-1990 y escenarios RCP4.5 y RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	248

Gráfico VII.11	Razón de probabilidad de la precipitación extrema como función del calentamiento global.....	250
Gráfico VII.12	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: distribución de la precipitación acumulada, climatología 1960-1990 y escenarios RCP4.5 y RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080	251

Recuadro

Recuadro I.1	Tratamiento de incertidumbre en la evaluación del Grupo de trabajo I del IPCC	38
--------------	---	----

Diagrama

Diagrama VII.1	Evaluación de la ciencia de la atribución del cambio climático para diferentes tipos de eventos.....	232
----------------	--	-----

Mapas

Mapa II.1	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: ubicación en el sistema de coordenadas geográficas.....	48
Mapa II.2	Mesoamérica: temperatura media, resolución de 30 minutos, mayo de 1990.....	59
Mapa II.3	Mundo: localización de estaciones climáticas con datos de temperatura media trabajadas por WorldClim, 1950-2000.....	61
Mapa II.4	Mesoamérica: temperatura media, resolución 30 segundos, mayo 1960-1990.....	61
Mapa III.1	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: temperatura media anual por departamento y por período, 1960-2018.....	93
Mapa III.2	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: anomalía de la temperatura media por departamento y por período, 1960-2018.....	96
Mapa III.3	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: temperatura media por municipio y por período, climatología 1960-1990 y escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	101
Mapa III.4	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: anomalía de temperatura media por municipio, escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080	106
Mapa III.5	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: temperatura media por municipio y período, climatología 1960-1990 y escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	114
Mapa III.6	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: anomalía de temperatura media por municipio y período, climatología 1960-1990 y escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	118

Mapa IV.1	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: precipitación acumulada anual por departamento y período, 1960-2018.....	140
Mapa IV.2	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: anomalía de la precipitación acumulada por departamento y período, 1960-2018.....	142
Mapa IV.3	Mundo: cambio de la precipitación media anual, 2081-2100.....	147
Mapa IV.4	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: precipitación acumulada anual por municipio y período, climatología 1960-1990 y escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	155
Mapa IV.5	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: anomalía de la precipitación acumulada anual por municipio y período, escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080	158
Mapa IV.6	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: precipitación acumulada anual por municipio y período, climatología 1960-1990 y escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	165
Mapa IV.7	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: anomalía de la precipitación acumulada anual por municipio y período, escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080	168
Mapa V.1	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: índice de aridez por departamento y por período, 1960-2018.....	182
Mapa V.2	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: variación del índice de aridez por departamento y por período con respecto al período 1960-1990, 1991-2018.....	184
Mapa V.3	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: índice de aridez por municipio, período 1960-1990 y escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	188
Mapa V.4	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: variación del índice de aridez por municipio, escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	190
Mapa V.5	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: índice de aridez por municipio, período 1960-1990 y escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	193
Mapa V.6	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: variación del índice de aridez por municipio y período, escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	196
Mapa VI.1	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: meses secos al año por departamento, promedio 1960-2018	207
Mapa VI.2	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: meses secos al año por municipio, período 1960-1990 y escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	210

Mapa VI.3	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: meses secos al año por municipio, período 1960-1990 y escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080.....	213
Mapa VII.1	Centroamérica: Corredor Seco.....	237
Mapa VII.2	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: eventos de sequía por departamento, 1980-2019 ^a	237
Mapa VII.3	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: tormentas y huracanes que impactan tierra por departamento, 1980-2019.....	241
Mapa VII.4	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: inundaciones por departamento, 1980-2019 ^a	243
Mapa VII.5	México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: resumen de la probabilidad de decremento o incremento en la precipitación menos evapotranspiración (P-E)	252

Mensajes clave

El clima es un bien público global; es el soporte de millones de especies de animales, plantas y otras formas de vida y producto de la constante y compleja interacción de esta vida con la atmósfera, los océanos, las capas de hielo y nieve y los continentes del planeta. Las consecuencias de cambios en los promedios de temperatura y precipitación en los países de la región SICA, Cuba, Haití y México son múltiples y pueden tener efectos importantes en la agricultura, la seguridad alimentaria y nutricional, los ecosistemas, la biodiversidad, la disponibilidad de agua, la salud, la infraestructura, y generar elevados costos socioeconómicos. A medida que dichos efectos no se mitiguen, el resultado será una mayor migración en la región al reducirse sus medios de vida.

En el programa de trabajo del Consejo Agropecuario Centroamericano (CAC) de los Ministerios de Agricultura de los países miembros del SICA con la CEPAL 2015-2020, aprobado por el consejo de Ministros de Agricultura, se acordó realizar diversos análisis y brindar apoyo técnico para implementar políticas públicas de agricultura sostenible y adaptada al clima (ASAC) y seguridad alimentaria y nutricional (SAN), incluyendo continuar con el análisis y fortalecimiento de capacidades técnicas con respecto a los impactos potenciales del cambio climático y opciones de respuesta, el desarrollo de seguros agropecuarios con gestión integral de riesgo, fortalecimiento de sistemas de información y generación de capacidades técnicas para su manejo y utilización en el diseño y evaluación de políticas, todo lo cual debía ser orientado al desarrollo de instrumentos de política y aplicaciones útiles.

En este último punto se acordó recabar información histórica del clima y hacer la actualización de los escenarios climáticos del Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5) y buscar “reducir la escala” a distintos niveles subnacionales. Asimismo, se acordó fomentar el uso de sistemas de información satelital y sistemas de información georreferenciada (SIG). Estas herramientas podrán fortalecer los análisis de las cadenas de valor, los seguros agropecuarios, la producción agrícola, los proyectos de inversión pública, los planes de adaptación y las medidas de mitigación, entre otros. Al mismo tiempo, está alineado con la Estrategia de Agricultura Sostenible Adaptada al Clima para la región del SICA 2018-2030 (EASAC), en el fortalecimiento y articulación de mecanismos regionales de generación e intercambio de información climática y agroclimática y el fortalecimiento de las bases de datos climáticos regionales, y con la Estrategia Regional de Cambio Climático (ERCC) 2018-2022 en sus objetivos de adaptación al cambio climático y reducción de vulnerabilidades, y su eje de implementación de gestión de conocimiento.

Esta copublicación reporta el trabajo realizado por el equipo técnico de CEPAL con el GTCCGIR de CAC/SICA y el apoyo técnico de CCAFS/CIAT y científicos de la región. Está enfocada en generar datos útiles en función de los escenarios del IPCC AR5. Su objetivo es divulgar información e identificar próximos pasos para su aplicación en iniciativas como el

desarrollo de instrumentos de implementación de políticas públicas de cambio climático, el diseño de proyectos agropecuarios, de seguros agropecuarios, de sistemas nacionales de inversión pública (SNIP) y fortalecimiento de capacidades de funcionarios públicos para que pueden aplicarse en otras iniciativas. Esta copublicación está dirigida a técnicos y académicos que realizan análisis de cambio climático incluyendo análisis de impacto en diversos sectores como el agrícola, ecosistemas, hídrico, salud y energía con el fin de generar información que pueda ayudar a los tomadores de decisiones a crear políticas públicas basadas en la mejor evidencia.

Las emisiones antropogénicas de GEI dependen principalmente del tamaño de la población, la actividad económica, el estilo de vida, el uso de la energía, los patrones de uso del suelo, la tecnología y la política climática. El clima futuro dependerá de la acumulación de las emisiones antropogénicas del pasado, así como de emisiones presentes y futuras. La continua alza de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) está generando cambios en todos los componentes del sistema climático, aumentando la probabilidad de impactos graves, generalizados e irreversibles en las personas y los ecosistemas.

Las proyecciones de las emisiones de GEI presentan un amplio margen de variación, pero dependen principalmente de las decisiones y medidas orientadas a una transición económica profunda, de producción y consumo hacia un sendero de desarrollo sostenible y bajo en emisiones de GEI. Sin embargo, todos los escenarios de emisiones proyectan que la temperatura global en la superficie continuará aumentando a lo largo del siglo XXI. Como consecuencia, es muy probable que la variabilidad climática también aumente, que las olas de calor ocurran con mayor frecuencia y tengan una mayor duración, y que los episodios de precipitación extrema sean más intensos y frecuentes. Igualmente, el océano se seguirá calentando y acidificando y el nivel medio global del mar continuará elevándose.

En la quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) del IPCC se identificaron diferentes escenarios de forzamiento radiativo, llamados trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés), conocidos también como escenarios IPCC AR5. Estos incluyen un escenario de mitigación estricto (RCP2.6), dos escenarios intermedios (RCP4.5 y RCP6.0), y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP8.5).

Durante el período 2000-2019, las concentraciones de GEI han aumentado en promedio 3 ppm al año y, de mantenerse esta tendencia, en 50 años se alcanzarían las concentraciones necesarias para superar los 2 °C de aumento en temperatura. Sin embargo, la tendencia de aumento de concentraciones de CO₂eq se ha acelerado, por lo que este incremento podría ocurrir antes y alcanzar temperaturas aún mayores al final del presente siglo. De acuerdo con el CMIP5, es probable que la temperatura media global en el período 2046-2065 supere de 1 °C a 2 °C con respecto al promedio observado durante el período 1986-2005, con rangos probables que se encuentran entre 0,4 °C a 2,6 °C, de acuerdo con los escenarios RCP, y hacia 2081-2100 estarían entre 1 °C y 3,7 °C, con rangos probables de 0,3 °C a 4,8 °C con respecto al período 1986-2005 (IPCC, 2013a). Esta estimación está basada en múltiples líneas de evidencia y supone que no habrá erupciones volcánicas importantes o cambios en la irradiación solar total. Se considera que los cambios en el ciclo del agua en respuesta al cambio climático no serán

uniformes y el contraste entre las regiones húmedas y secas podría aumentar. A corto plazo y a escala regional los cambios se verán afectados por la variabilidad natural.

Limitar el aumento de temperatura requiere reducir las concentraciones de GEI, por lo que la humanidad tendría que disminuir sus emisiones globales de GEI de manera significativa para poder limitar el incremento de la temperatura. La sumatoria de las metas actuales de reducción de emisiones de los países miembros de la CMNUCC no es suficiente para alcanzar la estabilización y eventual reducción de las emisiones. Estas metas fueron presentadas en sus contribuciones nacionales determinadas (NDC, por sus siglas en inglés) surgidas a partir del Acuerdo de París en 2015, que también incluyen prioridades de adaptación. Actualmente, los países miembros están revisando sus NDC, frente al llamado a aumentar la ambición y responder urgentemente a la creciente emergencia climática.

Desde 2008 la iniciativa la Economía del Cambio Climático en Centroamérica y República Dominicana (ECC CARD) generó diversos análisis de impacto del cambio climático. En una primera etapa se generaron escenarios de temperatura y precipitación hasta 2100 con cambio climático y se evaluaron los impactos del cambio climático en la agricultura, los recursos hídricos y la biodiversidad. En posteriores etapas se ampliaron los análisis para incluir aridez, meses secos, patrones intraanuales del clima, salud, ecosistemas, granos básicos, café, seguridad alimentaria y nutricional (SAN) e hidroelectricidad. Se destacan también los análisis realizados por diversas instituciones, incluyendo el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) de México, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) de México, el Instituto de Meteorología (INSMET) de Cuba y la Universidad de Costa Rica, entre otras. La mayoría de estos estudios tuvo como base los escenarios de cambio climático del cuarto informe de evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) (AR4).

El objetivo de este estudio es realizar una actualización de los escenarios de cambio climático a nivel nacional y subnacional, utilizando los escenarios de cambio climático del AR5 y una selección de los modelos del CMIP5 para México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana, países atendidos por la sede subregional de la CEPAL en México. También tiene el propósito de divulgar entre a los potenciales usuarios de estos datos cuáles son las fuentes disponibles, las herramientas de descarga y visualización, las diferencias de estos nuevos escenarios con los anteriores, así como mostrar aplicaciones de los datos climáticos históricos y proyecciones futuras de temperatura y precipitación como el análisis de aridez y meses secos.

Además, se busca mostrar los hallazgos más relevantes que puedan ser de utilidad para la evaluación del impacto del cambio climático a nivel subnacional. Este análisis se basa en fuentes de información globales de instituciones de renombre en cambio climático. Por una parte, está la fuente de información para datos históricos, CRU TS 4.03, de East Anglia University. Por otra parte, la información de escenarios de cambio climático (RCP4.5 y RCP8.5) de WorldClim y CCAFS-Climate de los modelos CESM1_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR SE del CMIP5 y que son presentados como un ensamble o promedio. La elección de estos modelos se basó en su capacidad para reproducir las características del clima de fines del siglo XX en Centroamérica.

Para el análisis histórico se utilizó toda la serie disponible de información SIG del sitio web del CRU que va de 1900 a 2018 a nivel mensual de temperatura media y precipitación. En tanto que para el análisis de cambio climático se trabajó con los escenarios del AR5 del IPCC denominados RCP que hacen referencia a la trayectoria de concentración de emisiones, la emisión de contaminantes atmosféricos y el uso de suelo hasta 2100. Estos escenarios identifican su forzamiento radiativo total para 2100 que oscila entre $2,6 \text{ W/m}^2$ y $8,5 \text{ W/m}^2$ (vatios por metro cuadrado) (IPCC, 2014a). Se eligió el escenario intermedio RCP4.5 y el escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI, RCP8.5. El escenario RCP4.5 supone mayores reducciones de emisiones que la sumatoria de las propuestas nacionales en sus NDC registradas para 2030 (PNUMA, 2019), mientras que la trayectoria actual de emisiones es muy cercana a las emisiones del escenario RCP8.5. Tanto para el análisis histórico como de cambio climático los cambios se muestran con respecto al período base 1960-1990. Se utilizaron cuatro cortes futuros que representan períodos de 30 años nombrados como 2030 (2020-2049), 2050 (2040-2069), 2070 (2060-2089) y 2080 (2070-2099). A continuación, se presenta un resumen de los hallazgos.

En la última década se han registrado las temperaturas globales más altas registradas desde 1850. En 2016 se registró la temperatura global (superficie y océano) más alta con una anomalía de $1,11 \text{ }^\circ\text{C}$ con respecto al período 1850-1900 (era preindustrial); en toda la década de 2011-2019 la anomalía global fue de $0,93 \text{ }^\circ\text{C}$ (superficie y océano) con respecto a dicho período, y la de la superficie terrestre fue de $1,44 \text{ }^\circ\text{C}$, superior al incremento de la temperatura en los océanos. Cada uno de los cuatro últimos decenios ha sido sucesivamente más cálido en la superficie de la tierra que cualquier decenio anterior (CRU, 2019).

El clima y los ecosistemas, de México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana se caracterizan por su gran diversidad. La temperatura y la precipitación varían significativamente: algunas zonas secas del noroeste de México reciben un promedio de menos de 100 mm de precipitación anual; en contraste, algunos lugares de la costa del caribe de Centroamérica reciben más de 6.000 mm anuales. Por su parte, Centroamérica es una región con una topografía compleja y diversa que incluye territorios continentales, cadenas de islas y cadenas montañosas de diferentes orientaciones y elevaciones. Las variaciones subregionales dificultan las generalizaciones sobre el clima de la región y motivan a buscar información a nivel más desagregada geográficamente.

En los países estudiados en esta publicación, la última década ha sido la más caliente desde 1900. Todos los países tuvieron anomalías por arriba de $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ entre 2011 y 2018 con respecto al promedio de 1960-1990. La mayor anomalía promedio del período 2011-2018 se presentó en México con $1,05 \text{ }^\circ\text{C}$, seguido de Cuba con $0,91 \text{ }^\circ\text{C}$, después el grupo de países del norte de Centroamérica, Guatemala ($0,89 \text{ }^\circ\text{C}$), Belice ($0,86 \text{ }^\circ\text{C}$), El Salvador ($0,82 \text{ }^\circ\text{C}$) y Honduras ($0,76 \text{ }^\circ\text{C}$), y finalmente el resto de los países: Haití ($0,70 \text{ }^\circ\text{C}$), Nicaragua ($0,68 \text{ }^\circ\text{C}$), República Dominicana ($0,62 \text{ }^\circ\text{C}$), Panamá ($0,61 \text{ }^\circ\text{C}$) y Costa Rica ($0,59 \text{ }^\circ\text{C}$).

El cambio climático ya experimentado muestra diferencias en aumentos de temperatura entre países y meses. En los tres países del Caribe el aumento fue significativo entre diciembre y febrero durante el período 2011-2018, mientras que en Belice, El Salvador, Guatemala y Honduras hubo un mayor aumento entre noviembre y febrero. En el mismo período, Costa Rica y Nicaragua han experimentado mayores aumentos en julio y diciembre.

Panamá mostró un mayor aumento en julio y septiembre entre 2011 y 2018. México ha presentado un mayor aumento en febrero y marzo durante el período 2011-2018. La evidencia muestra que, con excepción de México y Panamá, diciembre es el mes que ha sufrido el mayor aumento de temperatura media. Espacialmente, en el período 2011-2018, en Haití, la República Dominicana, entre el oriente de Honduras hasta Panamá y desde el noreste de México hacia su costa Pacífico se registraron anomalías de entre 0,4 °C a 0,8 °C con respecto a 1960-1990. Aumentos mayores en el rango de 0,8 °C a 1,2 °C se registraron en Cuba, en algunos estados del norte y del sur de México hasta El Salvador y el occidente de Honduras. De acuerdo con la evidencia, en este rango se encuentra el aumento global de temperatura. En el noroeste de México se presentó la mayor anomalía al superar 1,2 °C.

Bajo el escenario de cambio climático RCP4.5, con respecto al período 1960-1990, en 2030 algunas áreas al norte de México tendrían incrementos de temperatura entre 2 °C a 2,4 °C y el resto del norte de México tendría anomalías entre 1,6 °C a 2 °C. Desde el centro-norte de México hasta Honduras se experimentarían incrementos entre 1,2 °C a 1,6 °C, al igual que en Haití y la República Dominicana. En Nicaragua, Costa Rica, Panamá, Cuba, la costa del Pacífico en Guatemala y El Salvador los incrementos serían de entre 0,8 °C a 1,2 °C. En 2080 la mayor severidad del cambio climático en el escenario RCP4.5 se observaría en el norte de México con anomalías de 2,8 °C a 3,2 °C con respecto al período 1960-1990, entre 2,4 °C a 2,8 °C en el centro de México y entre 2 °C a 2,4 °C en las costas y en el sur de México. Se esperaría un incremento de 2 °C a 2,4 °C en Belice, Guatemala, El Salvador, gran parte de Honduras, el occidente de Nicaragua, Haití y el occidente de la República Dominicana. Algunos municipios de Guatemala y Honduras experimentarían una mayor anomalía, y la zona del Atlántico de Honduras y de Nicaragua, así como Costa Rica, Panamá, Cuba y el oriente de la República Dominicana experimentarían las menores alzas, con un rango de 1,6 °C a 2 °C en 2080 en RCP4.5.

En el escenario RCP8.5 los incrementos serían mayores. En 2030 el aumento de temperatura entre 2 °C a 2,4 °C, con respecto al período 1960-1990, abarcaría un área mayor en el norte de México y la anomalía entre 1,6 °C a 2 °C se daría desde México hasta El Salvador y el occidente de Honduras. El resto de la región experimentaría incrementos entre 1,2 °C a 1,6 °C. En 2080 las anomalías serían superiores a 4,4 °C, con respecto al período 1960-1990, en casi todo el territorio de México, Guatemala, Honduras y El Salvador; en las costas del Caribe y sur de Centroamérica y en Cuba tendrían anomalías de temperatura con 3,2 °C a 3,6 °C; en la República Dominicana y Haití se identifica una zona central más afectada con una anomalía de entre 3,6 °C y 4 °C.

El IPCC indica que es probable que las influencias antropogénicas hayan afectado al ciclo global del agua desde 1960. Con un nivel de confianza medio se considera que han contribuido a los aumentos observados en el contenido de humedad en la atmósfera, a los cambios a escala global en los patrones de precipitación en la superficie terrestre, a la intensificación de precipitaciones fuertes en regiones continentales y a cambios en la salinidad del océano en su capa superficial y por debajo de ella. El análisis de precipitación histórica de las últimas décadas evidencia un incremento en las medias de la precipitación por década con respecto a las anteriores a 1950. Sin embargo, esto solo se puede afirmar con un nivel de confianza bajo. Se requieren registros extensos de precipitación para analizar potenciales

cambios y se deben analizar zonas o regiones con características similares. Además, los análisis de datos globales pueden no reflejar los cambios en algunas regiones climáticas.

La precipitación anual promedio en los países de la región —México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana— varía en un amplio rango, dependiendo de la diversidad en las condiciones topográficas. En los últimos años no se han observado cambios importantes que indiquen una mayor o menor cantidad de lluvias, aunque sí se observa mayor variabilidad. No obstante, incluso con tendencias no significativas en la precipitación, el incremento en la temperatura puede generar graves consecuencias en la hidrología y la disponibilidad de agua, ya que un mayor calentamiento genera aumentos en la evapotranspiración, suelos más secos y mayor aridez.

El análisis del ciclo anual de precipitación del centro y sur de México, así como de la mayor parte de los demás países, revela un régimen que se caracteriza por una distribución bimodal, con dos precipitaciones máximas en el año, aproximadamente en junio y septiembre-octubre, una estación seca de noviembre a mayo y una canícula entre julio y agosto. El inicio de la temporada de lluvias generalmente es en mayo. El segundo máximo de precipitación suele ser más húmedo que el primero.

El cambio en la precipitación en el período 1991-2000 con respecto a la climatología 1960-1990, sugiere condiciones con menos lluvia sobre todo en el norte de México, Haití y Guantánamo en Cuba. Mientras tanto, 2001-2010 fue un período con mayor precipitación con respecto a la climatología base. En algunos estados del norte de México, sobre todo la península de Baja California y Sonora, se presentaron condiciones más secas y el decremento llegó hasta 18%. En Chihuahua, Sinaloa, Nayarit, Jalisco y Colima en México, Huehuetenango, Quiché y la región nororiente de Guatemala, Honduras, El Salvador y la región del Pacífico de Nicaragua y Costa Rica el decremento fue menor al 10%. En el resto de la región, la precipitación aumentó en menos del 10%. Durante el período 2011-2018 se registró mayor precipitación en México, Guatemala, Belice y Cuba con respecto a la climatología de referencia 1960-1990, aunque el incremento no sobrepasó el 10%. Sin embargo, en el resto de la región centroamericana se presentaron condiciones más secas; en promedio en Centroamérica la precipitación se redujo menos del 10%.

Las estimaciones de los escenarios climáticos sugieren cambios no uniformes en el ciclo global del agua en respuesta al calentamiento durante el siglo XXI. Se acentuará el contraste de las precipitaciones entre las regiones húmedas y secas, así como entre las estaciones húmedas y secas, aunque podrá haber excepciones regionales. Existe un nivel de confianza alto en que el fenómeno ENOS seguirá siendo el modo dominante de variabilidad intraanual en el Pacífico tropical, con efectos que se sentirán a escala mundial en el siglo XXI.

A partir de 2030 con los escenarios analizados se observan cambios en el nivel de precipitación promedio acumulada al año. De acuerdo con el escenario RCP4.5, durante el presente siglo la región seca (niveles bajos de precipitación) se ampliaría y se extendería en el norte de México. En Centroamérica se ampliaría lo que se denomina Corredor Seco Centroamericano, principalmente en las regiones centrales de Guatemala, Honduras y Nicaragua. Las regiones húmedas (con niveles altos de precipitación) seguirían siendo la costa atlántica de Nicaragua, Costa Rica y Panamá, así como algunos municipios del occidente y

norte de Guatemala. También habría menos precipitación en la parte sur de Cuba y suroeste de la República Dominicana.

En el corte 2080 las proyecciones del escenario RCP4.5 indican que en la mayor parte de la región habría un decremento en la precipitación con respecto al período 1960-1990. La región más afectada continuaría siendo el norte de México. No obstante, la región con decrementos mayores al 10% se reducirá significativamente en comparación con las proyecciones de 2030 y 2050. La mayor parte de Guatemala, Honduras, El Salvador, la República Dominicana, así como gran parte de Nicaragua y Cuba también serían afectadas por una reducción en la precipitación, pero no mayor al 10%. Los mayores decrementos se ubicarían en el norte de México —especialmente en Baja California y Sonora— con decrementos mayores al 15%. Los aumentos en la precipitación ocurrirían en la costa pacífica del sur de México, Guatemala y Nicaragua, la mayor parte de Costa Rica, Panamá y la parte norte de Cuba.

Las estimaciones del escenario RCP8.5 sugieren que hacia 2030 la precipitación disminuiría con respecto al período 1960-1990 en la mayor parte de México, las regiones del Petén y norte de Guatemala, algunos municipios de la costa atlántica de Honduras, oriente de Cuba, sur de Haití y la mayor parte de la República Dominicana. El resto de la región experimentaría incrementos incluyendo la costa del Pacífico y la mayor parte de la península de Yucatán en México, la costa del Pacífico de Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, Panamá y la mayor parte de Cuba. Los incrementos superiores al 10% de precipitación estarían en el sur de la península de Baja California y en la costa del Pacífico de Panamá. Se esperaría que al corte 2080 la mayor parte de México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana tendría una reducción significativa en la precipitación.

Decrementos mayores al 10% ocurrirían en la zona noroeste, el golfo de México y la península de Yucatán en México, Belice, el Petén en Guatemala, Honduras, algunos municipios en el norte de Nicaragua, el este de Cuba, el sur de Haití y la República Dominicana. Decrementos menores al 10% se presentarían en el norte, centro y sur de México, la mayor parte de Guatemala (excepto la costa del Pacífico), El Salvador, Nicaragua, Costa Rica, centro y occidente de Cuba y norte de Haití. No obstante, habría zonas con incrementos de la precipitación, como la costa del Pacífico del centro y sur de México (aunque la región sería menos extensa que las estimaciones de los cortes 2030 y 2050), la costa del Pacífico de Guatemala, algunos municipios del occidente de El Salvador y la mayor parte de Panamá.

Con respecto a los escenarios de aridez, se aplicó la metodología de De Martonne, utilizando solo las variables de temperatura y precipitación, para calcular el índice de aridez para la región en el período histórico y con los escenarios de cambio climático. Dicha metodología utiliza una escala que va de 0 a 5 para la clasificación hiperárida o desértico, 5 a 10 para árido o semidesierto, 10 a 20 para semiárido, 20 a 30 para subhúmedo, 30 a 60 para húmedo y valores mayores de 60 para perhúmedo o muy húmedo. Las condiciones de húmedo y perhúmedo se dividieron en dos subcategorías para identificar posibles cambios entre las regiones más húmedas.

En el período 1960-1990 a nivel departamental, la región norte de México fue clasificada árida y semiárida, la región del occidente, el Bajío y Yucatán en México se clasificó como subhúmeda, el centro y sur de México, Cuba, Haití, la República Dominicana, el norte de

Belice, El Salvador, el centro y el Pacífico de Honduras y el Pacífico de Nicaragua se clasificaron como húmedo, y Tabasco en México, el sur de Belice, Guatemala, el Atlántico de Honduras y Nicaragua, Costa Rica y Panamá se clasificaron como perhúmedos.

En el período 2011-2018 el valor del índice de aridez se incrementó (mayor humedad) hasta en cinco unidades con respecto a 1960-1990 en toda la región de golfo de México, en el centro, en el Pacífico sur, en Baja California Sur y la península de Yucatán de México; lo mismo en Belice, el Petén, el occidente de Cuba y en el oriente de la República Dominicana. El resto de la región disminuyó el valor del índice (mayor aridez), con una reducción de más de cinco unidades en el Atlántico de Nicaragua, Costa Rica y el occidente de Panamá que son las áreas más húmedas de la región. Estos cambios han resultado en una disminución de los departamentos clasificados como perhúmedos y una ligera disminución en los clasificados como subhúmedos, y un aumento en los departamentos húmedos entre 2011 y 2018.

A escala municipal se observa una clasificación del índice de aridez más detallada. Durante el período 1960-1990 se observan algunos municipios clasificados como hiperáridos en la península de Baja California y Sonora en el noroeste de México, y una región más amplia clasificada como árida y semiárida desde el norte hacia el centro de México. Los municipios clasificados como subhúmedos también se encuentran en Yucatán y desde el norte hacia el sur en México, y se observan algunos municipios con estas condiciones en Guatemala, Honduras, Nicaragua, Cuba y la República Dominicana. Las regiones húmedas se encuentran desde las partes altas del noroeste de México y en otros municipios del centro y sur de este país, en algunos municipios de Guatemala, El Salvador, gran parte de Honduras, el Pacífico de Nicaragua y el resto de Cuba, Haití y la República Dominicana. La zona perhúmeda se encuentra desde el estado de Veracruz hacia el sur de México, Guatemala, Belice y desde la región del Atlántico de Honduras hasta Panamá.

Bajo el escenario RCP4.5 las mayores reducciones en el índice, con respecto al período 1960-1990, se darían en el sur de México y en el norte de Centroamérica en 2080. Esto resultaría en una mayor fragilidad en las zonas que se ubican en el Corredor Seco Centroamericano y en casi todo el territorio de Honduras. Algunas de las áreas más afectadas por la mayor reducción del índice, como el sur de México, Guatemala, desde el altiplano occidental hasta Izabal y toda la región del Atlántico desde Nicaragua hasta Panamá, no perderían su condición de húmedas por sus características actuales de muy húmedas. El estimado con el escenario RCP8.5 mostró reducciones mayores en las zonas más húmedas de la región, en más de 10 unidades del índice a 2080 con respecto a 1960-1990. En el norte de México habría disminuciones de hasta cinco unidades del índice de aridez que verían una reducción en su clasificación climática a áridas, semiáridas y subhúmedas, lo que indica la vulnerabilidad climática en la que se encuentran algunas regiones.

Entre el período 1960-1990 y el corte 2080, en el escenario RCP4.5, la proporción de municipios clasificados como perhúmedo 2 pasaría de 4% a 3%, perhúmedo 1 pasaría de 13% a 9% y húmedo 2 de 24% a 21%, mientras que en el escenario RCP8.5 la proporción de municipios sería de 1%, 7% y 17% respectivamente en 2080. En el mismo período habría un aumento de municipios en las clasificaciones más secas, en el RCP4.5 la proporción de municipios subhúmedos pasaría de 19% a 22%, los semiáridos de 9% a 13% y los áridos de 1% a 2%. En el escenario RCP8.5 la proporción de municipios de húmedo 1 pasaría de 30% a

32% entre 1960-1990 y 2080, y la proporción de subhúmedo sería de 25%, semiárido 15% y árido 2% en 2080. En ambos escenarios la condición de húmedo 1 sería la de mayor porcentaje y a partir de 2070 la condición de subhúmedo sería la segunda clasificación en la región.

El número de meses secos es un indicador climático que complementa el análisis de precipitación para identificar estaciones secas en el año y cambios en su duración. Entre 1990 y 2018 se ha generado un aumento de meses secos con respecto al período 1960-1990 en gran parte de la región —principalmente en el norte de México— donde entre 2011 y 2018 se han presentado más estados con más de 9 meses secos. En los departamentos del Pacífico de Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua y Costa Rica la característica es tener entre 4 y 6 meses secos durante el período 1960-2018. En Cuba aparecieron más provincias con condiciones de 5 y 6 meses secos en el período 2011-2018 con respecto a 1960-1990, donde tenían 4 meses secos.

El indicador de meses secos a nivel municipal muestra que durante el período 1960-1990 predominan los municipios con 5 y 6 meses secos con 38% del total; le sigue la clasificación de 0 y 1 mes seco con 18% de los municipios (principalmente en el Atlántico de Centroamérica), con 7 y 8 meses secos (14%), con 4 meses secos (13%), con 3 meses secos (8%), con 2 meses secos (5%) y con más de 9 meses secos (4% de los municipios). En 2080 estas proporciones serían de 30% para 5 y 6 meses secos, 20% para 4 meses secos, 19% para 7 y 8 meses secos, 12% para 0 y 1 mes seco, 9% para 3 meses secos, 5% para 2 meses secos y 5% para más de 9 meses secos en RCP4.5; y en RCP8.5 las proporciones serían de 29% para 5 y 6 meses secos, 22% para 4 meses secos, 21% para 7 y 8 meses secos, 9% para 3 meses secos, 7% para 0 y 1 mes seco, 6% para más de 9 meses secos y 5% para 2 meses secos. De los municipios que dejarían de tener 5 y 6 meses secos algunos incrementarían su número de meses secos a más de 7 meses secos en el norte, centro y Pacífico de México y otros disminuirían sus meses secos a 4 en El Salvador, el Pacífico de Guatemala, Cuba y Panamá principalmente, con mayor proporción a más meses secos en RCP8.5.

El 48% de los municipios experimentaron una estación seca que va de noviembre a abril en el período histórico de 1960-1990. Con cambio climático en ambos escenarios el período dominante podría ser de diciembre a abril, pero con aumento en el porcentaje de los municipios que considerarían a estos meses como secos, llegando a 62% en RCP4.5 en 2080 y a 64% en RCP8.5. Entre mayo y septiembre podría haber un aumento de municipios que experimentarían algunos meses como secos, en mayor medida en mayo y julio, lo que da la posibilidad de mayores períodos secos en la primera mitad del año, en especial en el escenario RCP8.5. Esta tendencia podría ocurrir en México, Cuba, Haití, Honduras y la República Dominicana. El cambio en la estación seca podría impactar las actividades económicas, principalmente la actividad agrícola de la región, pues la fenología de diversos cultivos requiere ciertos patrones de precipitación. Por ejemplo, para el cultivo del café se requiere de condiciones secas para la floración; mayor humedad podría provocar menor floración y la aparición de enfermedades como la roya. Asimismo, una tendencia hacia mayores meses secos en la estación tradicionalmente húmeda impactaría en la siembra de temporal.

Los impactos de los recientes fenómenos extremos —como olas de calor, sequías, inundaciones, tormentas, ciclones e incendios forestales— ponen de relieve la vulnerabilidad

y exposición de los ecosistemas y sistemas humanos a la variabilidad climática. México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana conforman una región donde los eventos meteorológicos extremos y el cambio climático tienen grandes repercusiones e impactan directamente a los ecosistemas y las actividades económicas. Por ejemplo, una elevación en el nivel del mar dañaría las zonas litorales, provocaría infiltración salina, erosión costera y pérdida de playas, afectando puertos, asentamientos humanos, infraestructura turística, producción agropecuaria y carreteras. Asimismo, eventos extremos han generado la destrucción de ecosistemas y su biodiversidad, incluyendo áreas protegidas.

El índice de riesgo climático (CRI, por sus siglas en inglés) de la organización German Watch califica el impacto de los eventos extremos (tormentas, inundaciones, extremos de temperatura y olas de calor y frío) en una clasificación de países, en el que el país con el número más bajo es el más vulnerable. Los resultados del CRI del período 1999-2018 indican que Haití se encuentra entre los países más afectados por eventos climáticos extremos, es el país con mayores impactos recibidos en la región, y se ubica en la tercera posición de la clasificación, Guatemala en la posición decimosexta, El Salvador en la vigésimo quinta, Belice en la trigésima segunda, Nicaragua en la trigésima octava, Honduras en la cuadragésima segunda, la República Dominicana en la quincuagésima, México en la quincuagésima cuarta, Costa Rica en la nonagésima quinta y Panamá en la posición centésima decimoctava.

La tendencia de los eventos extremos registrados en la región se ha incrementado en las últimas décadas con respecto a los históricos. De acuerdo con los datos de EM-DAT, la frecuencia de las inundaciones se ha duplicado en las últimas décadas, pues de 1980 a 1989 se reportaron 45 eventos; de 1990 a 1999, 57 eventos; en el período de 2000 a 2009 se reportaron 121 y de 2010 a 2019 se registraron 105 eventos. La frecuencia de huracanes y tormentas tropicales que han impactado a los países se ha incrementado significativamente en la región. En la década de 1970 se reportaron 16 eventos (huracanes y tormentas tropicales) en los 11 países; en la década de 1980, 25; en la década de 1990, 62; durante el período 2000 a 2009, 107 y de 2010 a 2019, 90 eventos. Las sequías también se han incrementado significativamente en la región. En la década de 1960 se reportaron 5 eventos de sequía en los 11 países; en la década de 1980, 7; en la década de 1990, 16; en el período 2000-2009, 15, y de 2010 a 2019, 19 eventos. Los países con mayor número de eventos extremos fueron México y Haití. No obstante, Cuba, Honduras, Guatemala y la República Dominicana también registraron una alta frecuencia de estos eventos.

Por una parte, el calentamiento global conduciría a eventos extremos calientes más frecuentes e intensos en todas las regiones terrestres, así como a períodos cálidos más largos, que afectarían a muchas regiones densamente habitadas (calificado como muy probable por el IPCC). Con una alta confianza se prevé que los aumentos de temperatura de los días de calor extremo en latitudes medias sean hasta dos veces el aumento de la temperatura media global de la superficie (GMST). Por otra parte, los extremos fríos serían menos intensos y frecuentes, además de que los períodos de frío serían más cortos (muy probable). Muy probablemente las temperaturas extremas en la tierra aumentarían más que la temperatura promedio global.

Los modelos climáticos que estiman la temperatura máxima en México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana sugieren que habrá un aumento en el número de eventos extremos como olas de calor. Es decir, la distribución de probabilidad de la

temperatura máxima se modificaría; la media se desplazaría hacia mayores temperaturas y la probabilidad de temperatura mayor a 40 °C se incrementaría. El promedio de la temperatura máxima anual en la región durante el período 1960-1990 fue de 27,8 °C. Se espera que el cambio climático desplazaría la media hacia mayores temperaturas. El escenario RCP4.5 sugiere que hacia 2030 la media sería de 30 °C, y hacia 2080 de 32 °C. En tanto que, con el escenario RCP8.5 la media en 2030 podría llegar a 31,5 °C y en 2080, a 34,3 °C.

Algunos análisis encuentran que los cambios proyectados de precipitaciones fuertes son más inciertos que los de temperaturas extremas. Asimismo, los resultados de los escenarios de precipitación son menos robustos que los de la temperatura media. Algunas zonas de la región serían más propensas de ser afectadas por un probable aumento en la intensidad de los ciclones o tormentas y huracanes o por la mayor cantidad de lluvia que traerían estos eventos. Sin embargo, existe una menor confiabilidad y poca evidencia en la atribución de que el cambio climático aumente la frecuencia o la intensidad de los huracanes y tormentas tropicales.

Debido a la gran variabilidad que existen en los escenarios de cambio climático para la precipitación no es posible identificar tendencias claras en las proyecciones futuras de la precipitación extremas de México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana. Los modelos climáticos para esta región indican la distribución de probabilidad de la precipitación no se modifica significativamente. La media, varianza y forma de la distribución de probabilidad de la precipitación acumulada anual permanecerían sin cambios importantes. No obstante, se esperarían cambios en la distribución de la precipitación intraanual.

Las evaluaciones sobre sequía que se han realizado ponen de manifiesto la incertidumbre sobre las proyecciones futuras, sobre todo porque estas incluyen una gran variedad de factores como los efectos de las concentraciones de CO₂ y la eficiencia del uso de agua de las plantas, entre otros. En general, las proyecciones de cambios en la sequía para escenarios de altas emisiones de GEI (RCP8.5) que corresponden a aumentos de temperatura global de aproximadamente de 4 °C son inciertas en muchas regiones del planeta. Algunos análisis sugieren que las regiones del norte de latitudes altas muestran respuestas robustas que tienden a aumentar la humedad, mientras que las regiones subtropicales muestran una tendencia a sequías, pero con un amplio rango de respuestas. El reporte especial de eventos extremos (SREX) (IPCC, 2012) indicó que existe una confianza media de que las sequías se intensificarán en el siglo XXI en algunas regiones —como Centroamérica y México— debido a la reducción de las precipitaciones o al aumento de la evapotranspiración.

Los análisis del IPCC (2014) han identificado la influencia antropogénica en los cambios de temperatura de la superficie de la tierra, en la atmósfera y en los océanos, así como en los cambios en la criósfera, el ciclo del agua y los eventos extremos. Desde el primer informe del IPCC se han incluido dos líneas de análisis: la detección de que el clima y sus efectos están cambiando con respecto a lo conocido en el pasado reciente y la atribución de que las causas de tales cambios tienen un origen asociado con la actividad humana y por lo tanto no se trata de un proceso natural.

De acuerdo con la revisión reciente de la literatura, incluido el IPCC, Zhai, Zhou y Chen (2018) y el NAS (2016), hay una alta confiabilidad de atribución en los eventos extremos relacionados con temperatura, como las ondas de calor o frío, donde el ser humano ha tenido efecto en la magnitud y frecuencia. Hay confiabilidad media de atribución en el caso de

precipitación extrema y sequías. Finalmente, la menor confiabilidad de atribución se presenta en eventos como huracanes, ciclones tropicales, incendios forestales y tormentas severas. Este nivel de confiabilidad se debe a la necesidad de simulaciones con alta resolución y una serie histórica más larga. Aunque esta visión aún no se ha comprobado científicamente, la detección y atribución a los eventos extremos debe seguir siendo analizada a nivel global y regional. Lo anterior es fundamental para analizar el comportamiento de la frecuencia e intensidad de los eventos extremos en el futuro y para determinar políticas adecuadas que ayuden a disminuir la vulnerabilidad de la población.

Con respecto a los sistemas de información y su gestión, desde el lanzamiento de los escenarios AR4 han ocurrido grandes avances. Diversas instituciones globales, regionales y nacionales han generado y difundido información climática, lo que ha incrementado su disponibilidad para el público en general. Por una parte, con el AR5 del IPCC, algunas instituciones de investigación globales y regionales (incluyendo el CGIAR-CCAFS) publicaron los resultados de los escenarios de cambio climático. El trabajo del CGIAR-CCAFS incluye un conjunto de modelos y cortes seleccionados con acceso fácil para descarga de los usuarios en formato ráster. Por otra parte, las fuentes de información histórica de datos globales de clima se han actualizado con mayor regularidad. El Climatic Research Unit (CRU) genera información por mes de la evolución de la temperatura y precipitación, disponible en su página web. En la última década, el CRU mejoró sus métodos de interpolación, así como su resolución y ha aumentado el número de estaciones meteorológicas. También se ha mejorado el acceso a esta información y los datos globales pueden descargarse también en formato ráster.

Al mismo tiempo, diversos programas de *software* libre permiten leer los archivos ráster (por ejemplo, los *softwares* QGIS, R y Python). Estos programas permitieron al equipo de la CEPAL realizar este análisis sin recurrir a contrataciones externas. La capacitación en estos programas se vuelve fundamental para que las instituciones nacionales avancen en la adquisición de capacidades de gestión, análisis e interpretación de la información. Es de remarcar el importante avance y fortalecimiento de las instituciones meteorológicas nacionales de la región con respecto a los pronósticos climáticos. En el caso de los países del SICA, bajo la coordinación del Comité Regional de Recursos Hídricos (CRRH) han aumentado sus capacidades y trabajan de manera conjunta con otras instituciones sectoriales en la generación y divulgación de pronósticos a corto plazo de sequía, precipitación, tormentas tropicales y huracanes dirigido a sectores como la agricultura, la seguridad alimentaria y la reducción de desastres.

Adicionalmente, en 2020 publicaron su visor de escenarios de cambio climático generado con apoyo de Euroclima+ y la Agencia Estatal de Meteorología de España (AEMET), que incluye cursos de capacitación para las instituciones nacionales. Igualmente, la FAO y la CEPAL han colaborado con instituciones nacionales de Panamá en cursos sobre el uso de escenarios climáticos, con el apoyo de científicos de la región. También existen importantes contribuciones de la academia y universidades de la región que han avanzado en el uso, análisis y evaluación de los modelos climáticos que mejor representaron el clima en la región. En esta copublicación se tomó en consideración la clasificación de Hidalgo y Alfaro (2015), quienes evaluaron modelos climáticos e hicieron una selección de ellos. La colaboración entre instituciones nacionales, regionales e internacionales también se evidencia en la disponibilidad

de datos para su procesamiento como, por ejemplo, las proyecciones de las bases de datos globales de CRU, WorldClim y CCASFS-Climate, utilizadas en el análisis aquí publicado.

Se requiere de información climática de alta calidad y una amplia base de datos sobre clima, sistemas sociales, económicos, biológicos, ambientales y de eventos extremos para poder estimar los procesos de impacto climático y mejorar el diseño e implementación de políticas de cambio climático y sectoriales y fomentar prácticas de adaptación. La información histórica de los impactos de la variabilidad actual y pasada del clima — así como los escenarios climáticos— son un elemento estratégico de esta agenda. Es indudable la mejora en el acceso y la generación de información climática en los últimos años, con contribuciones de instituciones globales como Wordlclim, CRU y CGIAR-CCAFS, así como de instituciones regionales como CRRH y sus socios nacionales con su visor de escenarios climáticos para la región e iniciativas similares de otras instituciones nacionales como el INECC en México y el INSMET en Cuba. Sin embargo, todavía hay retos en cuanto a los datos climáticos y en los impactos de cambio climático en los diversos sectores, para diseñar mejores medidas de implementación de políticas de adaptación a nivel local o subnacional.

Habiendo concluido este proceso de análisis y discusión de los resultados con el GTCCGIR del CAC, se presentan algunas recomendaciones para acciones futuras:

- Incrementar las capacidades de técnicos nacionales de las instituciones meteorológicas, académicas y sectoriales para acceder y transformar la información histórica y de escenarios de cambio climático; esto es relevante frente al próximo lanzamiento del sexto reporte del IPCC que tendrá nuevos escenarios (AR6). Lo anterior debe acompañarse con programas de fortalecimiento de capacidades y asistencia técnica. Los interesados podrán solicitar cursos sobre el acceso y uso de datos climáticos a diferentes niveles subnacionales.
- Ampliar el uso de herramientas como sistemas de información georreferenciada (SIG) que permitan mejorar el diseño de medidas para reducir la vulnerabilidad o la exposición de poblaciones urbanas y rurales, frente al aumento de la frecuencia de eventos extremos y su probable intensificación a causa del cambio climático.
- Promover el intercambio de conocimiento, experiencias y lecciones aprendidas entre países. Este tipo de actividades podrían institucionalizarse en las diferentes mesas agroclimáticas intrarregionales.
- Divulgar y utilizar la información climática con acceso amplio tanto para los tomadores de decisiones, como para actores relevantes (por ejemplo, los productores, técnicos nacionales y académicos de diferentes disciplinas), con adecuaciones para cada público. Incluye el apoyo, a solicitud de los socios, para proporcionar insumos a comunicadores con el fin de preparar material de divulgación útil para los actores relevantes, como mapas o datos concretos para regiones subnacionales específicas.
- Aumentar el uso de información climática de fuentes globales, nacionales, subnacionales y de estaciones meteorológicas que ayuden a diseñar programas, proyectos y medidas para implementar políticas nacionales de cambio climático y sectoriales, incluyendo las NDC, tanto con respecto a la adaptación como a la mitigación.

- Comunicar el conocimiento sobre los escenarios de cambio climático a todos los sectores de la sociedad, en especial a los de mayor vulnerabilidad y que enfrentarán los posibles impactos negativos, como los pequeños productores de granos básicos y cultivos de exportación como el café. Esto incluye desarrollar material adecuado para distintos públicos, realizar campañas de información pública y crear espacios para la participación e intercambio de información, como las mesas agroclimáticas locales que promuevan varios ministerios/secretarías de agricultura y otras instituciones en la región.
- Fomentar iniciativas de organizaciones y productores agropecuarios para detectar y medir cambios en su clima local y analizar las implicaciones en sus actividades productivas y otras amenazas a su bienestar; esto incluye la comunicación con otros proveedores de información como los servicios meteorológicos, ministerios/secretarías de agricultura y académicos.
- Aumentar los análisis del impacto en sectores económicos y sociales, como salud, pobreza, desigualdad, migración, producción agropecuaria, entre otros, para afinar las propuestas de medidas de adaptación, extensión agrícola, inversión en infraestructura adaptada al cambio climático, medidas de prevención de eventos extremos, sistemas locales y nacionales de registro de datos climáticos y seguros agrícolas. Los análisis deben fortalecer las recomendaciones de adaptación al cambio climático a nivel local, municipal o regional.
- Generar análisis y divulgar datos subnacionales de sectores impactados por el cambio climático como agricultura, pesca, recursos hídricos, seguridad alimentaria, generación de electricidad, enfermedades sensibles al clima, turismo, bosques, biodiversidad, entre otros.
- Avanzar en la implementación de las políticas nacionales de cambio climático en el sector agropecuario en el marco de la EASAC avalada por el Consejo Agropecuario Centroamericano, incluyendo sus estrategias y medidas con respecto a sistemas de información.

Resumen

El clima global ha cambiado con relación al período preindustrial, no solamente por procesos y ciclos naturales, sino en gran medida por las emisiones de GEI de origen antropogénico. Estas emisiones dependen principalmente del tamaño de la población, la actividad económica, el estilo de vida, el uso de la energía, los patrones de uso del suelo, la tecnología y la política climática. Los cambios en el clima incluyen incrementos en el promedio de la temperatura terrestre y oceánica, cambios en los volúmenes de nieve y hielo, elevación en el nivel del mar, aumento en la frecuencia de olas de calor, aumento en la frecuencia y duración de las olas de calor marinas, variabilidad de la precipitación, aumento en la frecuencia e intensidad de eventos de precipitación intensa a escala global, así como a un mayor riesgo de sequía en algunas regiones del planeta.

La emisión continua de GEI causará un mayor calentamiento y cambios en todos los componentes del sistema climático; muchos de esos cambios no han tenido precedentes en el planeta. Las proyecciones de las emisiones de GEI presentan un amplio margen de variación, pero principalmente dependen de las decisiones y medidas, que deben ser orientadas a una transición económica profunda, de producción y consumo hacia un sendero de desarrollo sostenible y bajo en emisiones de GEI para limitar el aumento en temperatura en 1,5 °C. Sin embargo, todos los escenarios de emisiones proyectan que la temperatura global en la superficie continuará aumentando a lo largo del siglo XXI. Como consecuencia, es muy probable que la variabilidad climática también aumente, que las olas de calor ocurran con mayor frecuencia y tengan una mayor duración, y que los episodios de precipitación extrema sean más intensos y frecuentes. Igualmente, los océanos se seguirán calentando y acidificando y el nivel medio global del mar continuará elevándose.

El aumento de la temperatura media global en las últimas décadas es una de las muestras del cambio climático originado por el aumento de las emisiones de GEI antropogénicas. En el período 2011-2019 la temperatura a nivel global ha aumentado aproximadamente 0,93 °C con respecto al período preindustrial y la tendencia es creciente. Este aumento no se observa ni se espera que sea espacial o estacionalmente uniforme. Este calentamiento inducido por los seres humanos y los múltiples cambios climáticos que se derivan de él ha desencadenado diversos impactos en los ecosistemas, en las actividades económicas y en el bienestar humano. Asimismo, y de acuerdo con el IPCC, los cambios en el sistema climático han generado modificaciones en la intensidad y frecuencia de climas extremos.

De acuerdo con el IPCC se espera que el ciclo del agua se intensifique con un clima más cálido. A corto plazo, es probable que la frecuencia e intensidad de las precipitaciones aumente sobre la superficie terrestre. Estos cambios están principalmente causados por el aumento del contenido de vapor de agua en la atmósfera, pero también por cambios en la circulación

atmosférica. En el sur de México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana el ciclo anual de precipitación tiene una distribución bimodal, con dos picos máximos separados por un período seco denominado canícula. En general, sectores productivos —y en especial la agricultura de esta región— se han adaptado a este fenómeno. El cambio climático puede contribuir a agudizar los patrones de hambre estacional y vulnerabilidad de los medios de vida. Por ello resalta la necesidad de desarrollar capacidades de adaptación local, pero ello requiere caracterizar mejor el ciclo y la variabilidad de la precipitación, además de anticipar los posibles cambios de la canícula durante el siglo XXI.

Con base en evidencia del pasado y en la tendencia de aumento de las emisiones de GEI, se esperan mayores impactos en el futuro. Las consecuencias de cambios en los promedios de temperatura y precipitación en la región SICA, Cuba, Haití y México son múltiples, y se manifiestan en las condiciones de humedad y aridez de la región, así como en la extensión de la estación seca, y pueden tener efectos importantes en los sectores económicos como la agricultura, la seguridad alimentaria nutricional, los ecosistemas y la biodiversidad, la disponibilidad de agua, la salud, la infraestructura, así como generar elevados costos socioeconómicos. A medida que dichos efectos no se mitiguen, el resultado será una mayor migración en la región al reducir sus medios de vida.

Introducción

Esta copublicación surge del plan de trabajo de la CEPAL con el CAC/SICA y pretende ser de utilidad para divulgar información sobre escenarios climáticos para la región, aplicable a iniciativas como el desarrollo de instrumentos de respuesta e implementación de las políticas públicas de cambio climático, el diseño de proyectos agropecuarios y los seguros agropecuarios, los sistemas de inversión pública (SIP) y su adaptación al cambio climático, el fortalecimiento de capacidades de funcionarios/as públicos/as y servir como un insumo para otras iniciativas y análisis de impacto del cambio climático en el sector agrícola, ecosistemas, salud y energía.

Su objetivo es actualizar los escenarios climáticos con la información del AR5 del IPCC para distintos niveles subnacionales en México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana, además de brindar información georreferenciada que ayude a la toma de decisiones de política pública y el diseño de instrumentos, programas y proyectos que pueden responder a las necesidades de la población, especialmente la asociada al sector agropecuario y rural, frente al cambio climático.

El clima es un bien público global. Es el soporte de millones de especies de animales, plantas y otras formas de vida y producto de la constante y compleja interacción de esta vida con la atmósfera, los océanos, las capas de hielo y nieve y los continentes del planeta (CEPAL y otros, 2011). Los cambios en los promedios de temperatura y precipitación pueden tener efectos importantes en las condiciones del clima, los ecosistemas y como consecuencia, en las actividades socioeconómicas (Stern, 2007; Walther y otros, 2002; Salinger, 2005; Zhao y otros, 2005; IPCC, 2007). Eventos extremos como sequías, inundaciones, heladas, ondas de calor, granizadas u otro tipo de condiciones generan con frecuencia baja disponibilidad de agua, pérdida de cultivos, contracción de la producción o baja producción hidroeléctrica (Landa, Magaña y Neri, 2008).

Las consecuencias de un aumento en la temperatura media en México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana son múltiples y generarían elevados costos socioeconómicos, debido a los efectos negativos en la biodiversidad, la agricultura, la disponibilidad de agua y la ocurrencia de eventos extremos como sequías e inundaciones generadas por huracanes y tormentas tropicales (CEPAL, CCAD, SICA, UKAID y DANIDA, 2011). Desde 2008 la iniciativa de la Economía del Cambio Climático en Centroamérica y la República Dominicana (ECC CARD) generó diversos estudios de impacto del cambio climático.

En una primera etapa se generaron escenarios de temperatura y precipitación hasta 2100 con cambio climático, se evaluaron los impactos del cambio climático en la agricultura, los recursos hídricos y la biodiversidad. En una segunda etapa se evaluaron los impactos del cambio climático en la aridez, los meses secos, los patrones intraanuales del clima, la salud, los

ecosistemas, los granos básicos, el café y la hidroelectricidad en plantas de generación eléctrica de El Salvador y Guatemala. En la tercera etapa de la iniciativa se hicieron estudios de impactos del cambio climático en la producción de café en la República Dominicana; plantas de hidroelectricidad en la República Dominicana y Panamá; estudios y talleres en Salud en Centroamérica y la República Dominicana; una propuesta metodológica para evaluar el impacto del cambio climático en la seguridad alimentaria y nutricional (SAN) así como estudios nacionales de impacto del cambio climático en Honduras y Guatemala. La mayoría de estos estudios tuvo como base los escenarios de cambio climático del cuarto informe de evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) (AR4).

La iniciativa de ECC CARD fue gestionada de forma conjunta por los ministerios de ambiente y hacienda o finanzas de Centroamérica, sus consejos y secretarías ejecutivas en la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD) y en el Consejo de Ministros de Hacienda o Finanzas de Centroamérica y República Dominicana (COSEFIN) de la Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA), instancias del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA), con la coordinación técnica de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Las dos primeras etapas de la ECC CARD fueron financiadas por el programa de asistencia del Departamento para el Desarrollo Internacional del Gobierno del Reino Unido (UkAID) y la Agencia de Cooperación para el Desarrollo de Dinamarca (DANIDA). La tercera etapa del proyecto contó con el apoyo financiero del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y el Fondo Nórdico de Desarrollo (NDF).

A partir de 2012 se estableció un programa de trabajo técnico entre la CEPAL y el Consejo Agropecuario Centroamericano (CAC) de los Ministerios de Agricultura de los países miembros del SICA, ejecutado con su Secretaría Ejecutiva (SE-CAC) y su Grupo Técnico de Cambio Climático y Gestión Integral de Riesgo (GTCCGIR) y con una colaboración estrecha con el Grupo Interagencial de Apoyo, que incluye a la FAO, IICA, CCAFS-CIAT y CATIE, entre otras instituciones.

En el programa de trabajo del CAC y la CEPAL 2015-2020, aprobado en el Consejo de Ministros de Agricultura, se acordó contribuir a la implementación de políticas públicas de Agricultura Sostenible y Adaptada al Clima (ASAC) y seguridad alimentaria y nutricional (SAN); continuar con el análisis y fortalecimiento de capacidades técnicas con respecto a los impactos potenciales del cambio climático y opciones de respuesta; el desarrollo de seguros agropecuarios con gestión integral de riesgo; el fortalecimiento de sistemas de información y la generación de capacidades técnicas para su manejo y utilización en el diseño y evaluación de políticas, todo lo cual debía ser orientado al desarrollo de instrumentos de política y aplicaciones útiles.

En este último punto se acordó recabar información histórica del clima y actualizar los escenarios climáticos anteriormente utilizados con los del Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5) y buscar “reducir la escala” a distintos niveles subnacionales. Asimismo, se acordó fomentar el uso de sistemas de información satelital y sistemas de información georreferenciada (SIG) con el propósito de incorporar estas herramientas a los análisis de las cadenas de valor, los seguros agropecuarios, la producción agrícola, los proyectos de inversión pública, los planes de adaptación, las medidas de mitigación, entre otras.

Al mismo tiempo, a fines de 2019 la CEPAL y la Secretaría Ejecutiva de COSEFIN iniciaron la ejecución del proyecto “Fortalecimiento de capacidades para la incorporación de

la reducción del riesgo de desastres (RRD) y la adaptación sostenible e incluyente al cambio climático (ASICC) en la inversión pública en los países miembros del COSEFIN/SICA”, con financiamiento de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE). Uno de los componentes de este proyecto es un Sistema de Información Georreferenciada que provea de datos y conocimientos suficientes y necesarios para la integración de la RRD y ASICC en la formulación y evaluación de proyectos de inversión pública. Entre la información contenida en este sistema estará información histórica climática y de desastres y escenarios de cambio climático.

A nivel global y regional existen diversas instituciones que compilan y organizan diversos modelos climáticos para los escenarios climáticos AR5 del IPCC y que pueden ser descargados y leídos por *software* de SIG, lo que constituye un avance significativo en accesibilidad y aplicabilidad desde el AR4. Para el análisis presentado en esta publicación se eligió utilizar las proyecciones de la base de datos global CCAFS-Climate, desarrollado por el Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (CGIAR) a través de su programa de Investigación en Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS), también institución miembro del Grupo Interagencial de Apoyo (GIA) de CAC. Para esta copublicación, al elegir los modelos se tomaron en consideración los avances de investigadores de la región, como en Hidalgo y Alfaro (2015), quienes evaluaron 48 modelos climáticos y seleccionaron los que mejor representaron el clima en la región.

Además, en la región SICA existe una importante iniciativa regional del programa EUROCLIMA financiado por la Comisión Europea (CE) cuyo proyecto “Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para Centroamérica” es coordinado por la Agencia Estatal de Meteorología de España (AEMET) y cuenta con el apoyo de los servicios meteorológicos de Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua y Panamá y la participación del Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH). Los resultados de este proyecto están disponibles desde 2020 en un sitio web para la consulta de información de escenarios a distintas escalas geográficas. Este conjunto de iniciativas augura oportunidades para fortalecer las capacidades técnicas nacionales de desarrollar estos escenarios y aplicarlas a instrumentos específicos.

Esta copublicación de SE-CAC y la CEPAL ha contado con los apreciables aportes y revisiones de los delegados del GTCCIR y la SE-CAC y de los científicos de la región SICA, reconocidos en la página de créditos. El documento consta de esta introducción, mensajes clave y ocho capítulos. En el capítulo I se presentan los conceptos clave del cambio climático; en el capítulo II, las consideraciones metodológicas para obtener los datos climáticos que incluyen las mejoras de los escenarios AR5 en el clima regional y los fenómenos meteorológicos, las fuentes de información consultadas, los períodos de referencia y la elección de los modelos utilizados en la región.

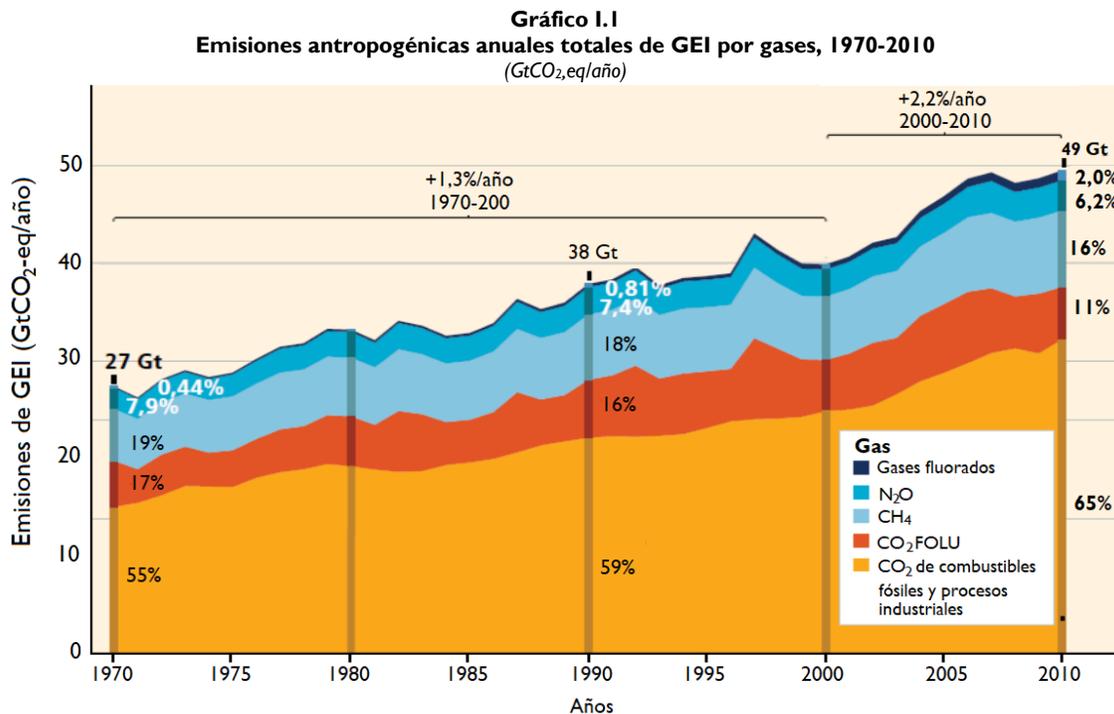
En los capítulos III al VI se presentan el análisis estadístico y espacial de la temperatura, precipitación, el índice de aridez y los meses secos, respectivamente. En ellos se expone la tendencia histórica global y regional a nivel departamental, así como los escenarios de cambio climático con cortes hasta 2080 para cada variable a nivel municipal. En el capítulo VII se presentan los avances en la ciencia de atribución y evidencia de los eventos extremos ocurridos en la región. Finalmente, en el capítulo VIII se muestran las conclusiones y recomendaciones con algunas líneas de acción para posibles aplicaciones de la información generada.

I. Cambio climático

A. Contexto y conceptos

La continua alza de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) genera cambios en todos los componentes del sistema climático, aumentando la probabilidad de impactos graves, generalizados e irreversibles en las personas y los ecosistemas. Debido a que algunos de estos gases tienen una vida prolongada en la atmósfera, el clima futuro dependerá de las emisiones antropógenas del pasado, así como de las del presente y las del futuro. Las proyecciones de las emisiones de GEI presentan un amplio margen de variación, pero principalmente dependen de las decisiones y medidas, que deberían estar orientadas a una transición económica profunda, de producción y consumo hacia un sendero de desarrollo sostenible y bajo en emisiones de GEI. Sin embargo, todos los escenarios de emisiones proyectan que la temperatura global en la superficie continuará aumentando a lo largo del siglo XXI. Como consecuencia, es muy probable que la variabilidad climática también aumente, las olas de calor ocurran con mayor frecuencia y tengan una mayor duración, y los episodios de precipitación extrema sean más intensos y frecuentes. Igualmente, el océano se seguirá calentando y acidificando y el nivel medio global del mar continuará elevándose.

Las emisiones antropógenas de GEI han aumentado desde la era preindustrial resultado del crecimiento demográfico y económico, intenso en insumos y procesos emisores. Las concentraciones atmosféricas de los GEI —dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O)— no tienen comparación en los últimos 800.000 años. Alrededor de la mitad de las emisiones de CO₂ antropógenas acumuladas entre 1750 y 2011 se han producido en los últimos 40 años (IPCC, 2014a). Entre 1750 y 2011 las emisiones antropógenas acumuladas de CO₂ a la atmósfera fueron de 2040 ± 310 GtCO₂. Se calcula que alrededor del 40% de esas emisiones permanecen en la atmósfera (880 ± 35 GtCO₂); el resto han sido removidas de la atmósfera y están almacenadas en el océano y la tierra (plantas y suelos). Las estimaciones indican que los océanos han absorbido alrededor del 30% del CO₂, lo que ha provocado su acidificación (IPCC, 2014a) (véase el gráfico I.1).



Fuente: Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), *Cambio climático 2014: informe de síntesis*, contribución de los grupos de trabajo I, II and 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.), Ginebra, Suiza, 2014.

B. Escenarios de cambio climático

El análisis de las interacciones del sistema climático, los ecosistemas y las actividades humanas que emiten GEI se realiza a través de escenarios con diferentes niveles de emisiones de GEI. Los escenarios de emisiones son por tanto una representación plausible de la evolución futura de las emisiones de sustancias que podrían ser radiativamente activas (GEI y aerosoles), basada en un conjunto coherente de supuestos sobre los factores que las impulsan como el desarrollo demográfico y socioeconómico, el cambio tecnológico, la energía, el uso del suelo y las principales relaciones entre ellos. Desde 1992 el IPCC ha presentado un conjunto de escenarios de emisiones que son utilizados para obtener proyecciones climáticas. Primero fueron los escenarios IS92 del informe complementario del Primer Reporte de evaluación del IPCC (FAR) y usados en el Segundo Reporte (SAR), después se elaboraron las familias de escenarios (A1, A2, A1B, B1 y B2) con base en el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (IPCC, OMM y PNUMA, 2000) para el Tercer y Cuarto Informe de evaluación (TAR y AR4).

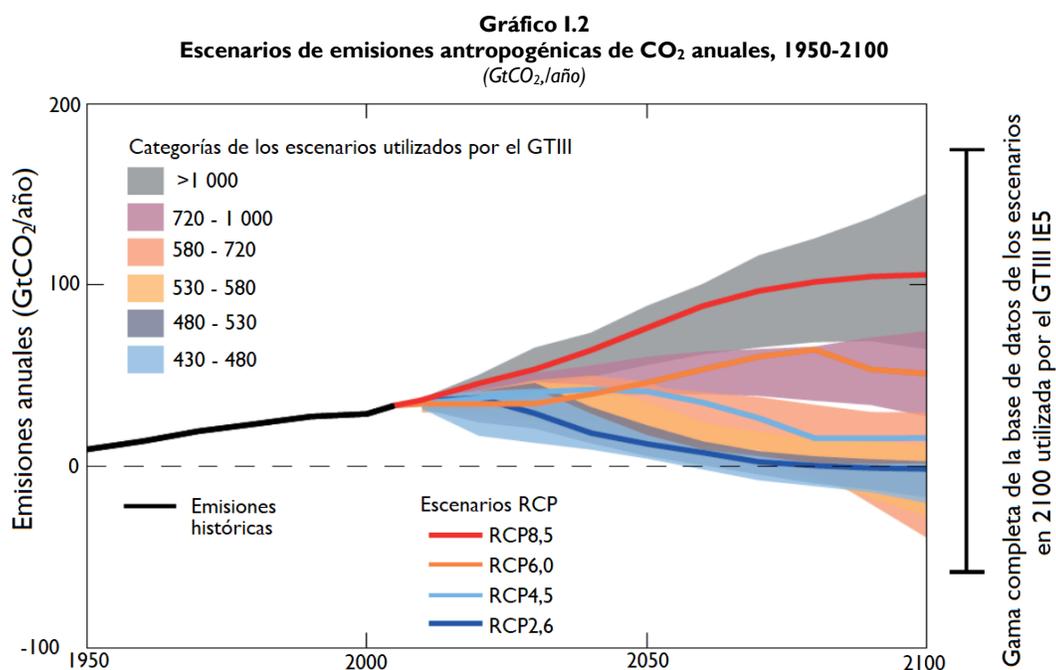
En la quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5 -Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) del IPCC se identificaron cuatro diferentes escenarios de forzamiento radiativo¹ denominados trayectorias de concentración representativas (Representative Concentration Pathways, RCP). Los RCP abarcan series temporales de emisiones y concentraciones de la gama completa de GEI, aerosoles y gases químicamente

¹ El forzamiento radiativo es el cambio en el flujo de energía causado por un elemento impulsor y se calcula en la tropopausa o en la parte superior de la atmósfera.

activos, así como el uso del suelo y la cubierta terrestre hasta 2100, e identifican su forzamiento radiativo total para 2100, que oscila entre 2,6 y 8,5 W/m² (vatios por metro cuadrado) (IPCC, 2014a).

Las trayectorias de forzamiento radiativo no están asociadas directamente a escenarios socioeconómicos o de emisión únicos, sino que cada trayectoria de concentración ofrece uno de los muchos posibles escenarios que conducirían a las características específicas de forzamiento radiativo, es decir, pueden ser el resultado de la combinación de diferentes futuros económicos, tecnológicos, demográficos, políticos e institucionales. La palabra "representativa" significa que cada trayectoria de representación ofrece uno de los muchos posibles escenarios que conducirían a las características específicas de forzamiento radiativo. La palabra "trayectoria" hace hincapié en que únicamente son de interés los niveles de concentración a largo plazo, pero también indica el camino seguido a lo largo del tiempo para llegar al resultado en cuestión (Moss y otros, 2010).

Las emisiones antropógenas de GEI dependen principalmente del tamaño de la población, la actividad económica, el estilo de vida, el uso de la energía, los patrones de uso del suelo, la tecnología y la política climática. Los RCP incluyen un escenario de mitigación estricto (RCP2.6) que representa una trayectoria de concentraciones que mantienen el calentamiento global menor de 2 °C por encima de las temperaturas preindustriales. También dos escenarios intermedios (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP8.5), (véase el gráfico I.2, que reporta emisiones solamente de CO₂). Los escenarios sin esfuerzos adicionales para limitar las emisiones (escenarios de referencia) dan lugar a trayectorias que se sitúan entre RCP6.0 y RCP8.5 (IPCC, 2014a).



Fuente: Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), *Cambio climático 2014: informe de síntesis*, contribución de los grupos de trabajo I, II and 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.), Ginebra, Suiza, 2014.

Recuadro I.1
Tratamiento de incertidumbre en la evaluación del Grupo de trabajo I del IPCC

El IPCC reconoce la importancia de tratar las incertidumbres con coherencia y transparencia en sus evaluaciones y reportes. En este documento se hace una revisión de literatura de los reportes del IPCC. El siguiente cuadro presenta los términos utilizados en los informes para definir la probabilidad de un resultado, siempre que este se pueda calcular de manera probabilística. Estas definiciones fueron presentadas en la guía de incertidumbres del AR4 (Solomon, 2007).

Terminología de probabilidad	Probabilidad del resultado
Prácticamente cierto	> 99% de probabilidad
Sumamente probable	> 95% de probabilidad
Muy probable	> 90% de probabilidad
Probable	> 66% de probabilidad
Más probable que improbable	> 50% de probabilidad
Tan probable como improbable	De 33% a 66% de probabilidad
Improbable	< 33% de probabilidad
Muy improbable	< 10% de probabilidad
Sumamente improbable	< 5% de probabilidad
Excepcionalmente improbable	< 1% de probabilidad

Y los niveles de confianza son definidos de la siguiente manera:

Terminología de los niveles de confianza	Nivel de confianza en acertar
Confianza muy alta	Al menos 9 de 10 probabilidades
Confianza alta	Al menos 8 de 10 probabilidades
Confianza media	Al menos 5 de 10 probabilidades
Confianza baja	Al menos 2 de 10 probabilidades
Confianza muy baja	Al menos 1 de 10 probabilidades

Fuente: S. Solomon y otros (eds.), "Resumen técnico", *Cambios climáticos 2007: base física de la ciencia*, aportes del Grupo de Trabajo I al Cuarto informe de evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos, Cambridge University Press.

Un escenario es una descripción internamente coherente, plausible e integrada de un posible futuro del sistema humano-ambiental, que incluye una narración con tendencias cualitativas y proyecciones cuantitativas (IPCC, OMM y PNUMA, 2000). Para analizar el cambio climático los científicos utilizan modelos matemáticos que representan el sistema climático, con base en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, en sus interacciones y en sus procesos de retroalimentación. En la actualidad, los modelos de circulación general atmósfera-océano acoplados (MCGAO) proporcionan la representación más completa del sistema climático disponible y se utilizan para proyectar las posibles trayectorias del clima futuro. De esta manera, los escenarios proporcionan un marco para desarrollar e integrar las proyecciones de emisiones de GEI en los MCGAO y estimar los cambios en el clima, incluida una evaluación de sus incertidumbres inherentes.

Las proyecciones de las variables climáticas —como temperatura y precipitación— se derivan de los MCGAO en un proceso que utiliza las trayectorias de los escenarios RCP y pueden generarse en diferentes escalas temporales y espaciales (mundial y regional). Estas proyecciones se basan en el trabajo de la comunidad científica y los centros de modelización

del clima de todo el mundo y su trabajo permite que los grupos de trabajo del IPCC cuenten con información científica sobre posibles futuros del clima. Gracias a la mayor información y a la mejora de los modelos climáticos utilizados en el AR5 es posible atribuir con mayor certidumbre cómo la actividad humana impactaría en más componentes del sistema climático que en el AR4 (IPCC, 2013a).

Con base en el conjunto de la CMIP5, es probable que la temperatura media global en el período 2046-2065 supere de 1 °C a 2 °C el promedio observado durante el período 1986-2005 (IPCC, 2013a) con rangos probables que se encuentran entre 0,4 °C a 2,6 °C dependiendo del escenario. Igualmente, las proyecciones de los escenarios RCP indican que los aumentos de temperatura hacia 2081-2100 se encontrarían entre 1 °C y 3,7 °C, y los intervalos probables se encontrarían de 0,3 °C hasta 4,8 °C (véase el cuadro I.1). Esta evaluación se basa en múltiples líneas de evidencia y supone que no habrá erupciones volcánicas importantes o cambios en la irradiación solar total. Se espera que los cambios en el ciclo del agua en respuesta al cambio climático no serán uniformes y el contraste entre las regiones húmedas y secas podría aumentar. Además del cambio climático por causas antropogénicas, los cambios en el clima se verán muy afectados por la variabilidad natural en el corto plazo y a escala regional, que también podría ser afectada por el cambio climático.

Con respecto al nivel del mar, los modelos climáticos proyectan que su aumento continuará debido a la pérdida de masa de los glaciares y los mantos de hielo y la expansión oceánica producida por un mayor calentamiento. Para el período 2081-2100 en relación con 1986-2005, es probable que la elevación ocurra en los rangos de 0,26 metros (m) a 0,55 m en el escenario RCP2.6, y de 0,45 m a 0,82 m en el RCP8.5 (véase el cuadro I.1).

Cuadro I.1
Cambios proyectados en la temperatura superficial media y en la elevación del nivel del mar, escenarios RCP,
relativos al período 1986-2005
(En °C y m)

	Escenario	2046-2065		2081-2100	
		Media	Rango probable	Media	Rango probable
Cambio de la temperatura media global de la superficie (°C)	RCP2.6	1,0	0,4 a 1,6	1,0	0,3 a 1,7
	RCP4.5	1,4	0,9 a 2,0	1,8	1,1 a 2,6
	RCP6.0	1,3	0,8 a 1,8	2,2	1,4 a 3,1
	RCP8.5	2,0	1,4 a 2,6	3,7	2,6 a 4,8
Aumento del nivel medio global del mar (m)	RCP2.6	0,24	0,17 a 0,32	0,40	0,26 a 0,55
	RCP4.5	0,26	0,19 a 0,33	0,47	0,32 a 0,63
	RCP6.0	0,25	0,18 a 0,32	0,48	0,33 a 0,63
	RCP8.5	0,30	0,22 a 0,38	0,63	0,45 a 0,82

Fuente: Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), "Resumen para responsables de políticas", *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., y otros (eds.), Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos, Cambridge University Press [en línea] http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_brochure_es.pdf.

La elevación del nivel del mar no será uniforme entre las regiones; por ejemplo, el movimiento vertical de la tierra como consecuencia del movimiento de las placas tectónicas también puede causar valores diferentes a la tendencia media global del nivel del mar en algunas zonas (en especial en aquellas donde una placa tectónica se hunde por debajo de otra)

(IPCC, 2014a). Las proyecciones señalan que alrededor del 70% de las costas de todo el mundo experimentarán un cambio de nivel del mar en un intervalo de $\pm 20\%$ de la media global.

De acuerdo con el IPCC (2013a), es sumamente probable que las actividades humanas causaran más del 50% del aumento observado en la temperatura media global en superficie entre 1951 y 2010 y que este aumento haya sido causado por la combinación del incremento de las concentraciones de GEI resultantes de la actividad humana y de otros forzamientos antropógenos como el cambio de uso de suelo y la cantidad de partículas sólidas que se encuentran en la atmósfera. La concentración de GEI, como se refleja en los RCP, constituye una métrica para comparar el forzamiento radiativo de una mezcla de diferentes gases de GEI en un momento dado, pero no implica una equivalencia en las respuestas en términos de cambio climático ni en el futuro forzamiento para cada gas porque el nivel de concentraciones es el resultado de forzamientos climáticos naturales, forzamientos antropogénicos y otros forzamientos externos (IPCC, 2013b y 2014a).

De acuerdo con las características de los escenarios climáticos del AR5 del IPCC es probable que se sobrepase un incremento de 1,5 °C de temperatura global a finales del presente siglo con concentraciones de CO_{2eq} a partir de una concentración de 500 ppm (partes por millón) en la atmósfera (con un rango de 480 a 530 ppm) (véase el cuadro I.2); este nivel es una trayectoria intermedia entre los escenarios, RCP2.6 y RCP4.5.

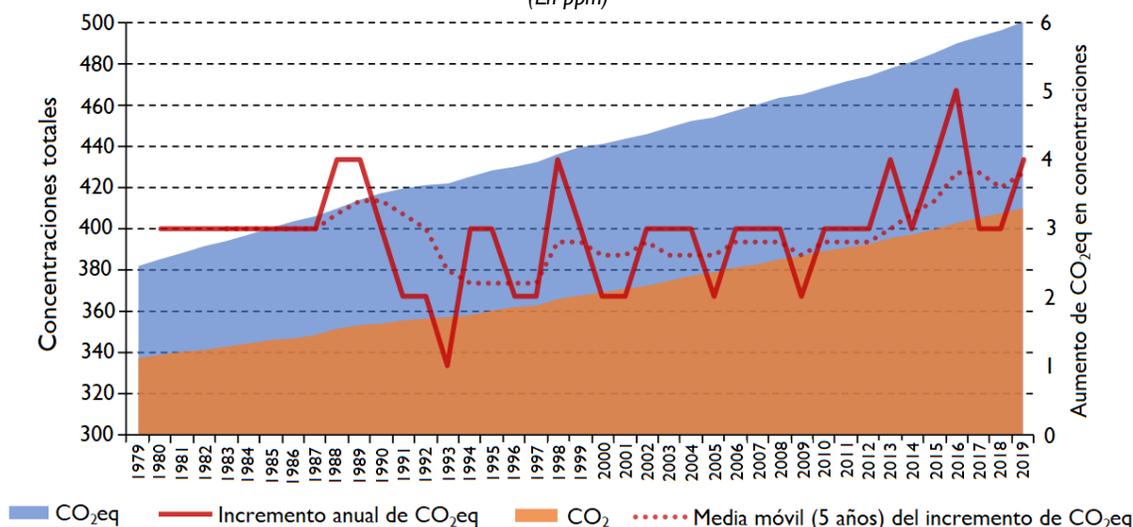
Cuadro I.2
Probabilidades en alza de temperatura asociada a los escenarios RCP

Concentraciones de CO _{2eq} en 2100 (ppm CO _{2eq})	Subcategorías	Posición relativa de las RCP	Probabilidad de que no se supere el nivel de temperatura indicado a lo largo del siglo XXI (con respecto al período 1850-1900)			
			1,5 °C	2 °C	3 °C	4 °C
< 430	Los niveles por debajo de las 430 ppm CO _{2eq} solo se han analizado en un escaso número de estudios de modelos.					
450 (430 a 480)	Rango total	RCP2.6	Más improbable que probable	Probable	Probable	Probable
500 (480 a 530)	Sin sobrepasar de 530 ppm CO _{2eq}		Improbable	Más probable que improbable		
	Sobrepasa 530 ppm CO _{2eq}			Tan probable como improbable		
550 (530 a 580)	Sin sobrepasar de 580 ppm CO _{2eq}				Más improbable que probable	Probable
(580 a 650)	Rango total	RCP4.5				
(650 a 720)	Rango total				Más probable que improbable	
(720 a 1000)	Rango total	RCP6.0		Improbable	Más improbable que probable	
> 1000	Rango total	RCP8.5			Improbable	Más improbable que probable

Fuente: Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), *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.), Ginebra, Suiza, 2014.

En el gráfico I.3 se muestra que en 2019 las concentraciones de CO₂eq alcanzaron las 500 ppm, por lo que con base en la tendencia se puede suponer que se superarán los 1,5 °C antes de mediados del presente siglo.

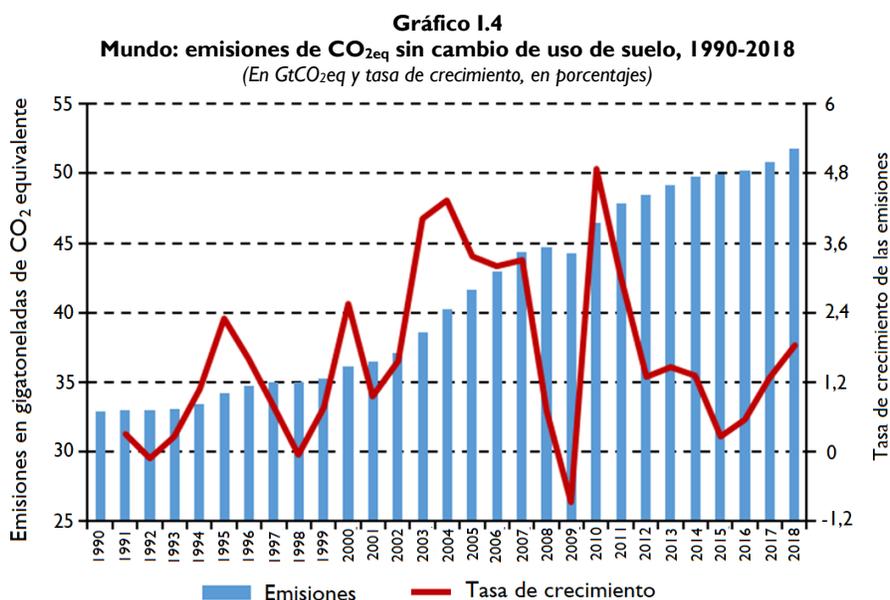
Gráfico I.3
Mundo: concentración de CO₂eq y CO₂ en la atmósfera e incremento anual de concentraciones de CO₂eq, 1979-2019
(En ppm)



Fuente: J. H. Butler y S. A. Montzka, *The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI)*, 2020 [en línea] <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>.

Se calcula que a partir de los 650 ppm de concentración de CO₂eq es probable que se supere los 2 °C de incremento en la temperatura (véase el cuadro I.2). Con el RCP6.0 es más probable que improbable que el incremento supere 3 °C y 4 °C con el RCP8.5. En el presente siglo (2000-2019) en promedio las concentraciones de GEI han aumentado 3 ppm al año. De mantenerse esta tendencia, en los próximos 50 años se alcanzarían las concentraciones necesarias para superar los 2 °C de aumento en temperatura. Sin embargo, la tendencia de aumento de concentraciones de CO₂eq ha aumentado (véase el gráfico I.3) por lo que este incremento podría ser antes y alcanzar temperaturas aún mayores al final del siglo.

La forma de limitar el aumento de temperatura entre 1,5 °C a 2 °C es reducir el crecimiento de las concentraciones de GEI. La humanidad está obligada a actuar para estabilizar y después reducir sus emisiones globales de GEI de forma urgente para poder limitar el incremento de la temperatura. Las emisiones de GEI sin cambio de uso de suelo (CUS) han crecido 1,5% por año entre 2009 y 2018; por su parte, las emisiones globales con CUS (emisiones menos absorciones) lo han hecho en 1,3% en el mismo período. Se calcula que hacia 2018 se alcanzaron niveles récord de emisiones sin cambio de uso de suelo de 51,8 GtCO₂eq y con CUS 55,3 GtCO₂eq (PNUMA, 2019). En el gráfico I.4 se muestra la trayectoria de las emisiones globales de GEI sin CUS desde 1990 con una tendencia positiva; estas no han disminuido desde 2009 a pesar de la implementación de políticas climáticas en gran parte de los países.



Fuente: J. G. J. Olivier y J. A. H. W. Peters, *Trends in Global CO₂ and Total Greenhouse Gas Emissions: 2018 Report*, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague, 2018; Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), *Informe sobre la disparidad en las emisiones de 2019*, Nairobi, Kenia, 2019.

Entre 2005 y 2015, 18 economías desarrolladas avanzaron en su descarbonización al lograr disminuir sus emisiones de CO₂ en ese período. Entre estas economías se encuentran los Estados Unidos y algunos países europeos. De acuerdo con el análisis de Le Quéré y otros (2019), esta disminución de emisiones se logró debido al desplazamiento de energías fósiles por energías renovables o por energías fósiles con menor intensidad de emisiones (como el gas natural), y la disminución en el uso de energía. En algunos años la disminución se debió, en parte, a reducciones o un menor crecimiento del PIB —por ejemplo, la caída temporal de las emisiones globales en 2009 se asocia a la crisis financiera global de 2008-2009 y en 2020 por la pandemia de COVID-19.

Sin embargo, la reducción en el ritmo de crecimiento de las emisiones de estas economías no compensa el crecimiento de emisiones en otros países y entre ellos hay diferentes niveles de emisiones por habitante. Asimismo, muchos países desarrollados han subcontratado una gran parte de su contaminación de carbono al importar más acero, cemento y otros productos de fábricas en China y otros lugares, en vez de producirlos dentro de sus territorios (Moran y otros, 2018). Sin embargo, los autores consideran que hay gran potencial para reducir las emisiones en los países en desarrollo. En estos países el uso de energía por unidad de actividad económica es mayor que en los países que ya iniciaron su transición energética (PNUMA, 2019).

Recientemente, las medidas para frenar la pandemia de COVID-19 han tenido repercusiones en las actividades sociales y económicas, y a su vez tienen un impacto en las emisiones de CO₂eq. La reducción de estas actividades por la propagación del virus provocó una caída en las emisiones mundiales de GEI. En China, donde las medidas incluyeron el cierre de industrias, las emisiones de carbono cayeron alrededor de un 25% en un período de cuatro semanas y equivalen a alrededor de 200 millones de toneladas de CO₂ (MtCO₂). La demanda volvió lentamente a los niveles normales durante un período de siete semanas, lo que sumó

hasta el 30 de marzo de 2020 en una reducción total de 250 MtCO₂, es decir, un 18% por debajo de los niveles usuales. No obstante, se espera que, como respuesta a esta interrupción económica, el estímulo del gobierno chino impulse las actividades económicas de tal manera que supere estos impactos a corto plazo en la energía y las emisiones, tal como sucedió en la crisis financiera global y durante la recesión interna de 2015 (Myllyvirta, 2020).

De acuerdo con Chelsea Harvey (2020) las emisiones globales disminuyeron por el impacto en la actividad industrial en China, la caída mundial de la demanda de energías fósiles y una caída en los viajes aéreos. Sin embargo, la magnitud de la caída de las emisiones globales es incierta ya que medidas como cuarentenas, teletrabajo y cierre de escuelas significan una disminución en las emisiones de transporte, pero un aumento en la demanda de energía residencial, que depende del estilo de vida de las familias, su ubicación geográfica y el clima.

Para la Organización Meteorológica Mundial (OMM) es muy pronto para evaluar las implicaciones de la pandemia de COVID-19 para las concentraciones de GEI a largo plazo. Hasta marzo de 2020 los niveles de CO₂ en las estaciones de observación clave han sido más altos que en 2019. Frente a lo que se ha observado en China y lo que se espera a nivel global en reducción de GEI, la OMM declaró que el impacto del COVID-19 no es un sustituto de la acción climática concertada y el mundo tiene que demostrar el mismo compromiso frente el cambio climático como con las medidas tomadas en la pandemia, independientemente de cualquier caída temporal de las emisiones (OMM, 2020a).

C. Trayectoria y meta de emisiones globales

La acción climática requiere fortalecer las contribuciones nacionales determinadas (NDC, por sus siglas en inglés) presentadas por los países miembros de la CMNUCC a partir del Acuerdo de París de 2015. En el cuadro I.3 se muestran las emisiones globales de GEI en distintos escenarios para 2030 y las brechas entre las emisiones con la política actual y las NDC actuales y las emisiones necesarias para limitar el alza de temperatura. El cuadro elaborado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2019) muestra estos escenarios actualizados en 2019. El escenario con políticas de 2005 muestra que las emisiones en 2030 habrían alcanzado 64 GtCO₂eq de no haberse implementado políticas adicionales a partir de ese año y con las políticas implementadas posteriormente se estarían emitiendo solo 4 GtCO₂eq menos para ese año. Si los países cumplen con sus compromisos de mitigación incondicionales de las NDC, se estarían reduciendo solo 4 GtCO₂eq más y si además se logran las metas condicionales, se reducirían 2 GtCO₂eq más.

De acuerdo con los escenarios, el cumplimiento de la sumatoria de las metas en las NDC es insuficiente para limitar el calentamiento a 2 °C o 1,5 °C (con un 66% de probabilidad en ambos) ya que si se cumplieran las metas incondicionales y condicionales la brecha aún sería de 12 GtCO₂eq en 2030 para no superar los 2 °C y de 29 GtCO₂eq para no rebasar 1,5 °C. Como se muestra en el gráfico I.4, las emisiones ya sobrepasan las 50 GtCO₂eq, lo que implica tener que replantear las NDC para aumentar significativamente la ambición de reducir las emisiones en alrededor de 20 GtCO₂eq con respecto a la tendencia y escenario actual para 2030. El escenario RCP4.5 supone mayores reducciones de emisiones que la sumatoria de las propuestas nacionales en sus NDC registradas para 2030 (PNUMA, 2019), mientras que la trayectoria actual de emisiones es muy cercana a las emisiones del escenario RCP8.5.

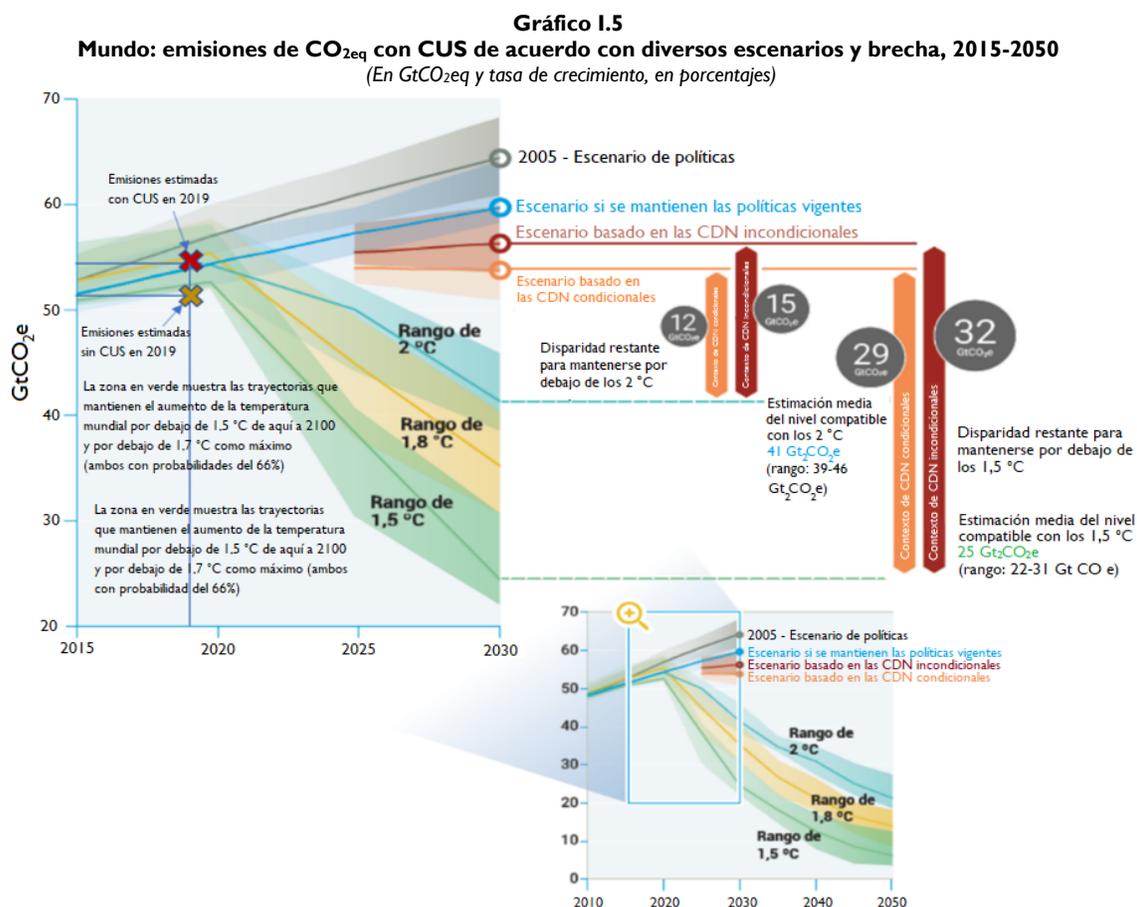
Cuadro I.3
Global: emisiones de GEI bajo diferentes escenarios, implicaciones para temperatura y brechas, 2030

Escenario	Emisiones globales totales en 2030 (GtCO ₂ eq)	Temperatura estimada			Brecha de emisiones en 2030 (GtCO ₂ eq)		
		Probabilidad 50%	Probabilidad 66%	Probabilidad 90%	Debajo de 2 °C	Debajo de 1,8 °C	Debajo de 1,5 °C en 2100
Políticas 2005	64 (60-68)						
Política actual (2005-2019)	60 (58-64)				18 (17-23)	24 (23-29)	35 (34-39)
NDC incondicional	56 (54-60)				15 (12-18)	21 (18-24)	32 (29-35)
NDC condicionales	54 (51-56)				12 (9-14)	18 (15-21)	29 (26-31)
Por debajo de 2 °C (66% de probabilidad)	41 (39-46)	Pico: 1,7-1,8 °C En 2100: 1,6-1,7 °C	Pico: 1,9-2,0 °C En 2100: 1,8-1,9 °C	Pico: 2,4-2,6 °C En 2100: 2,3-2,5 °C			
Por debajo de 1,8 °C (66% de probabilidad)	35 (31-41)	Pico: 1,6-1,7 °C En 2100: 1,3-1,6 °C	Pico: 1,7-1,8 °C En 2100: 1,5-1,7 °C	Pico: 2,1-2,3 °C En 2100: 1,9-2,2 °C			
Por debajo de 1,5 °C y pico por debajo de 1,7 °C (ambos con 66% de probabilidad)	25 (22-31)	Pico: 1,5-1,6 °C En 2100: 1,2-1,3 °C	Pico: 1,6-1,7 °C En 2100: 1,4-1,5 °C	Pico: 2,0-2,1 °C En 2100: 1,8-1,9 °C			

Fuente: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), *Informe sobre la disparidad en las emisiones de 2019*, Nairobi, Kenia, 2019.

Nota: El valor en las emisiones globales totales es la mediana del total de los escenarios modelados (los primeros cuatro escenarios de políticas y los últimos tres escenarios de metas de temperatura) y un rango del percentil 10 y 90. Las trayectorias fueron agrupadas en tres categorías dependiendo de si su máximo acumulado de emisiones de CO₂ fue menor a 600, 600-900 o 900-1.300 GtCO₂, respectivamente, desde 2018 en adelante hasta que se alcancen las emisiones netas cero de CO₂ o hasta el final del siglo si el punto cero no se alcanza antes. Los resultados de temperatura representan estimaciones de la temperatura promedio global del aire en la superficie más consistente con la evaluación de impacto del AR5 del IPCC. Las trayectorias suponen una acción limitada hasta 2020 y una mitigación de costo óptimo a partir de entonces. Los resultados estimados de temperatura se basan en el AR5 del IPCC.

En el gráfico I.5 se muestran las emisiones estimadas con CUS en 2019, que están dentro del rango de las estimaciones del escenario que mantiene las políticas vigentes (políticas climáticas de 2005 a 2019). Las emisiones estimadas en 2019 son cercanas a las trayectorias de las metas de 2°C y 1,8 °C, sin embargo, se empiezan a alejar de la trayectoria de la meta de 1,5 °C. El mundo aún está a tiempo de implementar metas más ambiciosas que limiten las emisiones por debajo de los 2 °C (véase el gráfico I.5). Si se prolonga la aplicación de medidas para reducir las emisiones y limitar el aumento de la temperatura en 2 °C, el esfuerzo que se requerirá será cada vez mayor en los próximos años, pues la brecha entre las emisiones que cumplen los compromisos condicionados e incondicionados con la meta de 2°C es de 12 GtCO₂eq en 2030. De acuerdo con estimaciones de la OMM presentadas en julio de 2020, existe aproximadamente un 70% de probabilidad de que uno o más meses durante los próximos cinco años sean al menos 1,5 °C más cálidos que los niveles preindustriales y aproximadamente un 20% de probabilidad de que al menos un año de los próximos cinco sea al menos 1,5 °C más cálido que los niveles preindustriales (OMM, 2020b).



Fuente: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), *Informe sobre la disparidad en las emisiones de 2019*, Nairobi, Kenia, 2019.

El PNUMA (2018 y 2019) señala algunas implicaciones bajo los escenarios de políticas actuales y con los compromisos actuales de las NDC que mantendrían trayectorias de emisiones altas. Hacia 2030 implicaría que:

- Habría mayor dependencia de la eliminación de CO₂ a gran escala (CDR, por sus siglas en inglés), que es la eliminación de este gas de la atmósfera por el almacenamiento en el fondo del océano o bajo tierra en los llamados sumideros de carbono. Una forma de incrementar la captura de carbono en la tierra es plantando árboles, aumentando la materia orgánica del suelo e incorporando material vegetal en las prácticas agrícolas, evitar la quema de biomasa, entre otros.
- Llevaría a una mayor compensación potencial con los ODS. Al no cumplir con los objetivos de mitigación para 2030 esto implicaría un mayor apoyo en los ODS para disminuir una mayor cantidad de emisiones. Esta compensación de emisiones que no se lleguen a reducir por la ausencia de un mayor compromiso en las políticas ambientales, se debería a la reducción de contaminantes atmosféricos (ODS11), disminución de la demanda de agua (ODS6) y dependencia de la bioenergía (ODS7), que requerirán de un mayor esfuerzo.

- Llevaría al bloqueo de la infraestructura intensiva en carbono después de 2030, de seguir invirtiendo en ella. Los sistemas sociotécnicos en general y los sistemas energéticos en particular se caracterizan por su inercia y la dependencia de su ciclo de vida debido a reservas de capital de larga duración con una rotación lenta, requisitos de infraestructura, aprendizaje práctico y prácticas culturales. Estas inercias dan lugar a la noción de bloqueo de carbono, que son las emisiones comprometidas a gran escala que resultan de las infraestructuras existentes. Compromisos más ambiciosos resultarían en activos varados de la energía del carbón que representan inversiones cuantiosas. La energía a base de carbón es la causa más importante de bloqueo de carbono en la actualidad (Davis y otros, 2010; Bertram y otros, 2015; PNUMA, 2017) y todas las plantas actualmente en funcionamiento comprometen al mundo en alrededor de 190 GtCO₂ (PNUMA, 2017; Edenhofer y otros, 2018). Si todas las centrales eléctricas de carbón actualmente en construcción entran en funcionamiento y funcionan hasta el final de su vida útil técnica, el compromiso de emisiones de carbón aumentará en otros 150 GtCO₂, poniendo en peligro el compromiso de 1,5 °C y 2 °C del acuerdo de París (PNUMA, 2018).

II. Escenarios, fuentes de información y metodología

Los análisis de impactos del cambio climático requieren una gran cantidad de información sobre el clima, la población, los sectores económicos, la infraestructura, los servicios y los ecosistemas. La demanda de información climática se ha expandido significativamente, tanto para contar con datos históricos, como con escenarios climáticos que tengan mejores niveles de certidumbre. Igualmente, se requiere información para áreas geográficas específicas como departamentos, estados, provincias, municipios, cuencas, ciudades, fincas, entre otros. La información satelital y espacial, fortalecida por el avance en plataformas y programas de análisis, manejo de datos y georreferenciación, proporcionan nuevas oportunidades y retos para la adquisición de competencias técnicas.

Esta publicación presenta un análisis espacial y estadístico de datos climáticos históricos y los escenarios climáticos llamados trayectorias de concentración representativas² para distintos niveles subnacionales, basados en información de datos almacenados en formato ráster³. Los resultados son de utilidad para el análisis de impactos del cambio climático a escalas geográficas más específicas, paso útil para una mejor instrumentación de las políticas de adaptación en agricultura, energía, disponibilidad hídrica, salud, inversión pública, biodiversidad y ecosistemas para distintos territorios. En este capítulo se describe el clima de México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana con consideraciones sobre los escenarios climáticos y el cambio climático regional. Asimismo, se explican las fuentes de información y el proceso realizado para la elección de los modelos MCGAO utilizados. Después se enumeran las diferencias metodológicas entre los escenarios SRES (empleados anteriormente en el proyecto ECCCARD) y los RCP. Finalmente se describen las trayectorias socioeconómicas compartidas⁴ y se hace un resumen de los escenarios que serán parte del sexto reporte del IPCC (AR6).

² Representative Concentration Pathways (RCP, por sus siglas en inglés).

³ Un ráster es una matriz de celdas o píxeles organizadas en filas y columnas en la que cada celda contiene un valor o muchos valores que representa información. Los ráster son fotografías aéreas digitales, imágenes satelitales, imágenes digitales o incluso mapas escaneados (ESRI, 2020).

⁴ Shared Socio-economic Pathways (SSP, por sus siglas en inglés).

A. Descripción climática de México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana

México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana se encuentran entre la latitud $32^{\circ} 43'$ y $7^{\circ} 06'$ N y entre la longitud $68^{\circ} 50'$ y $117^{\circ} 31'$ W (véase el mapa II.1). Un tercio de esta región, incluyendo el norte de México, se sitúa al norte del trópico de cáncer y se caracteriza por veranos calientes e inviernos fríos. En contraste, dos tercios de la región, incluido el sur de México y Centroamérica se encuentra al sur del trópico de cáncer, donde la diferencia entre la temperatura de verano e invierno es menor (Escoto, 1953).

Mapa II.1
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: ubicación en el sistema de coordenadas geográficas



Fuente: Google Earth, 2020 [en línea] <https://www.google.com/earth/>.

El clima se define como el estado promedio del tiempo y más rigurosamente, como una descripción estadística del tiempo atmosférico en términos de los valores medios y de la variabilidad de las magnitudes correspondientes durante períodos que pueden abarcar desde meses hasta miles o millones de años. Las variables que se utilizan para describir el clima son casi siempre las de temperatura, precipitación o viento, a nivel de la superficie (IPCC, 2014b). Se utilizan las normales climáticas o climatología (promedios históricos de 30 años de variables como temperatura y precipitación) como punto de referencia para el estudio del comportamiento de las distintas variables climáticas dentro de un contexto histórico.

Por su parte, el sistema climático consta de cinco componentes principales: atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera, y considera las interacciones entre ellos. El sistema climático evoluciona en el tiempo bajo la influencia de su propia dinámica interna y por efecto de forzamientos externos, como las erupciones volcánicas o las variaciones solares y de forzamientos antropógenos, como el cambio de composición de la atmósfera o el cambio de uso de la tierra (IPCC, 2014b).

Asimismo, la variabilidad del clima denota las variaciones de la media y de otras estadísticas del clima, como la desviación estándar. La variabilidad puede deberse a procesos internos naturales del sistema climático (variabilidad interna) o a variaciones debidas al forzamiento externo natural o antropógeno (variabilidad externa). Las variaciones del clima van desde días hasta décadas.

El calor, la humedad, así como sus cambios, no se distribuyen uniformemente en todas las regiones (Christensen y otros, 2013), algunas de las razones son:

- Los forzamientos externos varían espacialmente: la radiación solar depende de la latitud, la emisión de aerosoles tiene fuentes locales, los cambios regionales en el uso de la tierra, entre otros.
- Las condiciones de la superficie varían espacialmente, como el contraste tierra/mar, la topografía, la temperatura de la superficie del mar, el contenido de humedad del suelo, entre otros.
- Los sistemas meteorológicos locales y las corrientes oceánicas redistribuyen el calor y la humedad de una región a otra.

El clima en México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana se caracteriza por su gran diversidad. La temperatura y la precipitación varían significativamente de región en región. Algunas partes secas del noroeste de México reciben menos de 100 mm de precipitación anual, en tanto que algunos lugares de la costa del Caribe de Centroamérica reciben más de 6.000 mm anuales. Por su parte, Centroamérica es una región con una topografía compleja y diversa, que incluye territorios continentales, cadenas de islas y cadenas montañosas de diferentes orientaciones y elevaciones.

La topografía interactúa con las circulaciones atmosféricas a gran escala para producir variaciones locales en el clima, incluidas variaciones significativas en la precipitación acumulada anual, duración de la temporada de lluvias y ocurrencia de máximos y mínimos. Por ejemplo, las estaciones que caracterizan las zonas costeras caribeñas de Honduras, Costa Rica y Panamá poseen un régimen de lluvia más homogéneo intraanual, que contrasta con el régimen seco de invierno de la costa Pacífico, lo anterior se explica por las fuertes interacciones de los vientos de bajo nivel con la topografía (Taylor y Alfaro, 2005). Las variaciones subregionales dificultan las generalizaciones sobre el clima de la región, un hecho que debe tenerse en cuenta al considerar las descripciones generales presentadas en las siguientes secciones.

1. Corredor Seco Centroamericano

El Corredor Seco Centroamericano (CSC) es una región que se extiende por la costa Pacífica de Centroamérica, desde Chiapas, México, en una franja que abarca las zonas bajas de la vertiente del Pacífico y gran parte de la región central premontana (0 a 800 msnm) de Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, hasta Guanacaste en Costa Rica; Honduras incluye fragmentos que se aproximan a la costa del Caribe (Van der Zee y otros, 2012). Algunas delimitaciones incluyen el arco seco de Panamá, área donde se dan condiciones climatológicas y ecosistémicas que la distinguen del resto de la región centroamericana al presentar una

marcada aridez climatológica y caracterizarse por áreas de potencial bosque tropical seco (Calvo y otros, 2018).

El CSC cuenta con una gran variedad de condiciones climáticas, que pueden cambiar en pocos kilómetros y con cambios de altitud. Su climatología se caracteriza por dos puntos máximos de precipitación que corresponden a junio y septiembre, una estación seca que abarca los meses de noviembre a mayo y una canícula entre julio y agosto que suele ser marcada y prolongada (Taylor y Alfaro, 2005; Calvo y otros, 2018). El CSC tiene una base climática y ecológica pues define condiciones de un grupo de ecosistemas que se combinan en la ecorregión del bosque tropical seco de Centroamérica. Durante la estación lluviosa existe un latente riesgo a la sequía que ocurre por una tardía entrada del invierno, una prolongación de la canícula o una suspensión prematura del invierno (FAO, 2012b). Para mayor detalle, en el capítulo VII se muestra el mapa de sequía en el CSC.

2. Características de los principales fenómenos meteorológicos que tienen influencia en el clima regional

a) *Monzón*

Es un cambio estacional en la dirección de los vientos predominantes de una región. Los monzones provocan estaciones húmedas y secas en gran parte de los trópicos. Se deben al efecto de las diferencias entre el calentamiento de la masa terrestre a escala continental y el del océano adyacente. Los monzones siempre soplan de regiones frías a cálidas. Las lluvias monzónicas caen principalmente sobre tierra firme, durante los veranos. El monzón norteamericano ocurre una vez al año a mediados del verano. El aire cálido y húmedo del golfo de California sopla al noreste, mientras que el aire cálido y húmedo del golfo de México sopla al noroeste. Estos dos vientos se encuentran sobre las montañas de la Sierra Madre Occidental de México. El monzón lleva humedad al ecosistema montañoso y continúa hacia el norte (Stanley, s/a; IPCC, 2013b; IPCC, 2002).

b) *Zonas de convergencia intertropical (ZCIT)*

Están asociadas a una franja terrestre, cercana al ecuador, en donde convergen los vientos alisios⁵ del hemisferio norte (del noreste) y del hemisferio sur (del sureste). Por efecto de esta convergencia y debido a las altas temperaturas, el aire húmedo asciende originando abundante nubosidad y fuertes precipitaciones, algunas acompañadas de descargas eléctricas. La zona de convergencia intertropical no es uniforme ni continua, se puede interrumpir y su grosor varía de una región a otra, al igual que su comportamiento en zonas oceánicas y continentales (AEMET, 2020).

c) *El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)*

Es el calentamiento del agua en toda la cuenca del océano Pacífico tropical al este de la línea internacional de cambio de fecha y, por ende, cerca de las Américas. Está asociado a ciertas

⁵ Se trata de vientos persistentes sobre extensas regiones, generalmente en la atmósfera inferior, que soplan desde un anticiclón subtropical hacia las bajas presiones ecuatoriales (AEMET, 2020).

fluctuaciones de un patrón global de presiones en la superficie tropical que se denomina Oscilación Sur. Este fenómeno, que puede durar entre dos y siete años, no tiene una periodicidad regular. Durante el evento de ENOS, los vientos alisios habituales se debilitan, lo que reduce el flujo ascendente y altera las corrientes oceánicas por lo que aumenta la temperatura superficial del mar, lo que debilita aún más los vientos alisios. El ENOS afecta los patrones de viento, la temperatura superficial del mar y la precipitación en el Pacífico tropical e influye en el clima de toda la región del Pacífico y de otras partes del mundo. Su fase fría se denomina La Niña (IPCC, 2013b). El índice multivariado del ENOS (IME) es una evaluación del estado de este fenómeno y es importante para los servicios meteorológicos que deben informar el estado del clima para preparar las respuestas sociales y acciones de política para el suministro de agua, la seguridad alimentaria, la salud y la prevención. El IME combina variables oceánicas y atmosféricas y proporciona el nivel de intensidad del fenómeno (NOAA, 2020a).

d) Modos anular y dipolar

Son modos de la variabilidad en los extratropicos. Los dominantes son:

- *Modo Anular del Norte (MAN)*: es un patrón climático caracterizado por un cinturón de vientos alrededor del Ártico, circulando en sentido contrarreloj. En su fase positiva, estos vientos son intensos y aíslan el aire más frío en las regiones polares. En su fase negativa, estos vientos se debilitan lo que permite la llegada de masas de aire Ártico hacia latitudes medias (AEMET, 2020).
- *Modo Anular del Sur (MAS)*: describe el movimiento de norte a sur del cinturón de vientos del oeste que rodea la Antártida. Es el patrón dominante en latitudes medias y altas del hemisferio sur. En su fase positiva, el cinturón de vientos fuertes del oeste se contrae hacia la Antártida, confinando la masa de aire más fría hacia el polo. En su fase negativa, se produce una expansión de este cinturón hacia el ecuador, aumentando en número e intensidad los sistemas de bajas presiones en latitudes medias (AEMET, 2020).
- *Oscilación del Atlántico Norte (OAN)*: oscilación consistente en variaciones de signo opuesto de la presión del nivel del mar entre el subtrópico alto del Atlántico e Islandia. Está asociada a los ciclones extratropicales y sus fluctuaciones en el Atlántico Norte y las áreas continentales de alrededor (IPCC, 2013a, Christensen y otros, 2013).
- *Oscilación del Pacífico Norte (OPN)*: está asociada con los desplazamientos norte-sur de la corriente en chorro de Asia-Pacífico y la trayectoria de tormenta del Pacífico. Influye en la temperatura del invierno y la precipitación en gran parte del oeste de América del Norte, así como en el hielo del mar sobre el Pacífico y el Ártico (IPCC, 2013b, Christensen y otros, 2013).

e) Ciclones tropicales

Se trata de fenómenos meteorológicos ligados a los fenómenos climáticos regionales y a los modos de variabilidad climática. Producen vientos y precipitación fuerte (IPCC, 2013b).

f) *Ciclón extratropical*

Se trata de una tormenta a gran escala en latitudes medias o altas con una presión central baja y frentes con fuertes gradientes horizontales de temperatura y humedad. Constituye una causa importante de velocidades extremas de viento y fuerte precipitación, especialmente en invierno (IPCC, 2013b; Christensen y otros, 2013).

B. El cambio climático regional y fenómenos meteorológicos

Los MCGAO son evaluados comparando sus simulaciones con las observaciones históricas. Si el modelo hace una buena reproducción del clima pasado aumenta la confianza en las proyecciones del futuro que puede generar. Las pruebas de calidad de los modelos que involucran la capacidad de reproducir la variabilidad o las tendencias son más relevantes para la confianza en sus proyecciones del clima futuro que aquellas que reproducen bien solo las medias (Min y Hense, 2006; Greene y otros, 2006; Duffy y otros 2014).

Los métodos de evaluación de los modelos se han centrado en evaluar su capacidad de reproducir las tendencias observadas que pueden incluir una contribución significativa o incluso dominante de la variabilidad no forzada (variabilidad natural) que en general no puede separarse de la respuesta forzada, como del efecto de las emisiones antropogénicas. Esto es especialmente cierto en escalas espaciales específicas por la influencia de fenómenos meteorológicos regionales (Duffy y otros, 2014). Los modelos se van mejorando con cada generación, incluyendo su simulación de los fenómenos meteorológicos a nivel global y regional, dando mayor confianza en las proyecciones climáticas en cada reporte del IPCC (Flato y otros, 2013).

Los escenarios de cambio climático describen trayectorias distintas en el siglo XXI de las emisiones y las concentraciones atmosféricas de GEI, las emisiones de contaminantes atmosféricos y el uso de suelo (véase el capítulo I)⁶. Las proyecciones de las concentraciones y emisiones de los GEI y de la carga de aerosol antropogénico de los escenarios climáticos son los insumos que se introducen en los MCGAO; las proyecciones de cambio climático se obtienen a partir de dichos modelos. Para el AR4 del IPCC los escenarios se basaron en los supuestos sobre las fuerzas impulsoras del Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (SRES) (Nakićenović y otros, 2000) y para el AR5 se usaron los RCP (Moss y otros, 2010; van Vuuren y otros, 2011) de la quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5, *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*).

Los climas regionales responden de manera diferente a los cambios globales y son afectados por procesos que varían con su ubicación geográfica. Por lo tanto, el cambio medio global podría definirse como una sumatoria de muchas respuestas climáticas regionales diversas (Christensen y otros, 2013). El cambio climático no se distribuye uniformemente en el planeta, y el nivel de vulnerabilidad y, por ende, el impacto, no es el mismo por región, por lo que las medidas de adaptación deben ser diferentes. Frente a la diversidad de respuestas que se requieren, los análisis regionales de cambio climático cobran mayor importancia.

⁶ En el capítulo I se abordan los conceptos y evolución de los escenarios de cambio climático planteados por el IPCC de una manera más amplia, así como de los Modelos de Circulación General Atmósfera-Océano (MCGAO).

Se prevé que algunos fenómenos climáticos cambien en el futuro, lo que puede llevar a mayores impactos en los climas regionales (Christensen y otros, 2013). Los sistemas meteorológicos están asociados con fenómenos climáticos importantes a escala regional como monzones, zonas de convergencia tropical, trayectorias de tormenta y modos de variabilidad climática importantes (ENOS, NOA, MAS, presentados en la sección anterior).

Las proyecciones de cambio en la temperatura de la superficie y la precipitación muestran grandes variaciones regionales. Christensen y otros (2013) analizaron los cambios proyectados del modelo CMIP5 bajo el escenario RCP4.5 para el período 2081-2100 con respecto a 1986-2005. En él se estima un calentamiento de la superficie más intenso en las regiones continentales de alta latitud y en el océano Ártico, mientras que en otros océanos y en latitudes más bajas los cambios están más cerca de la media global. Por ejemplo, se prevé que el calentamiento cerca del área de los grandes lagos de América del Norte sea aproximadamente 50% mayor a la media del calentamiento global.

Por su parte, los cambios proyectados en la precipitación son aún más variables regionalmente que los cambios en la temperatura; estas diferencias regionales se deben a fenómenos como los monzones y las zonas de convergencia tropical. En general, bajo el RCP4.5 y el modelo CMIP5 los cambios proyectados en precipitación son:

- Un aumento en la precipitación en las regiones cercanas al ecuador.
- Una reducción de la precipitación media en las regiones subtropicales que están en los bordes polares.
- Un aumento de la precipitación media en particular una precipitación más extrema de los ciclones extratropicales en las regiones de latitudes más altas.

La credibilidad en las proyecciones regionales del cambio climático aumenta si es posible identificar los impulsores clave del cambio y simularlos correctamente en los MCGOA frente a las series históricas. Un fenómeno se considera relevante para el cambio climático regional si existe la confianza de que influye en el clima regional y si existe la confianza de que el fenómeno cambiará. En particular, a partir del escenario RCP4.5⁷, habría mayores cambios en los fenómenos meteorológicos con una alta confianza.

En el cuadro II.1 se muestra el resumen de la evaluación de los principales fenómenos climáticos y su relevancia para el cambio climático regional, con información del Grupo I del AR5 del IPCC⁸ (Christensen y otros, 2013). En el cuadro solo se ha extraído información de América del Norte, Centroamérica y el Caribe, objeto de estudio de este documento. No obstante, el AR5 evalúa dichos fenómenos para todas las regiones del mundo. El cuadro también incluye la evaluación de la confianza en el cambio futuro del fenómeno y de cómo el fenómeno influye en el clima regional. Los fenómenos en color rojo tienen relevancia alta en la región, los de amarillo tienen relevancia media y en gris no tienen relevancia.

La evaluación de los fenómenos climáticos indica que para las regiones analizadas hay una confianza alta de que haya un cambio en los fenómenos tropicales y en los modos anular

⁷ Los autores del capítulo 14 titulado "Fenómenos climáticos y su relevancia para el cambio climático regional" del grupo I del AR5 del IPCC consideran los impactos a partir del escenario RCP4.5, por contar con las trayectorias más cercanas a las observadas históricamente y ser un escenario de estabilización.

⁸ Los reportes del IPCC se componen de tres grupos de trabajo, el grupo I es "La base de la ciencia física", el grupo II es el de "Vulnerabilidad y adaptación" y el grupo III es el de "Mitigación del cambio climático".

y dipolar, una confianza media de que cambie el monzón, los ciclones tropicales y extratropicales, y una confianza baja de un cambio en el ENOS (véase el cuadro II.1). Para Centroamérica y el Caribe existe confianza alta de que los monzones, los fenómenos tropicales, el ENOS y los ciclones tropicales tienen impacto en la región. En Centroamérica estos sistemas meteorológicos reducirían la precipitación y solo la presencia de ciclones tropicales que toquen tierra aumentaría las lluvias extremas en ambas costas. En América del Norte, incluyendo México, existe confianza alta de su impacto en el monzón, el ENOS y los ciclones tropicales y extratropicales. En América del Norte podría haber cambios en precipitación y temperatura por el fenómeno tropical y los modos anular y dipolar, y además se proyectan cambios en estos fenómenos durante el invierno y en los ciclones extratropicales. Estos fenómenos se reflejan en las proyecciones de los escenarios de cambio climático del AR5, pero esto no implica que los modelos indiquen en qué año se presentarán fenómenos como los ciclones tropicales, sino que están reflejados en la variabilidad de la precipitación.

Cuadro II.1
América del Norte, Centroamérica y el Caribe: resumen de los cambios proyectados en los fenómenos mayores y su impacto en el cambio del clima regional futuro

Fenómeno Región	Monzón	Fenómeno tropical	ENOS	Modos anular y dipolar	Ciclones tropicales	Ciclón extratropical
Centroamérica y el Caribe	MP/HI Reducción proyectada en la precipitación media.	HP/HI Precipitación media reducida en el sur de Centroamérica si hay un desplazamiento hacia el sur del Pacífico Este de la zona de convergencia intertropical.	LP/HI Precipitación media reducida si el evento de El Niño llega a ser más frecuente o intenso.		MP/HI Precipitaciones más extremas cerca de los centros de ciclones tropicales que tocan tierra en las costas este y oeste.	
América del Norte	MP/HI Es probable que aumente el número de días secos consecutivos y se reduzca la disponibilidad general de agua.	HP/LI Los cambios proyectados de la zona de convergencia intertropical no relacionados con los cambios de ENOS afectarán la temperatura y la precipitación, especialmente en invierno.	LP/HI Probables cambios en la precipitación si el ENOS cambia en el norte de esta región.	HP/MI Los pequeños cambios proyectados en el índice de la OAN son probables para contribuir a cambios en temperatura y precipitación en el invierno en la parte del noreste de la región.	MP/HI Incremento proyectado en la precipitación extrema cerca de los centros de los ciclones tropicales tocando tierra a lo largo de la costa occidental de los Estados Unidos y México, el golfo de México y la costa este de los Estados Unidos y el Canadá.	MP/HI Los aumentos proyectados en la precipitación en ciclones extratropicales conducirán a grandes aumentos en la precipitación de invierno sobre un tercio del norte de la región.

Fuente: J. H. Christensen y otros, "Climate phenomena and their relevance for future regional climate change", *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, contribución del Grupo de Trabajo I para el Quinto reporte de evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), T. F. Stocker y otros (eds.), Cambridge y Nueva York, Cambridge University Press, 2013.

Nota: La relevancia es clasificada en alto (rojo), medio (amarillo), bajo (azul) y sin relevancia obvia (gris), basado en los niveles de confianza que habrá un cambio en los fenómenos (HP para alta probabilidad, MP para probabilidad media, LP para baja probabilidad) y los niveles de confianza en el impacto de los fenómenos en cada región (HI para alta, MI para media, LI para baja).

El IPCC no mostró un informe tan detallado por regiones para las temperaturas y precipitaciones extremas y las sequías en las simulaciones de los MCGAO como con los fenómenos meteorológicos y sus análisis han sido más globales. Los extremos climáticos han recibido mayor atención por sus impactos sociales. Es más confiable simular los eventos extremos de temperatura que de precipitación, aunque no existe un amplio registro debido a su baja ocurrencia. Asimismo, la precipitación extrema puede generarse en una escala espacial pequeña que es difícil de representar en los MCGAO. En el caso de las ondas de calor existe una discordancia entre las observaciones históricas y los modelos, ya que en los primeros no se observa una tendencia significativa, mientras que en los modelos hay una tendencia de incremento.

Duffy y otros (2014) encuentran que en el escenario RCP8.5 con el modelo CMIP3 la atmósfera contará con mayor capacidad de sostener vapor de agua llevando a episodios de precipitaciones intensas, pero, al mismo tiempo este ciclo del agua más acelerado conllevaría a períodos más secos. Se espera que el índice de intensidad de precipitación se incrementaría en la región de América del Norte y el número de eventos totales que exceden el percentil 95 de la distribución de días húmedos se incrementaría en la mayor parte de dicha región. En cuanto a la temperatura extrema la razón entre los registros de temperaturas altas y bajas en la simulación del modelo CMIP3 arrojó un valor de 4 a 1 en 2000; en el escenario RCP8.5 al 2050 la razón sería 20 a 1 y a 2100 aumentaría 50 a 1 en la región de América del Norte. Para el este de los Estados Unidos y México el número de días superiores a los 32,2 °C se incrementaría entre un 400% a 500% comparado con 1979-2005 al final del presente siglo.

En cuanto a las sequías, algunos estudios concluyen que pueden ser una consecuencia de la temperatura de la superficie del mar. En el caso de una simulación histórica larga y no forzada, en el modelo HadCM3, las sequías muestran patrones geográficos y una relación con el ENOS. Por otra parte, el modelo CMIP3 sobrerrepresenta la extensión y severidad de las sequías en México, los Estados Unidos y el Canadá relativo a las observaciones históricas. En general, en la región de América del Norte se proyecta un incremento de las sequías con duración de 4 a 6 meses o mayores a 12 meses en el escenario RCP8.5 (Duffy y otros, 2014).

C. Fuentes de información y proceso para obtener valores nacionales y subnacionales

El análisis presentado en este documento se basa en fuentes de información global, de las cuales se extrajeron los datos de la región. Las fuentes de información global ya incluyen un proceso de homogenización y validación de las bases de datos de diferentes orígenes. Por una parte, están las fuentes de información histórica, que contienen series de un período largo de tiempo y hacen una interpolación del clima a diferentes escalas con base en estaciones meteorológicas de todo el mundo. Por otra parte, la información de escenarios futuros es proporcionada por instituciones que hacen el trabajo de compilación de los MCGAO para cada uno de los escenarios de cambio climático. Estas instituciones toman los datos generados por los modelos para cada escenario y ajustan las resoluciones espaciales para contar con

información a una escala reducida (*downscaling*)⁹. Los distintos MCGAO son realizados por distintas universidades e instituciones de investigación y pueden tener diferentes resoluciones espaciales. Asimismo, la información de los escenarios RCP son hechos a nivel global, pero se pueden extraer los datos para alguna región en particular.

Los datos utilizados en este análisis son la temperatura y la precipitación que son dos de las principales variables que muestran el impacto del cambio climático. Con dichos datos, se pueden estimar las tendencias y variaciones en los patrones intraanuales hasta en escala municipal, por lo que se requirieron series largas y por mes con una muy alta resolución. Además, con esta información se ha podido generar un índice de aridez y un indicador de meses secos. A continuación, se describen las fuentes de información en que se basó el análisis histórico y futuro del cambio en la temperatura y precipitación, así como del índice de aridez y los meses secos.

I. Información histórica

La construcción de climatologías y series de datos históricos es clave para el análisis de las tendencias del clima hasta hoy día y para la elaboración de escenarios de cambio climático. Hay instituciones e investigadores que han trabajado por muchos años en la construcción de bases de datos históricas globales como WorldClim, NOAA GlobalTemp, ERA-5, JRA-55, GISTEMP y HADCRUT, con distintas resoluciones espaciales, métodos de interpolación y extrapolación y fuentes de información. Estas fuentes de información varían en cantidad de estaciones meteorológicas, uso de información satelital y el punto de partida de sus registros históricos.

Con el tiempo los encargados de generar estas bases de datos han hecho mejoras en su accesibilidad. Generalmente los usuarios requieren un mínimo de conocimiento en programas SIG o de programación de *software* que sea capaz de leer los formatos en los que son presentados las bases de datos climáticos. Una mejor accesibilidad implica que hay mayor claridad en las opciones o instrucciones para descargar la información; los formatos pueden ser leídos por distintos *softwares* y son archivos de menor tamaño. Asimismo, en los últimos años se han creado comunidades y foros que aportan mejoras en *software* libre para el análisis de gran cantidad de datos como R, Python, QGIS, entre otros, que han propiciado que más personas utilicen esta información y continúe creciendo el número de usuarios.

a) Climatic Research Unit (CRU)

En el proyecto de la Economía del Cambio Climático en Centroamérica (ECC CA), gestionado por la sede subregional de la CEPAL en México y los Ministerios de Ambiente y Hacienda de SICA a partir de 2008, el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional

⁹ Las técnicas de *downscaling* o reducción de escala se pueden dividir en dos categorías: dinámicas y estadísticas. El *downscaling* dinámico se refiere al uso de simulaciones regionales de alta resolución para extrapolar dinámicamente los efectos de los procesos climáticos de gran escala a escalas de interés regional o local. El *downscaling* estadístico abarca el uso de varias técnicas basadas en estadísticas para determinar las relaciones entre los patrones climáticos a gran escala resueltos por los modelos climáticos globales y las respuestas climáticas locales observadas. Estas relaciones se aplican a los resultados de GCM para transformar los resultados del modelo climático en productos estadísticamente refinados, que a menudo se consideran más apropiados para su uso como entrada en estudios de impactos climáticos regionales o locales (GFDL, 2020).

Autónoma de México (UNAM) recomendó utilizar la base de datos del Climatic Research Unit (CRU, por sus siglas en inglés), de la Universidad de East Anglia, del Reino Unido, para el análisis nacional e histórico. Esta base de datos consiste en rejillas de valores mensuales de variables climáticas con una resolución de 30 minutos de arco (que equivalen a 0,5° o 55,5 km) y cuya versión CRU TS (Time Serie) 3.0 cubría el período 1901-2006 (CEPAL, CCAD, SICA, UkAid y DANIDA, 2011). La recomendación se basó en su popularidad entre la comunidad internacional y su seguimiento a las anomalías con respecto al período preindustrial (1850-1900), al contar con la serie histórica de temperatura global desde 1850.

En la segunda etapa del proyecto de la ECC CA, en 2013, se hizo un análisis departamental¹⁰ del impacto del cambio climático en los granos básicos y el café en Centroamérica, para lo cual se requirieron datos a este nivel de subdivisión política. Ante la falta de información se optó por utilizar la base del CRU TS 3.10 que era una actualización hasta 2009. Al validar la información con datos de estaciones meteorológicas se encontraron diferencias en los niveles de la temperatura y precipitación principalmente con departamentos que tienen mayor altitud. Los datos del CRU TS 3.10 fueron ajustados con los datos de las estaciones meteorológicas disponibles de las instituciones meteorológicas en algunos países y de las instituciones de estadísticas para el resto de los países de Centroamérica utilizando la metodología recomendada por la OMM (CEPAL y CAC/SICA, 2013 y 2014). Una de las ventajas de usar esta información fue que se pudo relacionar la variabilidad climática anual con los rendimientos anuales de los cultivos¹¹.

Con el propósito de dar seguimiento a la información histórica de CRU TS y al ser este uno de los referentes internacionales del seguimiento de la temperatura global se decidió preparar el análisis histórico del clima del presente documento con la base del CRU TS 4.03, que cuenta con series de tiempo mes a mes en el período 1901-2018¹² provistos en rejillas de alta resolución (0,5 x 0,5 grados) calculado a partir de datos diarios o subdiarios suministrados por los servicios meteorológicos nacionales y otros agentes externos. Esta información puede descargarse, junto con versiones anteriores, en el sitio web del CRU y se trata de mapas en formato ráster.

La fuente principal usada en el CRU TS para la actualización de los datos climáticos mensuales, desde la versión 3.10, proviene de la OMM, obtenidos como archivos de calidad controlada a través de la Oficina Meteorológica del Reino Unido, en colaboración con la Administración Nacional Oceanográfica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos a través de su Centro Nacional de Datos Climáticos (NCDC). Los encargados de esta base ingresan a estos datos mediante el Centro Hadley en el Reino Unido y del NCDC en los Estados Unidos. De acuerdo con Harris y otros (2014 y 2020) la información utilizada de estas instituciones considera:

¹⁰ La división política departamental es referida para departamentos, provincias y distritos.

¹¹ No se usaron los datos de estaciones meteorológicas pues solo reflejan el clima de un punto y no en un área geográfica.

¹² Hasta febrero de 2020, fecha de la última revisión, se mantenía en ese período.

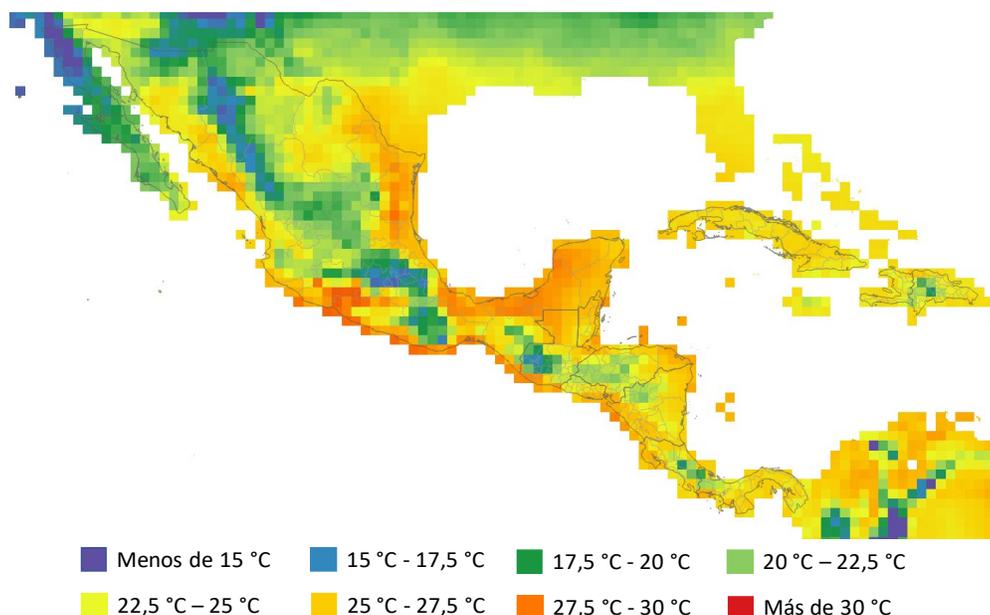
- Datos mensuales de CLIMAT, intercambiados internacionalmente entre países de la OMM. Por lo general cuenta con alrededor de 2.400 estaciones, pero con un número significativo de valores faltantes. Las estaciones no permanecen constantes con el tiempo. Para precipitación se han llegado a contar con 2.900 estaciones.
- Los datos de Monthly Climatic Data for the World (MCDW, por sus siglas en inglés) producidos por el NCDC para la OMM, que utiliza alrededor de 2.000 estaciones. Para precipitación han llegado a contar con 2.600 estaciones. Al igual que con CLIMAT, las estaciones cambian con el tiempo.
- Los datos por décadas del World Weather Records (WWR, por sus siglas en inglés) son alimentados con base en los servicios meteorológicos nacionales (SMN) y del centro de archivos del NCDC. Ha llegado a contar con información de alrededor de 1.700 estaciones. Las series de datos por décadas tienden a tener menos valores faltantes y menos valores atípicos y existen más series para algunos países.
- Otras fuentes adicionales son las colaboraciones con otros científicos e instituciones climáticas y la publicación de series climáticas por parte de los Servicios Meteorológicos Nacionales (SMN). Estas se incorporaron después de las verificaciones de control de calidad, incluida la ubicación y la verificación de valores atípicos.

La versión CRU TS 4.03 se ha ido actualizado año con año desde 2016 y ha mejorado el método de interpolación. Se ha incrementado la densidad de estaciones meteorológicas y las fuentes con el apoyo del Consejo de Investigación del Medio Ambiente Natural del Reino Unido (NERC, por sus siglas en inglés), el Departamento de Energía de los Estados Unidos (USDOE, por sus siglas en inglés) y el Centro Nacional de Ciencia Atmosférica del Reino Unido (NCAS, por sus siglas en inglés). El cambio principal de la versión CRU TS4.03 fue la ponderación de distancia angular (ADW, por sus siglas en inglés) para realizar las celdas (cuadrículas) de las anomalías mensuales.

Esta técnica permite tener un control total sobre la selección de observaciones de la estación para cada celda y una trazabilidad completa para cada dato en los archivos de salida (Harris, 2019). Una desventaja es que, pese a su mejora en la interpolación, sigue sin tener una alta resolución, lo que impide generar información para áreas pequeñas. En el mapa II.2 se muestra un ejemplo del mapa ráster que puede descargarse de la base del CRU TS4.03 (este mapa se editó en el *software* libre de SIG QGIS). Del mapa global se extrajo el área de Mesoamérica y se editaron los rangos con colores. Este mapa ráster corresponde al mes de mayo de 1990.

Para los datos nacionales se usó la base CRU CY 4.03 que contiene promedios por país. El método del CRU CY para calcular los promedios espaciales por país fue utilizando medias ponderadas por área. La CRU CY se deriva directamente del conjunto de datos CRU TS y la numeración de la versión coincide en los dos conjuntos de datos. Esta fuente de información contiene un conjunto de diez variables climáticas —temperatura máxima, mínima y promedio, rango de temperatura diurna, precipitación, cobertura de nubes, frecuencia de heladas, potencial de evapotranspiración, presión de vapor y frecuencia de días húmedos— con una frecuencia mensual y anual. Estos archivos están disponibles por variable y por país en archivos de texto ASCII, de fácil acceso mediante un editor de texto o en el *software* de SIG.

Mapa II.2
Mesoamérica: temperatura media, resolución de 30 minutos, mayo de 1990
 (En grados centígrados)



Fuente: Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

b) WorldClim

Otra fuente de información que se utilizó en el proyecto ECC CARD fue la base de WorldClim (Hijmans y otros, 2005)¹³. Esta base de datos se empleó para analizar patrones intraanuales y espaciales del clima, en la elaboración de los índices de aridez y meses secos a nivel departamental y en la validación de datos del CRU TS 3.10 (CEPAL, COSEFIN, CCAD, SICA, UkaID y DANIDA, 2012a y 2012b; CEPAL y CAC/SICA, 2013). Esta fuente ofrece datos climáticos con base en un gran número de estaciones meteorológicas diseminadas irregularmente en el planeta. En su primera versión consistió en datos mensuales de la climatología (promedio de un período largo) 1960-1990 y 1950-2000 y en la segunda versión se construyó la climatología 1970-2000.

Las características de esta base son:

- Resolución espacial máxima que va de 30 segundos de arco (1 km) a 10 minutos de arco (18,5 km).
- La metodología de reducción de escala es utilizada por otras fuentes de datos que presentan escenarios de cambio climático.
- La climatología utilizada para observar las anomalías de cambio climático, primero con referencia al período histórico 1950-2000 (versión anterior), 1960-1990 (versión actual), y con 1970-2000 para la siguiente generación.

¹³ La primera versión fue elaborada por Robert Hijmans, Susan Cameron y Juan Parra en el Museo de Zoología de Vertebrados de la Universidad de California, en la que también participaron Peter Jones y Andrew Jarvis, este último del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

- El método de interpolación toma en cuenta la elevación, la latitud y la longitud, por lo que se pueden observar microclimas con detalle.
- Gran cantidad de estaciones meteorológicas incluidas.

Esta fuente de información cuenta con algunas desventajas, entre las que destacan:

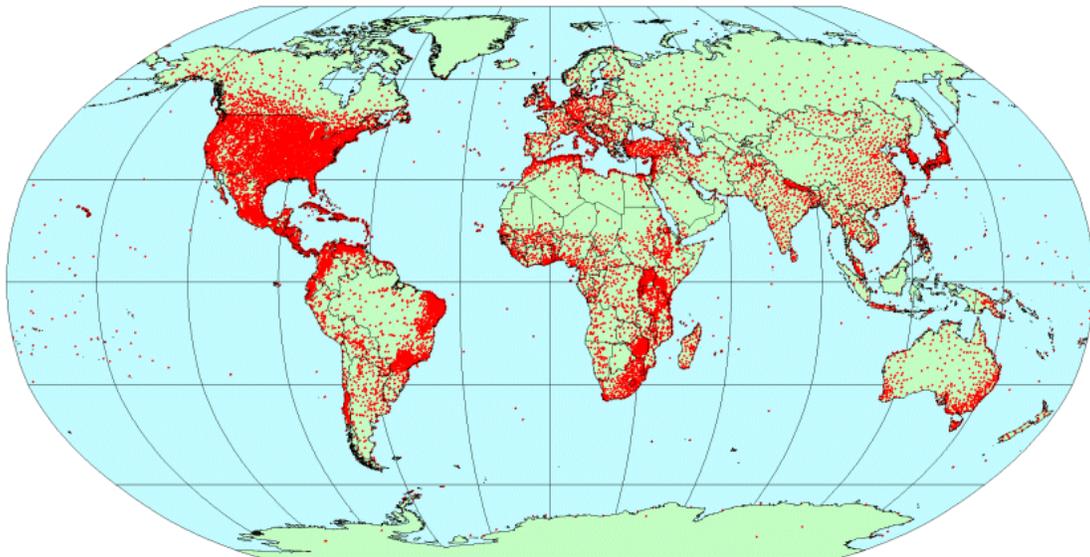
- No cuenta con series de tiempo.
- Las climatologías solo llegan hasta el año 2000.
- No hay actualizaciones frecuentes.

Las fuentes de información para los datos climáticos incluyen el Global Historical Climatology Network (GHCN, por sus siglas en inglés), además de estaciones adicionales de otras bases de datos como la FAO, la OMM, el CIAT, R-HYdronet (Red de datos electrónicos de Hidrometeorología regional de América del Sur, Centroamérica y el Caribe) y un número menor de datos para Australia, Nueva Zelanda, los países nórdicos, el Ecuador, el Perú, el Estado Plurinacional de Bolivia, entre otros. Después de eliminar las estaciones con errores, la base se conformó con registros de precipitación de 47.554 estaciones, para temperatura media 24.542 estaciones y para temperatura mínima y máxima 14.835 estaciones. En el mapa II.3 se muestra la localización de las estaciones climáticas que miden la temperatura media a nivel global con las que trabaja el WorldClim (Hijmans y otros, 2005).

Los autores interpolaron los datos climáticos con un algoritmo de *splines*, usando latitud, longitud y elevación como variables independientes y crearon superficies climáticas globales con una muy alta resolución (CEPAL, CCAD, SICA, UkaID y DANIDA, 2011). La fuente de información de elevación se tomó del *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM, por sus siglas en inglés) de la NASA, con escala de 1 km (Hijmans y otros, 2005). La información se encuentra en el sitio web de WorldClim y los mapas pueden ser descargados en formato ráster para la climatología 1960-1990 y 1970-2000, por mes, para temperatura media, mínima y máxima y precipitación, y 19 variables bioclimáticas relacionadas con la temperatura y precipitación.

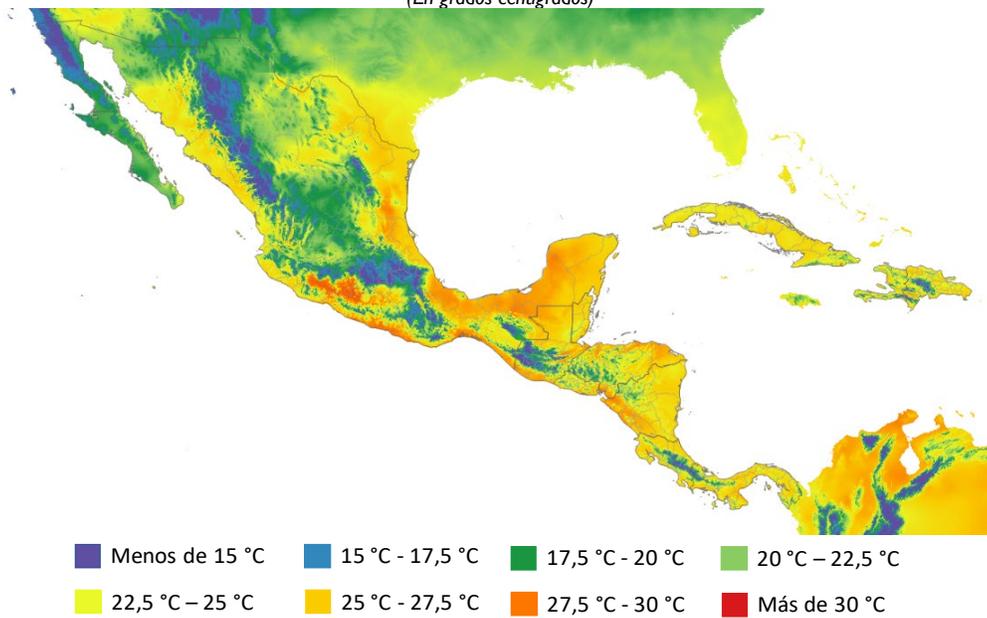
El mapa II.4 se descargó en mayo de 2020 del sitio web de WorldClim con una resolución de 1 km para período 1960-1990, se recortó el mapa global circunscribiéndolo a la región de Mesoamérica, y se le editó por rangos de temperatura con el *software* libre QGIS. En este mapa se puede observar con mayor detalle el clima de algunas regiones como el centro de México, el altiplano occidental guatemalteco y la región central de Costa Rica. Esta resolución permite calcular áreas geográficas pequeñas como municipios y diferenciar climas entre zonas contiguas, además de obtener el dato de puntos geográficos específicos con buena precisión. La información con muy alta resolución es importante en el análisis de impactos, ya que los paisajes agrícolas y naturales tienen grandes variaciones espaciales, en particular en los trópicos, donde la orografía, el clima, los suelos y el manejo de los cultivos varían a través de pequeñas distancias (Navarro-Racines y otros, 2020).

Mapa II.3
Mundo: localización de estaciones climáticas con datos de temperatura media trabajadas por WorldClim, 1950-2000



Fuente: R. J. Hijmans y otros, "Very high resolutions interpolated climate surfaces for global land areas", *International Journal of Climatology*, vol. 25, 2005.

Mapa II.4
Mesoamérica: temperatura media, resolución 30 segundos, mayo 1960-1990
 (En grados centígrados)



Fuente: WorldClim [en línea] <https://www.worldclim.org/>.

2. Información de escenarios climáticos

a) *WorldClim*

Los autores de WorldClim usaron la misma metodología de *downscaling* de la climatología histórica (1960-1990) para 19 MCGAO de la fase 5 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5) para los cuatro escenarios RCP, aunque algunos modelos no tienen los cuatro RCP. Los escenarios contienen datos de temperatura máxima, mínima (en grados centígrados, multiplicados por un factor de 10), precipitación mensual (en milímetro) y el conjunto de variables bioclimáticas, para los cortes 2050 (promedio 2041-2060) y 2070 (promedio 2061-2080) por mes¹⁴.

b) *CCAFS-Climate*

El Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (CGIAR, por sus siglas en inglés) a través de su programa de Investigación en Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS) desarrolló la base de datos global CCAFS-Climate, con proyecciones de cambio climático con corrección de sesgo. Para el desarrollo de esta base de datos los autores aplicaron el método delta (corrección de sesgo simple) a 35 MCGAO del CMIP5 para los cuatro escenarios RCP (Navarro-Racines y otros, 2020).

Los autores usaron el método delta, ya que se enfocaron en proporcionar datos para las condiciones climáticas medias de 30 años y porque el método es robusto para corregir las condiciones climáticas medias en otras regiones. Para cada MCGAO utilizaron períodos de 30 años nombrados como 2030 (2020-2049), 2050 (2040-2069), 2070 (2060-2089) y 2080 (2070-2099). Esta base de escenarios cuenta con información de la temperatura mensual máxima y mínima, y la precipitación mensual. Asimismo, los autores utilizaron la base de datos de WorldClim como referencia del período histórico (Navarro-Racines y otros, 2020). Los datos se encuentran disponibles en el sitio web de CCAFS-Climate y pueden descargarse en formato ráster a escala global o por región, a nivel mensual para los distintos cortes de tiempo antes mencionados. Esta base de datos también cuenta con la información de los SRES. De acuerdo con Navarro-Racines y otros (2020), la metodología usada para su construcción es la siguiente:

- Se obtuvieron los MCGAO del CMIP5, con la coordinación del Programa Mundial de Investigación Climática en apoyo al AR5 del IPCC, que proporciona simulaciones de última generación.
- Se calcularon las anomalías o deltas de los resultados originales de los MCGAO (diferencia de las simulaciones de cada modelo para el período 1961-1990 y los datos futuros en cada corte) con resoluciones que van entre de los 70 km a los 400 km.
- Se interpolaron las anomalías a resoluciones altas, entre ellas la de 30 segundos de arco o 1 km.
- Se aplicaron estas anomalías interpoladas al clima de referencia de las superficies de alta resolución de WorldClim (1961-1990).

¹⁴ Al momento de la consulta estos eran los períodos disponibles.

Algunos autores sostienen que las resoluciones originales de los MCGAO deben mantenerse para no sesgar o alterar la plausibilidad física de los modelos. No obstante, la reducción de escala y la corrección de sesgo del resultado de los MCGAO produce datos que permiten estimaciones locales y no regionales o globales del cambio climático y sus impactos. Con escenarios a más alta escala la planificación, el modelado y el monitoreo pueden realizarse a escala municipal, de cuenca u otras escalas subnacionales (Navarro-Racines y otros, 2020).

Existen otras iniciativas y fuentes de información con información global de escenarios RCP, pero se decidió seleccionar CCAFS-Climate porque esta base cuenta con una alta resolución, un mayor número de MCGAO, períodos para los objetivos de planificación (como 2030 y 2050), y porque CCAFS es parte del Grupo Interagencial de Apoyo (GIA) para la región del SICA con la que la CEPAL ha tenido un programa de trabajo en cambio climático desde 2012. Asimismo, se decidió trabajar con la climatología de WorldClim como referencia para las proyecciones.

3. Selección de modelos para la región

Como se mencionó anteriormente, los MCGAO son las herramientas utilizadas por el IPCC para estimar los impactos climáticos hasta fines del presente siglo (Flato y otros, 2013). No obstante, los MCGAO tienen limitaciones en el modelado de procesos a pequeña escala, por lo que no pueden reproducir con precisión ciertas características del clima regional. Por lo tanto, a menudo es necesario clasificar los modelos de acuerdo con su capacidad para reproducir las características climáticas observadas de una cierta región. Esta tarea no es trivial ya que un modelo podría ser muy bueno para reproducir el patrón general de ENOS, pero deficiente para reproducir las medias mensuales o las desviaciones estándar de la precipitación o temperatura de una región de interés y viceversa (Hidalgo y Alfaro, 2015).

Hidalgo y Alfaro (2015)¹⁵ evaluaron 48 modelos del CMIP5 de acuerdo con su capacidad para reproducir las características del clima de fines del siglo XX en Centroamérica. Los modelos se clasificaron de acuerdo con la media y desviación estándar de la precipitación, temperatura de la superficie y el fenómeno ENOS. Estos autores verificaron los modelos comparando simulaciones con observaciones y un conjunto de datos de reanálisis. El estudio se centró en la habilidad de los modelos del CMIP5 para reproducir las características climáticas básicas de Centroamérica. Se hicieron 107 simulaciones de 48 modelos para el período histórico 1979–1999. La selección de los modelos del análisis presentado en este documento se basó en la clasificación que hicieron Hidalgo y Alfaro (2015) y en la disponibilidad de información.

En el cuadro II.2 se muestran las tres simulaciones de los tres modelos que se eligieron para este análisis (CESM1_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR) colocados en orden ascendente de los rangos fines de su *ranking*. También se incluyen las clasificaciones para cada métrica. El

¹⁵ Durante la elección de los modelos se consultó a los autores de este artículo, Hugo Hidalgo y Eric Alfaro, de la Universidad de Costa Rica, además de consultar a expertos como Diego Pons, investigador del Programa del Clima del International Research Institute (IRI) de la Universidad de Columbia; Edwin Castellanos, investigador de la Universidad del Valle de Guatemala y uno de los autores líderes del capítulo de Centroamérica y América del Sur del grupo II del AR5 y ahora coordinador del mismo capítulo para el AR6, y a Rosario Gómez, climatóloga del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (INSIVUMEH).

modelo CESM1_CAM5 es calificado en las primeras posiciones de las clasificaciones parciales y número uno en la clasificación final. Los modelos CESM1_CAM5 y MIROC5 tuvieron un buen rendimiento para reproducir los patrones medios de precipitación y su desviación estándar. Las tres simulaciones del modelo CNRM_CM5 tuvieron un desempeño relativamente bueno, pero no estaban disponibles entre los modelos del portal de CCAFS-Climate por lo que no pudieron utilizarse.

Entre los modelos disponibles en CCAFS-Climate está el MPI_ESM_LR que también fue analizado por Hidalgo y Alfaro (2015), en general el modelo mostró un buen rendimiento para reproducir los patrones de la temperatura y en la clasificación general, pero tuvo resultados pobres con respecto a las otras métricas. Para los propósitos de este análisis se utilizó un ensamble de los modelos CESM1_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR para analizar el clima futuro de la región. El promedio simple de estos modelos se usó en este documento para obtener un ensamble. Las anomalías se calcularon con respecto a la climatología base 1960 a 1990. El CRU y el WorldClim recomiendan este período de referencia por tener la mejor cobertura de estaciones meteorológicas, lo que evitaría posibles sesgos a escala regional (New y otros, 1999; Jones y otros, 2016)¹⁶.

Cuadro II.2
Clasificación parcial y total de las simulaciones de los MCGAO para Centroamérica

	Precipitación media mensual	Temperatura de la superficie	Desviación estándar de la precipitación	Desviación estándar de la temperatura	ENSO	Clasificación final
CESM1_CAM5 (1)	9	17	18	4	6	1
CESM1_CAM5 (3)	5	13	3	10	33	2
CESM1_CAM5 (2)	4	15	28	19	43	7
MPI_ESM_LR (1)	18	5	37	87	8	15
MPI_ESM_LR (3)	28	1	34	61	68	21
MPI_ESM_LR (2)	25	2	44	68	54	22
MIROC5 (3)	15	35	12	86	61	29
MIROC5 (1)	10	34	2	95	77	30
MIROC5 (2)	11	33	43	106	60	48

Fuente: H.G. Hidalgo y E.J. Alfaro, "Skill of CMIP5 climate models in reproducing 20th century basic climate features in Central America", *International Journal of Climatology*, 35(12), 2014.

Nota: Los números entre paréntesis indican el número de simulación.

En otro estudio, Ryu y Hayhoe (2014) evaluaron la capacidad de los modelos climáticos globales para simular los ciclos de precipitación anual observados en el Caribe, agrupándolos en tres categorías: i) modelos que simulan correctamente una distribución bimodal con dos máximos pluviométricos en mayo-junio y septiembre-octubre, y la canícula o sequía de medio verano (MSD por sus siglas en inglés) en julio-agosto (bimodal); ii) modelos que reproducen la canícula y los segundos máximos de precipitación solamente (single w/MSD), y iii) modelos que simulan solo un máximo de precipitación, comenzando a principios del verano (*single*). De

¹⁶ También se consultó a Diego Pons y Edwin Castellanos, quienes dieron su visto bueno a esta climatología que es usada en la literatura, pero advirtieron que los nuevos estudios, incluido el AR6, comenzarán a usar climatologías más recientes para capturar las condiciones de los sectores que sufren los impactos del cambio climático.

acuerdo con esta clasificación, los modelos CESM1_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR son aptos para simular una distribución bimodal en el Caribe con picos al principio del verano y en otoño, interrumpidos por un período seco a mediados de verano. Dado que los modelos elegidos pertenecen al grupo de los que son capaces de simular la distribución bimodal del ciclo anual de precipitación en el Caribe, este estudio aporta otro elemento que apoya la selección de estos modelos.

4. Incertidumbre

Hay una serie de elementos a considerar al momento de usar las proyecciones de cambio climático como son la incertidumbre de los modelos de cambio climático; las técnicas de regionalización (importante para adaptar las variables a las características locales); el uso climático de los datos (comparar promedios y no años); su expresión en forma probabilista (rangos, percentiles, entre otros) y la corrección de los sesgos de los modelos.

Se espera que las nuevas generaciones de modelos, de mayor complejidad, representen mejor los procesos climáticos y proporcionen estimaciones más detalladas y certeras hacia el futuro. Sin embargo, existen varias hipótesis que explican la falta de convergencia e incertidumbre en los modelos: i) limitaciones inherentes en la forma en que se construyen los modelos dados los recursos computacionales limitados y la resolución espacial; ii) falta de comprensión del proceso; iii) falta de observaciones precisas a largo plazo para restringir los modelos; iv) falta de consenso sobre métricas de desempeño de modelos actuales que claramente separan modelos mejores de peores en términos de calidad de proyección; v) limitación inherente del cambio climático que no es predecible debido a la variabilidad interna; vi) adición de modelos diferentes de instituciones que entran al CMIP5, y vii) adición de nuevos procesos, componentes o forzamientos en CMIP5 que no se entienden bien, no están bien representados en el modelo o no están bien limitados por las observaciones (Knutti y Sedláček, 2012). Asimismo, por tratarse de escenarios a largo plazo que integran diversas capas de análisis con incertidumbres y retos metodológicos, los resultados deben interpretarse como tendencias y magnitudes relativas, no como predicciones ni como magnitudes exactas.

5. Escalas geográficas

En el análisis presentado en esta publicación se trabajaron diferentes escalas geográficas, nacional, departamental y municipal. Los datos históricos a escala nacional se tomaron directamente de la base del CRU CY4.03. Los datos de las áreas subnacionales se calcularon como la media del valor de todas rejillas o cuadrículas de los mapas ráster que se encuentran dentro de cada área departamental y municipal. Este cálculo fue realizado por los *softwares* libres QGIS y R con las capas de los mapas ráster y los mapas vectoriales (en formato *shape*) de las divisiones departamentales y municipales.

Los mapas ráster para el cálculo de los datos históricos de la primera división subnacional o nivel departamental ¹⁷ —estatal, departamental, distritos, provincias o comarcas— se obtuvieron directamente de la base del CRU. Debido a la resolución de los

¹⁷ En adelante, cuando se haga referencia a este segundo nivel subnacional, se usará el concepto de departamentos para hablar en conjunto de todos los países.

mapas ráster de esta fuente de información solo se calcularon los datos por departamento, dado que dentro de cada cuadrícula (55 km) puede haber numerosos municipios, lo que implicaría que se les asigne la misma información y posiblemente habría sobrestimación o subestimación de los valores asignados para municipios con superficies pequeñas, y con ello se perdería información local valiosa.

Los datos utilizados para la segunda escala subnacional —municipios, cantones en el caso de Costa Rica y distritos en Panamá— para los escenarios de cambio climático RCP y la climatología base 1960-1990 son de WorldClim y CCAFS Climate de 1 km, lo cual permite obtener datos municipales diferenciando entre climas locales. Las capas *shapes* de estos dos niveles subnacionales y nacionales se obtuvieron de diversas fuentes internacionales. Solo en el caso de Belice no se obtuvo la capa de la segunda subdivisión política (municipios) por lo que se trabajó a nivel de distritos.

6. Escenarios SRES y RCP

Algunos estudios tratan de dar seguimiento a los impactos del cambio climático desde hace 20 años, y hacer comparaciones entre los escenarios SRES del TAR y los RCP del AR5 para validar la continuidad de los impactos. El IPCC (Burkett y otros, 2014) en el grupo II del AR5 hizo una comparación entre los dos grupos de escenarios observando la trayectoria de los forzamientos radiativos con relación al período preindustrial de cada escenario y la trayectoria de los cambios en temperatura media con respecto al período 1986-2005 (véase el gráfico II.1). El IPCC indica que los forzamientos radiativos no describen de forma adecuada las diferencias entre los escenarios SRES y RCP, porque los RCP supusieron políticas estrictas de mitigación de la contaminación del aire y por tanto tienen una cantidad de ozono y aerosoles troposféricos mucho más bajos que los escenarios de SRES, que ignoraron las regulaciones de calidad del aire.

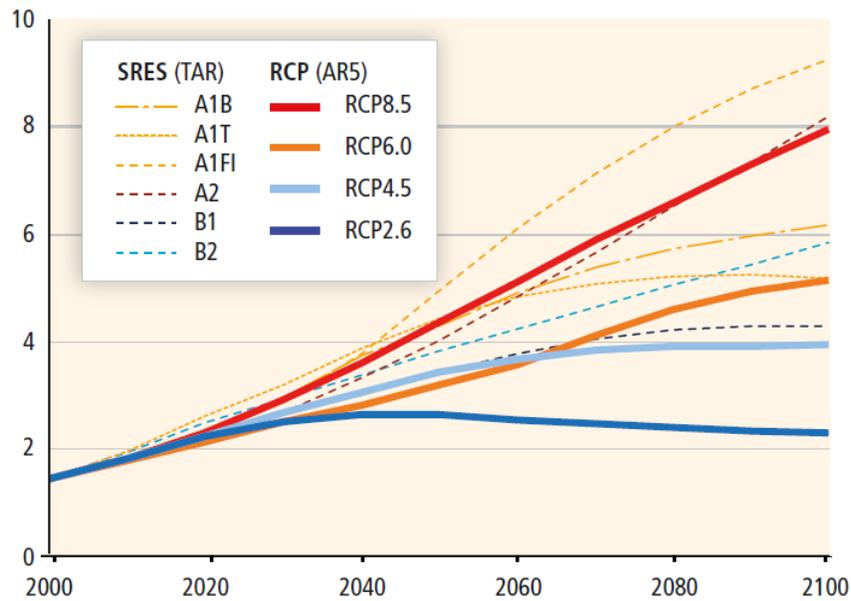
Los RCP también incluye un escenario de mitigación de GEI estricto, RCP2.6, y dos escenarios de mitigación intermedio RCP4.5 y RCP6.0. En los SRES los escenarios tuvieron historias socioeconómicas, pero no incluyeron opciones de mitigación climática. Por lo anterior es importante tomar con precaución la comparación entre ambas trayectorias de incremento en temperatura, si bien esta comparación es necesaria para el seguimiento de impactos elaborados con diferentes escenarios.

En los estudios de la ECC CARD se utilizaron el escenario A2 (considerado el escenario más extremo) y el escenario B2 (escenario optimista). En el presente documento se decidió utilizar el escenario RCP8.5 como el escenario más pesimista y el escenario RCP4.5 como escenario intermedio/optimista de mitigación. En el gráfico II.1 se puede observar que las trayectorias en los forzamientos radiativos del escenario RCP8.5 y del A2 son muy cercanas, principalmente a fines de siglo. No obstante, los incrementos de temperatura del escenario A2 se encuentran por debajo del RCP8.5 en todo el siglo XXI.

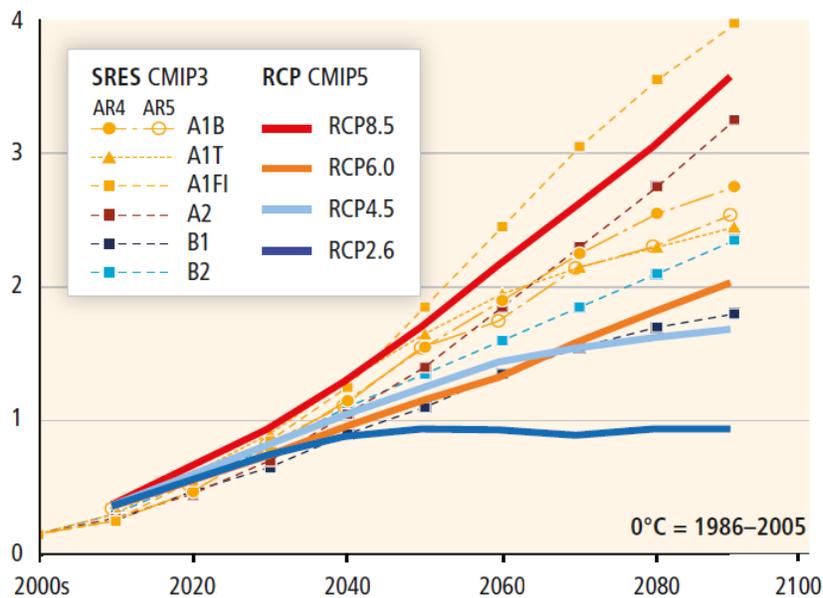
En cuanto al escenario RCP4.5 se observa una estabilidad en el forzamiento radiativo a partir de 2060, muy cercana a la trayectoria del escenario B1. Mientras que en el escenario B2 el forzamiento radiativo es mayor que en RCP4.5 e incluso es superior a la trayectoria del escenario RCP6.0. En cuanto al aumento en temperatura el escenario RCP4.5 se encuentra entre los escenarios B2 y B1 hasta 2060, año en el que aumenta más la temperatura en los escenarios

B2 y B1, lo que refleja que su forzamiento radiativo se estabiliza a partir de este corte (Burkett y otros, 2014).

Gráfico II.1
Comparación de los escenarios SRES y RCP
 A. Forzamiento radiativo relativo a la época preindustrial
 ($W m^{-2}$)



B. Cambio en la temperatura media global superficial con respecto a 1986-2005
 (Grados centígrados)



Fuente: V.R. Burkett y otros, "Point of departure", capítulo I, *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Part A: Global and Sectoral Aspects, contribución del Grupo de Trabajo I para el Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), C.B. Field y otros (eds.), Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Estados Unidos, Cambridge University Press, 2014.

Tomando en cuenta estos puntos, no es posible hacer una comparación a detalle entre los resultados de este análisis y los resultados de los estudios de la iniciativa de la ECC CARD que usaron los escenarios del SRES A2 y B2 para Centroamérica. A continuación, se resumen algunas consideraciones sobre las diferencias conceptuales y metodológicas:

- Como se mencionó en la primera sección y en el gráfico II.1, los escenarios SRES y RCP suponen diferentes trayectorias hacia objetivos específicos del forzamiento radiativo en este siglo (Burkhet y otros, 2014; May y otros, 2016).
- Los análisis de la ECC CARD y este documento también utilizan diferentes modelos para realizar los ensambles, dichos modelos han mejorado en cada generación con respecto a su capacidad de simular mejor la variabilidad y el clima regional.
- En cuanto a la metodología de asignación de los datos para las variables climáticas para cada departamento, distrito o provincia en los estudios anteriores de la ECC CARD se utilizó el dato (coordenada) de su cabecera departamental. En este análisis el dato de las áreas subnacionales está representado por la media del valor de todas rejillas o cuadrículas que se encuentran dentro de cada área.
- Finalmente, la comparación se hace más difícil al tener cortes o períodos de tiempo futuro distintos entre los escenarios SRES y RCP.

Estas consideraciones no significan que los escenarios y los impactos calculados en estudios anteriores con los SRES sean incorrectos, sino que no es posible comparar los resultados de los escenarios B2 con el RCP4.5 y el A2 con el RCP8.5 en los cortes 2030 y 2050. Lo que se recomienda es realizar nuevos estudios de impactos cada vez que se actualicen los escenarios en función de las necesidades técnicas y de formulación de políticas de cada período, por lo cual es útil contar con capacidades nacionales de manejo de dichos modelos y escenarios.

D. Trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP)

Las trayectorias socioeconómicas compartidas (*Shared Socio-Economic Pathways*, SSP, por sus siglas en inglés) se elaboraron para complementar los RCP con distintos desafíos socioeconómicos de adaptación y mitigación. Describen tendencias alternativas plausibles en la evolución de la sociedad y los sistemas naturales durante el siglo XXI¹⁸. Se componen de una historia narrativa y un conjunto de medidas cuantitativas de desarrollo. Los SSP son trayectorias de referencia en el sentido de que asumen que no hay cambio o impactos climáticos, ni nuevas políticas climáticas (Kriegler y otros, 2012). La intención al no incorporar tales efectos es que los investigadores puedan utilizar los SSP para evaluar cómo el cambio climático y diferentes tipos de políticas pueden afectar estas condiciones socioeconómicas y ambientales de referencia (O'Neill y otros, 2014).

¹⁸ El término "socioeconómico" pretende ser una forma abreviada de una amplia gama de aspectos de la sociedad o, más ampliamente, de los sistemas socio ecológicos. Estos incluyen aspectos demográficos, políticos, sociales, culturales, institucionales, de estilo de vida, económicos y tecnológicos, y las condiciones de los ecosistemas y servicios de los ecosistemas que se han visto afectados por la actividad humana, como la calidad del aire y del agua, la biodiversidad y la forma del ecosistema y función.

El conjunto de elementos cuantitativos incluidos en los SSP no incluye emisiones, cambio en el uso del suelo, que generalmente se calculan mediante modelos de evaluación integrados, ni los resultados de modelos de impacto en sectores como los efectos en la agricultura. Pero incluyen cuantificaciones de factores que se consideran impulsores de tales resultados, como el crecimiento de la población y el crecimiento económico. La cuantificación de los impactos de estos impulsores se deja a escenarios que se producirán en función de los SSP (Van Vuuren y otros, 2013).

El objetivo de los SSP es caracterizar la incertidumbre de la mitigación o de la adaptación a un nivel dado y para ello se describen los desafíos que las condiciones socioeconómicas representarían para la adaptación, y los retos que representarían para la mitigación. Para garantizar que el conjunto de SSP abarque una gama de resultados que permitirán caracterizar la incertidumbre en la mitigación, la adaptación y los impactos, se define un espacio de resultados en el que los desafíos socioeconómicos y ambientales están representados en dos ejes: el eje horizontal representa los desafíos relacionados con la adaptación y el vertical los de la mitigación (véase el gráfico II.2).

Los SSP describen futuros socioeconómicos alternativos en ausencia de una intervención por medio de políticas climáticas sobre la base de cinco descripciones narrativas. La Trayectoria Socioeconómica Compartida 1 (SSP1) combina niveles bajos de desafíos de mitigación y adaptación y podría considerarse como una narrativa de desarrollo sostenible, ya que asume un bajo crecimiento de la población; alto crecimiento económico; altos niveles de educación; gobernabilidad; una sociedad globalizada; cooperación internacional; desarrollo tecnológico y conciencia ambiental (Escoto Castillo y otros, 2017; y O'Neill y otros, 2014).



Fuente: B. O'Neill y otros, "A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways", *Climatic change*, 122(3), 2014.

La SSP3 se describe como de rivalidad regional y asume crecimiento poblacional alto y desarrollo económico bajo, niveles de educación inferiores, y una sociedad regionalizada y con poca conciencia ambiental, por lo que representan un nivel alto de desafíos para la adaptación y

la mitigación (Escoto Castillo y otros, 2017; y O'Neill y otros, 2014). Por su parte, la SSP4 podría considerarse como una narrativa de desigualdad —la tecnología avanza en los países desarrollados, pero no toda la población global logra beneficiarse de ello—, lo cual representa un nivel de desafío alto para la adaptación (Escoto Castillo y otros, 2017; y O'Neill y otros, 2014).

En contraste la SSP5 se considera desarrollo con combustibles fósiles y asume un bajo crecimiento en la población, un elevado crecimiento económico y un alto desarrollo humano, sin embargo, la conciencia ambiental y la dependencia de los combustibles fósiles es todavía muy alta, por lo que representa un elevado nivel de desafío para la mitigación (Escoto Castillo y otros, 2017; y O'Neill y otros, 2014). Finalmente, la SSP2 se establece de manera intermedia entre la SSP1 y la SSP3 y se le considera desarrollo de término medio.

Las trayectorias relativamente más optimistas son la SSP1 y la SSP5, y las relativamente más pesimistas son la SSP3 y la SSP4 (véanse el gráfico II.2 y el cuadro II.3) (Escoto Castillo y otros, 2017; y O'Neill y otros, 2014). La combinación de escenarios socioeconómicos basados en las trayectorias socioeconómicas compartidas y proyecciones climáticas basadas en trayectorias de concentración representativas ofrece un marco integrador útil para el análisis de los impactos climáticos y de las políticas (IPCC, 2014a).

Cuadro II.3
Desafíos socioeconómicos para la adaptación y mitigación

		Desafíos socioeconómicos para la adaptación		
		Bajo	Medio	Alto
Desafíos socioeconómicos para la mitigación	Alto	<p>SSP5: desarrollo con combustibles fósiles</p> <ul style="list-style-type: none"> • Baja población • Muy alto crecimiento económico por habitante • Alto desarrollo humano • Alto progreso tecnológico • Amplios recursos de combustibles fósiles • Estilos de vida muy intensivos en recursos • Alta demanda de energía y alimentos por habitante • Convergencia económica y cooperación global 		<p>SSP3: rivalidad regional</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alta población • Bajo crecimiento económico por habitante • Bajo desarrollo humano • Bajo progreso tecnológico • Estilos de vida intensivos en recursos • Demanda de energía y alimentos con recursos limitados por habitante • Concentración en seguridad alimentaria y energética regional • Regionalización y falta de cooperación global
	Medio		<p>SSP2: Desarrollo de término medio</p> <ul style="list-style-type: none"> • Población media • Crecimiento económico medio y desigual • Desarrollo humano medio y desigual • Progreso tecnológico medio y desigual • Estilos de vida intensivos en recursos • Demanda media y desigual de energía y alimentos por habitante • Cooperación global limitada y convergencia económica 	

Bajo	<p>SSP1: Desarrollo sostenible</p> <ul style="list-style-type: none"> • Baja población • Alto crecimiento económico por habitante • Alto desarrollo humano • Alto progreso tecnológico • Cambio tecnológico y comportamiento orientado al ambiente • Estilos de vida eficientes en recursos • Baja demanda de energía y alimentos por habitante • Convergencia económica y cooperación global 	<p>SSP4: Desigualdad</p> <ul style="list-style-type: none"> • Población media a alta • Crecimiento económico por habitante desigualdad de bajo a medio • Desarrollo humano desigual de bajo a medio • Progreso tecnológico desigual: alto en sectores de alta tecnología globalizado, lentos en los sectores domésticos • Estilos de vida y consumo de energía y alimentos desiguales: intensidad de recursos dependiendo del ingreso • Elite conectada globalmente, fuerza de trabajo domestica desconectada
-------------	--	--

Fuente: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), *Global Warming of 1.5°C*, V. Masson-Delmotte y otros (eds.).

E. Proyecto de intercomparación de modelos acoplados fase 6 (CMIP6)

El Proyecto de Intercomparación del Modelo de Escenarios (Escenario MIP) del CMIP6 proporciona proyecciones climáticas de modelos basadas en escenarios alternativos de emisiones futuras y cambios en el uso del suelo producidos con modelos de evaluación integrados (MEI). Este conjunto de nuevas proyecciones climáticas está basado en los SSP y RCP (Riahi y otros, 2017; O'Neill y otros, 2016). Este enfoque fue introducido por Moss y otros (2010) que planteó una fase de integración que reúne las simulaciones climáticas RCP y los SSP. Esta generación de escenarios serán la base del análisis de cambio climático del AR6.

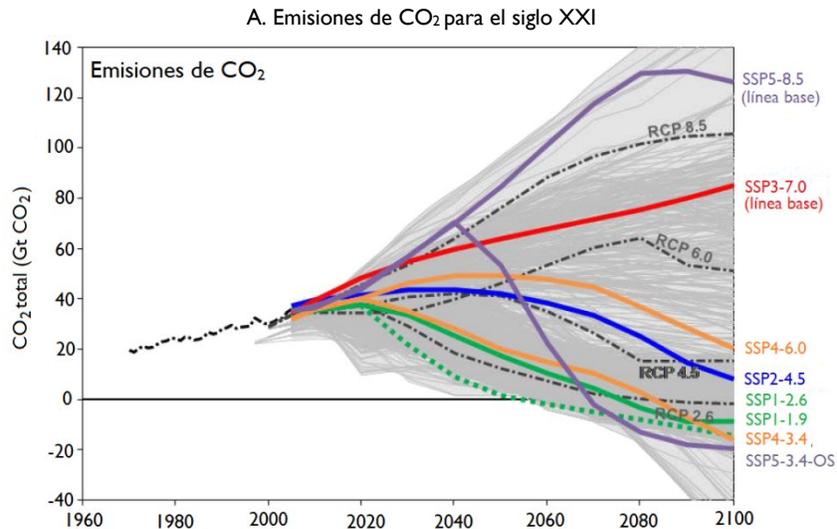
A diferencia de CMIP3 y CMIP5, donde las proyecciones de los modelos climáticos eran la parte central de los proyectos, en el CMIP6 son un elemento de los Escenarios MIP (Eyring y otros, 2016; O'Neill y otros, 2016). Los Escenarios MIP tienen tres objetivos: i) facilitar la investigación integrada; ii) tener una base para abordar preguntas científicas específicas con respecto a los efectos climáticos, y iii) proporcionar una base de investigación con métodos mejorados para cuantificar las incertidumbres de proyecciones basadas en conjuntos de modelos múltiples (O'Neill y otros, 2016).

El diseño experimental de Escenario MIP consiste en un conjunto de ocho trayectorias de emisiones futuras, concentraciones y uso de la tierra, con elementos adicionales de ensamble y extensiones a largo plazo, agrupados en dos niveles de prioridad. Con base a estas consideraciones, se incluyeron dos tipos de trayectorias de emisiones en el diseño de Escenario MIP.

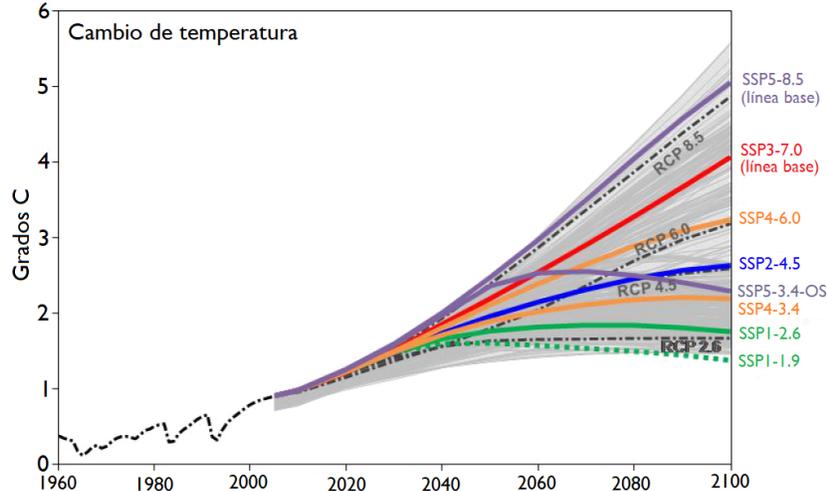
Las primeras trayectorias incluyen las trayectorias de forzamiento de los RCP: $2,6 \text{ W m}^{-2}$, $4,5 \text{ W m}^{-2}$, $6,0 \text{ W m}^{-2}$ y $8,5 \text{ W m}^{-2}$, a los cuales se agregan $7,0 \text{ W m}^{-2}$, $3,4 \text{ W m}^{-2}$ y una trayectoria por debajo de $2,6 \text{ W m}^{-2}$ en 2100, para explícitamente informar sobre el objetivo de $1,5 \text{ °C}$ en el Acuerdo de París. La trayectoria $7,0$ representa un escenario de referencia no mitigado (al igual que el $8,5$), mientras que las trayectorias $3,4$ y las menores a $2,6$ son nuevos escenarios de mitigación (O'Neill y otros, 2016).

Para cada una de estas ocho trayectorias de forzamiento se seleccionó un SSP para basar las emisiones y un escenario de uso de tierra que lleven al nivel de forzamiento deseado en 2100. Los criterios para tomar estas decisiones giraron en torno al potencial de diferentes SSP para conducir a diferentes resultados climáticos, incluso si alcanzaron el mismo nivel de forzamiento promedio global en 2100. En el gráfico II.3 se resumen las emisiones y las respuestas de temperatura promedio global, de acuerdo con lo estimado con un modelo climático simple.

Gráfico II.3
Comparación de Escenarios RCP y Escenarios-MIP (SSP y RCP)



B. Aumento de temperatura media global para el siglo XXI con respecto al período preindustrial



Fuente: B. C. O'Neill y otros, "The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6", *Geoscientific Model Development*, vol. 9, 2016.

Nota: Los Escenarios MIP se diseñaron sobre la base de Riahi K., D.P. y otros, "The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An Overview", *Global Environmental Change*, vol 42, 2017. Los resultados de temperatura se calcularon con modelo climático simple (MAGICC versión 6.8.01 BETA; Meinshausen y otros, 2011a y 2011b) e incluyen el forzamiento natural en el período histórico. Las trayectorias de emisiones solo consideran el CO₂ y no el total de los GEI. Las proyecciones suponen un forzamiento volcánico cero y mantienen ciclos de forzamiento solar de 11 años, de acuerdo con el enfoque CMIP5 (Meinshausen y otros, 2011c). Las áreas grises representan el rango de escenarios para el AR5 del IPCC (Clarke y otros, 2014).

Los escenarios del CMIP6 son los siguientes (O'Neill y otros, 2016):

a) Escenarios MIP Nivel 1

- SSP5-8.5 Este escenario representa el extremo superior del rango de trayectorias de forzamiento futuras, es la actualización de la trayectoria RCP8.5 y se eligió SSP5 porque es el único escenario de SSP que implicaría emisiones lo suficientemente altas como para producir un forzamiento radiativo de $8,5 \text{ W m}^{-2}$ en 2100.
- SSP3-7.0 Este escenario representa el extremo medio a alto del rango de trayectorias de forzamiento futuras. Llena un vacío en las trayectorias de forzamiento de CMIP5 que es particularmente importante porque representa un nivel de forzamiento que es similar al escenario base SSP2. Se eligió SSP3 porque SSP3-7.0 es un escenario con cambios sustanciales en el uso de la tierra (en particular, disminución de la cubierta forestal mundial) y altas emisiones de forzadores del clima a corto plazo (particularmente SO_2).
- SSP2-4.5 Este escenario representa la parte media del rango de trayectorias de forzamiento futuras y actualiza la trayectoria RCP4.5. Se eligió SSP2 porque su cambio de uso del suelo y las trayectorias de aerosol no son extremas en relación con otros SSP, y también porque es un escenario que combina la vulnerabilidad intermedia de la sociedad con un nivel de forzamiento intermedio.
- SSP1-2.6 Este escenario representa el extremo inferior del rango de futuras trayectorias de forzamiento y actualiza la trayectoria RCP2.6. Se anticipa que producirá un calentamiento significativamente menor a 2°C para 2100 (véase el gráfico II.3) y, por lo tanto, puede respaldar los análisis de este objetivo de política. Se eligió SSP1 porque plantea una mayor cobertura forestal mundial y combina una baja vulnerabilidad con bajos desafíos para la mitigación.

b) Escenarios MIP Nivel 2

- SSP4-6.0 Este escenario completa el rango de trayectorias de forzamiento medio y actualiza la trayectoria RCP6.0. Se eligió SSP4 porque, junto con SSP4-3.4, podría usarse para investigar las diferencias en los impactos a lo largo de las trayectorias de forzamiento, en un mundo de mayor desigualdad con grandes desafíos para la adaptación.
- SSP4-3.4 Este escenario llena un vacío en el extremo inferior del rango de trayectorias de forzamiento futuras. Existe un interés sustancial en los requerimientos de políticas de mitigación para escenarios que alcanzan solamente $3,4 \text{ W m}^{-2}$ para 2100, ya que los costos de mitigación difieren sustancialmente entre los niveles de forzamiento de $4,5 \text{ W m}^{-2}$ y $2,6 \text{ W m}^{-2}$.

- SSP5-3.4-OS Este escenario llena un vacío en las simulaciones climáticas existentes al investigar las implicaciones de un sobreimpulso sustancial del siglo XXI en el forzamiento radiativo en relación con un objetivo a más largo plazo. Este escenario sigue al SSP5-8.5, un escenario de referencia sin mitigación, hasta 2040, momento en el que se lleva a cabo una mitigación agresiva para reducir rápidamente las emisiones a cero en aproximadamente 2070 y a niveles negativos a partir de entonces (véase el gráfico II.3).
- SSPa-b (con b alrededor o por debajo de 2,0) Este escenario representa el extremo más bajo del rango de escenarios en la literatura medido por su trayectoria de forzamiento radiativo. Existe un interés político en escenarios que informarían un posible objetivo de limitar el calentamiento medio global a 1,5 °C por encima de los niveles preindustriales de acuerdo con el Acuerdo COP21 de París (CMNUCC, 2015). Múltiples grupos de MEI que producen escenarios basados en SSP han podido producir escenarios preliminares basados en SSP1 que alcanzan aproximadamente 1,9 W m⁻² en 2100 con una probabilidad de más de 66% de permanecer por debajo de 1,5 °C en 2100. Por lo tanto, se considera que SSP1-1.9 es un candidato preliminar para este escenario. El perfil de emisiones se caracterizará por un rápido descenso a cero y un largo período de emisiones negativas de CO₂.

Esta revisión del CMIP6 pretender brindar un panorama general sobre los nuevos escenarios del AR6 e identificar las diferencias o los cambios con respecto a los RCP, de esta manera poder diferenciar los resultados aquí presentados con los de la siguiente generación de escenarios. Lo anterior es importante dado que se pretende actualizar constantemente los escenarios de cambio climático para la región y alentar la evaluación de impactos en los distintos sectores basada en escenarios actualizados.

III. Temperatura

El efecto invernadero natural de la atmósfera hace posible la vida en el planeta como la conocemos. Sin él, la temperatura promedio de la superficie de la Tierra estaría por debajo del punto de congelación del agua (Le Treut y otros; 2007). La existencia de GEI en la atmósfera ha permitido que la Tierra tenga una temperatura promedio anual de 13 °C en los últimos 170 años. El calor es necesario para la vida; cada proceso vital y cada nivel de desarrollo están limitados por un rango de temperatura específico. Las plantas terrestres están adaptadas a temperaturas entre 5 °C y 40 °C y en el caso de las especies tropicales y subtropicales; las temperaturas óptimas están entre 15 °C y 35 °C (Yepes y Buckeridge, 2011). La temperatura es uno de los principales controladores de la distribución y productividad de las plantas, y tiene efectos importantes en su actividad fisiológica (Budowsky, 1965; Sage y Kubien, 2007; Yepes y Buckeridge, 2011).

La variable de temperatura es el principal insumo para dar seguimiento a la crisis de cambio climático que vive el planeta. Es esencial para evaluar los impactos en sectores como la agricultura, recursos hídricos, los ecosistemas, la biodiversidad, la salud humana, el consumo de energía, entre otros. Hasta ahora no se observa ni se espera que el aumento de temperatura sea espacial o estacionalmente uniforme, por ejemplo, en el invierno de latitudes medias del hemisferio norte ya se experimenta un calentamiento de más del doble que el promedio mundial (Allen y otros, 2018).

Con la pandemia de COVID-19 en 2020 y las restricciones inmediatas impuestas en un gran número de países, se disminuyeron temporalmente las emisiones de GEI. Con todo y esto, los efectos proyectados en la temperatura serían insignificantes y poco duraderos para evitar el calentamiento futuro. Para ello se requiere de una estrategia de recuperación de mayor alcance, adoptada en mediano y largo plazo y acompañada de medidas como los estímulos verdes y reducción en las inversiones en combustibles fósiles (Forster y otros, 2020). Por ello es esencial dar seguimiento a los cambios en la temperatura y determinar si los esfuerzos de mitigación son suficientes o no para limitar el aumento de temperatura en menos de 1,5 °C o 2 °C con respecto a los niveles preindustriales y definir medidas de adaptación apropiadas en las actividades humanas.

En este capítulo se presenta evidencia del aumento en la temperatura global, regional y subnacional. Primero se muestra la evidencia global del aumento en temperatura; le sigue un análisis histórico por país de 1901 a 2018 con datos del CRU CY4.03, y en la siguiente sección se presenta un análisis histórico espacial por departamentos. Después se presenta la información obtenida de CCAFS-Climate con el análisis de los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 a escala municipal.

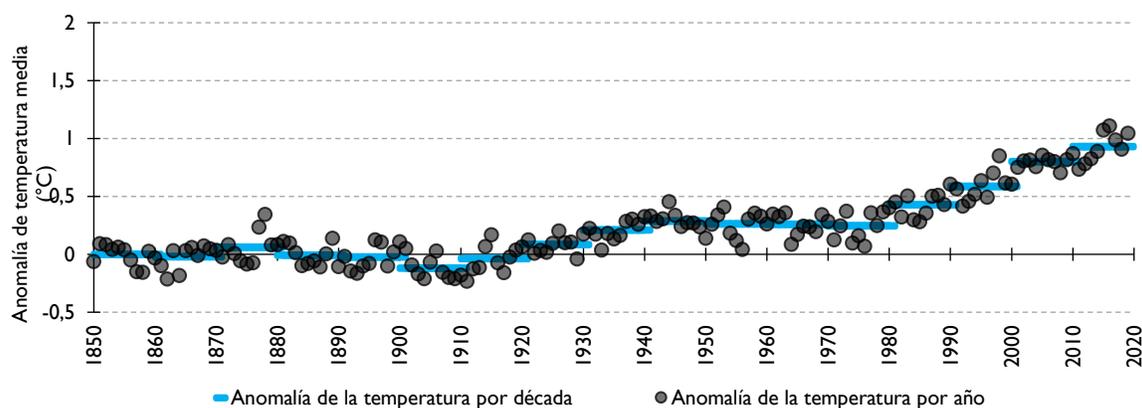
A. Análisis histórico de la temperatura

I. Evidencia global

De acuerdo con el Informe especial del IPCC sobre el calentamiento global de 1,5 °C (2018), se estima que las actividades humanas han causado aproximadamente el incremento de 1 °C de calentamiento global por encima de los niveles preindustriales (1850-1900) con un rango probable de 0,8 °C a 1,2 °C. De continuar con este ritmo en el aumento de temperatura es probable que el calentamiento global alcance 1,5 °C entre 2030 y 2052. Igualmente, se estima que la temperatura media está aumentando 0,2 °C por década, debido a las emisiones pasadas y en curso (IPCC, 2018). Nuevas estimaciones reportadas por la OMM (2020a) señalan que por lo menos en un año de los próximos cinco (2020-2024) se superaría el incremento de temperatura en más de 1,5 °C con respecto al período preindustrial con una probabilidad de 20%.

En la última década se han registrado las temperaturas globales más altas registradas desde 1850. En 2016 se registró la temperatura global más alta —superficie y océano— con una anomalía de 1,11 °C, con respecto al período 1850-1900. Este récord se debió a la combinación de un evento de El Niño y el cambio climático a largo plazo (OMM, 2020b). De acuerdo con la consolidación de distintas fuentes de datos climáticos¹⁹ la OMM señaló a 2019 como el segundo año más caliente desde la época preindustrial (OMM, 2020b). HadCRUT²⁰ colocó a 2019 como el tercer año más caliente, con una anomalía de 1,05 °C con respecto a la era preindustrial. Asimismo, señaló que desde la década de 1980 cada década es más caliente que la anterior. En el período 2011-2019 la anomalía global fue de 0,93 °C con respecto al período preindustrial (véase el gráfico III.1).

Gráfico III.1
Mundo: anomalía de la temperatura global por año y década, 1850-2019 con respecto a la climatología 1850-1900
 (En grados centígrados)



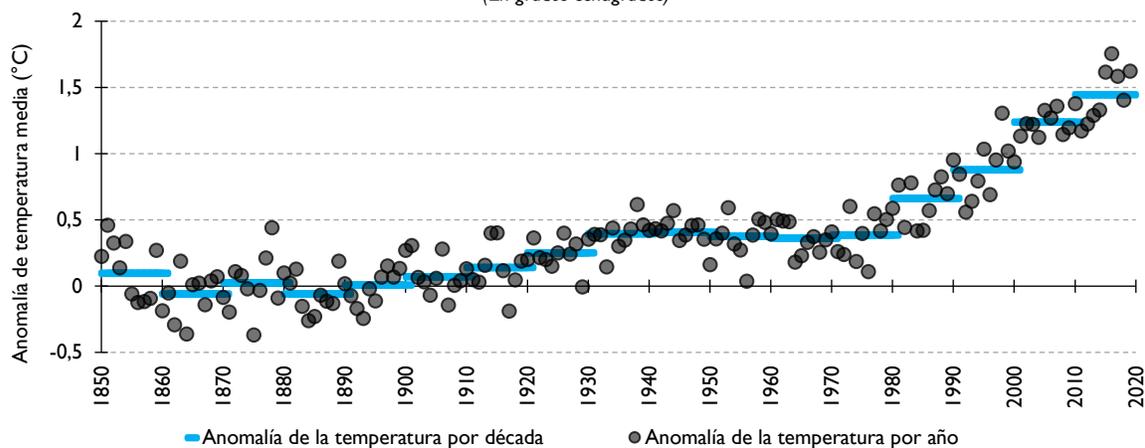
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de datos de Climatic Research Unit (CRU), Temperature HadCRUT4 [base de datos en línea] <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>.

¹⁹ Las fuentes utilizadas por la OMM son NOAA GlobalTemp, ERA-5, JRA-55, GISTEMP y HADCRUT.

²⁰ La fuente de HADCRUT es una base de datos climáticos globales desarrollada por el Centro Hadley de la oficina meteorológica del Reino Unido con el modelo HadSST3 para las temperaturas de la superficie del mar y por la Universidad de East Anglia del Reino Unido con el modelo CRUTEM4 para las temperaturas de la superficie terrestre.

En la superficie terrestre, la década de 2011 a 2019 fue la más caliente a nivel global desde 1850, con una anomalía de 1,44 °C con respecto a la climatología de la era preindustrial (1850-1900). Cada uno de los cuatro últimos decenios ha sido sucesivamente más cálido en la superficie de la tierra y a escala global (superficie terrestre y océanos) que cualquier decenio anterior. El año 2016 fue el más caliente con una anomalía de 1,76 °C. Los años 2015, 2017 y 2019 también tuvieron una anomalía superior a 1,5 °C con respecto a 1850-1900 (CRU, 2019) (véase el gráfico III.2).

Gráfico III.2
Mundo: anomalía de la temperatura superficial terrestre por año y década con respecto a la climatología 1850-1900, 1850-2019
 (En grados centígrados)



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de datos de Climatic Research Unit (CRU), CRUTEM4, Google Earth interface for CRUTEM4 land temperature data [base de datos en línea] <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/crutem/ge/>.

En los gráficos III.1 y III.2 se muestra un cambio en la tendencia, al alza, desde la década de 1970. El cambio ha sido significativo, en promedio entre 1850-1900 la temperatura media de la superficie terrestre global fue de aproximadamente 12,7 °C, mientras que en la última década se han registrado temperaturas superiores a los 14°C a nivel global.

El calentamiento es diferenciado entre las regiones del planeta y ha sido mayor en el Ártico. La evidencia muestra que el calentamiento es generalmente más alto en la tierra que en el océano, debido a que el 93% del calor del sistema climático del planeta se acumula en el mar por su capacidad calorífica²¹ (IPCC, 2019; Cheng y otros, 2019 y 2020). Sin embargo, la vida marina ha sido la más sensible al aumento en temperatura oceánica. El aumento de la temperatura marina reduce el oxígeno disuelto en el océano (desde la superficie hasta los 1.000 metros de profundidad) afectando la vida marina, particularmente a los corales (Abram y otros, 2019; Bindoff y otros, 2019; IPCC, 2019; Cheng y otros, 2019).

El rendimiento fisiológico y el comportamiento de los organismos marinos dependen en gran medida de su capacidad para extraer oxígeno del agua de mar. La desoxigenación de

²¹ La capacidad calorífica es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura una unidad de temperatura. La capacidad calorífica del agua de mar se reduce un poco conforme aumenta la salinidad. El océano tiene una gran capacidad calorífica y es capaz de absorber grandes cantidades de calor con ligeras variaciones de la temperatura atmosférica (GeoEnciclopedia, 2020).

los océanos afecta a los organismos marinos, con consecuencias en sus actividades y capacidad para enfrentar contingencias naturales. La hipoxia —una condición que priva a un organismo del suministro adecuado de oxígeno— es uno de los síntomas de la reducción del oxígeno disuelto en el mar. La pérdida actual de oxígeno en los océanos está comenzando a alterar progresivamente el equilibrio de la vida marina, favoreciendo a las especies tolerantes a la hipoxia —como la floración de algas— a expensas de las sensibles (peces e invertebrados) (Laffoley y Baxter, 2019). A medida que las zonas mínimas de oxígeno se expanden, los hábitats para peces y mariscos se comprimen, por ejemplo, en el Atlántico tropical las poblaciones de atunes, peces picudos y marlines han experimentado una reducción del 15% entre 1960-2010 como resultado de la expansión de las zonas mínimas de oxígeno²² (Stramma y otros, 2010; Linden, 2019).

Otra consecuencia del aumento de temperatura oceánica es el aumento del nivel del mar, por la expansión térmica del océano y por el derretimiento del hielo de los polos (Oppenheimer y otros, 2019; Cheng y otros, 2020). El aumento del calor en el mar también aumenta la evaporación y esta humedad adicional en la atmósfera alimenta las lluvias haciendo que los eventos extremos sean más frecuentes (Trenberth y otros, 2003; Held y Soden, 2006; Trenberth, 2011; Collins y otros, 2019; Cheng y otros, 2020). Además, el calentamiento en los océanos es una de las razones clave por las cuales el planeta ha experimentado un aumento de incendios catastróficos en 2019 en el Amazonas, California y Australia (Cheng y otros, 2020). Los océanos funcionan como los radiadores del mundo, al redistribuir energía y lluvia, sus oscilaciones térmicas²³ generan señales climáticas sobre los continentes que se reflejan en sequías e incendios (Kitzberger, 2007).

Los sistemas meteorológicos que se caracterizan por oscilaciones de temperatura como el ENOS, la oscilación multidecadal del Atlántico, la oscilación decadal del Pacífico y el dipolo del océano Índico en su fase positiva han incrementado sus extremos debido al aumento de los GEI. Estos eventos han coincidido o precedido a grandes incendios forestales en América del Norte y Australia (Kitzberger y otros, 2007; Cai y otros, 2009; Cai y otros, 2014; Fasullo y otros, 2018; Universidad de East Anglia, 2020). Por ejemplo, con el aumento de temperatura en el Pacífico tropical, el aire caliente asciende y transporta calor hacia latitudes medias, cuando se encuentra con zonas con clima seco y frío el aire caliente desciende, este se combina con el aire seco de la superficie terrestre y con una disminución de lluvias²⁴, que son condiciones propicias para incendios forestales (Cai, 2020). El potencial de incendios en un lugar depende de cuatro factores: i) ignición o punto de incendio, causada por humanos o fuentes naturales como los

²² El inventario de oxígeno en el océano es alrededor del 0,6% de la atmósfera y ha disminuido del 1% al 2% desde mediados del siglo XX por causa de la eutrofización (escorrentía de nutrientes de la tierra y la deposición de nitrógeno por la quema de combustibles fósiles) y el calentamiento de las aguas oceánicas, como resultado del cambio climático (Laffoley y Baxter, 2019).

²³ La oscilación térmica es la diferencia entre las temperaturas extremas máximas y mínimas en un período (Pérez y otros, 2017).

²⁴ En el caso del dipolo del océano Índico en su fase positiva hay una anomalía caliente en el occidente del océano (al este de África) y una anomalía fría en el oriente del océano (al oeste de Australia). Las fuertes temperaturas incrementan la humedad y el calor asciende provocando fuertes lluvias en el este de África mientras que el calor de la atmósfera es transportado hacia el oriente hasta las zonas frías del océano Índico, donde el aire cálido desciende provocando en Australia temporadas secas y sin lluvia (Martínez, 2019).

rayos; ii) abundancia o carga de combustibles, como los bosques; iii) sequedad del combustible, es decir, menor humedad, y iv) condiciones climáticas adecuadas para la propagación del fuego, generalmente caliente, seco y ventoso (Bradstock, 2010; CSIRO y BOM, 2015).

Estudios recientes muestran que aun cuando el calentamiento es menor en el océano, la tasa oceánica de calentamiento se ha acelerado en las décadas posteriores a 1991 en aguas superficiales y profundas (hasta 2.000 metros) y en mayor medida en aguas cercanas a la superficie terrestre (Cheng y otros 2017 y 2019; Ishii y otros, 2017; Domingues y otros, 2008; Resplandy y otros 2018). Al mismo tiempo se observa una desaceleración²⁵ del aumento de la temperatura media global de la superficie terrestre. Esta desaceleración es explicada en parte por la redistribución del calor dentro del sistema climático de la superficie de la Tierra hacia el interior del océano (Cheng y otros, 2019; Balmaseda y otros, 2013). Si el aumento de la temperatura media global en la superficie se lograra estabilizar en 2 °C o menos, el calentamiento del océano continuará debido a que este y otros componentes en el sistema de la tierra (como las grandes capas de hielo) tardan en responder y equilibrarse, y cambiarán aún después de que el forzamiento radiativo se estabilice (Cheng y otros, 2019; IPCC, 2019; Abram y otros, 2019; Cheng y otros, 2020).

El reporte del IPCC señala que el calentamiento global generado por las emisiones de GEI antropogénicas desde el período preindustrial hasta el presente persistirá por siglos y continuará causando cambios a largo plazo en el sistema climático, como en el aumento del nivel del mar, con impactos asociados como la exposición de pequeñas islas y áreas costeras bajas, daño a los ecosistemas costeros naturales, aumento de la intrusión de agua salada, inundaciones y daños a la infraestructura. Los riesgos con un calentamiento entre 1,5 °C y 2 °C, relacionados con el clima para los sistemas naturales y humanos, serán más altos que los actuales. Estos riesgos dependen de la magnitud y la tasa de calentamiento, la ubicación geográfica, los niveles de desarrollo y la vulnerabilidad además de las opciones e implementación de políticas de adaptación y mitigación (IPCC, 2018).

2. Evidencia regional

a) *Temperatura media anual nacional*

Analizar el cambio climático requiere series de datos de temperatura y precipitación que abarquen varias décadas. Para esta sección del documento se recurrió a las series históricas del CRU CY4.03 (2020). En los gráficos III.3 al III.13 se muestran los datos nacionales de las anomalías anuales de temperatura media por año (puntos) y por década (líneas azules) entre 1900 y 2018. Las anomalías se calcularon con respecto al promedio de la temperatura media de 1960 a 1990.

En los gráficos de Costa Rica, Nicaragua y Panamá se puede observar la falta de información que se muestra con una constante hasta 1930 en los primeros dos países y hasta 1915 en Panamá. La temperatura en los países centroamericanos presentó una tendencia positiva a partir de la década de 1980. En Cuba, Haití y la República Dominicana se observan aumentos constantes desde las primeras décadas del siglo XX. En México se observa una

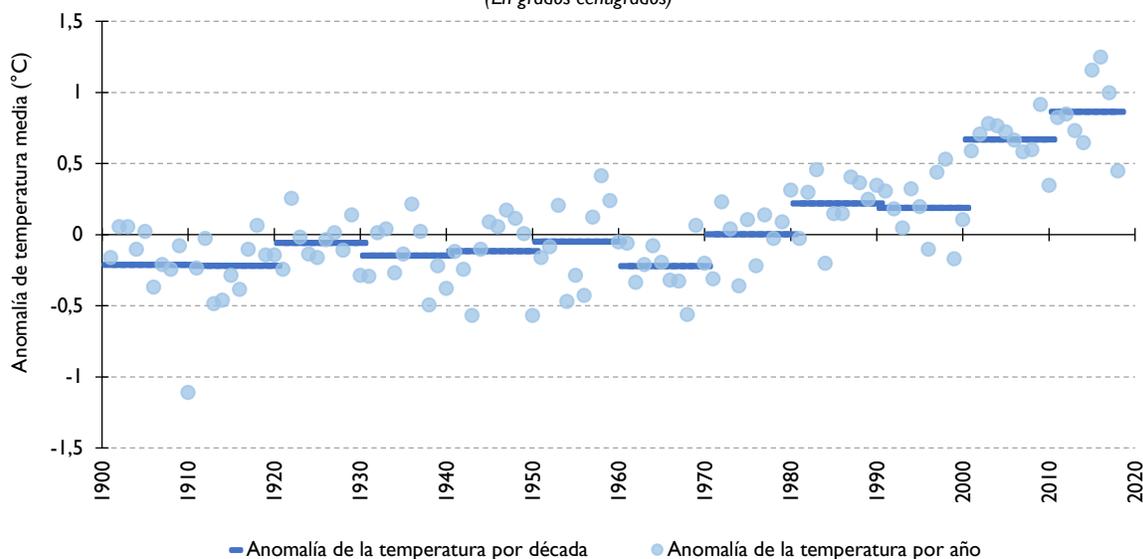
²⁵ La desaceleración del aumento de la temperatura media global implica incremento de la temperatura, pero a menores tasas de crecimiento en los últimos años.

reducción de la temperatura en la década de 1920, seguido de un aumento hasta la década de 1940; enseguida vuelve a reducirse la temperatura hasta la década de 1970 y desde entonces hay incrementos significativos en la temperatura (véanse los gráficos III.3 a III.13).

De los 11 países analizados solo Nicaragua, Costa Rica y Panamá, en el sur de Centroamérica, no han tenido anomalías positivas de la temperatura media superiores a 1 °C en algún año. México es el país con la mayor anomalía, ya que en 2017 mostró un incremento de 1,45 °C. Costa Rica es el país con la menor anomalía extrema, pues en 2016 tuvo su mayor incremento con 0,86 °C. Otro elemento destacable es que los países analizados del Caribe tuvieron sus mayores anomalías en 2015; los países de Centroamérica en 2016, y México en 2017. Una probable explicación a los récords de temperatura entre 2015-2016 es al impulso que tuvo el efecto de El Niño sobre la tendencia, que de acuerdo con algunos índices se clasificó como un Niño muy fuerte (Null, 2020). México es el país de esta región con la mayor tendencia positiva, ya que desde 2009 ha rebasado en siete años 1 °C de aumento en la temperatura media. 2018 fue uno de los años menos cálidos para toda la región, con una probable influencia del efecto de La Niña en la región, clasificado como muy débil (Null, 2020) (véanse los gráficos III.3 a III.13).

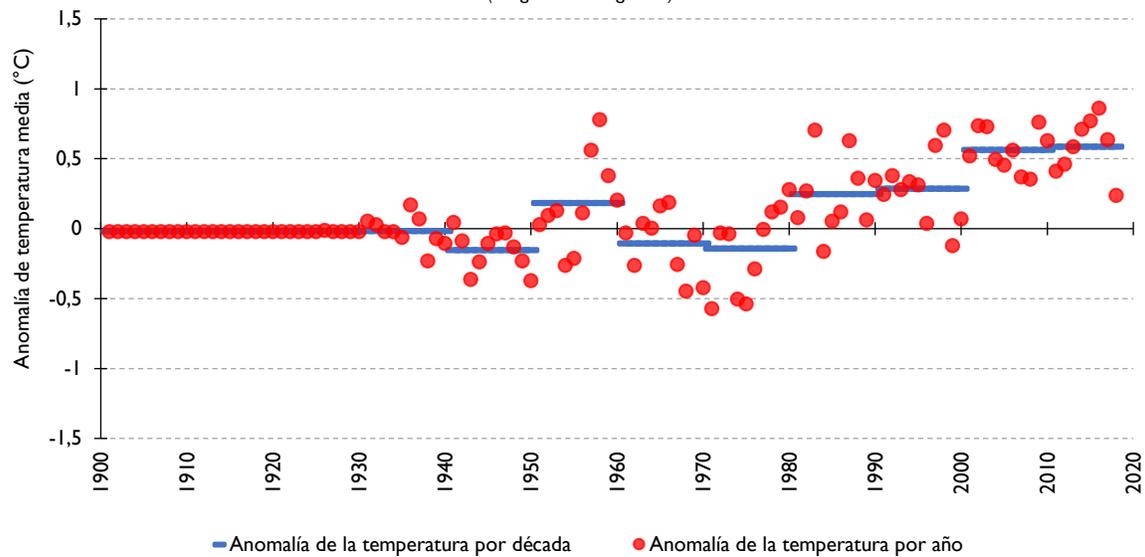
La última década ha sido la más caliente desde 1900 para la región. Todos los países tuvieron anomalías por arriba de los 0,5 °C entre 2011 y 2018. La mayor anomalía promedio de la presente década se presentó en México, con 1,05 °C, y la menor en Costa Rica, con 0,59 °C. Se puede observar un calentamiento acelerado entre la década de 1970 y la década de 1980 en Costa Rica, Nicaragua, Panamá y Haití; entre las décadas de 1980 y 1990 en México, Cuba y la República Dominicana, y entre la década de 1990 y en la década de 2000 en Belice, El Salvador, Guatemala y Honduras.

Gráfico III.3
Belice: anomalía de la temperatura por año y década, 1900-2018 con respecto a la climatología 1960-1990
(En grados centígrados)



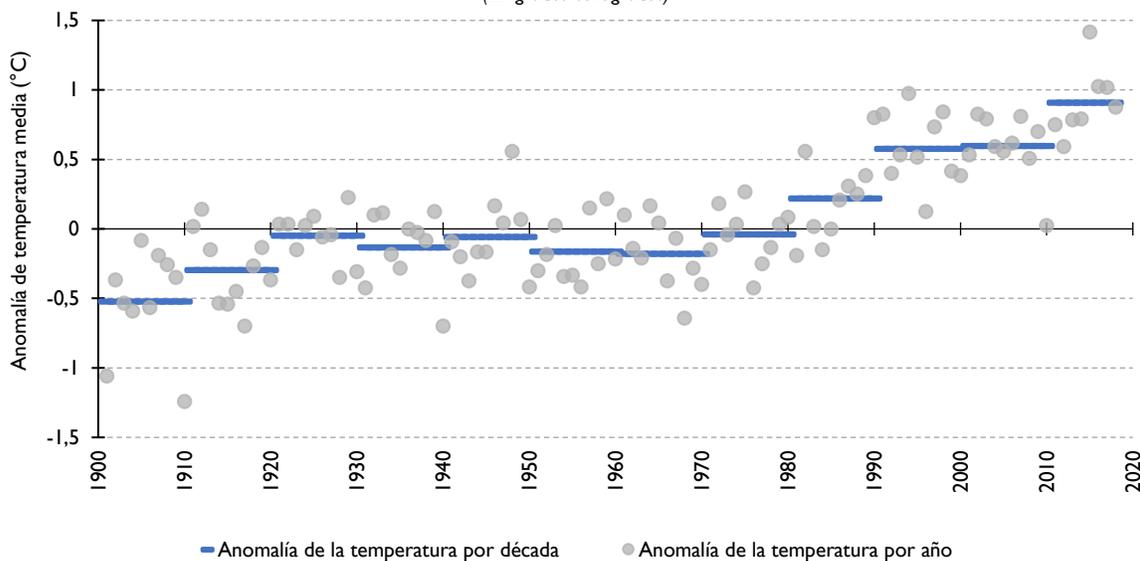
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

Gráfico III.4
Costa Rica: anomalía de la temperatura por año y década, 1900-2018 con respecto a la climatología 1960-1990
 (En grados centígrados)



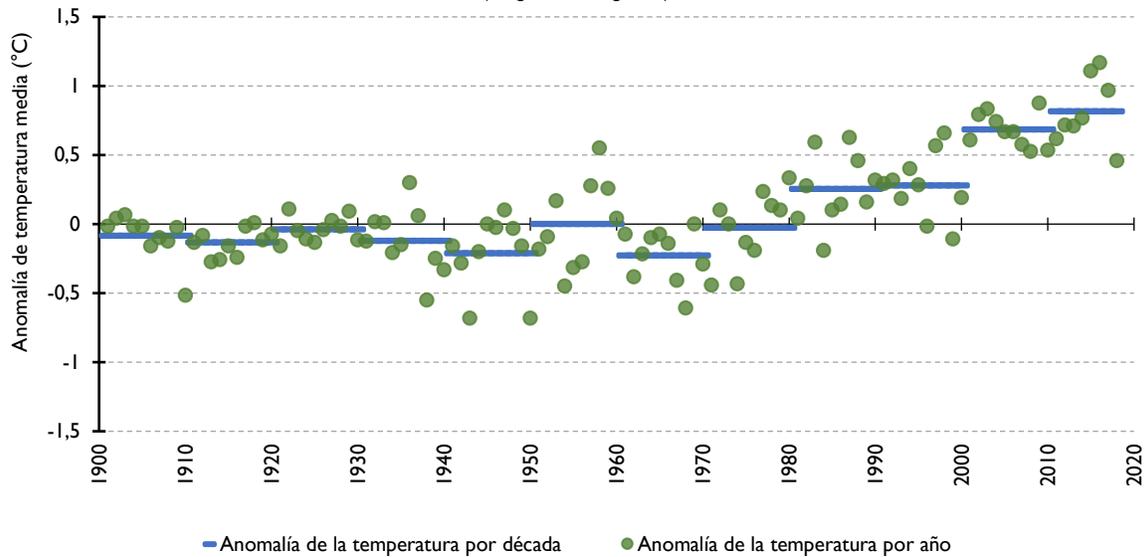
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

Gráfico III.5
Cuba: anomalía de la temperatura por año y década, 1900-2018, con respecto a la climatología 1960-1990
 (En grados centígrados)



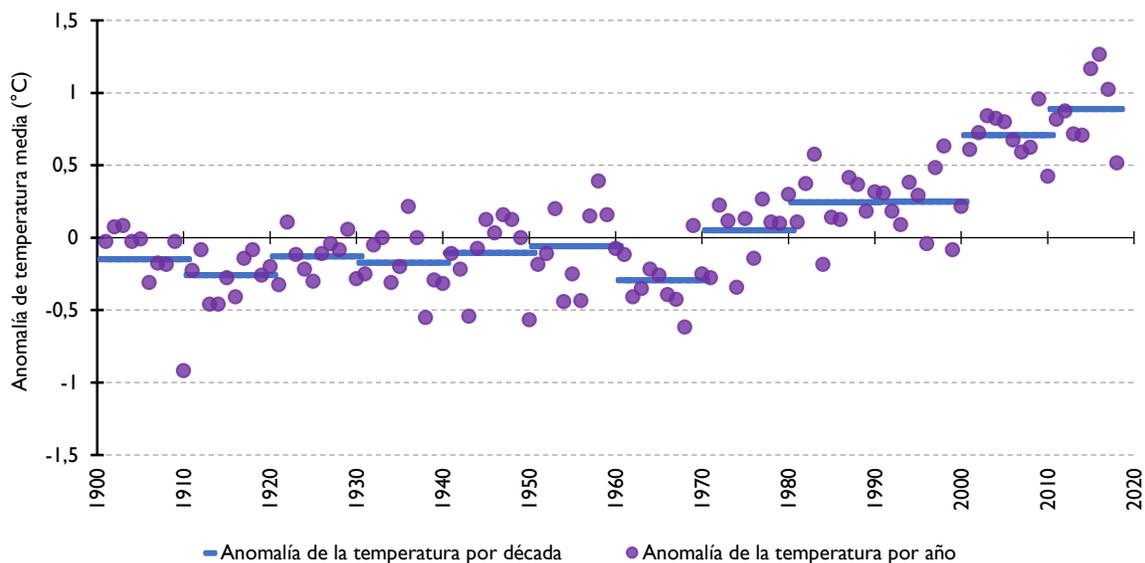
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

Gráfico III.6
El Salvador: anomalía de la temperatura por año y década, 1900-2018, con respecto a la climatología 1960-1990
 (En grados centígrados)



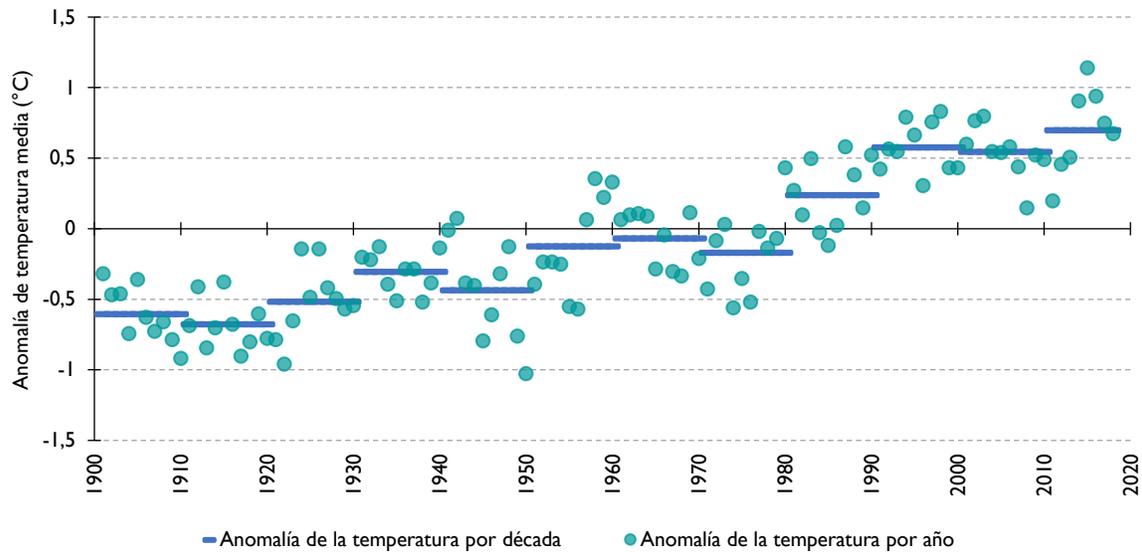
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

Gráfico III.7
Guatemala: anomalía de la temperatura por año y década, 1900-2018, con respecto a la climatología 1960-1990
 (En grados centígrados)



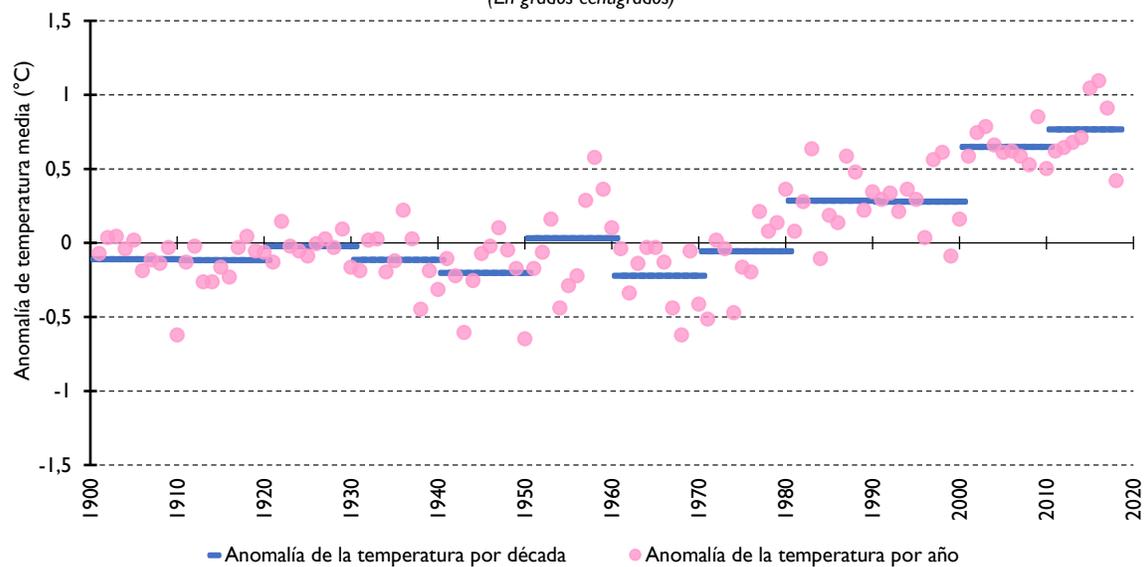
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

Gráfico III.8
Haití: anomalía de la temperatura por año y década, 1900-2018, con respecto a la climatología 1960-1990
 (En grados centígrados)



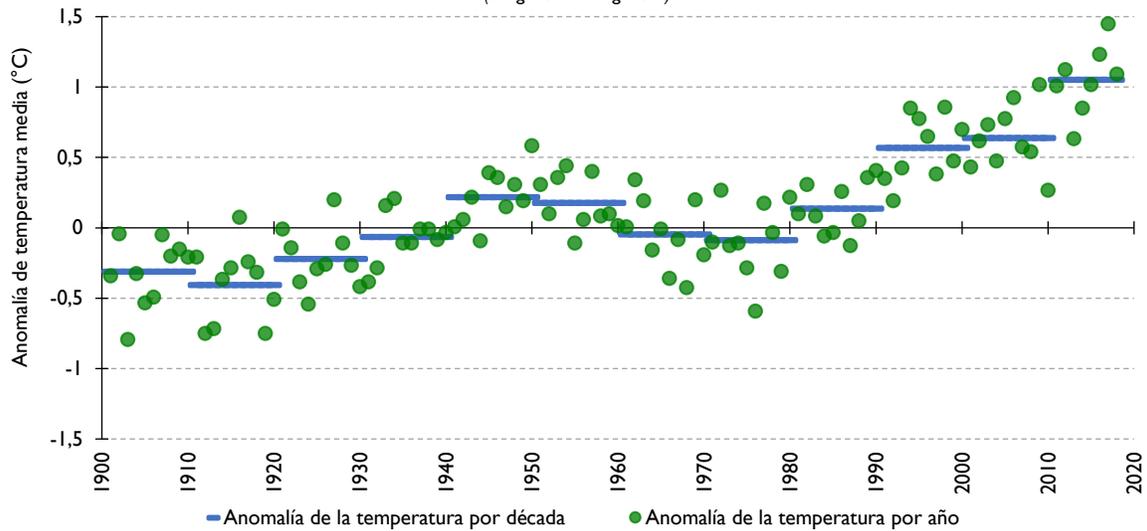
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

Gráfico III.9
Honduras: anomalía de la temperatura por año y década, 1900-2018, con respecto a la climatología 1960-1990
 (En grados centígrados)



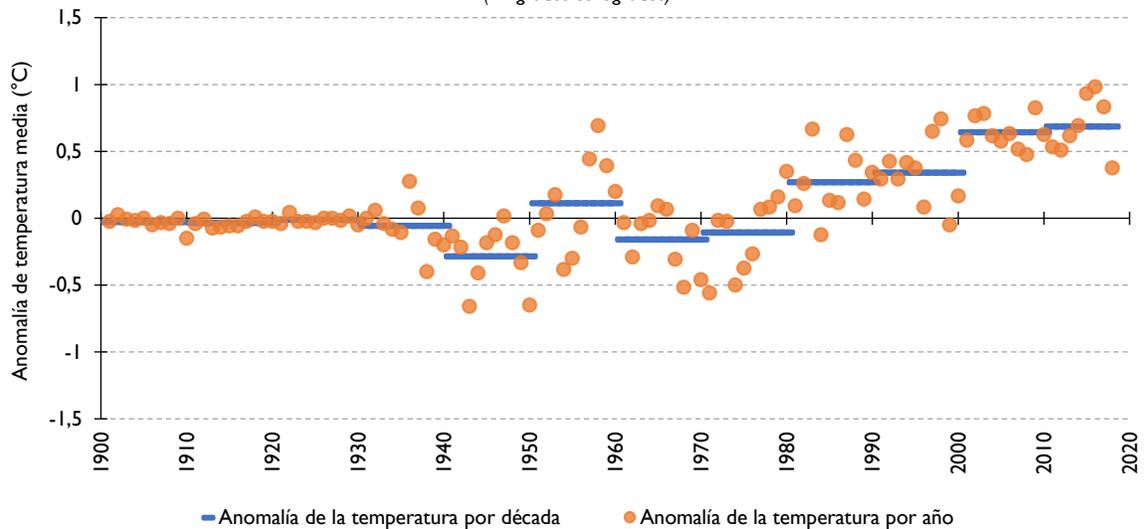
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

Gráfico III.10
México: anomalía de la temperatura por año y década, 1900-2018, con respecto a la climatología 1960-1990
 (En grados centígrados)



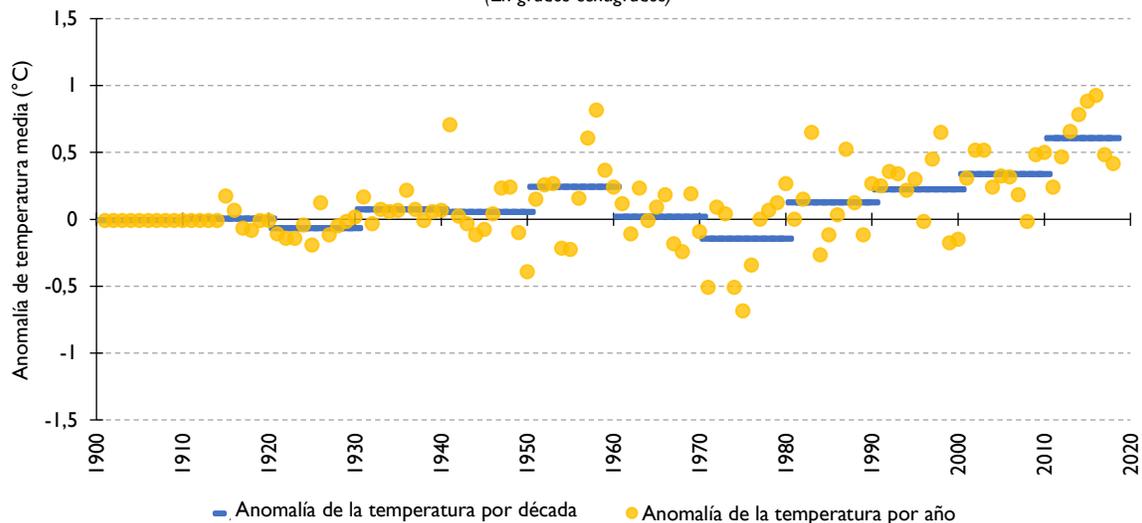
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

Gráfico III.11
Nicaragua: anomalía de la temperatura por año y década, 1900-2018, con respecto a la climatología 1960-1990
 (En grados centígrados)



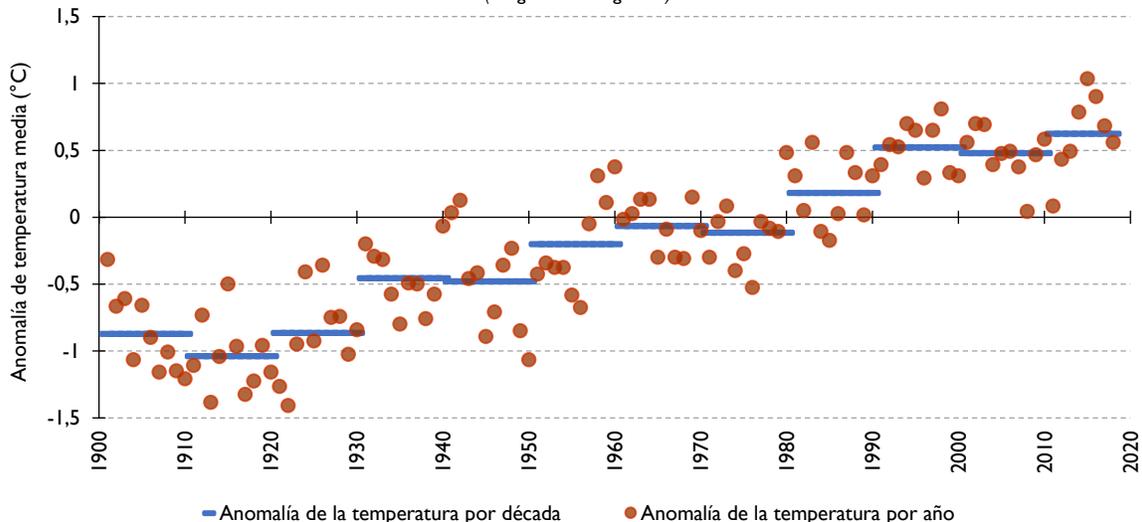
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

Gráfico III.12
Panamá: anomalía de la temperatura por año y década, 1900-2018, con respecto a la climatología 1960-1990
 (En grados centígrados)



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

Gráfico III.13
República Dominicana: anomalía de la temperatura por año y década, 1900-2018, con respecto a la climatología 1960-1990
 (En grados centígrados)

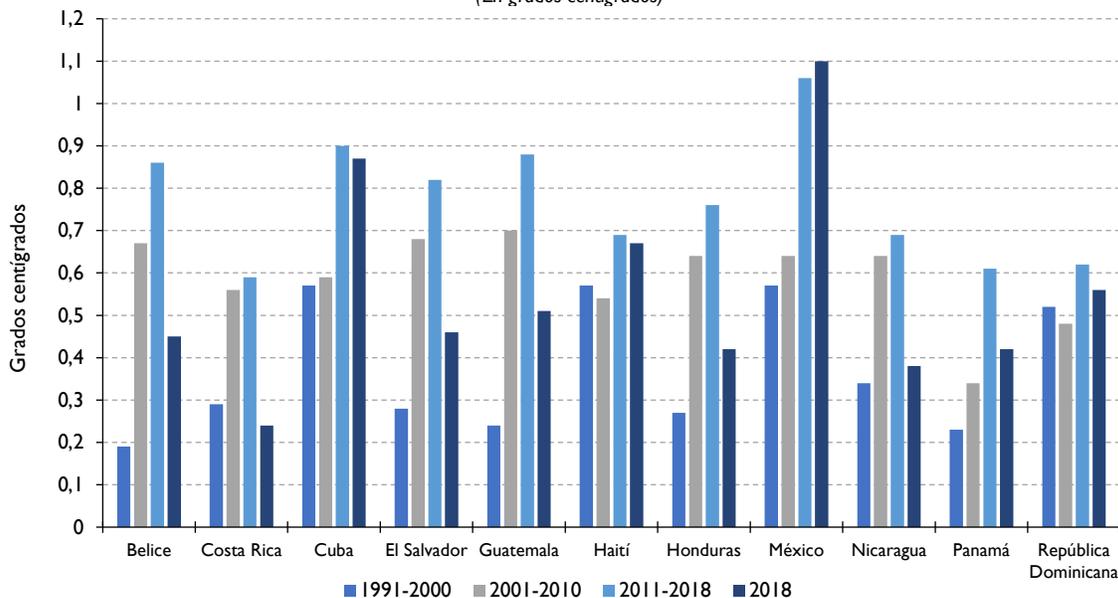


Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

Después de México, la mayor anomalía de la década actual se presentó en Cuba (0,91 °C). Le siguió el grupo de países del norte de Centroamérica: Guatemala (0,89 °C), Belice (0,86 °C), El Salvador (0,82 °C) y Honduras (0,76 °C). Finalmente, el resto de los países, Haití (0,70 °C); Nicaragua (0,68 °C); República Dominicana (0,62 °C); Panamá (0,61 °C) y Costa Rica (0,59 °C) (véase del gráfico III.3 al gráfico III.13).

En el gráfico III.14 se muestra un comparativo por década entre países de las anomalías de temperatura desde la década de 1990 con respecto a la climatología 1960-1990. En la década de 1990 se observa un fuerte calentamiento en México, Cuba, Haití y la República Dominicana con una anomalía superior de 0,5 °C. En la década de 2000 hay un calentamiento acelerado en Centroamérica, desde Belice hasta Costa Rica; en algunos de estos países el incremento en temperatura fue significativo, como en Guatemala, que fue de 0,7 °C. Para el período 2011-2018 hubo un incremento fuerte de la anomalía en México y Cuba. En Costa Rica, Haití, Nicaragua, Panamá y la República Dominicana el incremento fue menor a 0,7 °C. La anomalía de 2018 estuvo por debajo de la anomalía de la década en todos los países, con excepción de México.

Gráfico III.14
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: anomalía de la temperatura por década y país, 1991-2018, con respecto a la climatología 1960-1990
(En grados centígrados)



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

En la climatología 1960-1990 las temperaturas medias anuales nacionales de la región oscilaban entre 21,02 °C y 25,42 °C, con Panamá como el país más caliente y México el de menor temperatura. En la década de 1990 las temperaturas medias ya oscilaban entre 21,59 °C y 25,79 °C. Cuba fue el país de mayor temperatura media y México el de menor. En la década de 2001-2010 las temperaturas medias oscilaron entre 21,66 °C y 26,02 °C; Belice tuvo la temperatura más alta y México se mantuvo con la más baja. Entre 2011-2018 la temperatura media fue entre 22,08 °C y 26,21 °C, correspondiente a México y Belice respectivamente (véase el cuadro III.1).

En el caso de México se debe considerar que debido a que ocupa una superficie más grande y que en su territorio se incluyen a una mayor variedad de climas, el promedio de temperatura puede no ser representativo en cada una de sus regiones. Estos nuevos niveles de temperatura ya tienen impactos en los niveles óptimos de producción agrícola, requerimientos de riego, plagas en cultivos y mayor riesgo de enfermedades transmitidas por vectores (CEPAL y CAC/SICA, 2013 y 2014; CEPAL y otros 2012; Andrade y otros, 2017).

Cuadro III.1
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: temperatura media por país y por período,
1960-2018
 (En grados centígrados)

País	1960-1990	1991-2000	2001-2010	2011-2018	2018
Belice	25,35	25,54	26,02	26,21	25,80
Costa Rica	24,82	25,11	25,38	25,41	25,06
Cuba	25,22	25,79	25,81	26,12	26,09
El Salvador	24,49	24,77	25,17	25,31	24,95
Guatemala	23,47	23,71	24,17	24,35	23,98
Haití	24,92	25,49	25,46	25,61	25,59
Honduras	23,51	23,78	24,15	24,27	23,93
México	21,02	21,59	21,66	22,08	22,12
Nicaragua	24,89	25,23	25,53	25,58	25,27
Panamá	25,42	25,65	25,76	26,03	25,84
República Dominicana	24,56	25,08	25,04	25,18	25,12

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

b) *Temperatura media mensual nacional*

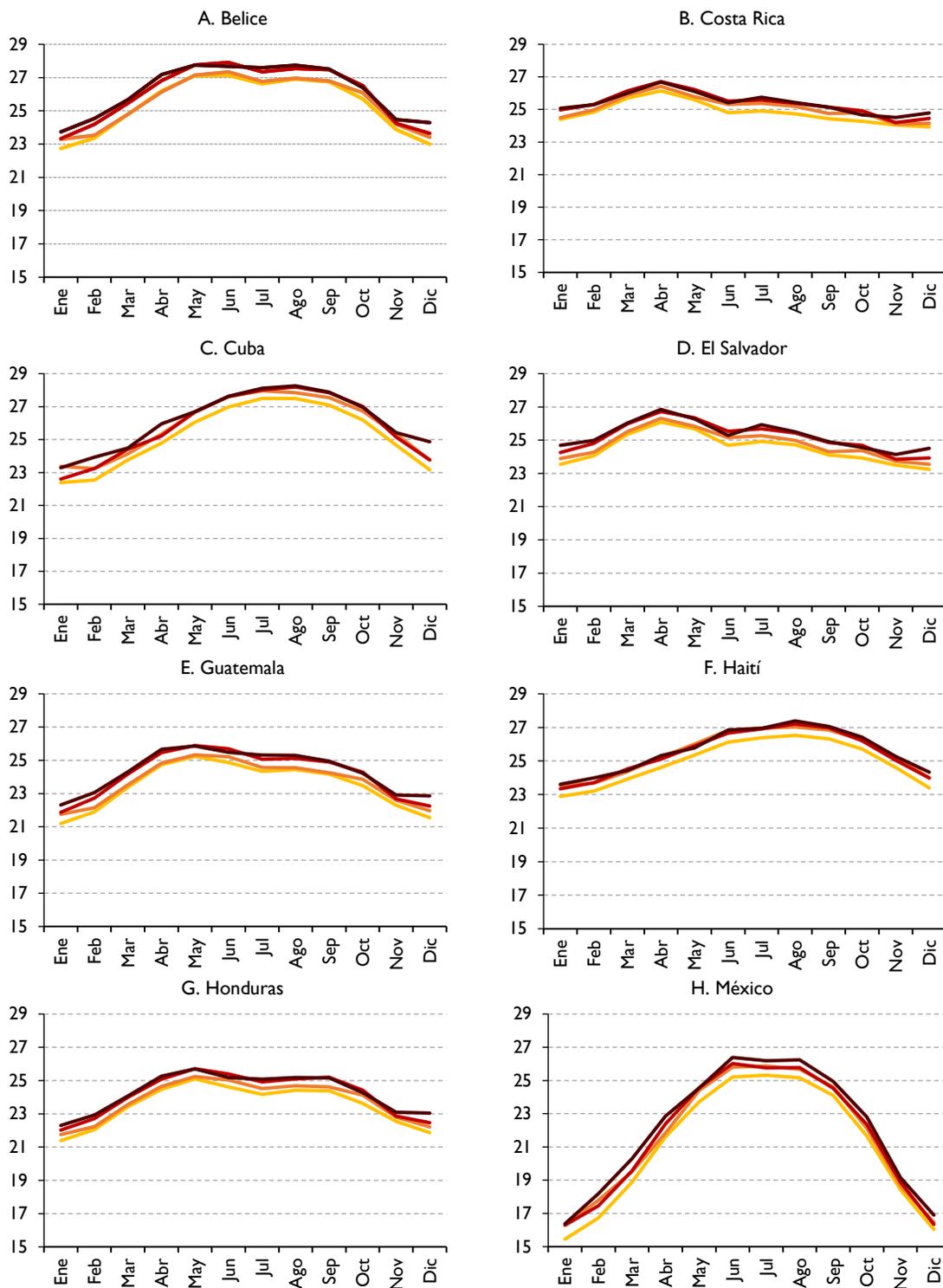
El aumento en la temperatura no ha sido homogéneo en todos los meses, lo que puede traer repercusiones en la producción de algunos productos agrícolas, ya que el ciclo de siembra, cultivo y cosecha se ha acoplado al patrón intraanual histórico de temperatura y precipitación, y en la aparición de enfermedades o plagas en algunas plantas, pues podría incrementarse el tiempo en que una planta está expuesta a un nivel de temperatura propicio para la germinación de una enfermedad o podría aumentar la humedad como en el cultivo del café de sombra (CEPAL y CAC/SICA, 2013 y 2014). En el gráfico III.15 se muestra la temperatura media mensual por país para los períodos 1960-1990 (línea de color amarillo) y las décadas 1991-2000 (línea de color naranja), 2001-2010 (color rojo) y 2011-2018 (color rojo oscuro). Desde la década de 1990 se ha generado un aumento en la temperatura media en todos los meses de una forma diferenciada entre meses y países.

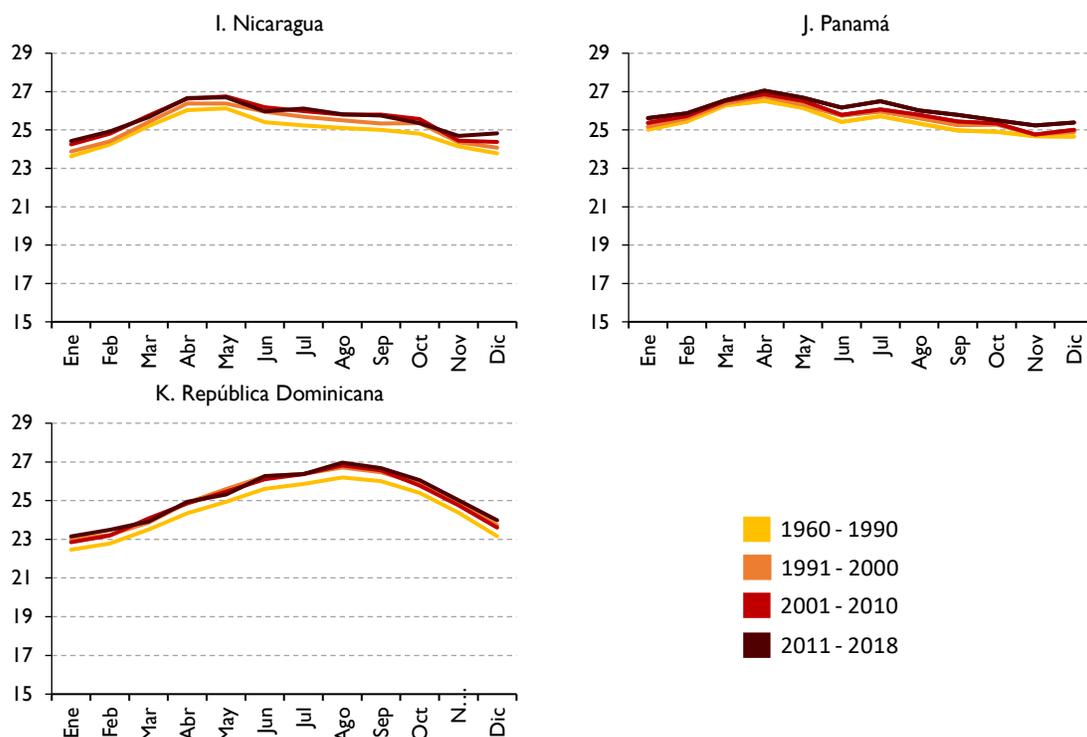
A continuación, se enlistan los cambios más relevantes por país:

- Durante la década de 1990, en Belice los aumentos más importantes ocurrieron entre octubre y febrero mientras que en los otros meses el aumento fue cercano a cero. Para las siguientes décadas el aumento se ha presentado en todos los meses, pero los mayores incrementos fueron entre diciembre y abril. En todos los períodos enero es el mes más frío, si bien pasó de 22,74 °C a 23,74 °C entre 1960-1990 y 2011-2018. Entre tanto, en el período 2011-2018 la temperatura media más alta pasó de 27,13 °C en junio en 1960-1990 a 27,75 °C en mayo.
- En Costa Rica los aumentos en la década de 1990 se dieron entre abril y octubre. En la primera década del presente siglo el aumento de la temperatura media continuó, pero en el último período los niveles de temperatura se mantuvieron en algunos meses o incluso disminuyeron con respecto a la década anterior. El mes más cálido sigue siendo abril, que pasó de 26,14 °C a 26,69 °C. El más frío fue diciembre, con 23,93 °C durante el

período 1960-1990, aunque durante el período 2011-2018 el mes más frío fue noviembre, con 24,51 °C.

Gráfico III.15
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: temperatura media por país, por mes y por período, 1960-2018
(En grados centígrados)





Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

- En Cuba los incrementos de temperatura media se generaron desde la década de 1990 en todos los meses. Entre 2011-2018 se aceleró el calentamiento, particularmente en febrero, abril y diciembre. Durante el período 1960-1990 los meses más cálidos fueron julio y agosto, con 27,49 °C y en el período 2011-2018 fue agosto, con 28,26 °C. El mes con la menor temperatura fue enero, que pasó de 22,39 °C en el período 1960-2000 a 23,29 °C en el período 2011-2018.
- En El Salvador hubo un aumento gradual de temperatura media en todos los meses entre 1991 y 2010 y durante el período 2011-2018 destaca el aumento entre noviembre y febrero con respecto a la década anterior. Entre el período base y el último período, abril se mantuvo como el mes con la temperatura más alta, pues pasó de 26,09 °C a 26,85 °C. La menor temperatura pasó de 23,25 °C en diciembre a 24,14 °C en noviembre, en los mismos períodos.
- En la década de 1990, en Guatemala el mayor aumento fue entre octubre y febrero. En el período de 2001 a 2010 el resto de los meses sufrieron grandes incrementos. En el período 2011-2018 se aceleraron los incrementos entre diciembre y abril. Mayo continúa como el mes más cálido, pues pasó de una temperatura media de 25,23 °C en 1960-1990 a 25,86 °C en el período 2011-2018. El mes de enero continúa como el de menor temperatura, ya que pasó de 21,20 °C en 1960-1990 a 22,31 °C en el período 2011-2018.
- En la década de 1990 se registró en Haití un aumento de temperatura en todos los meses. En el período 2011-2018 las temperaturas medias se mantuvieron alrededor de los niveles de la década de 1990. Agosto se mantuvo como el mes más caliente en el período 2011-2018, con respecto a 1960-1990, ya que pasó de 26,53 °C a 27,39 °C. Enero fue el

mes con la menor temperatura entre 1960-1990 y 2011-2018, pues pasó de 22,89 °C a 23,61 °C, respectivamente.

- En Honduras entre febrero y mayo el aumento de temperatura media no paso de 0,18 °C en la década de 1990, mientras que en el resto de los meses fue mayor. En la década de 2000 el incremento se registró en todos los meses y fue más significativo entre diciembre y febrero. Mayo siguió siendo el mes más cálido, pues pasó de una temperatura media de 25,10 °C en el período 1960-1990 a 25,70 °C en 2011-2018. Enero continuó siendo el mes de menor temperatura, ya que pasó de 21,39 °C a 22,30 °C entre el período base y el último período.
- En México el rango de temperatura mensual es grande debido a la variedad de ecosistemas y altitudes incluidas en su extenso territorio. Los cambios en México son mayores que en el resto de la región, y en todas las décadas se muestra un mayor aumento en el primer semestre del año. Enero se mantuvo como el mes de menor temperatura, pues pasó de 15,45 °C en el período 1960-1990 a 16,38 °C en el período 2011-2018. El mes más cálido fue julio, con 25,32 °C en el período 1960-1990 y en el último período fue junio con 26,39 °C.
- En Nicaragua el mayor aumento en temperatura media fue entre junio y diciembre en la década de 1990 con respecto a al período 1960-1990. En la siguiente década el mayor aumento fue en el primer semestre y en el último período se mantuvo con respecto a la década anterior. Se mantuvo mayo como el mes más cálido, ya que pasó de 26,13 °C en 1960-1990 a 26,70 °C en el período 2011-2018. El mes de enero continuó siendo el mes con menor temperatura, ya que durante el período 1960-1990 se ubicó en 23,63 °C y pasó a 24,43°C en el período 2011-2018.
- En Panamá el calentamiento ha sido gradual en las últimas tres décadas y los meses entre junio y diciembre han presentado los mayores aumentos. Abril se mantuvo como el mes más cálido, pues pasó de 26,52 °C en 1960-1990 a 27,05 °C en el período 2011-2018. Diciembre dejó de ser el mes con menor temperatura (24,66 °C en 1960-1990), y en el último período lo fue noviembre, con 25,24 °C.
- En la República Dominicana el mayor aumento se presentó en la década de 1990 y se ha mantenido un incremento gradual entre octubre y enero, hasta el período 2011-2018. En el resto de los meses el aumento ha sido menor. Agosto se mantuvo como el mes más caliente, pues pasó de 26,20 °C en el período 1960-1990 a 26,96 °C en 2011-2018. Enero tuvo la menor temperatura, ya que pasó de 22,46 °C en 1960-1990 a 23,15 °C en el período 2011-2018.

En resumen, el cambio climático se ha reflejado en la región con aumentos de temperatura diferenciados entre países y meses. En tres países del Caribe el aumento fue significativo en todos los meses en la década de 1990, si bien en las últimas décadas este incremento fue mayor entre diciembre y febrero. En Belice, El Salvador, Guatemala y Honduras, el aumento en la década de 1990 se registró en el segundo semestre, en tanto que durante el resto de los meses los cambios fueron mínimos. En la década de 2000 se experimentaron aumentos en todos los meses y en el período 2011-2018 hubo un mayor aumento entre noviembre y febrero. Costa Rica, Nicaragua y Panamá han tenido aumentos graduales en todas las décadas y en todos los meses. México ha presentado también un

incremento gradual desde la década de 1990, con un mayor aumento en el último período analizado, 2011-2018.

En el cuadro III.2 se muestran las anomalías mensuales de temperatura media del período 2011-2018 con respecto a 1960-1990 en grados centígrados a escala nacional. Las anomalías con color rojo son las dos anomalías mensuales más altas de cada país y las de color amarillo las dos anomalías más bajas. La evidencia muestra que —con excepción de México y Panamá— diciembre es el mes que ha sufrido el mayor aumento de temperatura media. Para los países que están al norte de la región, México, Belice, Guatemala y Cuba, el aumento en temperatura también ha impactado al mes de febrero. En la zona entre Honduras y Panamá el mes de julio ha tenido uno de los mayores incrementos. En El Salvador y Honduras el mes de enero ha visto incrementos altos de 1,14 °C y 0,91 °C respectivamente. En Haití y la República Dominicana el mes de agosto fue el segundo con mayor aumento de temperatura. En Panamá el mes con mayor anomalía fue septiembre. En México el segundo mes con la mayor anomalía fue marzo. Destaca el incremento de 1,70 °C en Cuba en el mes de diciembre y de 1,47 °C en México en febrero.

Cuadro III.2
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: anomalías de la temperatura media por país y por mes, 2011-2018
(En grados centígrados)

País	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Belice	1,00	1,18	0,88	0,98	0,63	0,54	0,98	0,83	0,77	0,68	0,60	1,30
Costa Rica	0,67	0,47	0,31	0,54	0,49	0,62	0,84	0,69	0,71	0,38	0,47	0,85
Cuba	0,90	1,39	0,71	1,17	0,63	0,66	0,63	0,77	0,80	0,77	0,76	1,70
El Salvador	1,14	0,92	0,67	0,76	0,60	0,60	1,00	0,78	0,80	0,62	0,65	1,27
Guatemala	1,12	1,16	0,92	0,93	0,63	0,61	0,97	0,86	0,79	0,73	0,62	1,32
Haití	0,73	0,79	0,51	0,70	0,43	0,73	0,57	0,86	0,74	0,71	0,67	0,93
Honduras	0,91	0,87	0,63	0,79	0,60	0,55	0,91	0,76	0,78	0,65	0,55	1,17
México	0,93	1,47	1,41	1,26	0,83	1,17	0,87	1,08	0,85	1,15	0,74	0,87
Nicaragua	0,79	0,68	0,46	0,63	0,57	0,58	0,87	0,72	0,75	0,56	0,55	1,05
Panamá	0,60	0,44	0,27	0,53	0,52	0,75	0,78	0,69	0,82	0,60	0,57	0,73
República Dominicana	0,69	0,71	0,40	0,59	0,37	0,66	0,51	0,77	0,67	0,66	0,63	0,82

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

Nota: Las anomalías se calcularon con respecto a la climatología 1960-1990.

Los datos en color en rojo señalan los meses con mayor aumento de temperatura y los amarillos con menor aumento.

En Nicaragua, Panamá, Haití y la República Dominicana el mes de marzo fue uno de los de menor anomalía de temperatura media. En México, El Salvador, Cuba, Haití y la República Dominicana mayo fue uno de los meses con menor anomalía. En el norte de Centroamérica, entre Belice y Honduras, junio es uno de los meses con menos incrementos. En la región entre México y Nicaragua (con excepción de El Salvador) fue noviembre otro de los meses con menos incremento. Aunque son los meses de menor anomalía sus aumentos no dejan de ser importantes por sus posibles impactos en agricultura por los requerimientos de

temperatura en cada proceso de los cultivos y por el brote de enfermedades transmitidas por vectores.

c) Temperatura media por departamento

Como se explicó en el capítulo II, la información de CRU TS3.1 tiene una alta resolución que ofrece la oportunidad de obtener información en el primer nivel geográfico subnacional (departamentos). En el mapa III.1 se muestra la temperatura media anual por departamento de la región analizada por períodos. Los colores van desde el morado como la temperatura media más baja hasta el color rojo como la más alta, pasando por azul, verdes, amarillos y naranja.

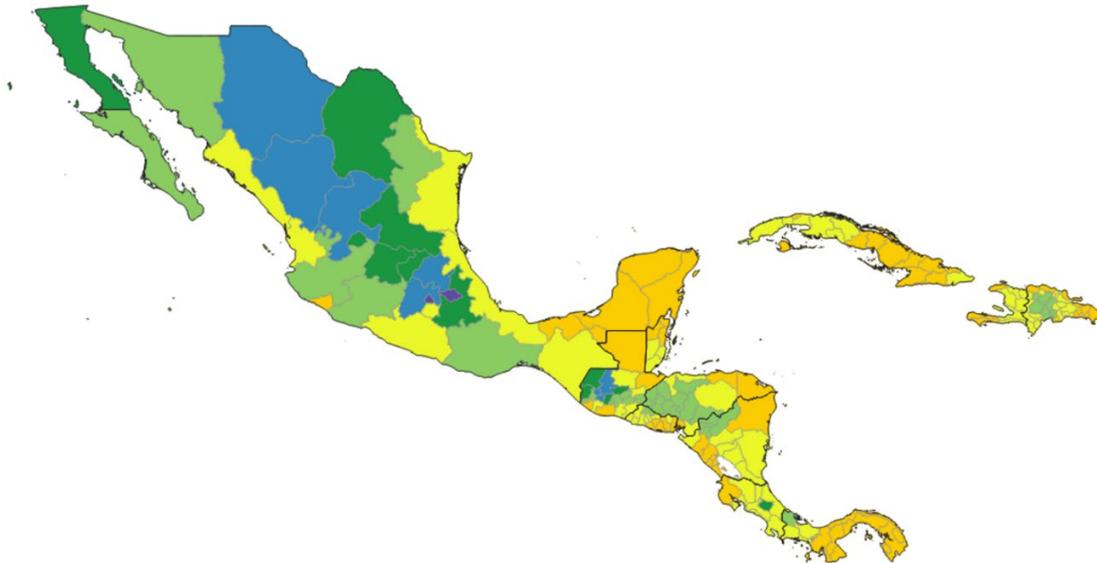
Entre 1960 y 1990 el rango de temperatura media fue entre 13,42 °C en la Ciudad de México a 26,97 °C en el archipiélago Islas de la Bahía (Honduras). Fueron 5% de departamentos o estados de la región los que presentaron temperaturas medias por debajo de los 17,5 °C. Estos se ubicaron en el centro norte y el centro de México, y en el altiplano occidental guatemalteco. Estos departamentos se caracterizan por tener altitudes medias por arriba de 1.400 metros sobre el nivel del mar (msnm). Por su extensión México tiene una gran variedad de climas en su territorio; en el norte de México los rangos de temperatura son muy amplios durante el año, por ejemplo, y de acuerdo con la climatología (1960-1990) en Chihuahua la temperatura media en enero fue de 8,59 °C y en junio de 25,80 °C (véase el mapa III.1.A).

En el período 1960-1990, 25% de los departamentos tuvieron entre 17,5 °C y 22,5 °C, los cuales tienen altitudes medias superiores a los 500 msnm con excepción de nueve departamentos que se encuentran en la península de California (México), en el centro occidente de la República Dominicana, Bocas del Toro (Panamá), Yoro (Honduras) y Chiquimula (Guatemala). Este grupo de departamentos que se identifican por los colores verdes marcan una línea desde el norte de México en el límite con los Estados Unidos hasta el Pacífico; los departamentos del altiplano occidental guatemalteco en la frontera con México; otro grupo de departamentos centrales que van desde el oriente en Guatemala hasta Nicaragua en su límite con Honduras, el altiplano central de Costa Rica y el centro-occidente de la República Dominicana (véase el mapa III.1.A).

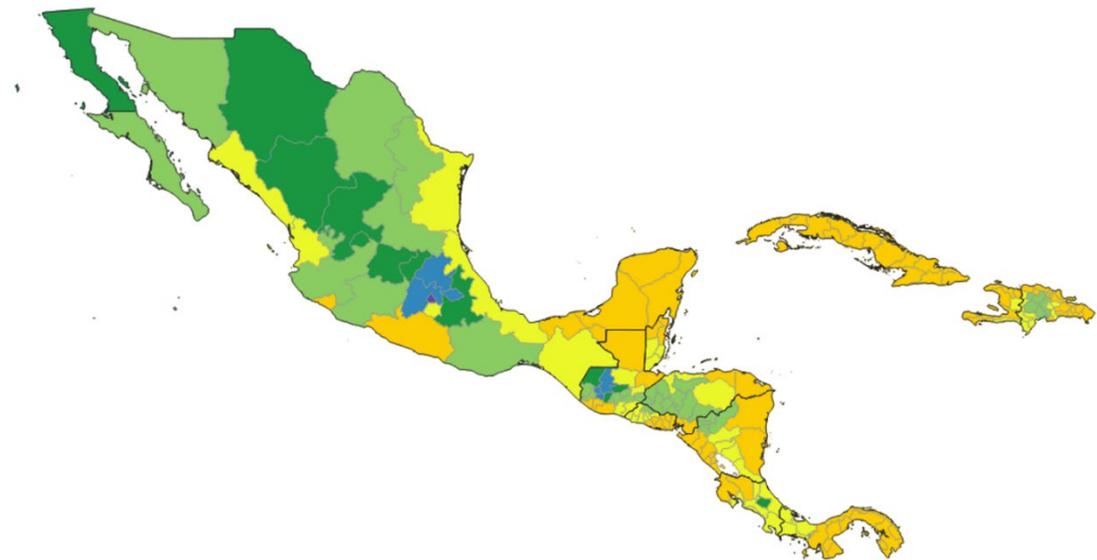
El mayor número de departamentos se ubicó entre los 22,5 °C a 25 °C, en el mapa se muestran de color amarillo, y representaron 36%. Estos departamentos se caracterizan por tener altitudes medias por debajo de 900 msnm con excepción de cuatro departamentos que tienen más de 1.000 msnm. La mayoría de estos departamentos se encuentran en las costas y en gran parte de Nicaragua y Costa Rica hasta el occidente de Panamá. En el Caribe este rango se encuentra en el occidente de Cuba, en una gran parte de Haití y la frontera con la República Dominicana (véase el mapa III.1.A).

Mapa III.1
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: temperatura media anual por departamento
y por período, 1960-2018
(En grados centígrados)

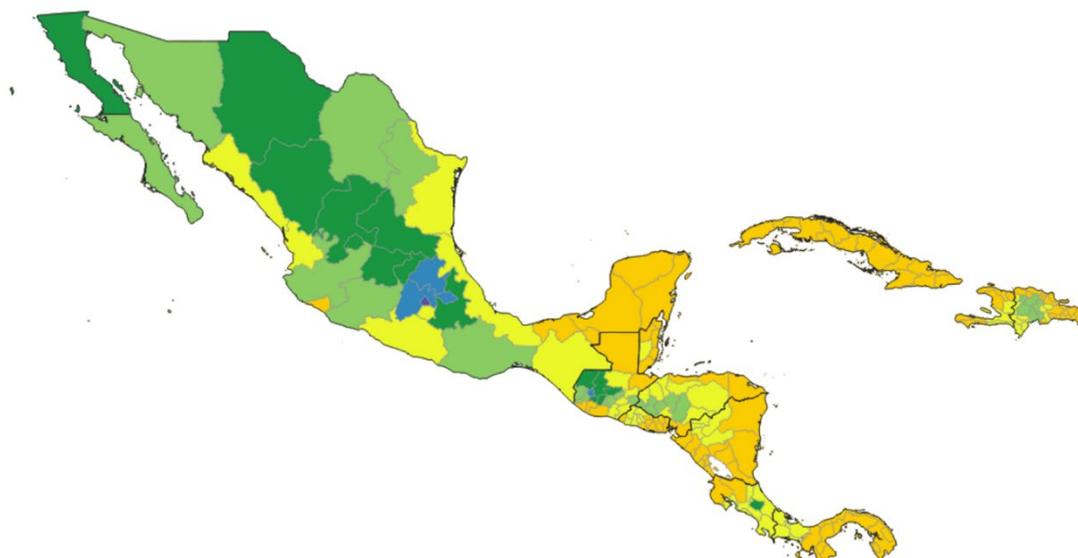
A. Período 1960-1990



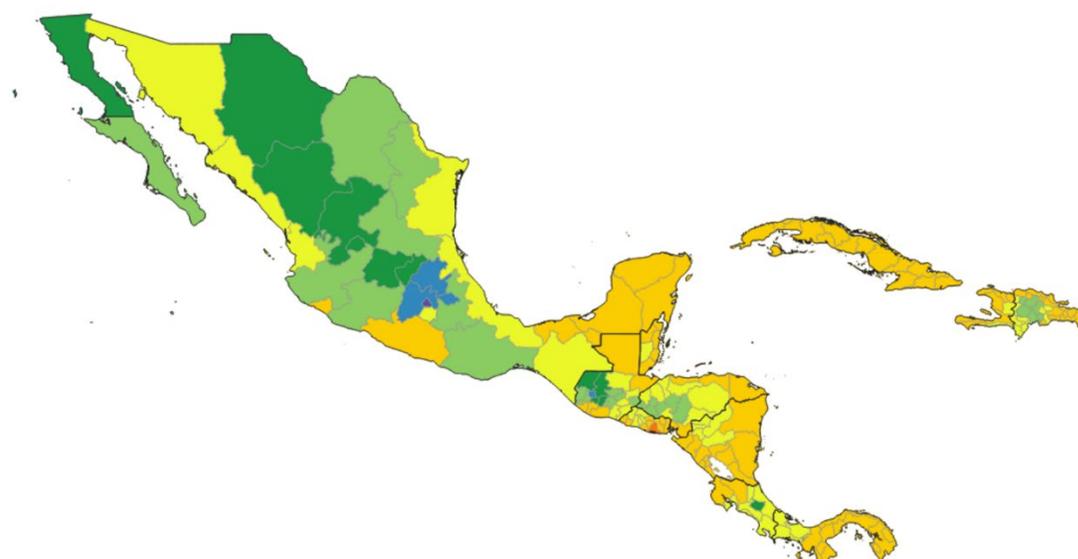
B. Período 1991-2000



C. Período 2001-2010



D. Período 2011-2018



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

Nota: Los datos por departamento se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de 0,5° x 0,5° (aproximadamente 55 km) para cada área correspondiente. El concepto "departamento" se refiere a la segunda división administrativa como "distrito", "estado", "provincia" o "comarca".

Los departamentos más cálidos se encontraban entre los 25 °C a 26,97 °C y en el período de referencia fueron 34% del total de la región. En el mapa III.1 son los departamentos de color naranja. Estos se caracterizan por tener altitudes medias por debajo de los 600 msnm y gran parte de ellos tienen costas. Entre ellos se encuentran la península de Yucatán; el norte de Belice; El Petén, Izabal, Escuintla y Retalhuleu en Guatemala; el oriente de El Salvador; el

Pacífico y el Caribe norte de Nicaragua; Colón, Gracias a Dios y Valle en Honduras; Guanacaste en Costa Rica; el centro y oriente de Panamá y Cuba; Nord-Ouest y el suroeste de Haití, y la costa norte de la República Dominicana hasta La Altagracia (véase el mapa III.1.A).

Con esta caracterización de la climatología de referencia (1960-1990) se observa el cambio de temperatura en los departamentos a través del tiempo. En el período 1991-2000, los departamentos con menos de 17,5 °C pasaron de diez a siete y en las dos últimas décadas quedaron en cinco. Entre 17,5 °C a 22,5 °C en la década de 1990 pasaron de 46 departamentos a 48, en la década de 2000 a 39 y entre 2011-2018 fueron 38. Los departamentos que pasaron del rango 17,5 °C - 22,5 °C al rango de 22,5 °C - 25 °C en el período 2011-2018 se ubican principalmente en Honduras, y algunos en El Salvador y Nicaragua, Sonora (México) y Bocas del Toro (Panamá) (véase el mapa III.1).

El número de departamentos entre 22,5 °C y 25 °C pasó de 68 a 45 en la década de 1990. Fueron 50 en 2001-2010 y 48 en 2011-2018. De la climatología base al período 2011-2018 los departamentos que pasaron de este rango al de 25 °C a 27,5 °C se ubicaron principalmente en Belice, El Salvador, Nicaragua, el occidente de Cuba, en Haití y el oriente de la República Dominicana. Por lo que los departamentos que se encuentran en el rango de 25 °C a 27,5 °C pasaron de 63 a 87 entre 1960-1990 y la década de 1990, 92 en el período 2001-2010 y 94 departamentos en 2011-2018. En la presente década ya hay dos departamentos con más de 27,5 °C de temperatura media (color naranja oscuro) que son Usulután en El Salvador y la isla de Gracias a Dios en Honduras (véase el mapa III.1).

Un hecho que se verifica en el análisis histórico es que para cada país los departamentos que en la climatología base eran los más cálidos y los de menor temperatura lo siguen siendo en la última década de análisis. Es decir que no ha habido un cambio en el patrón espacial de temperaturas, al menos en sus departamentos más extremos. Sin embargo, las anomalías se han diferenciado en toda la región; dichos cambios se muestran en el siguiente análisis.

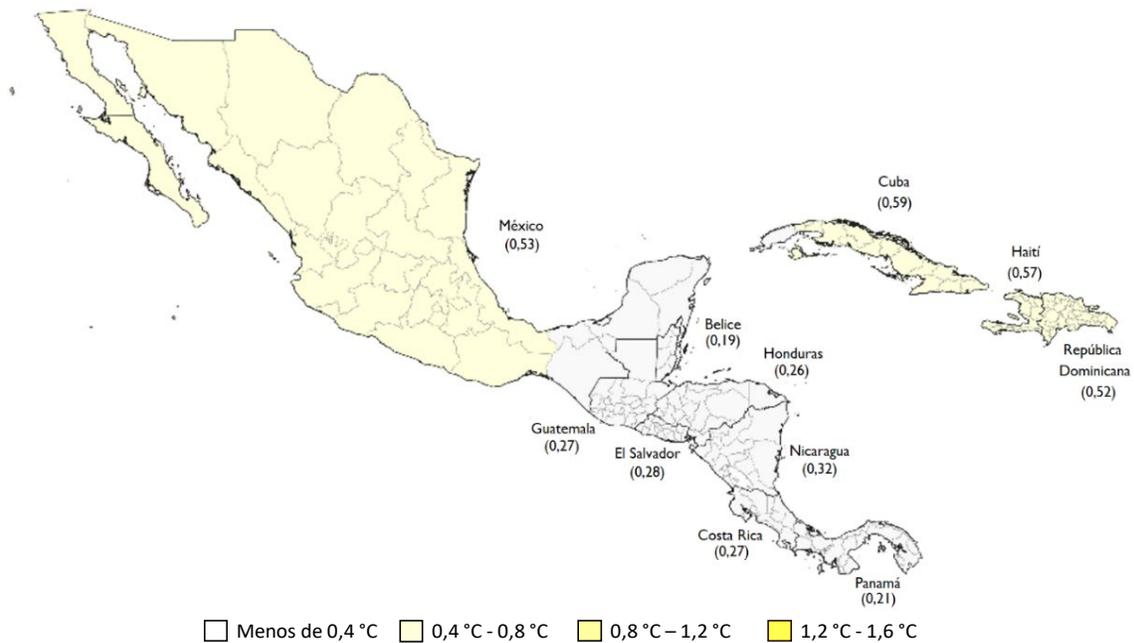
En el mapa III.2 se muestran las anomalías de las tres décadas analizadas con respecto a la climatología de referencia, 1960-1990. En los mapas también se muestra la anomalía por país, misma que se refiere al promedio de la anomalía de sus departamentos. La escala va desde blanco con la menor anomalía hasta distintos grados de amarillo. En cada uno de los mapas se observa que la ubicación geográfica determina los distintos niveles de incrementos de temperatura media. En la década de 1990 se observa que la región se divide en dos: el sur de México hasta Panamá y el occidente de Cuba —que tuvieron anomalías por debajo de los 0,4 °C—, y el resto de la región, que presentó incrementos entre 0,4 °C y 0,8 °C. Entre 2001-2010 el territorio con anomalías entre 0,4 °C y 0,8 °C se extendió desde el norte de México hasta Panamá en su frontera con Costa Rica. No obstante, en la región del Bajío en México la anomalía fue menor que en el período anterior. En el noroeste de México se encontraron las mayores anomalías de la región, superando los 0,8 °C.

En el período 2011-2018, como se muestra en el mapa III.2.C, Haití, la República Dominicana, entre el oriente de Honduras hasta Panamá, y desde el noreste de México hacia su costa Pacífico, registraron anomalías entre 0,4 °C a 0,8 °C con respecto a 1960-1990. Aumentos mayores, en el rango de 0,8 °C a 1,2 °C, se registraron en Cuba, en algunos estados del norte y del sur de México hasta El Salvador y el occidente de Honduras.

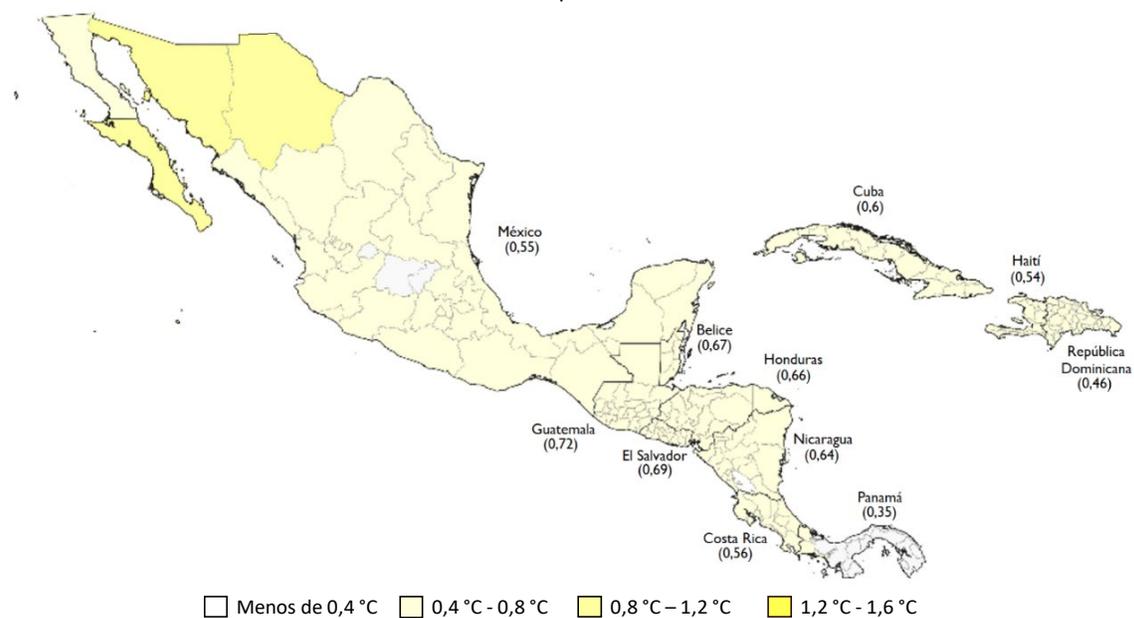
De acuerdo con la evidencia en este rango se encuentra el aumento global de temperatura. En el noroeste de México se presentó la mayor anomalía al superar 1,2 °C.

Mapa III.2
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: anomalía de la temperatura media por departamento y por período, 1960-2018
(En grados centígrados)

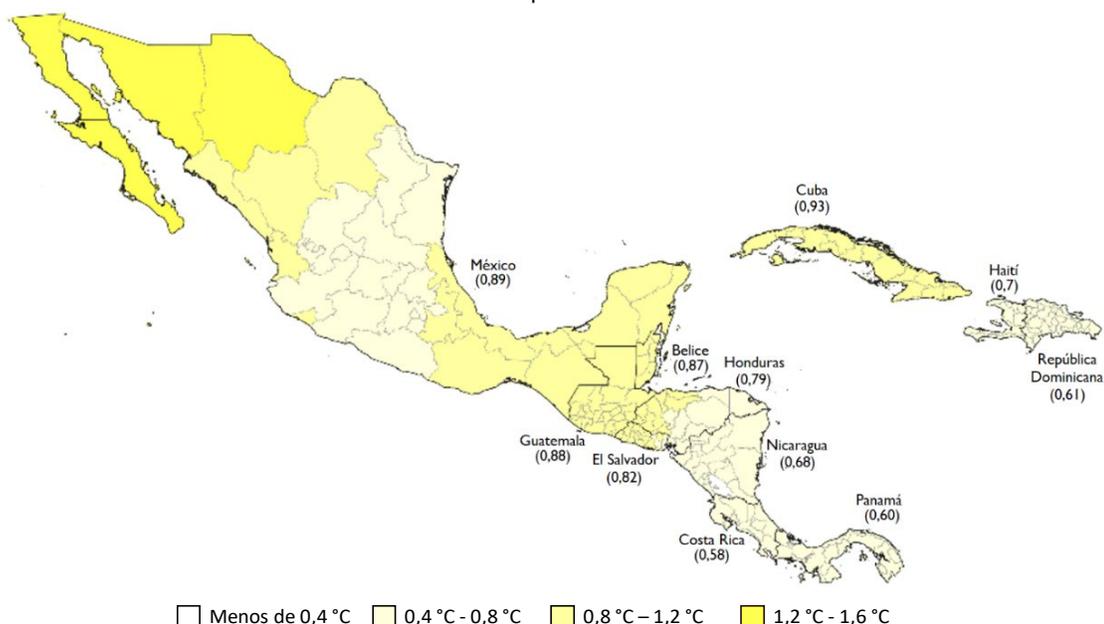
A. 1991-2000, en comparación con 1960-1990



B. 2001-2010, en comparación con 1960-1990



C. 2011-2018 en comparación con 1960-1990



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

Nota: Los datos por departamento se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$ (aproximadamente 55 km) para cada área correspondiente. El concepto "departamento" se refiere a la segunda división administrativa como distrito, estado, provincia y comarca.

En cada década los departamentos con la menor o mayor anomalía de temperatura media se han modificado. Lo anterior muestra que los efectos espaciales del aumento de temperatura pueden ser distintos en el largo plazo a lo que se observó en el pasado. Por ejemplo, en Belice, el distrito de Toledo tuvo la anomalía más grande en la década de 1990, que fue de $0,22^{\circ}\text{C}$, y el distrito de Belice, la menor, con $0,15^{\circ}\text{C}$, y en el período 2011-2018 el rango fue de $0,88^{\circ}\text{C}$ en Orange Walk, a $0,86^{\circ}\text{C}$, en Corozal (véase el mapa III.2).

En Costa Rica el rango de las anomalías fue de $0,32^{\circ}\text{C}$ en Guanacaste, a $0,23^{\circ}\text{C}$ en San José, en la década de 1990, y en el período 2011-2018 fue de $0,60^{\circ}\text{C}$ en Alajuela, a $0,55^{\circ}\text{C}$, en San José. En Cuba la mayor anomalía en el período 1991-2000 fue de $0,67^{\circ}\text{C}$ en Santiago de Cuba y la menor fue $0,39^{\circ}\text{C}$ en Pinar del Río, y en el período 2011-2018 fue de $1,05^{\circ}\text{C}$ en La Habana, a $0,84^{\circ}\text{C}$ en Ciego de Ávila. En El Salvador el departamento de Usulután fue el de mayor anomalía, con $0,30^{\circ}\text{C}$, y Chalatenango el de menor, con $0,26^{\circ}\text{C}$ en el período 1991-2000, y el rango fue de $0,85^{\circ}\text{C}$ en Santa Ana, a $0,78^{\circ}\text{C}$ en la Unión en el período 2011-2018 (véase el mapa III.2).

En Guatemala los rangos de anomalías de temperatura fueron de $0,29^{\circ}\text{C}$ en Suchitepéquez a $0,22^{\circ}\text{C}$ en Petén, en el período 1991-2000, y de $0,91$ en Huehuetenango, a $0,85$ en Chiquimula en 2011-2018. En la década de 1990 el rango de Haití fue de $0,60^{\circ}\text{C}$ en Grand'Anse, a $0,54^{\circ}\text{C}$ en Sud-Est, y en el período 2011-2018 fue de $0,75^{\circ}\text{C}$ en Nord-Ouest, a $0,65^{\circ}\text{C}$ en Centre. En Honduras, los rangos de las anomalías fueron de entre $0,32^{\circ}\text{C}$ en Gracias a Dios, a $0,23^{\circ}\text{C}$ en Atlántida en la década de 1990, y el período 2011-2018 fue de $0,85^{\circ}\text{C}$ en Copán, a $0,70^{\circ}\text{C}$ en Gracias a Dios. Durante la década de 1990, en México la mayor anomalía alcanzó $0,72^{\circ}\text{C}$ en Sinaloa, y la menor $0,20^{\circ}\text{C}$, en Quintana Roo. En el período 2011-2018 fue

entre 1,59 °C en Sonora (por arriba de la anomalía global), a 0,58 °C, en Guanajuato (véase el mapa III.2).

En Nicaragua el incremento de temperatura media en la década de 1990 fue de entre 0,36 °C en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte (RACCN), a 0,28 °C en Nueva Segovia. En este último departamento se aceleró el aumento de temperatura y entre 2011-2018 fue el de mayor anomalía en el país, con 0,72 °C; el de menor fue Río San Juan con 0,63 °C. Durante la década de 1990, el mayor incremento en Panamá se registró en la comarca de Emberá, con 0,24 °C, y el menor en la provincia de Los Santos, con 0,19 °C, en tanto que entre 2011-2018 el rango fue de 0,65 °C en la comarca de Kuna Yala, a 0,54 °C en los Santos. En la República Dominicana en la década de 1990 el rango fue de 0,55 °C en la provincia de Santiago Rodríguez a 0,49 °C en La Altagracia y en el período 2011-2018 fue de 0,66 °C en Monte Cristi, a 0,58 en Samaná (véase el mapa III.2). En los promedios por departamento a nivel de país, Cuba fue el de mayor aumento en 1991-2000 y en el período 2011-2018, y Guatemala en el período 2001-2010. Los de menor incremento fueron Belice, Panamá y Costa Rica, respectivamente, en cada período.

B. Escenarios de cambio climático

De acuerdo con el AR5 es probable que la temperatura media global en el período 2046-2065 supere en 1,4 °C en el escenario RCP4.5, con un rango probable de 0,9 °C a 2,0 °C, el promedio observado del período 1986-2005 y en 2 °C en el escenario RCP8.5 con un rango de 1,4 °C a 2,6 °C. En el período 2081-2100 estos aumentos serían de 1,8 °C con un rango probable de 1,1 °C a 2,6 °C en el escenario RCP4.5 y de 3,7 °C con un rango probable de 2,6 °C a 4,8 °C en RCP8.5 (IPCC, 2013a) (véase el cuadro I.1). Esta evaluación se basa en múltiples líneas de evidencia y supone que no habrá erupciones volcánicas importantes o cambios en la irradiación solar total.

El trabajo de algunas instituciones internacionales que han mejorado la resolución de las proyecciones de cambio climático de los distintos modelos ofrece la oportunidad de hacer un análisis a escala local o municipal de lo que podría pasar con el cambio climático. En el capítulo II se explican los modelos utilizados, los escenarios, la climatología base y los períodos para cada corte. Para este documento se eligió el escenario 4.5 como escenario de estabilización y el escenario 8.5 como escenario extremo, con un nivel muy alto de emisiones de GEI.

Los resultados de los escenarios se muestran en los mapas III.3 y III.5 y en los mapas III.4 y III.6 se ilustran las respectivas anomalías con su valor medio por municipio. En los mapas los rangos de temperatura son representados desde el color morado para los más fríos hasta el color rojo para aquellos que superan los 30 °C, pasando por azul, verdes, amarillo y naranjas. En los mapas de anomalías de temperatura media los valores fueron representados por colores que van desde el blanco hasta rojos intensos pasando por tonos de amarillos y naranjas. En total se consideraron más de 3.400 áreas del segundo nivel administrativo para toda la región (municipios), dependiendo de la disponibilidad de información. Cabe aclarar que estas pueden variar de acuerdo con las últimas actualizaciones. Para Belice no se tuvo disponible el segundo nivel y se utilizó únicamente el primer nivel administrativo (distritos).

I. Climatología regional 1960-1990

En el período base 1960-1990 se identifican municipios con temperatura media por debajo de los 17,5 °C, mismos que se concentran principalmente en tres áreas. La primera en el noroeste de México, en la Sierra Madre Occidental, cordillera de montañas que va desde Chihuahua hasta Durango y se extiende hasta los estados de Zacatecas y San Luis Potosí. La segunda área se encuentra en el centro de México, en los estados de Hidalgo, Estado de México, la Ciudad de México, Tlaxcala, el norte de Puebla y en parte de la Sierra Madre de Oaxaca, donde el nivel de temperatura se debe a su mayor altitud. Por último, el altiplano occidental guatemalteco, en los departamentos de Huehuetenango, Quetzaltenango, San Marcos y Sololá, región de tierras altas volcánicas con altitudes mayores a los 1.500 msnm. En México se localizan otros municipios con temperatura por debajo de los 17,5 °C que se caracterizan por ubicarse en zonas montañosas (véanse los mapas III.3 y III.5).

Los niveles de temperatura media anual de 17,5 °C a 22,5 °C se presentaron en el norte de México, en la península de Baja California, Chihuahua y Coahuila además de Jalisco, la zona conocida como el Bajío en Guanajuato y la Huasteca en San Luis Potosí y Querétaro. Otra área en México en este rango es parte de la Sierra Madre de Oaxaca y zonas centrales de Chiapas. En Centroamérica estos niveles se encontraron desde el altiplano occidental guatemalteco, pasando por el centro de Honduras hasta el norte de Nicaragua. El Valle Central de Costa Rica, Bocas del Toro y algunos distritos de Chiriquí, en Panamá, se caracterizan por tener temperaturas entre 17,5 °C y 22,5 °C. En la República Dominicana estas temperaturas se localizan en el occidente en su límite con Haití (véanse los mapas III.3 y III.5).

Los municipios que tenían temperaturas medias entre 22,5 °C y 27,5 °C se encontraban principalmente en toda la costa de la región. En la mayor parte de las costas de Centroamérica las temperaturas son mayores a 25 °C. Estas temperaturas se extendían a gran parte de los estados de México con costas en el Pacífico, el golfo de México y toda la península de Yucatán, y en algunos departamentos centrales de Centroamérica, como todos los distritos de Belice, el Petén, Alta Verapaz e Izabal en Guatemala, todos los municipios de El Salvador, Olancho en Honduras, casi todo el territorio de Nicaragua y de Panamá, y el occidente de Costa Rica. En Cuba y Haití este es un rango de temperatura característico. En el oriente de la República Dominicana se observan estas temperaturas además de sus municipios en las costas (véase los mapas III.3 y III.5).

A diferencia del nivel departamental, en la climatología base se encuentran municipios con temperaturas por arriba de los 27,5 °C, que son los más cálidos de la región. Estos se encuentran en Michoacán, en una zona conocida como Tierra Caliente, en algunos municipios de la costa de Guerrero y Chiapas en México. En Guatemala estas temperaturas de más de 27,5 °C se localizaron en Escuintla, en Honduras en algunos municipios de Valle y Choluteca, y en Nicaragua en Chinandega. Se puede observar que estos municipios se encuentran en el Pacífico (véase los mapas III.3 y III.5).

En México, el municipio con la temperatura media anual más baja en la climatología base 1960-1990 fue Ecatzingo, ubicado en el Estado de México, con 8,2 °C; en Centroamérica fue Todos Santos Cuchumatán, en Huehuetenango, Guatemala, con 10,4 °C y en el Caribe fue en el municipio de Constanza, en La Vega, República Dominicana, con 15,4 °C. En México el

municipio con la temperatura media anual más alta en el período base fue Zitácuaro, en el estado de Michoacán, con 29,3 °C; en Centroamérica fue Ocos, en San Marcos, Guatemala, con 28,1 °C, y en el Caribe fue Cristóbal, en la provincia de Independencia, República Dominicana, con 27,1 °C (véanse los mapas III.3 y III.5).

2. Escenario RCP4.5

Bajo el escenario de estabilización ya se visualizan cambios importantes en 2030 (véase el mapa III.3.B). Los más relevantes son:

- Temperaturas entre 25 °C a 27,5 °C en casi toda la superficie costera de la región, con excepción de la península de Baja California.
- En la zona de la Sierra Madre Occidental de México una gran proporción de municipios tendrían temperaturas entre 17,5 °C a 20 °C.
- Serían más visibles las zonas con temperaturas medias anuales por arriba de los 27,5 °C, como en Michoacán y Guerrero, y municipios con costas en estos estados. También en gran parte de la costa del Pacífico de Guatemala, Honduras y Nicaragua.
- Aparecerían nuevas zonas con temperaturas por arriba de los 27,5 °C en el golfo de México, en la zona de Tabasco y Campeche, hasta una parte de Chiapas, así como en Yucatán. También en Colón y Gracias a Dios, en Honduras, y en la península de Azuero en Panamá, esta última zona perteneciente al arco seco. Algunos municipios de la República Dominicana también estarían por arriba de 27,5 °C.
- En Cuba y Haití el rango principal de temperatura se colocaría entre 25 °C y 27,5 °C.

Las características principales en 2050 (véase el mapa III.3.C) serían las siguientes:

- En Michoacán y Guerrero aparecerían los primeros municipios en México con temperaturas media anual por arriba de los 30 °C.
- Los municipios con temperaturas por debajo de los 15 °C seguirían disminuyendo significativamente.
- En la península de Yucatán y el golfo de México aumentaría la superficie con temperatura media anual en el rango de 27,5 °C a 30 °C.
- Las temperaturas del arco seco en Panamá, como en la península de Azuero, se extenderían al oriente de este país.
- En el centro de Honduras gran parte del territorio se encontraría por arriba de 22,5 °C.
- En la República Dominicana las condiciones se tornarían hacia temperaturas medias anuales por arriba de los 25 °C.

Las características principales en 2070 serían (véase el mapa III.3.D):

- En la costa de Guerrero en México el área con más de 30 °C se incrementaría.
- Un gran porcentaje de la península de Yucatán estaría entre los 27,5 °C y 30 °C, incluyendo Tabasco y el sur de Veracruz.
- Aparecería una zona al oriente de Cuba con temperaturas entre 27,5 °C y 30 °C.

Las características principales en 2080 (véase el mapa III.3.E) serían las siguientes:

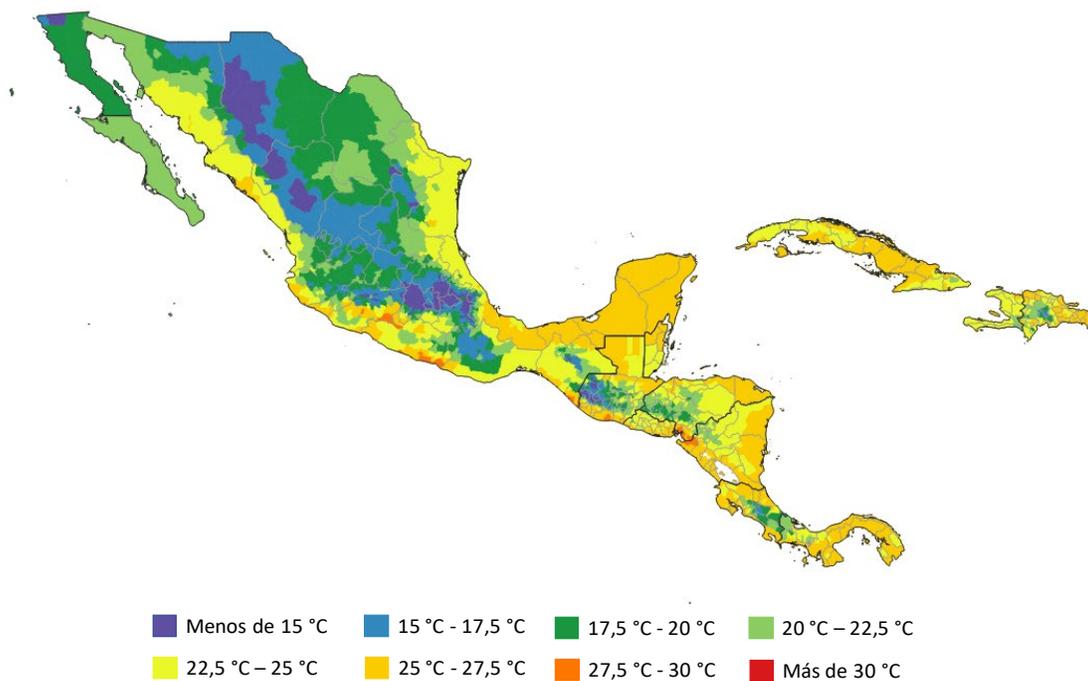
- En Michoacán, México, aumentarían los municipios con temperaturas por arriba de los 30 °C.
- Las condiciones de la península de Yucatán se extenderían hacia el Petén en Guatemala y abarcarían un mayor territorio de Veracruz en México.
- Habría temperaturas entre 27,5 °C y 30 °C desde la costa de Chiapas en México hasta Guanacaste en Costa Rica, en el Pacífico.
- Habría un pequeño número de municipios por debajo de los 15 °C.
- Los departamentos centrales de Centroamérica se tornarían hacia temperaturas superiores de 22,5 °C, con excepción del altiplano occidental de Guatemala y el valle central de Costa Rica.
- El rango de temperaturas en la República Dominicana iría desde los 17,5 ° hasta los 30 °C.

Mapa III.3

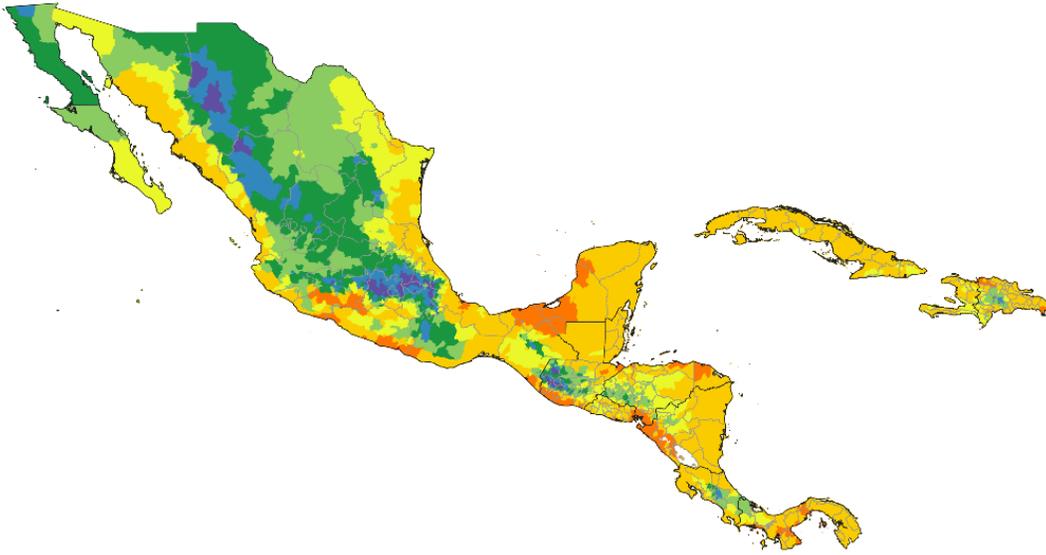
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: temperatura media por municipio y por período, climatología 1960-1990 y escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080

(En grados centígrados)

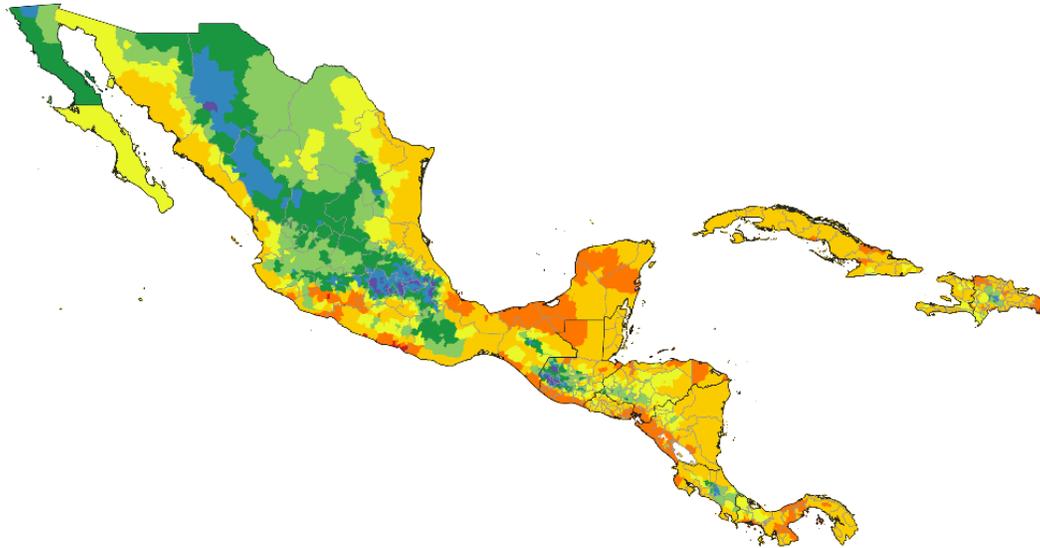
A. Período 1960-1990



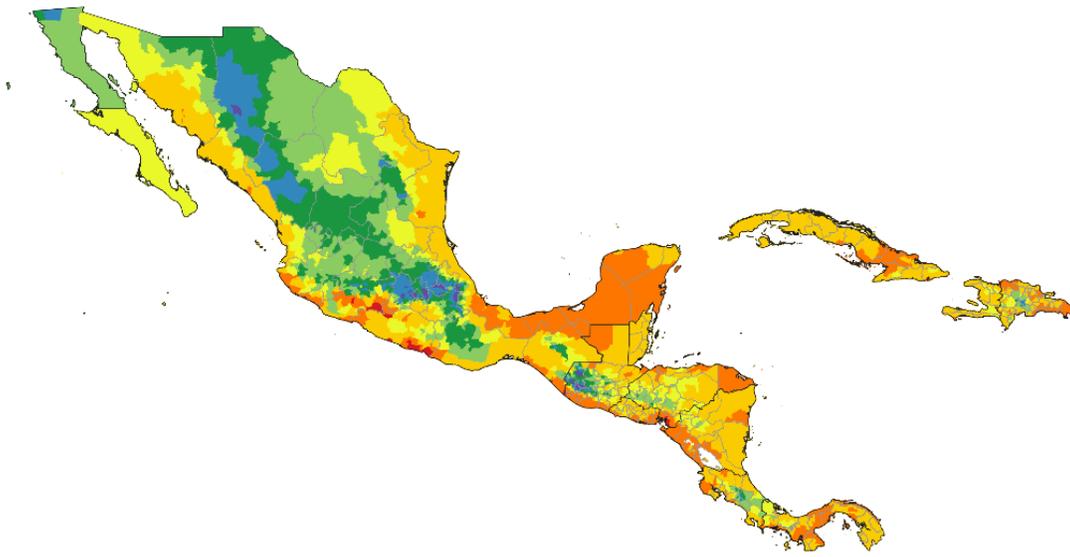
B. Escenario RCP4.5, corte 2030



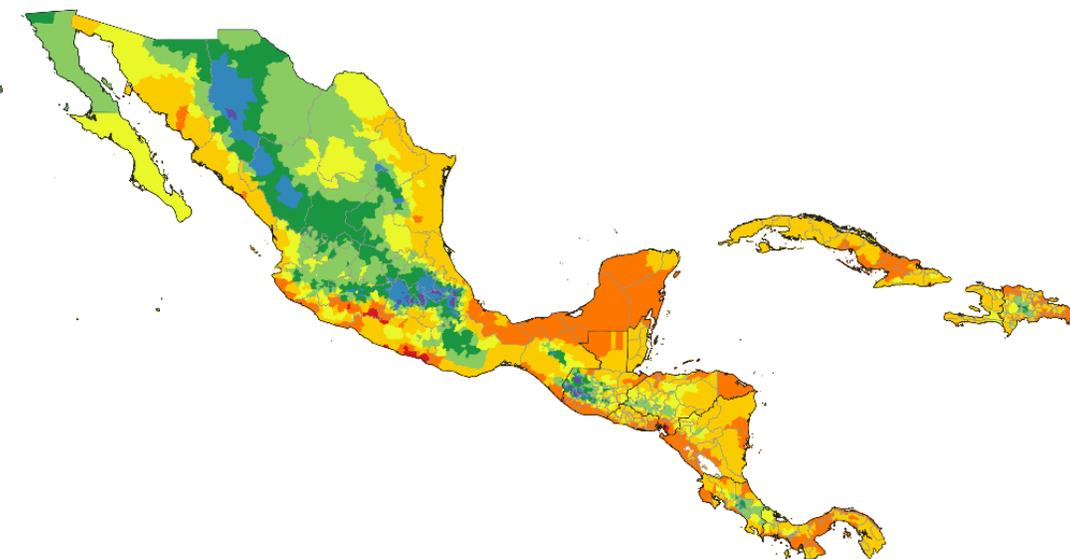
C. Escenario RCP4.5, corte 2050



D. Escenario RCP4.5, corte 2070



E. Escenario RCP4.5, corte 2080



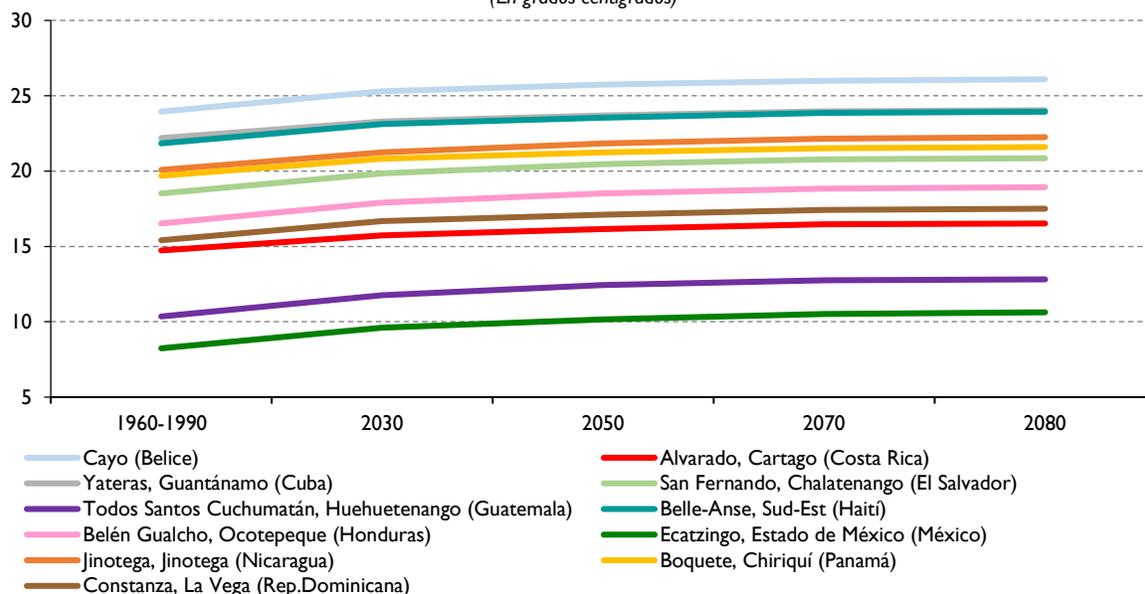
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS-Climate), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

Nota: Los datos por municipio se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de aproximadamente 1 km para cada área correspondiente. En el caso de Belice es a nivel de distrito debido a la disponibilidad de información. El escenario es el ensamble de los modelos CESMI_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR.

En el gráfico III.16 se muestra la trayectoria de temperatura media anual de los municipios que terminarían con el valor más bajo por país en el corte 2080 en el escenario RCP4.5. El rango de estos municipios con la temperatura más baja fue de 8,24 °C en Ecatzingo, Estado de México, a 23,95 °C en el distrito de Cayo, en Belice, en 1960-2000. En 2080 sería de

10,63 °C en Ecatingo, a 26,09 °C en Cayo. En general en este escenario y en este grupo de municipios seleccionados se ve un fuerte aumento del valor de temperatura en 2030 con respecto a la climatología base, sin embargo, partir de ese corte los aumentos se suavizarían.

Gráfico III.16
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios con temperatura más baja al final del siglo por país, climatología 1960-1990 y escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
 (En grados centígrados)



Fuente: Elaboración propia con datos de WorldClim [en línea] <http://www.worldclim.org> y CCAFS-Climate, “Downscaled Data Portal GCM”, Programa de Investigación sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS) de CGIAR [en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

Nota: Los datos por municipio se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de aproximadamente 1 km para cada área correspondiente. En el caso de Belice es a nivel Distrito debido a la disponibilidad de información. El escenario es el ensamble de los modelos CESM1_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR.

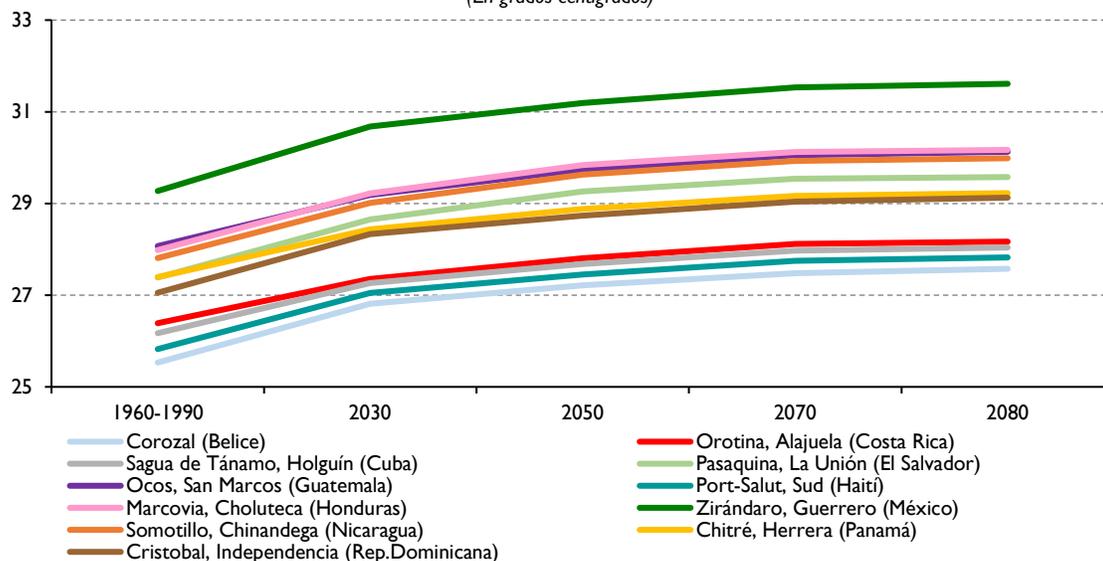
En el gráfico III.17 se presentan los municipios que terminarían con las temperaturas medias anuales más altas en 2080 en el escenario RCP4.5. También se observan aumentos mucho más elevados en 2030, a partir de este corte los aumentos serían menores en estos municipios, si bien serían más elevados que en los municipios con temperaturas más bajas. El municipio de Zirándaro, en Guerrero (México), sería el más cálido y alcanzaría los 31,61 °C. Habría una mayor diferencia entre este municipio y los municipios con temperaturas altas del resto de los países de la región. Le seguirían en temperatura los municipios de Ocos (Guatemala) y Marcovia (Honduras), que pasarían de 28 °C a 30,1 °C hacia fines del siglo XXI.

En el mapa III.4 se muestra el análisis de anomalías de la temperatura media anual por corte bajo el escenario RCP4.5. Este análisis muestra las regiones que serían más impactadas y podría ayudar a distinguir mejores políticas de adaptación en distintos sectores focalizadas por regiones. A continuación, se describen las diferentes anomalías por regiones.

En el mapa III.4.A se muestran las anomalías de 2030. Habría menor incremento en el sur de Centroamérica y el Caribe y un mayor incremento en el norte de México. Se observa que para 2030 las áreas al norte de los estados de Sonora y Chihuahua tendrían incrementos de temperatura entre 2 °C a 2,4°C. El resto de norte de México —desde Sonora hasta Nuevo León hacia Zacatecas— tendría incrementos entre 1,6 °C a 2 °C. El área desde el centro-norte de

México hasta Honduras experimentaría incrementos de entre 1,2 °C a 1,6 °C, al igual que Haití y la República Dominicana. En Nicaragua, Costa Rica, Panamá, Cuba, la costa del Pacífico en Guatemala y El Salvador los incrementos serían de entre 0,8 °C y 1,2 °C; en este rango se encuentra la anomalía global que ha registrado la última década. Esta descripción es consistente con lo que se mostró a nivel departamental y que ha sucedido en las últimas décadas al marcarse las mismas regiones y con anomalías cercanas al período 2011-2018.

Gráfico III.17
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios con temperatura más alta al final del siglo por país, climatología 1960-1990 y escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
 (En grados centígrados)



Fuente: Elaboración propia con datos de WorldClim [en línea] <http://www.worldclim.org> y CCAFS-Climate, "Downscaled Data Portal GCM", Programa de Investigación sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFA) de CGIAR [en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

Nota: Los datos por municipio se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de aproximadamente 1 km para cada área correspondiente. En el caso de Belice es a nivel Distrito debido a la disponibilidad de información. El escenario es el ensamble de los modelos CESM1_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR.

Para 2050 el centro de México y un área que abarca Chiapas, Tabasco en México; el Petén, parte del altiplano occidental guatemalteco y algunos municipios pertenecientes al arco seco de Centroamérica aumentarían su temperatura al mismo nivel de lo que lo haría el norte de México. La parte del Pacífico de Nicaragua tendría las mismas características de calentamiento que el norte de Centroamérica. En el occidente de Cuba, Haití y la República Dominicana también habría un incremento de temperatura mayor (véase el mapa III.4.B).

En el corte de 2070 el incremento de temperatura continuaría, en términos espaciales de una forma similar al 2050. En Haití y la República Dominicana habría regiones con incrementos similares a los que ocurren en México y el norte de Centroamérica. En 2080 la mayor severidad del cambio climático en el escenario RCP4.5, se daría en el norte de México con anomalías de 2,8 °C a 3,2 °C con respecto al período 1960-1990, entre 2,4 °C a 2,8 °C en el centro de México y entre 2 °C a 2,4 °C en las costas y en el sur de México. Se esperaría un incremento de 2 °C a 2,4 °C en Belice, Guatemala, El Salvador, gran parte de Honduras, el occidente de Nicaragua, Haití y el occidente de la República Dominicana. Algunos municipios

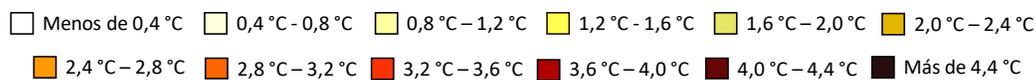
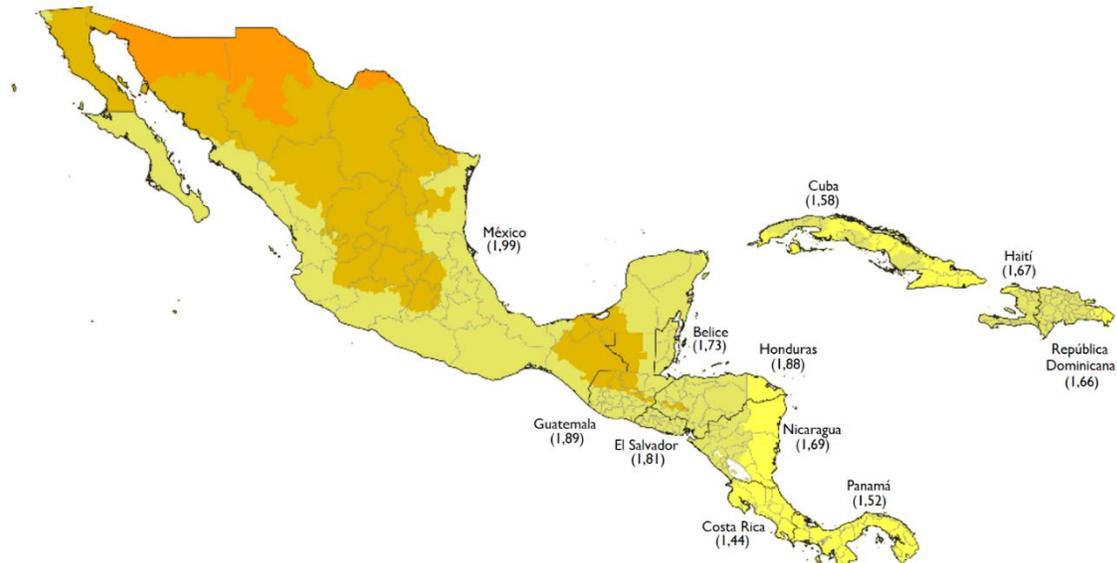
de Guatemala y Honduras experimentarían una mayor anomalía. La zona del Atlántico de Honduras y de Nicaragua, así como Costa Rica, Panamá, Cuba y el oriente de la República Dominicana experimentarían las menores alzas con un rango de 1,6 °C a 2 °C (véanse los mapas III.4.C y III.4.D).

Mapa III.4
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: anomalía de temperatura media por municipio, escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
(En grados centígrados)

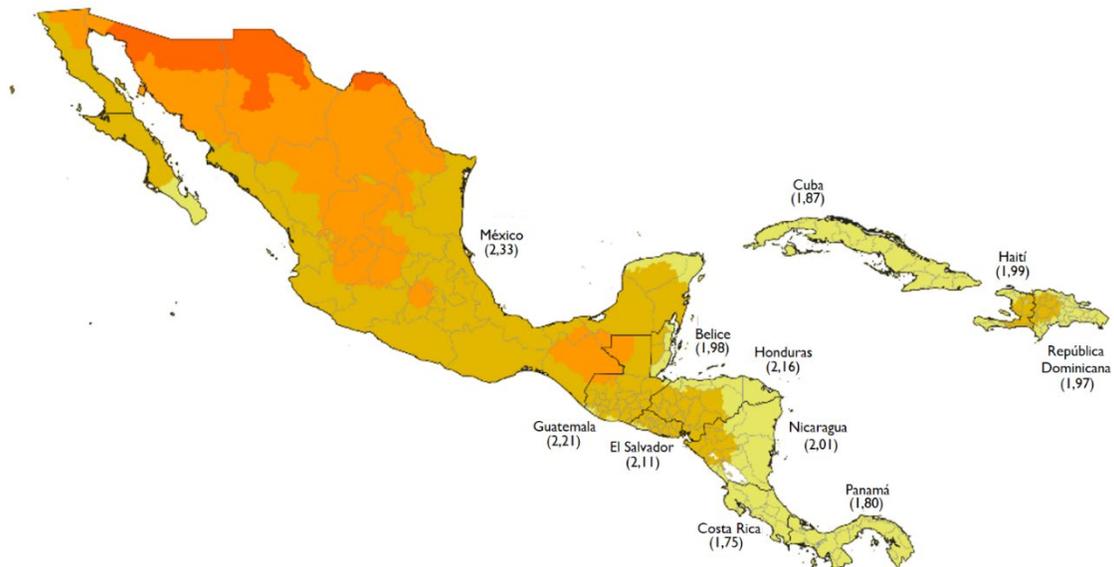
A. Escenario RCP4.5 2030 en comparación con 1960-1990



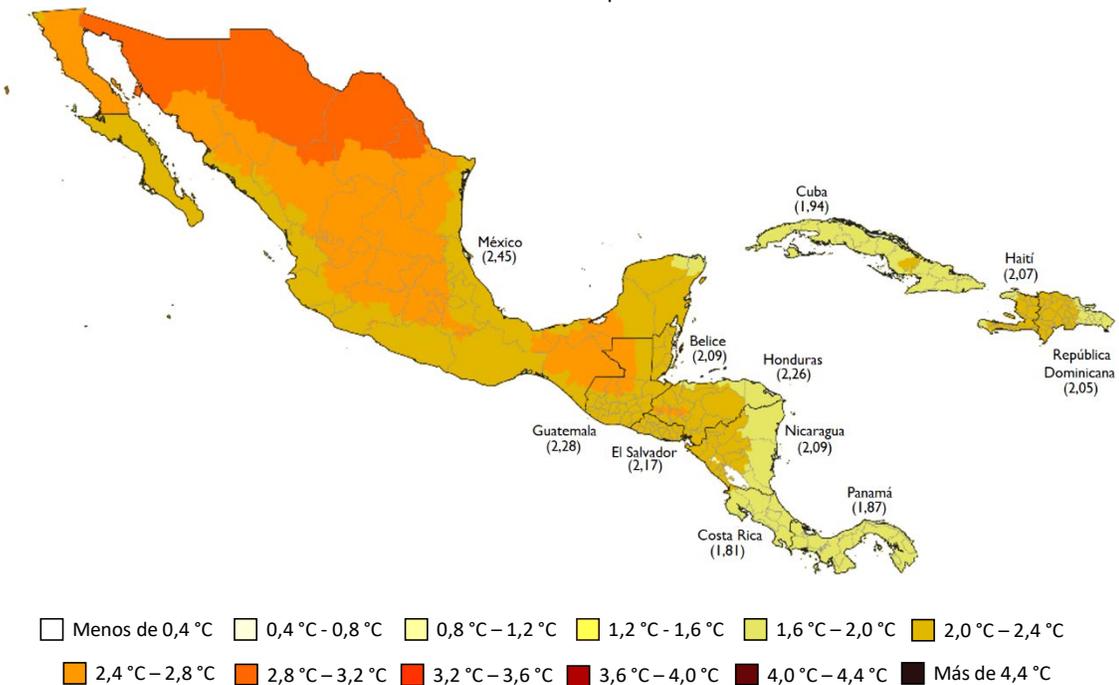
B. Escenario RCP4.5 2050 en comparación con 1960-1990



C. Escenario RCP4.5 2070 en comparación con 1960-1990



D. Escenario RCP4.5 2080 en comparación con 1960-1990



Fuente: Elaboración propia con datos de WorldClim [en línea] <http://www.worldclim.org> y CCAFS-Climate, "Downscaled Data Portal GCM", Programa de Investigación sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS) de CGIAR [en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

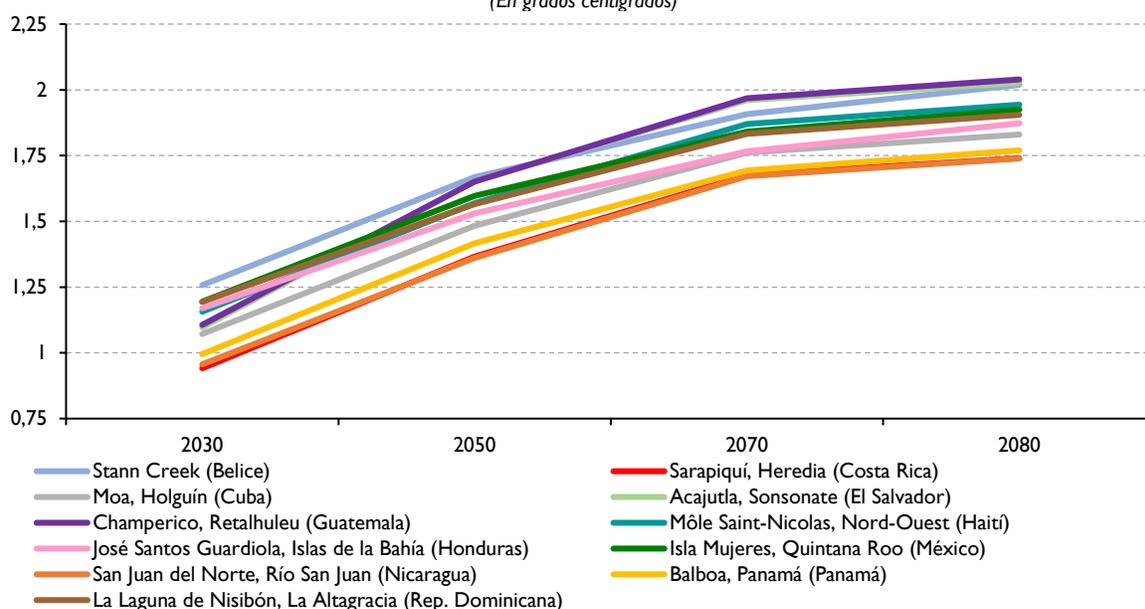
Nota: Los datos por municipio se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de aproximadamente 1 km para cada área correspondiente. En el caso de Belice es a nivel Distrito debido a la disponibilidad de información. El escenario es el ensamble de los modelos CESM1_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR.

Se obtuvieron las anomalías nacionales con base en los promedios de las anomalías de los municipios. Para 2030 las anomalías irían de 1,47 °C en México a 0,99 °C en Costa Rica. Para 2080 los promedios de las anomalías de los municipios irían de 2,45 °C en México a 1,81 °C en Costa Rica (véase el mapa III.4).

A continuación se muestra un ejercicio seleccionando los municipios con mayor anomalía y menor anomalía por país en 2080 en el escenario RCP4.5. Este ejercicio es un ejemplo de la información que se puede obtener por municipio, así como para diferenciar las trayectorias de los municipios con menor (véase el gráfico III.18) y mayor anomalía (véase el gráfico III.19). Este es un primer paso para identificar características en común en análisis posteriores e identificar los municipios con mayor o menor impacto.

En el gráfico III.18 se observa que las anomalías de temperatura de los municipios seleccionados con menor incremento por país serían muy cercanas entre sí. En 2030 la anomalía iría de 0,94 °C en Sarapiquí, Heredia (Costa Rica), a 1,26 °C en el distrito de Stann Creek (Belice). En 2080 las anomalías para este grupo de municipios irían de 1,74 °C en San Juan del Norte, Río San Juan (Nicaragua), a 2,04 °C en Champerico, Retalhuleu (Guatemala). Estos municipios con la menor anomalía por país se encuentran en costas o cercanos a ella, o en islas como Islas Mujeres y José Santos Guardiola.

Gráfico III.18
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios con anomalía de temperatura media más baja al final del siglo por país, escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
 (En grados centígrados)



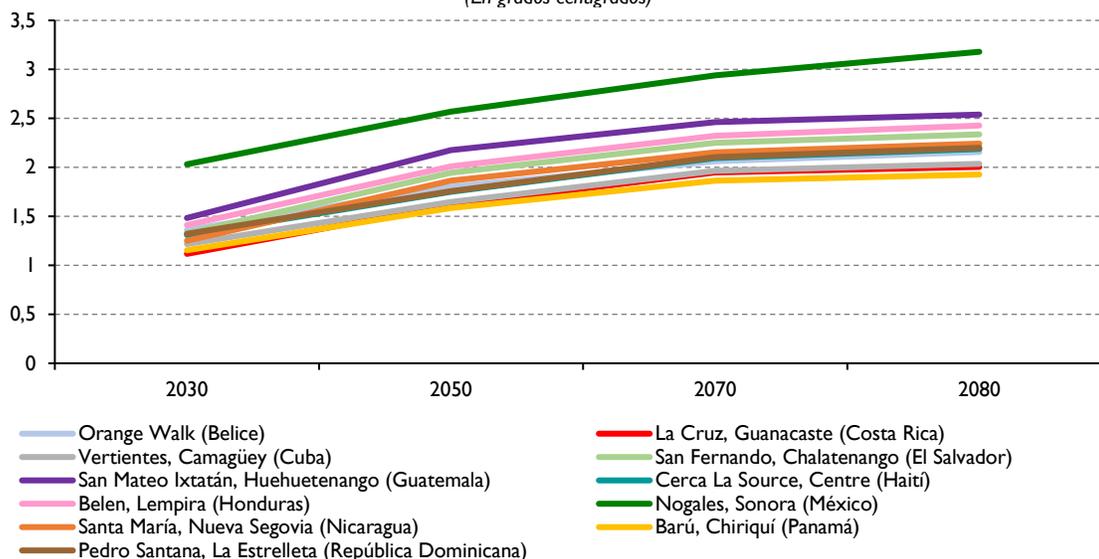
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS-Climate), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

Nota: Los datos por municipio se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de aproximadamente 1 km para cada área correspondiente. En el caso de Belice es a nivel "distrito" debido a la disponibilidad de información. El escenario es el ensamble de los modelos CESMI_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR.

En el gráfico III.19 se muestra un mayor rango entre los municipios con la anomalía más grande por país en el escenario RCP4.5. En 2030 iría de 2,03 °C en Nogales, Sonora (México), a 1,12 °C en La Cruz, Guanacaste (Costa Rica). En 2080 las anomalías serían de

3,18 °C en Nogales (el incremento más grande en este escenario) a 1,93 °C en Barú, Chiriquí (Panamá). Para estos municipios no hay una característica en común, pero algunos tienen altitudes mayores a las medias de sus países.

Gráfico III.19
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios con anomalía de temperatura media más alta al final del siglo por país, escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
 (En grados centígrados)



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS-Climate), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

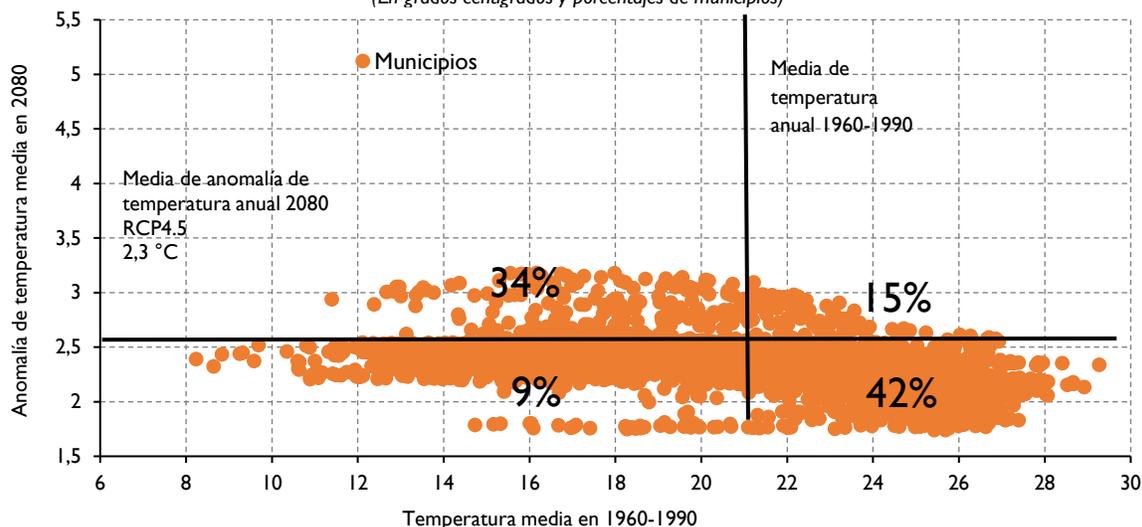
Nota: Los datos por municipio se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de aproximadamente 1 km para cada área correspondiente. En el caso de Belice es a nivel Distrito debido a la disponibilidad de información. El escenario es el ensamble de los modelos CESM1_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR.

Otro aspecto interesante para identificar zonas vulnerables es relacionar los niveles de temperatura media anual de la climatología 1960-1990 por municipios con sus anomalías de 2080. Esta relación indica qué niveles de temperatura serían más o menos impactados. En el gráfico III.20 se muestra esta relación, donde se eligió el nivel de temperatura media de 21,3 °C como valor medio de la región en 1960-1990 y 2,3 °C como valor medio de las anomalías de los municipios en 2080 en el escenario RCP4.5. En el gráfico no se muestra una relación significativa entre niveles, pero se observa que el 42% del total de municipios que tienen temperaturas superiores a los 21,3 °C en la climatología base tendrían anomalías por debajo de 2,3 °C y solo el 15% tendrían aumentos superiores. Entre tanto el 34% de los municipios con temperaturas por debajo de los 21,3 °C tendrían aumentos superiores a los 2,3 °C y el 9% por debajo de ese umbral.

En el gráfico III.20 se muestra que bajo el escenario RCP4.5 aquellos municipios con temperatura por debajo de la media de la región tendrían una mayor anomalía y que aquellos con temperaturas por arriba de la media es más probable que tengan anomalías menores. Este análisis podría ser una opción para crear medidas de adaptación para municipios con las temperaturas más altas pensando en un nivel máximo de 2,3 °C (anomalía media en 2080) y para municipios donde se encuentran los municipios con temperaturas altas y mayores anomalías. En tanto que para municipios con temperaturas menores realizar otras medidas de

adaptación que podrían ser en dos vías para el grupo de municipios con anomalías altas y las que no superarían los 2,3 °C. Esto implicaría observar sus características socioeconómicas y geográficas para determinar las mejores medidas.

Gráfico III.20
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: climatología base de temperatura media y sus anomalías, por municipios, 1960-1990 y escenario RCP4.5, corte 2080
 (En grados centígrados y porcentajes de municipios)



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS-Climate), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

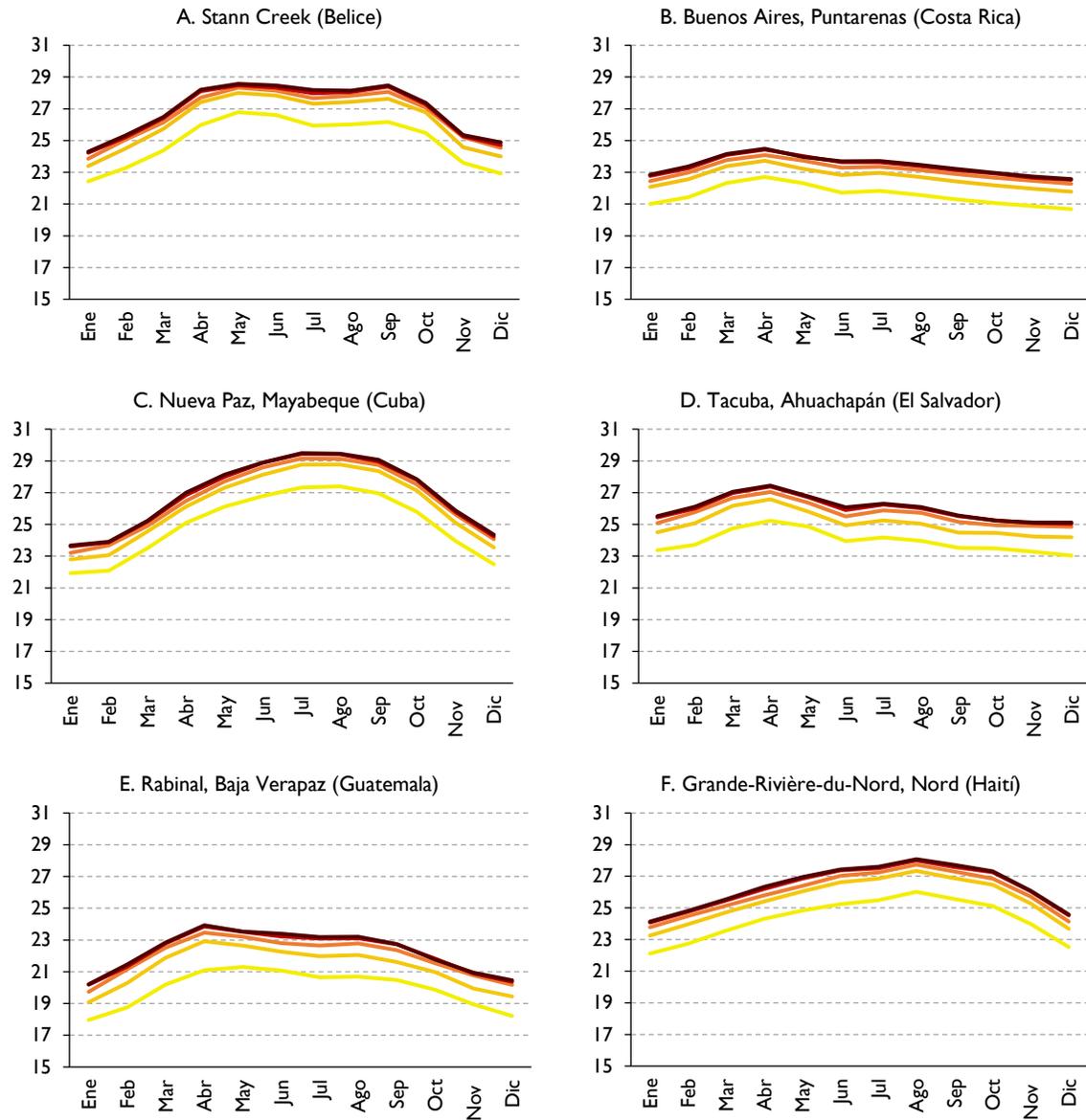
Nota: Los datos por municipio se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de aproximadamente 1 km para cada área correspondiente. En el caso de Belice es a nivel Distrito debido a la disponibilidad de información. El escenario es el ensamble de los modelos CESM1_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR.

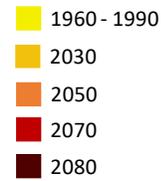
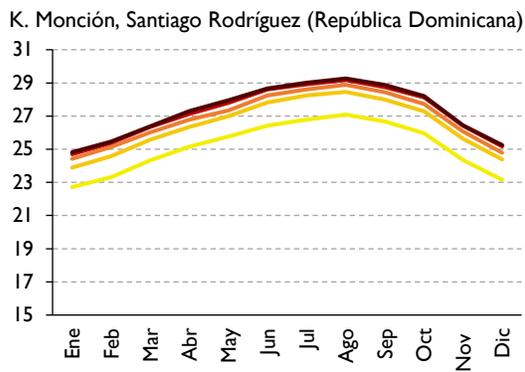
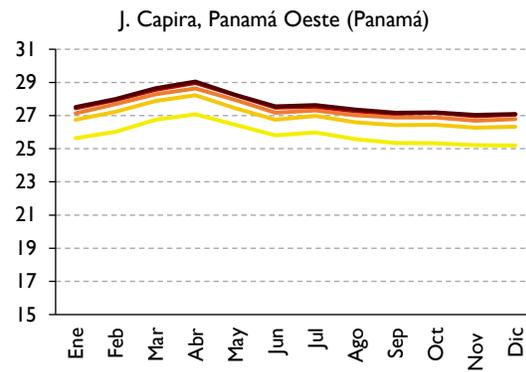
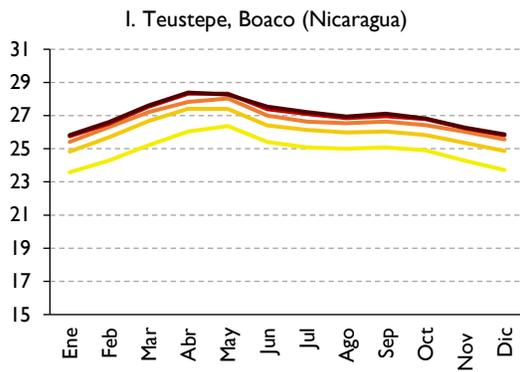
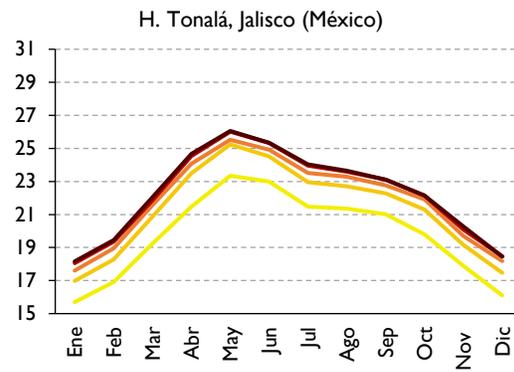
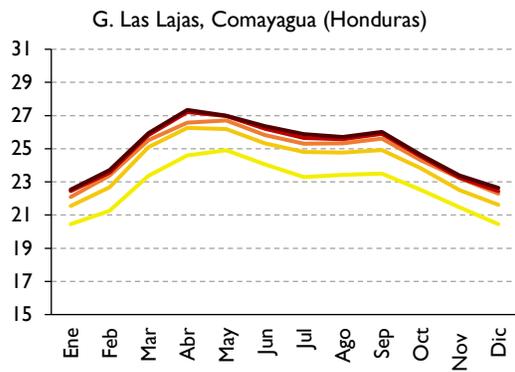
a) *Temperatura media mensual. Escenario RCP4.5 por municipio seleccionados.*

En el gráfico III.21 se muestra el comportamiento de la temperatura media mensual con cambio climático de 11 municipios de cada país, que representa la mediana de temperatura anual en 2080 en el escenario RCP4.5. Se observa que no hay un cambio importante del patrón de temperatura mensual, pero las magnitudes de los desplazamientos son significativas en algunos meses dependiendo del municipio.

En los municipios seleccionados el incremento más grande se da en 2030. Entre 2070 y 2080 ya no se tendrían incrementos tan significativos. En el caso de Stann Creek (Belice), habría un mayor aumento de temperatura entre julio y septiembre. En el cantón de Buenos Aires, Puntarenas (Costa Rica), mayo y junio podrían tener un mayor aumento. En Rabinal, Baja Verapaz (Guatemala), habría un pico más alto de temperatura en abril con respecto a los otros meses. En Las Lajas, Comayagua (Honduras) también se marcarían dos picos de temperatura en abril y septiembre. En Teustepe, Boaco (Nicaragua), abril también se marcaría como el mes más caliente del año. El resto de los ejemplos no muestran cambios importantes en la forma del comportamiento de la temperatura.

Gráfico III.21
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: temperatura media de municipios seleccionados, por mes, climatología 1960-1990 y escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
 (En grados centígrados)





Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS-Climate), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

Nota: Los datos por municipio se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de aproximadamente 1 km para cada área correspondiente. En el caso de Belice es a nivel Distrito debido a la disponibilidad de información. El escenario es el ensamble de los modelos CESMI_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR.

3. Escenario RCP8.5

Bajo el escenario más extremo de cambio climático se visualizan en el mapa III.5, cambios acelerados. Desde 2030, los cambios relevantes son (véase el mapa III.5.B):

- En general temperaturas entre 25 °C a 30 °C se presentarían en casi toda la superficie costera de la región.
- En el norte de México una gran proporción de municipios tendrían temperaturas medias anuales entre 20 °C a 22,5 °C.
- Aumentaría significativamente los municipios con temperaturas medias anuales superiores de 27,5 °C, en México en los estados de Michoacán, Guerrero, en el sur del golfo de México, la península de Yucatán, también toda la costa del Pacífico —desde Chiapas en México hasta Guatemala— y en la costa del Pacífico de Honduras y Nicaragua. Aparecerían algunos municipios con este rango en la costa del Caribe de Honduras y en la península de Azuero hasta la provincia de Colón, en Panamá. En la República Dominicana también se tendrían ya municipios en este rango en las provincias de Altagracia y Monte Cristi.
- Aparecerían zonas con temperaturas por arriba de los 30 °C en Michoacán y en la costa de Guerrero en México.
- En general las regiones con temperatura media anual menores a 15 °C disminuirían de manera importante.
- En Cuba y Haití el rango principal de temperatura se coloca entre 25 °C y 27,5 °C.

Las características principales en 2050 (véase el mapa III.5.C) serían:

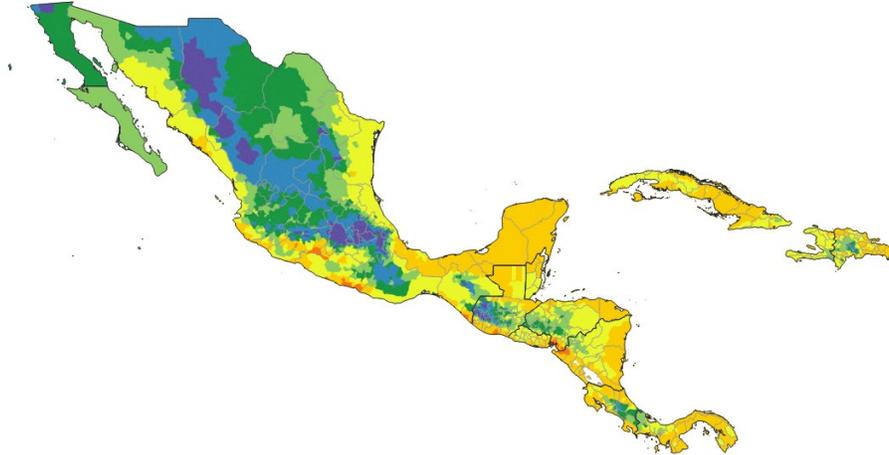
- Los municipios con temperaturas por debajo de los 17,5 °C disminuirían en gran proporción.
- En la península de Yucatán aumentaría la superficie con temperatura media anual en el rango de 27,5 °C a 30 °C y se extendería hacia Veracruz en México, el norte de Belice y El Petén e Izabal en Guatemala.
- Los niveles de temperatura de la península de Azuero en Panamá (arco seco) se extenderían a gran parte de ese país.
- Municipios del centro de Honduras se encontrarían por arriba de 22,5 °C.
- En las costas de la República Dominicana las condiciones se tornan hacia temperaturas medias anuales por arriba de los 27,5 °C.

Las características principales en 2070 (véase el mapa III.3.D) serían:

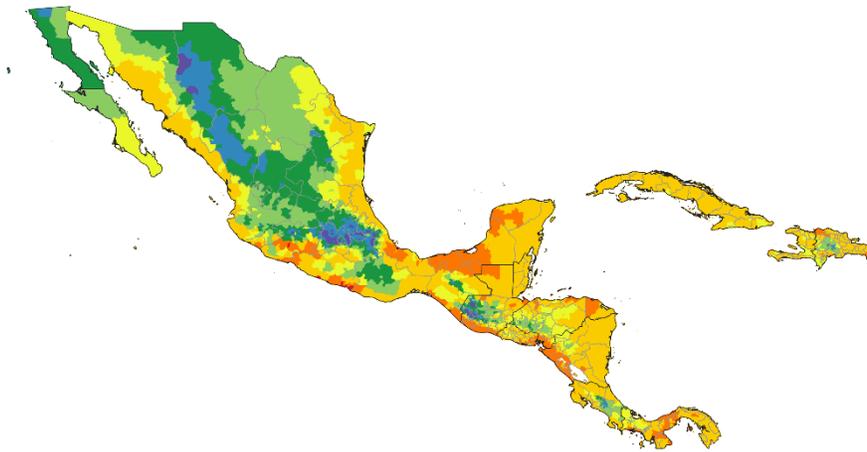
- En mayor parte de la costa de la región dominarían temperaturas superiores de los 27,5 °C.
- En Michoacán, en las costas de Guerrero, Campeche, Tabasco y Chiapas en México, El Petén y el Pacífico de Guatemala, y Nicaragua se extenderían las zonas con más de 30 °C.
- En Nicaragua, Cuba, Panamá, Guatemala, El Salvador, la República Dominicana y el sur de México dominarían temperaturas medias anuales entre 27,5 °C y 30 °C.

Mapa III.5
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: temperatura media por municipio y período,
climatología 1960-1990 y escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
(En grados centígrados)

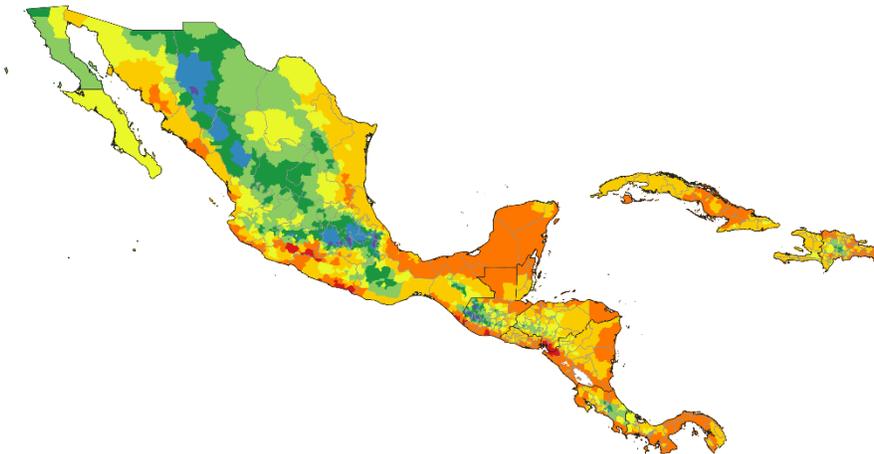
A. 1960-1990



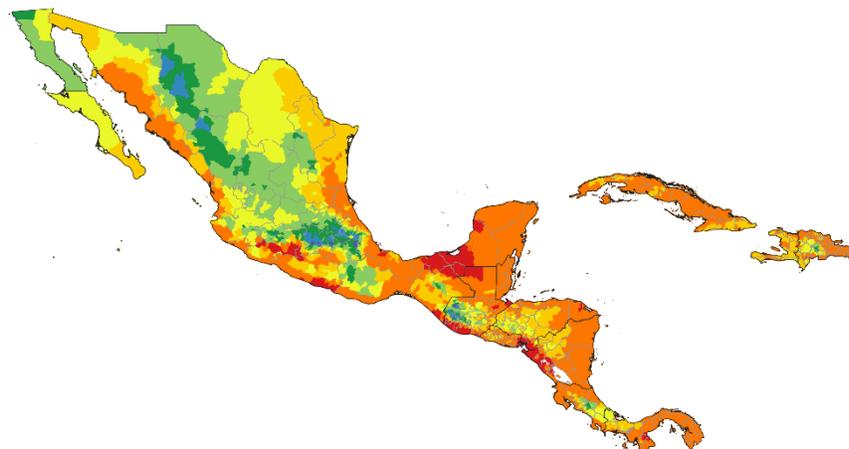
B. Escenario RCP8.5, corte 2030



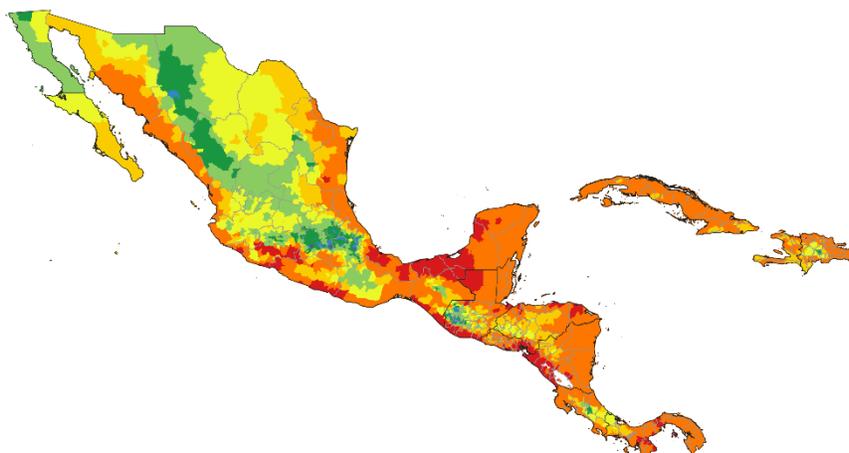
C. Escenario RCP8.5, corte 2050



D. Escenario RCP8.5, corte 2070



E. Escenario RCP8.5, corte 2080



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS-Climate), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

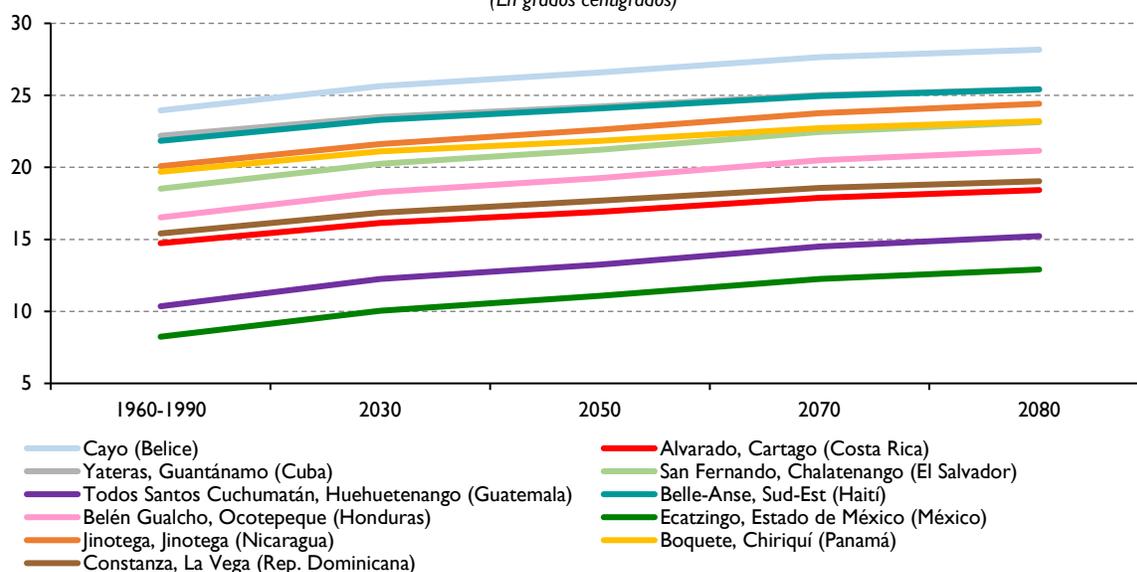
Nota: Los datos por municipio se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de aproximadamente 1 km para cada área correspondiente. En el caso de Belice es a nivel Distrito debido a la disponibilidad de información. El escenario es el ensamble de los modelos CESM1_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR.

Las características principales en 2080 (véase el mapa III.5.E) serían:

- Desde el sur de México hasta Panamá y en Cuba, Haití y la República Dominicana dominarían temperaturas por arriba de los 27,5 °C.
- En el altiplano occidental guatemalteco quedarían dos municipios con temperatura media por debajo de 15 °C y en México serían diez municipios.
- En el centro de Guatemala y Honduras las temperaturas predominantes estarían entre 25 °C y 27,5 °C.
- En el norte y en el centro de México las temperaturas comenzarían a generalizarse por arriba de los 22,5 °C, aunque aún hay regiones por debajo de ese nivel.

En el gráfico III.22 se muestra la trayectoria de temperatura media anual de los municipios que terminarían con el valor más bajo por país en el corte 2080 en el escenario RCP8.5. Se observa que en México se encuentra el municipio con la temperatura media anual más baja de la región, Ecatzingo, Estado de México, que en 1960-1990 tenía una temperatura media anual de 8,24 °C, ya estaría por arriba de los 10 °C en 2030 y terminaría con un valor de 12,9 °C en 2080. El distrito de Cayo (Belize) sería el de mayor valor en este grupo de municipios seleccionados donde en 1960-1990 tenía un valor de 23,95 °C, hacia 2030 superaría los 25,6 °C y terminaría en 2080 con 28,2 °C. En general en este escenario y en este grupo de municipios se esperaría un fuerte aumento del valor de temperatura desde 2030 con respecto a la climatología base y continuaría con esa tendencia hasta 2080.

Gráfico III.22
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios con temperatura más alta al final del siglo por país, climatología 1960-1990 y escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
 (En grados centígrados)

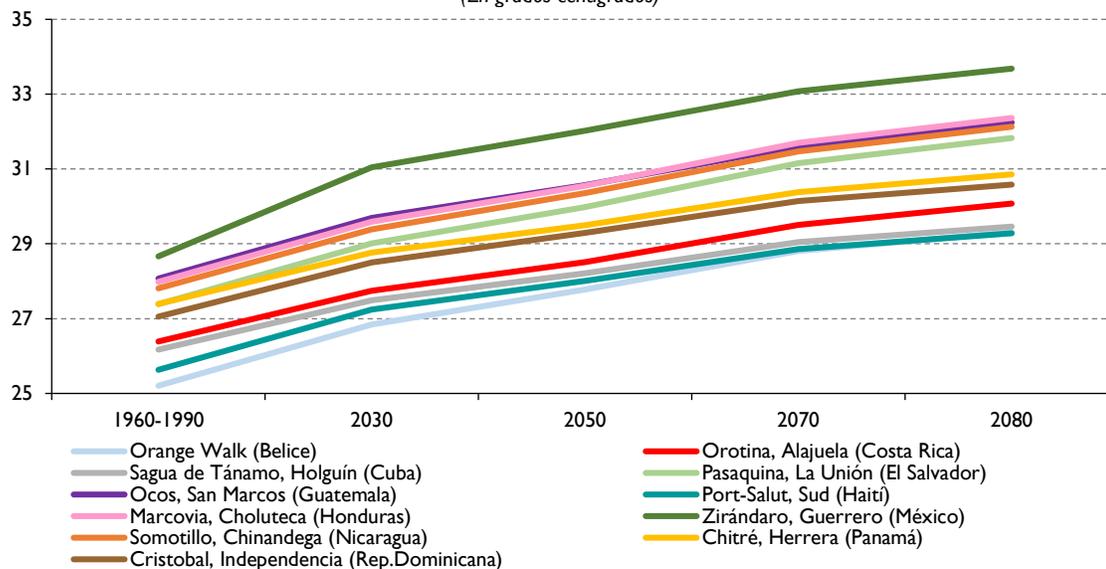


Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS-Climate), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

Nota: Los datos por municipio se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de aproximadamente 1 km para cada área correspondiente. En el caso de Belize es a nivel Distrito debido a la disponibilidad de información. El escenario es el ensamble de los modelos CESM1_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR.

En el gráfico III.23 se presentan los municipios que terminarían con las temperaturas medias anuales más altas por país en 2080 en el escenario RCP8.5. Se observan aumentos mucho más elevados en 2030 y el incremento seguiría siendo significativo hasta 2080. El municipio de Zirándaro en Guerrero (México) sería el más cálido (como en RCP4.5) y pasaría de 28,7 °C en 1960-1990 a 33,7 °C en 2080. En este escenario se muestra que los países de Centroamérica tendrían un aumento acelerado de temperatura. En el caso de Marcovia en Choluteca (Honduras), que sería el departamento con la temperatura más alta de Centroamérica en 2080, pasaría de 27,9 °C en la climatología base a 32,4 °C en 2080.

Gráfico III.23
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios con temperatura más baja al final del siglo por país, climatología 1960-1990 y escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
 (En grados centígrados)



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS-Climate), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

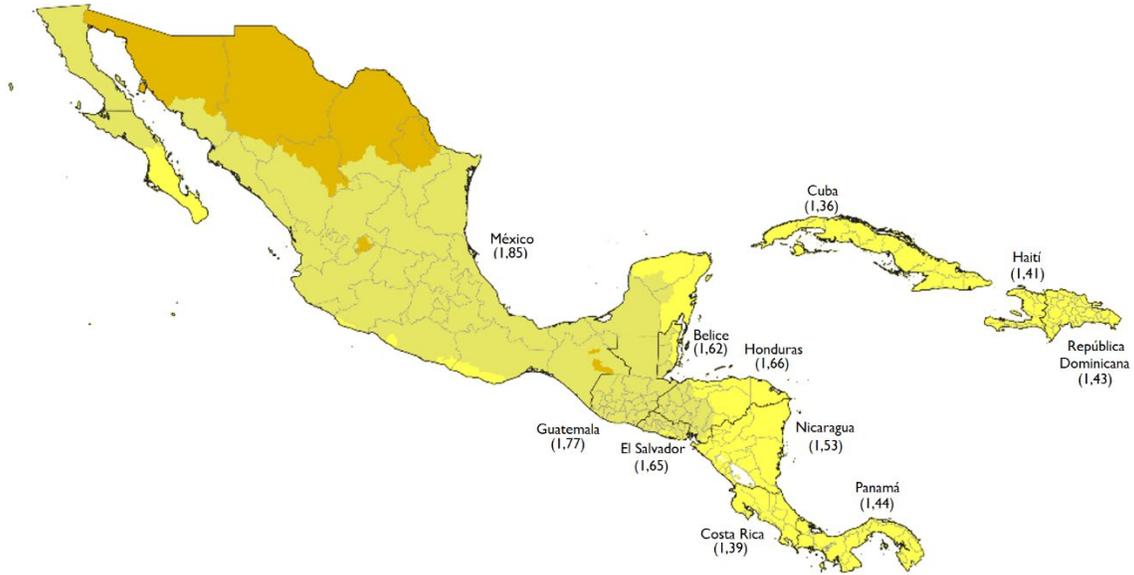
Nota: Los datos por municipio se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de aproximadamente 1 km para cada área correspondiente. En el caso de Belice es a nivel Distrito debido a la disponibilidad de información. El escenario es el ensamble de los modelos CESMI_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR.

En el mapa III.6 se muestra el análisis de anomalías de la temperatura media anual por corte bajo el escenario RCP8.5. En el mapa III.6.A se muestra la anomalía de 2030, a diferencia del escenario RCP4.5, los incrementos se encuentran en un rango superior en casi todo el territorio, que iría desde 1,2 °C a 2,4 °C. No obstante, se mantendrían las características espaciales de los incrementos. Menor incremento en el sur de Centroamérica y el Caribe y el mayor incremento en el norte de México. Los mapas indican que las áreas que abarcan los estados de Sonora, Chihuahua, Coahuila y parte de Nuevo León y Durango en México tendrían incrementos de temperatura de entre 2 °C a 2,4 °C.

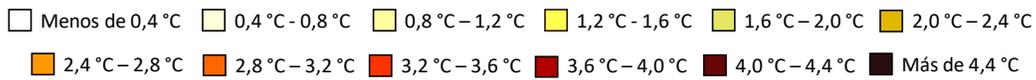
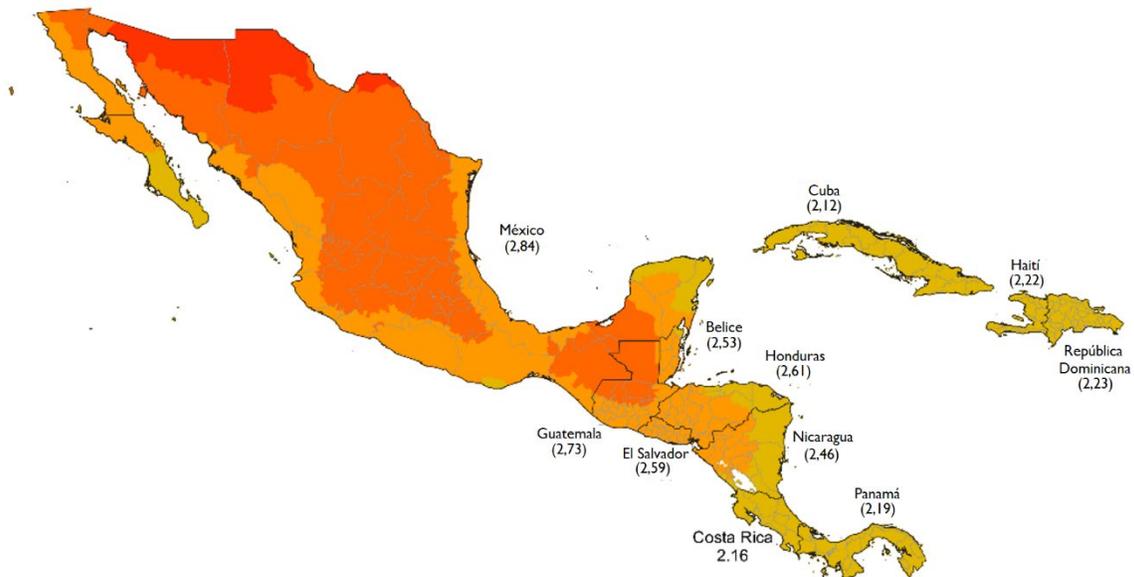
El resto de México, con excepción de la zona sur de la península de Baja California y parte de la península de Yucatán, Guatemala, Belice, El Salvador y el occidente de Honduras tendría incrementos entre 1,6 °C a 2 °C. El resto de la región tendría anomalías ente 1,2 °C y 1,6 °C. Lo que significa que gran parte del territorio habría superado el objetivo de 1,5 °C, con consecuencias adversas para las poblaciones vulnerables que dependen de los medios de vida agrícola o costeros por daños a ecosistemas marinos dañando la productividad costera; afectaciones en la salud humana por posible aumento en la morbilidad por golpes de calor; y pérdida de rendimientos en granos básicos (IPCC, 2018).

Mapa III.6
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: anomalía de temperatura media por municipio y periodo, climatología 1960-1990 y escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
(En grados centígrados)

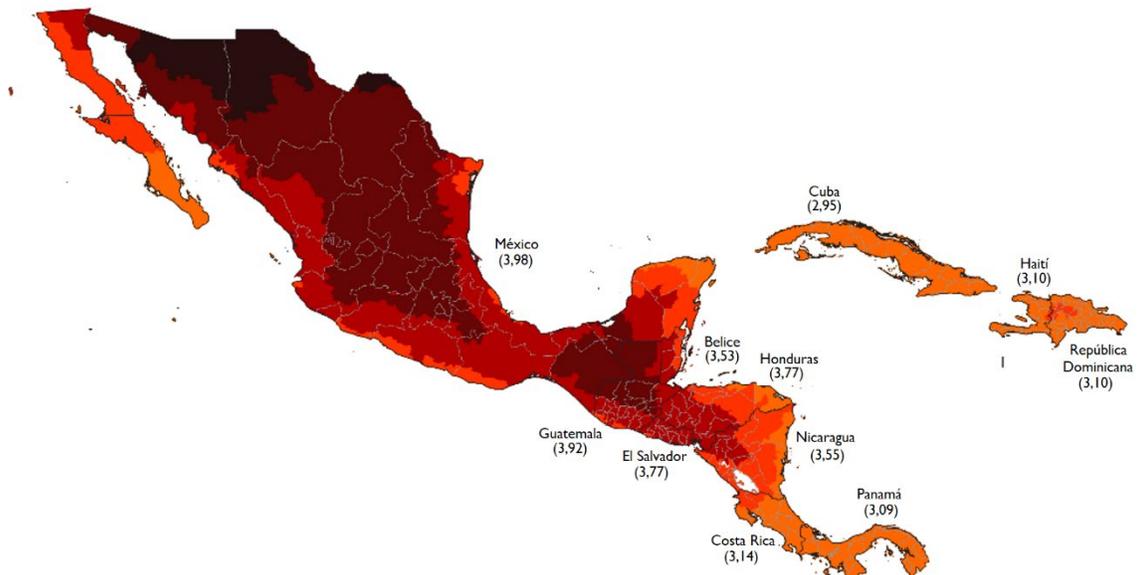
A. Escenario RCP8.5, corte 2030 en comparación con 1960-1990



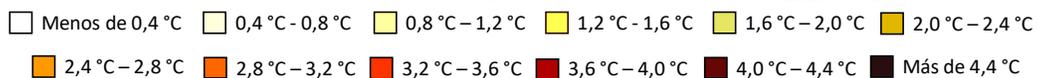
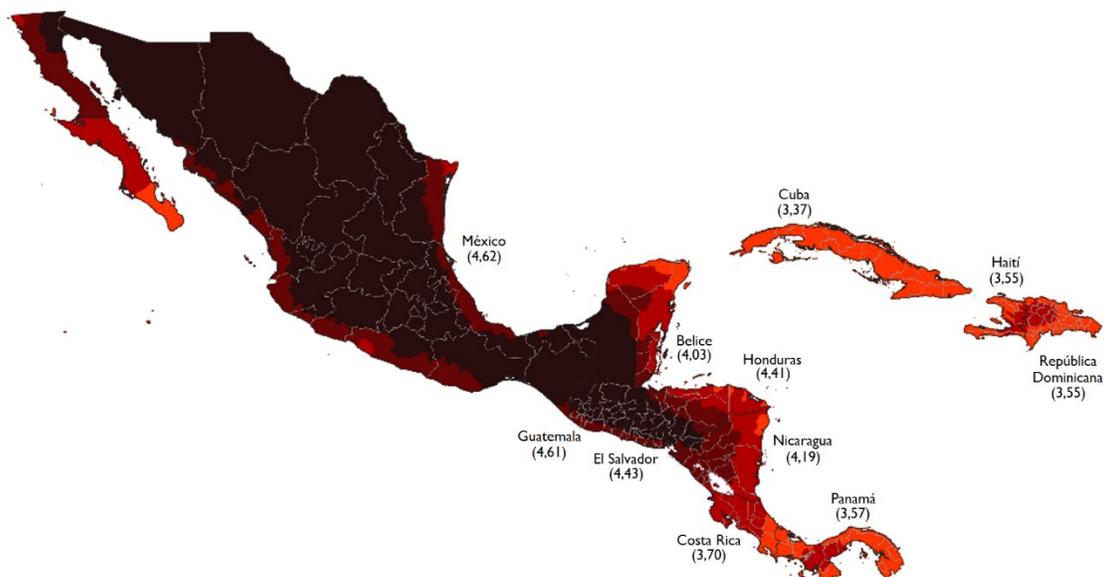
B. Escenario RCP8.5, corte 2050 en comparación con 1960-1990



C. Escenario RCP8.5, corte 2070 en comparación con 1960-1990



D. Escenario RCP8.5, corte 2080 en comparación con 1960-1990



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS-Climate), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

Nota: Los datos por municipio se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de aproximadamente 1 km para cada área correspondiente. En el caso de Belice es a nivel Distrito debido a la disponibilidad de información. El escenario es el ensamble de los modelos CESMI_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR.

En 2050 el norte y centro de México además del área que abarca Chiapas y Tabasco en el sur de México, El Petén y parte del Altiplano Occidental en Guatemala tendrían anomalías que sería superiores a 2,8 °C. En el área que incluye las costas de México hasta el Pacífico de Nicaragua la anomalía sería de 2,4 °C a 2,8 °C. Mientras desde el área del Caribe de Honduras hasta Panamá y Cuba, Haití, y la República Dominicana el rango sería de 2 °C a 2,4 °C (véase el mapa III.6.B).

En el corte de 2070 el incremento de temperatura se vuelve extremo ya que las regiones con mayor incremento descritas en 2050 tendrían anomalías por arriba de los 4 °C. En la parte norte de México incluso habría municipios con anomalías mayores de 4,4 °C. En el sur de Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana se tendrían las menores anomalías entre 2,8 °C y 3,2 °C.

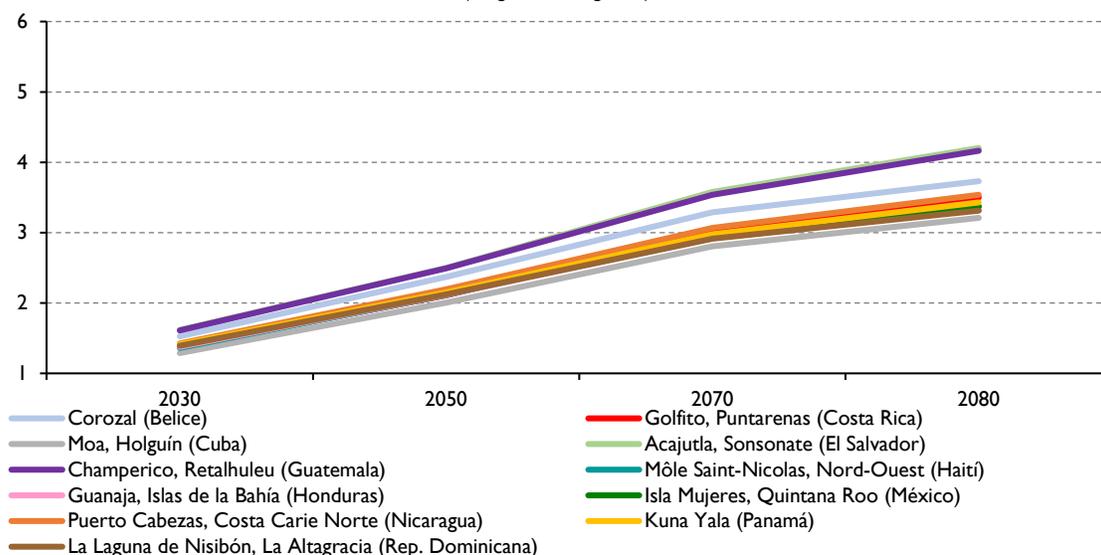
En 2080 las anomalías extremas serían superiores a 4,4 °C, con respecto al período 1960-1990, en casi todo el territorio de México, Guatemala, Honduras y El Salvador, en estos últimos países principalmente en la zona del arco seco. En las costas del Caribe y sur de Centroamérica y en Cuba tendrían anomalías de temperatura con 3,2 °C a 3,6 °C. En la República Dominicana y Haití se identifica una zona central más afectada con una anomalía de entre 3,6 °C y 4 °C (véase los mapas III.6.C y III.6.D).

Los mapas también muestran la anomalía por país que representa el promedio de los municipios en cada corte. El promedio de las anomalías por país va de 1,36 °C en Cuba a 1,85 °C en México en 2030. En 2050 todos los países tendrían anomalías superiores a los 2 °C. Para 2080 todos los países tendrían anomalías promedio superiores a los 3,3 °C; los más altos serían de 4,62 °C en México y 4,61 °C en Guatemala (véase el mapa III.6).

En el gráfico III.24 se muestran los municipios con la anomalía de temperatura más baja por país. El valor de las anomalías de los 11 municipios es muy cercano en 2030 con un rango que iría de 1,29 °C en Moa en Cuba a 1,62 °C en Acajutla en El Salvador. Desde 2050 la anomalía de los municipios Acajutla en El Salvador y Champerico en Guatemala aumentaría más rápido. En 2080 las anomalías para este grupo de municipios irían de 3,21 °C en Moa a 4,20 °C en Acajutla. Estos municipios con menor anomalía se encuentran en costas o cercanos a ella o en islas.

En el gráfico III.25 se muestran los municipios con la anomalía de temperatura más alta por país cuyo valor muestra una mayor brecha entre ellos desde 2030. En 2030 las anomalías irían de 2,28 °C en Bacoachi en Sonora (México) a 1,41 °C en Vertientes en Camagüey (Cuba). En 2080 las anomalías variarían de 5,33 °C en Bacoachi (sería el incremento más grande en este escenario en la región) a 3,33 °C en Vertientes. Para estos municipios no hay una característica en común.

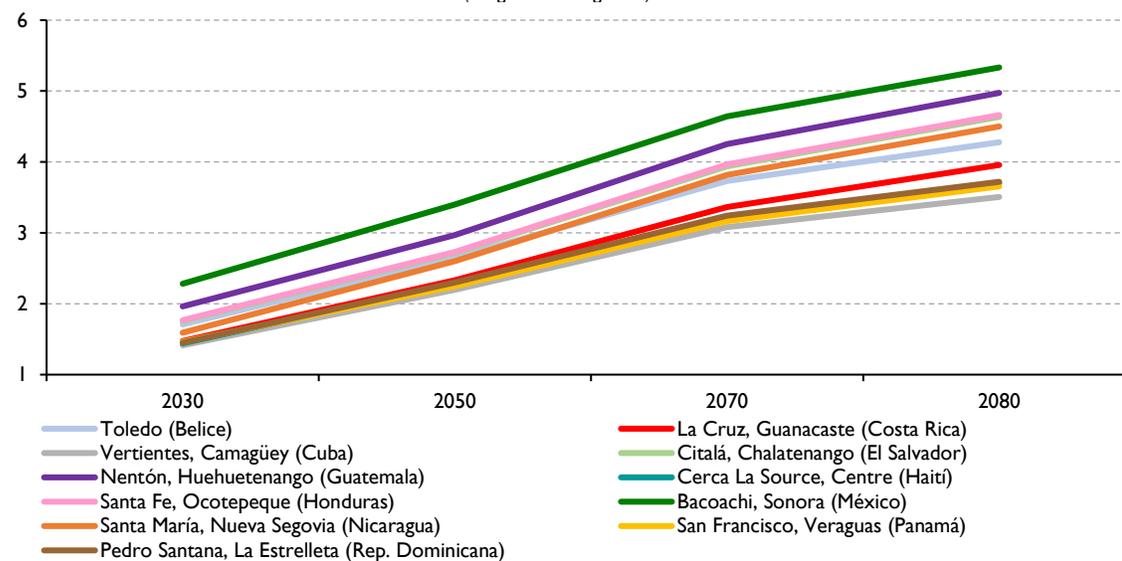
Gráfico III.24
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios con anomalía de temperatura media más baja al final del siglo por país y escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
 (En grados centígrados)



Fuente: Elaboración propia con datos de WorldClim [en línea] <http://www.worldclim.org> y CCAFS-Climate, “Downscaled Data Portal GCM”, Programa de Investigación sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS) de CGIAR [en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

Nota: Los datos por municipio se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de aproximadamente 1 km para cada área correspondiente. En el caso de Belice es a nivel Distrito debido a la disponibilidad de información. El escenario es el ensamble de los modelos CESMI_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR.

Gráfico III.25
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios con anomalía de temperatura media más alta al final del siglo por país, escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
 (En grados centígrados)



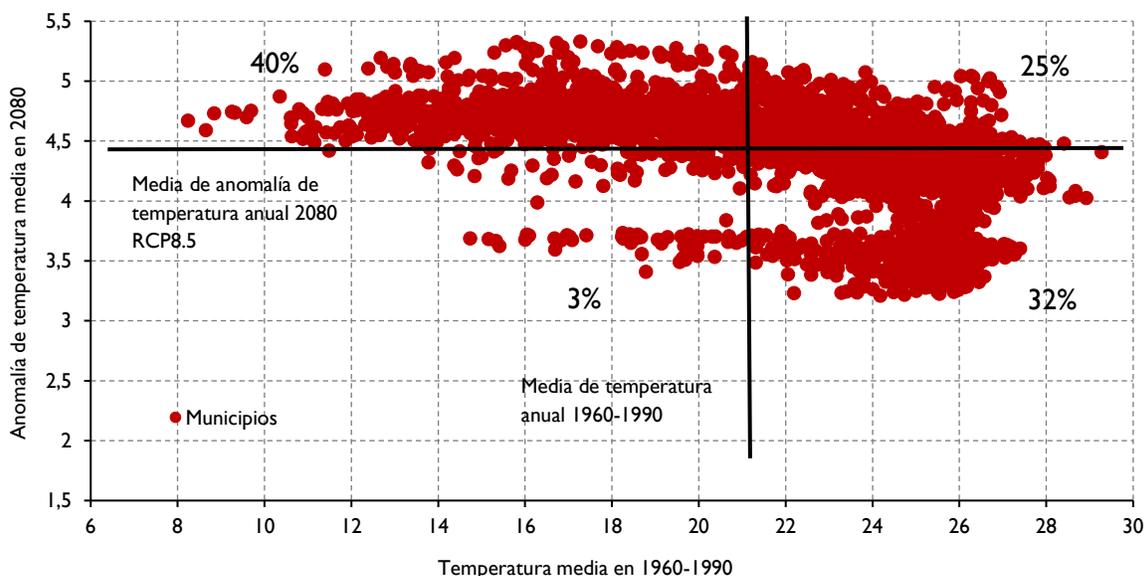
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS-Climate), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

Nota: Los datos por municipio se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de aproximadamente 1 km para cada área correspondiente. En el caso de Belice es a nivel Distrito debido a la disponibilidad de información. El escenario es el ensamble de los modelos CESMI_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR.

La relación de los niveles de temperatura media anual de la climatología base 1960-1990 por municipios con sus anomalías de 2080 se muestra en el gráfico III.26. Se eligió el nivel de 21,3 °C por ser el valor promedio de la temperatura de todos los municipios de la región en 1960-1990 y 4,4 °C como valor medio de las anomalías de las temperaturas de los municipios de la región en 2080 en el escenario RCP8.5. En el gráfico no se muestra una relación significativa entre uno y otro nivel, pero el 40% del total de municipios con temperaturas menores a los 21,3 °C en 1960-1990 tendrían anomalías de más de 4,4 °C y solo el 3% tendrían anomalías por debajo del umbral. Esto indica que hay mayor probabilidad de tener anomalías superiores al promedio de la región para aquellos municipios que en la climatología base tenían temperatura por debajo de la media de la región en el escenario RCP8.5. Mientras que el 25% de los municipios con temperaturas medias por arriba de los 21,3 °C tendrían aumentos superiores a los 4,4 °C y el 32% por debajo de esa anomalía.

Bajo este escenario esto implica crear medidas de adaptación apropiadas para los municipios que tienen temperaturas por debajo de 21,3 °C (promedio de la región) esperando que estos pudieran tener incrementos mayores a los 4,4 °C. Mientras que para municipios con temperaturas mayores las medidas de adaptación podrían ser en dos grupos para el de regiones con anomalías muy altas y las que son menores a los 4,4 °C. Esta característica debe ser complementada por las características socioeconómicas y geográficas de cada municipio.

Gráfico III.26
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: climatología base de temperatura media y sus anomalías, por municipios, 1960-1990 y escenario RCP8.5, corte 2080
(En grados centígrados y porcentajes de municipios)



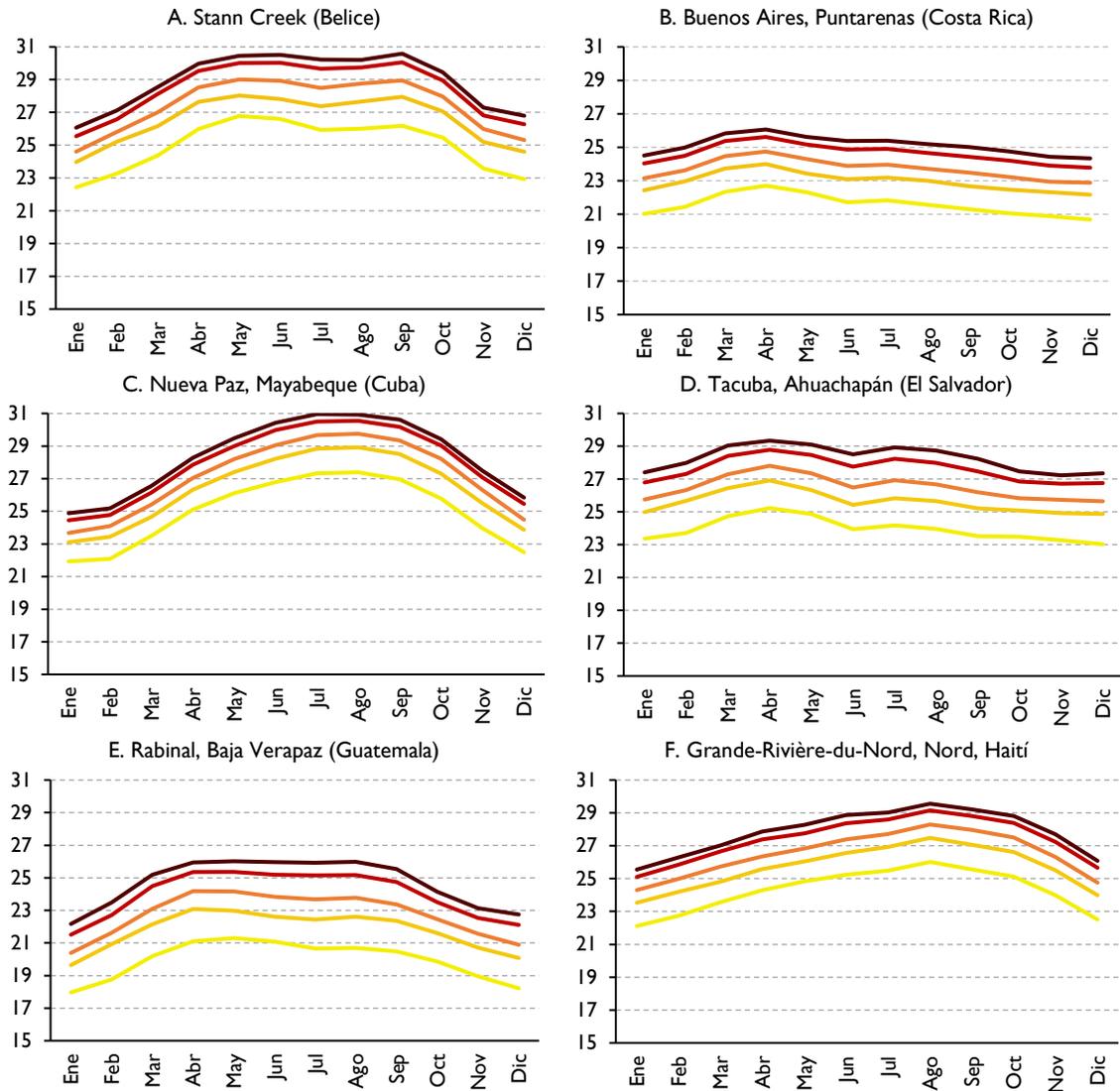
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS-Climate), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

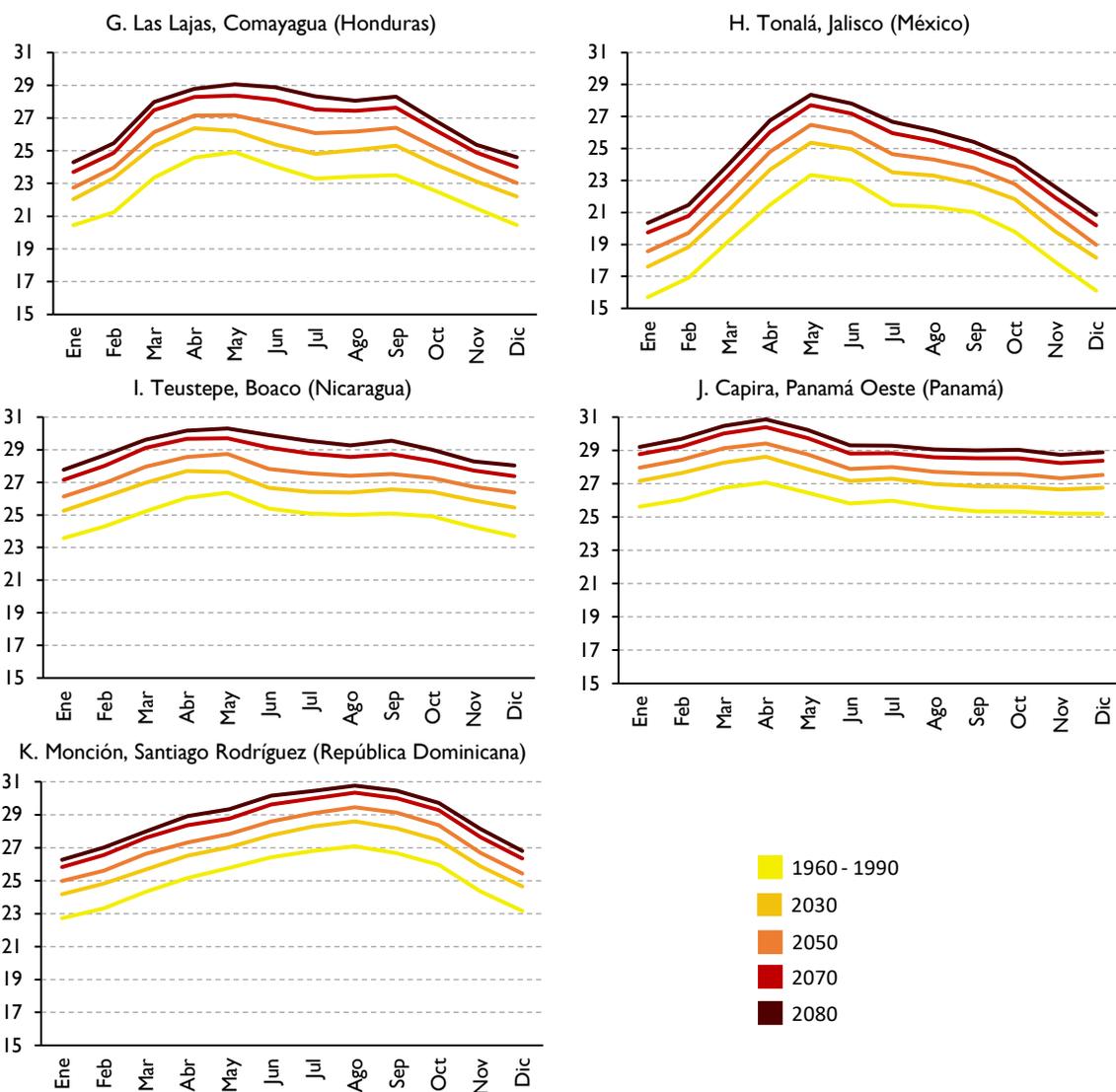
Nota: Los datos por municipio se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de aproximadamente 1 km para cada área correspondiente. En el caso de Belice es a nivel Distrito debido a la disponibilidad de información. El escenario es el ensamble de los modelos CESMI_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR.

a) *Temperatura media mensual. Escenario RCP8.5 por municipios seleccionados.*

En el gráfico III.27 se muestra el comportamiento de la temperatura media mensual con cambio climático de 11 municipios de cada país que representa la mediana de temperatura anual en 2080 en el escenario RCP8.5.

Gráfico III.27
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: temperatura media de municipios seleccionados, por mes, climatología 1960-1990 y escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
 (En grados centígrados)





Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS-Climate), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

Nota: Los datos por municipio se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de aproximadamente 1 km para cada área correspondiente. En el caso de Belice es a nivel Distrito debido a la disponibilidad de información. El escenario es el ensamble de los modelos CESMI_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR.

Los incrementos son notables en todos los meses y en todos los períodos. Los cambios más notables serían: en Stann Creek (Belice) donde la temperatura más alta sería en septiembre; en el cantón de Buenos Aires, Puntarenas (Costa Rica), junio mostraría un mayor incremento; en Tacuba, Ahuachapán (El Salvador) habría un mayor incremento en noviembre y diciembre; en Rabinal, Baja Verapaz (Guatemala) el nivel de la temperatura sería constante de abril a agosto; en Las Lajas, Comayagua (Honduras) entre junio y septiembre habría un incremento mayor; en Tonalá, Jalisco (México) julio mostraría un mayor aumento con respecto a los otros meses; en Teustepe, Boaco (Nicaragua) el aumento sería mayor de enero a marzo y en junio y septiembre; en el resto de los municipios seleccionados el patrón no muestra un cambio relevante.

C. Comparación escenarios AR4 y AR5 de cambio climático de temperatura media en Centroamérica

Como se explicó en el capítulo II, los escenarios del AR4 y AR5 no son comparables, si bien es interesante mostrar las diferencias de las magnitudes de los cambios. En el documento de *Impactos potenciales en los patrones intraanuales y espaciales del clima. La economía del cambio climático en Centroamérica* (CEPAL, COSEFIN, CCAD, SICA, UkaID y DANIDA, 2012) se mostraron los resultados para los escenarios B2 y A2 a nivel departamental con un ensamble de los modelos ECHAM4 y HADCM3 y ECHAM4 y HADGEM y se empleó la climatología base 1950-2000 de la base de WorldClim.

Este estudio mostró que para el escenario B2 las anomalías promedio por departamento en 2100 (promedio 2090-2100) con respecto a la climatología base 1950-2000 sería de 2,64 °C en Belice; 2,98 °C en Costa Rica; 3,01 °C en El Salvador; 2,98 °C en Guatemala; 2,99 °C en Honduras; 3,04 °C en Nicaragua, y 2,58 °C en Panamá (CEPAL, COSEFIN, CCAD, SICA, UkaID y DANIDA, 2012). En tanto que en el escenario RCP4.5 las anomalías promedio por municipio en 2080 —con respecto a la climatología base 1960-1990— serían de 2,09 °C en Belice; 1,81 °C en Costa Rica; 2,17 °C en El Salvador; 2,28 °C en Guatemala; 2,26 °C en Honduras; 2,09 °C en Nicaragua, y 1,87 °C en Panamá. Los escenarios B2 y RCP4.5 no son comparables porque tienen diferentes trayectorias de emisiones de CO₂ que son menores en RCP4.5. Por lo tanto, el incremento de temperatura a final del siglo es mayor en B2 en más de 0,5 °C a escala global. Este resultado se encontró en ambos escenarios para los países de Centroamérica, tomando en cuenta que los períodos son diferentes.

En el escenario A2 las anomalías promedio por departamento en 2100 con respecto a la climatología base 1950-2000 sería de 3,81 °C en Belice, 3,76 °C en Costa Rica, 4,64 °C en El Salvador, 4,78 °C en Guatemala, 4,25 °C en Honduras, 4,12 °C en Nicaragua y 3,19 °C en Panamá (CEPAL, COSEFIN, CCAD, SICA, UkaID y DANIDA, 2012). Mientras que en el escenario RCP8.5 las anomalías promedio por municipio en 2080 con respecto a la climatología base 1960-1990 sería de 4,03 °C en Belice; 3,70 °C en Costa Rica; 4,43 °C en El Salvador; 4,61 °C en Guatemala; 4,41 °C en Honduras; 4,19 °C en Nicaragua, y 3,57 °C en Panamá. Como los escenarios menos extremos, el A2 y RCP8.5 tampoco son comparables porque tienen diferentes trayectorias de emisiones de CO₂, pero son más cercanos (véase el capítulo II) e incluso a nivel global el escenario A2 quedaría aproximadamente 0,2 °C por arriba del RCP8.5.

En los escenarios menos extremos se observa que efectivamente las proyecciones por país a final del siglo son menores en el escenario RCP4.5 que en el B2 en diferentes magnitudes; Costa Rica y Nicaragua son los de mayor diferencia en las proyecciones. Por otra parte, en cuatro países el escenario RCP8.5 supera la proyección del A2. En Costa Rica, El Salvador y Nicaragua la diferencia fue menos de 0,1 °C y Guatemala presenta la mayor diferencia, con A2 mayor en 0,35 °C. Las diferencias en estos dos últimos escenarios —además de las diferencias en las trayectorias de emisiones y los períodos de tiempo en cada corte—, se explican por el detalle con que se presentan en este estudio los escenarios RCP. Por ejemplo, es posible observar las zonas más frías en el Altiplano Occidental de Guatemala con el nivel municipal que con el departamental, lo que arroja un promedio menor para el país.

El aumento de la temperatura media global en las últimas décadas es una de las muestras del cambio climático originado por el aumento de las emisiones de GEI antropogénicas. Durante el período 2011-2019 la temperatura a nivel global ha aumentado aproximadamente 0,93 °C con respecto al período preindustrial y la tendencia es creciente. Este aumento no se observa ni se espera que sea espacial o estacionalmente uniforme. Es esencial identificar los distintos niveles de aumento en temperatura en cada zona o microrregión —tanto a nivel anual como intraanual—, para evaluar los impactos en las actividades humanas, así como en los ecosistemas y biodiversidad.

Se observó un mayor aumento en el noroeste y sureste de México, Guatemala, Belice, El Salvador, el occidente de Honduras y Cuba en la última década. Con cambio climático en el escenario RCP4.5 en 2080 se tendrían incrementos de temperatura de hasta 3,2 °C en el norte de México; incrementos de hasta 2,8 °C en el norte de Centroamérica y hasta 2 °C en el sur y hasta 2,4 °C en los países del Caribe. En RCP8.5 el aumento podría llegar a ser en más de 4,4 °C en México y norte de Centroamérica, hasta de 4 °C en algunas zonas del sur de Centroamérica y los países del Caribe. Esta información es una herramienta para desarrollar políticas y planes de adaptación.

IV. Precipitación

A. Análisis histórico de la precipitación

El ciclo del agua se refiere al movimiento continuo del agua a través del sistema climático en sus tres estados (líquido, sólido y vapor) y a su almacenamiento en los reservorios de la atmósfera, los océanos, la superficie terrestre y la criosfera. En la atmósfera, el agua aparece principalmente en forma de gas y de vapor de agua, pero también en forma de hielo y de agua líquida en las nubes. Los océanos son sobre todo agua en estado líquido y están parcialmente cubiertos de hielo en las regiones polares. Las aguas terrestres en estado líquido aparecen como aguas superficiales (lagos, ríos), humedad del suelo y aguas subterráneas. Las aguas sólidas terrestres se encuentran en los mantos de hielo, los glaciares, la nieve y el hielo en la superficie y en el permafrost (IPCC, 2014a).

El movimiento del agua en el sistema climático es fundamental para la vida en el planeta. El agua que cae en forma de precipitación es evaporada de los océanos y transportada a tierra por la atmósfera. El calor latente contenido en el vapor de agua de la atmósfera es fundamental para impulsar su circulación a escalas que van de las tormentas individuales a la circulación global de la atmósfera.

El calentamiento global inducido por las actividades humanas ya ha causado múltiples cambios en el sistema climático, incluyendo el ciclo del agua. Estos cambios consideran aumentos en la temperatura de la tierra y océanos, mayor frecuencia de olas de calor, aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos de precipitación, pero también un mayor riesgo de sequía y déficit de precipitación en algunas regiones del planeta (IPCC, 2018a).

I. Evidencia global

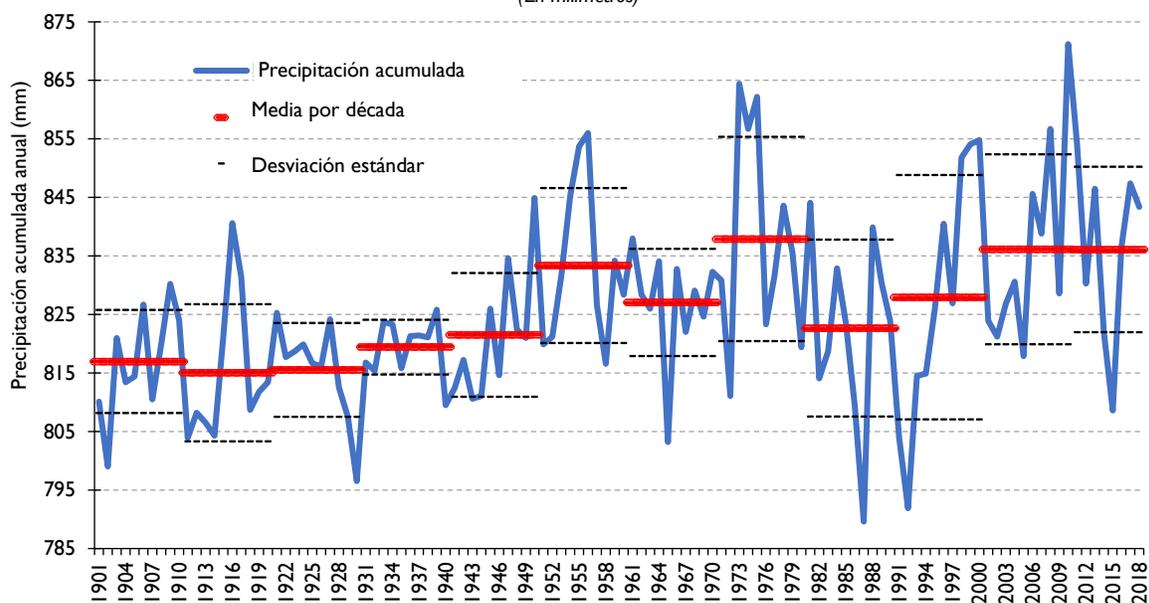
El informe del IPCC (2013a) indica que es probable que las influencias antropogénicas hayan afectado al ciclo global del agua desde 1960. Con un nivel de confianza medio se considera que han contribuido a los aumentos observados en el contenido de humedad en la atmósfera, a los cambios a escala global en los patrones de precipitación en la superficie terrestre, a la intensificación de precipitaciones fuertes en regiones continentales y a cambios en la salinidad del océano en su capa superficial y por debajo de ella. El análisis de precipitación histórica de las últimas décadas, evidencian un incremento en las medias de la precipitación por década con respecto a las anteriores a 1950. Sin embargo, esto solo se puede afirmar con un nivel de confianza bajo. Se requieren registros extensos de precipitación para analizar potenciales cambios, y se deben analizar zonas o regiones con características similares. Además, los análisis de datos globales pueden no reflejar los cambios en algunas regiones climáticas.

En promedio en las zonas continentales de latitudes medias del hemisferio norte, la precipitación ha aumentado desde 1901 (nivel de confianza medio antes de 1951 y alto

después). En el caso de América del Norte y Europa, existe un nivel de confianza alto de que se haya producido un aumento en la precipitación, ya sea en la frecuencia o en la intensidad de las precipitaciones, con algunas variaciones estacionales y regionales. En otros continentes existe un nivel de confianza bajo y como máximo un nivel de confianza medio en los cambios ocurridos relativos a los sucesos de precipitaciones intensas y en las tendencias positivas o negativas a largo plazo (el nivel de confianza bajo está relacionado con la disponibilidad de información que permite realizar una evaluación). Asimismo, desde aproximadamente 1950, se han observado cambios en numerosos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos. Es probable que desde aproximadamente 1950 las regiones donde se presentan precipitaciones intensas sobre la tierra sean mayores que las regiones con disminución en la precipitación (IPCC, 2014a).

El análisis de precipitación histórica a nivel global indica que las medias por década se han modificado. En el gráfico IV.1 se observa un incremento en las medias de la precipitación por década con respecto a décadas anteriores a 1950. Sin embargo, como menciona el IPCC esto solo se puede afirmar con un nivel de confianza bajo. Igualmente, desde 1950 se ha observado que la varianza por década se incrementa. Lo anterior podría explicarse por la presencia de mayores fenómenos climáticos extremos. En el gráfico IV.1 se muestra que la variabilidad en la precipitación es mayor, pero no hay cambios significativos en la media en los últimos 70 años y en la tendencia de la precipitación.

Gráfico IV.1
Mundo: precipitación global por año, media y desviación estándar de la precipitación por década, 1901-2018
(En milímetros)



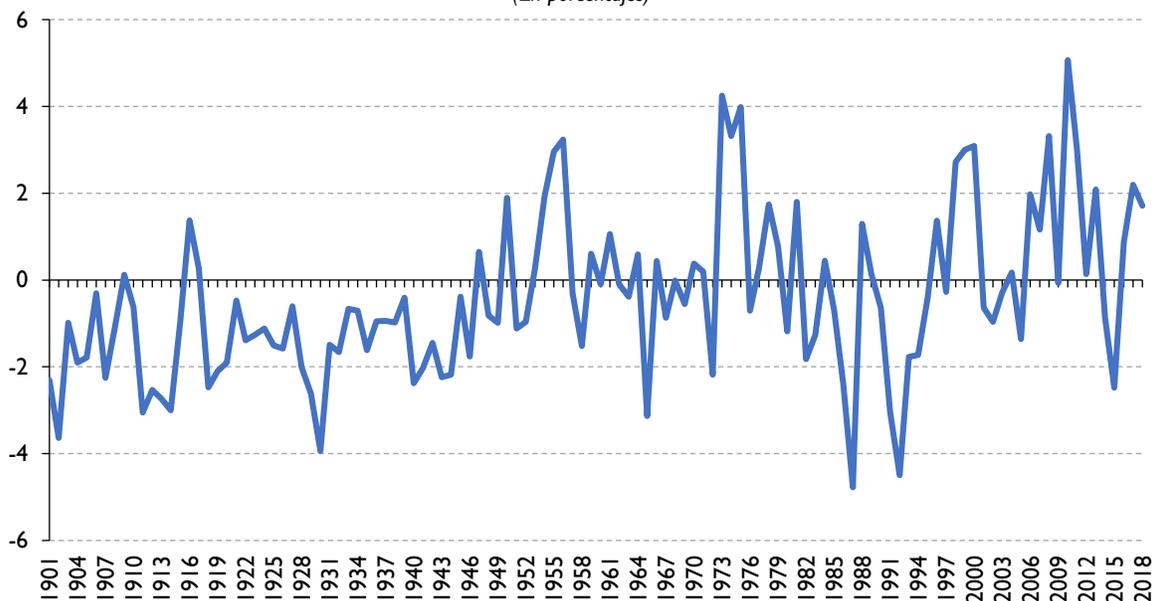
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

Nota: La línea roja representa la media por década, la línea negra punteada es +/- una desviación estándar por década.

Se requieren registros extensos de los niveles de precipitación para analizar potenciales cambios o una tendencia de aumento o disminución de la precipitación, especialmente se deben analizar zonas o regiones con características similares. Los análisis de datos globales

pueden no reflejar los cambios significativos en algunas regiones climáticas, asimismo, los promedios anuales ocultan la variación intraanual. Sin embargo, con las anomalías de los datos globales se puede observar que existe mayor variación en los niveles de precipitación, sobre todo desde 1950, pero ninguna tendencia es clara (véase el gráfico IV.2). Los cambios que se observan pueden deberse a la mayor calidad en la información y a la mayor disponibilidad de los datos climáticos, pero también a la presencia de mayores eventos de precipitación extrema y períodos de sequía.

Gráfico IV.2
Mundo: anomalía de la precipitación global por año con respecto a la climatología 1961-1990, 1901-2018
 (En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

2. Evidencia regional

La influencia más dominante para el clima del sur de México y Centroamérica es la Alta Subtropical del Atlántico Norte (NASH). Pero también, hay otras influencias en el clima de la región como la zona de convergencia intertropical (ITCZ), que afecta principalmente el lado Pacífico en el sur de Centroamérica, los eventos de "Norte" en invierno y principios de verano que principalmente influyen en el clima del norte de Centroamérica y los disturbios tropicales en el Caribe (Taylor y Alfaro, 2005).

Las precipitaciones de verano e invierno definen la mayoría de las clasificaciones climáticas de la región. Algunos autores sugieren que el clima del sur de México y Centroamérica podría clasificarse como invierno seco/verano húmedo, pero esta clasificación es muy general. La elevación y orografía de zonas específicas genera modificadores significativos. La altitud de algunas zonas podría producir variaciones locales en el clima, incluidas variaciones en los totales anuales de precipitación, duración de la temporada seca y el momento de los máximos y mínimos de la precipitación. Las variaciones subregionales dificultan las generalizaciones sobre el clima de la región, un hecho que debe tenerse en cuenta al considerar las descripciones generales presentadas en las siguientes secciones.

La precipitación anual promedio en los países de la región —México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana— varía en un amplio rango de acuerdo con la diversidad en las condiciones topográficas. La precipitación acumulada anual es menor en el norte de México, las llanuras de Guatemala, Honduras, y del noroeste de Nicaragua, y en algunas partes de la costa Pacífico de El Salvador, Honduras y Panamá. En contraste, las cadenas montañosas del norte y sur de Guatemala y las montañas bajas entre Costa Rica y Panamá reciben grandes cantidades de lluvia, al igual que las regiones costeras del Atlántico de Belice, Guatemala, la costa sur de Costa Rica y una sección de la costa del Atlántico de Panamá. En general, la costa del Caribe recibe más precipitaciones que el lado del Pacífico, lo que refleja la influencia de las perturbaciones tropicales del Mar Caribe y la interacción de los vientos alisios con las cadenas montañosas (Taylor y Alfaro, 2005).

En los últimos años no se han observado cambios importantes que indiquen una mayor o menor cantidad de lluvias, aunque sí se observa mayor variabilidad (véase el gráfico IV.3). No obstante, de acuerdo con Hidalgo y otros (2017 incluso con tendencias no significativas en la precipitación, el incremento en la temperatura puede generar graves consecuencias en la hidrología y la disponibilidad de agua, ya que un mayor calentamiento genera aumentos en la evapotranspiración, suelos más secos y mayor aridez (véase capítulo V).

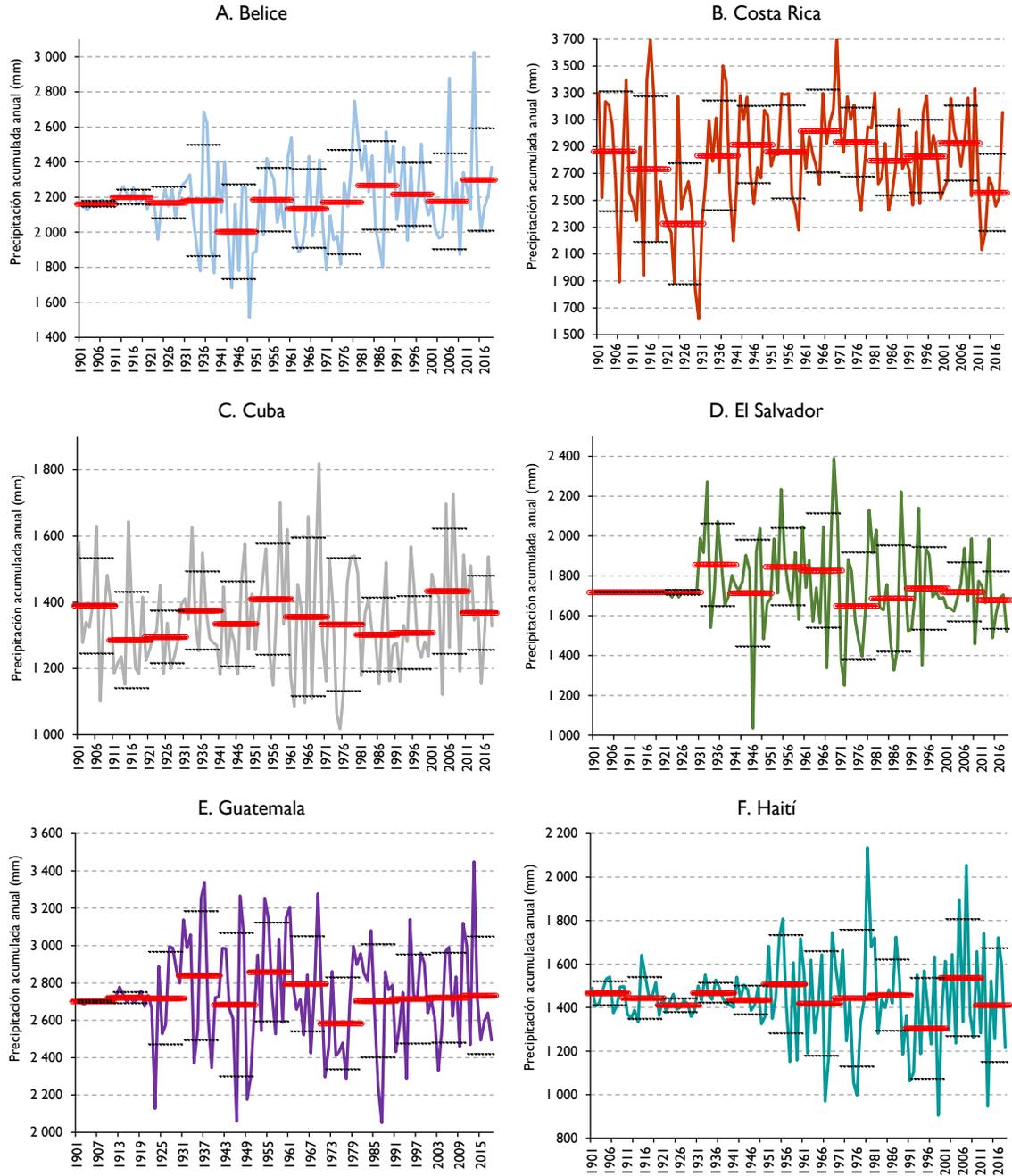
Como se mencionó anteriormente, los análisis del clima en Centroamérica indican que en los últimos años no hay una tendencia significativa de cambios en la precipitación de la región. Sin embargo, hay consideraciones adicionales que deben tenerse en cuenta. Primero, las variaciones anuales de precipitación son marcadas y probablemente el factor clave que controla las variaciones hidrológicas intraanuales, los cambios en la temperatura podrían afectar esta variabilidad y especialmente las tendencias en las variables hidrológicas como la escorrentía y la humedad del suelo a través de su influencia en la evapotranspiración. Segundo, incluso si los cambios anuales son pequeños, la distribución intraanual de la lluvia podría causar cambios significativos en las variables hidrológicas que requerirían medidas específicas de adaptación al cambio climático (Hidalgo y otros, 2017).

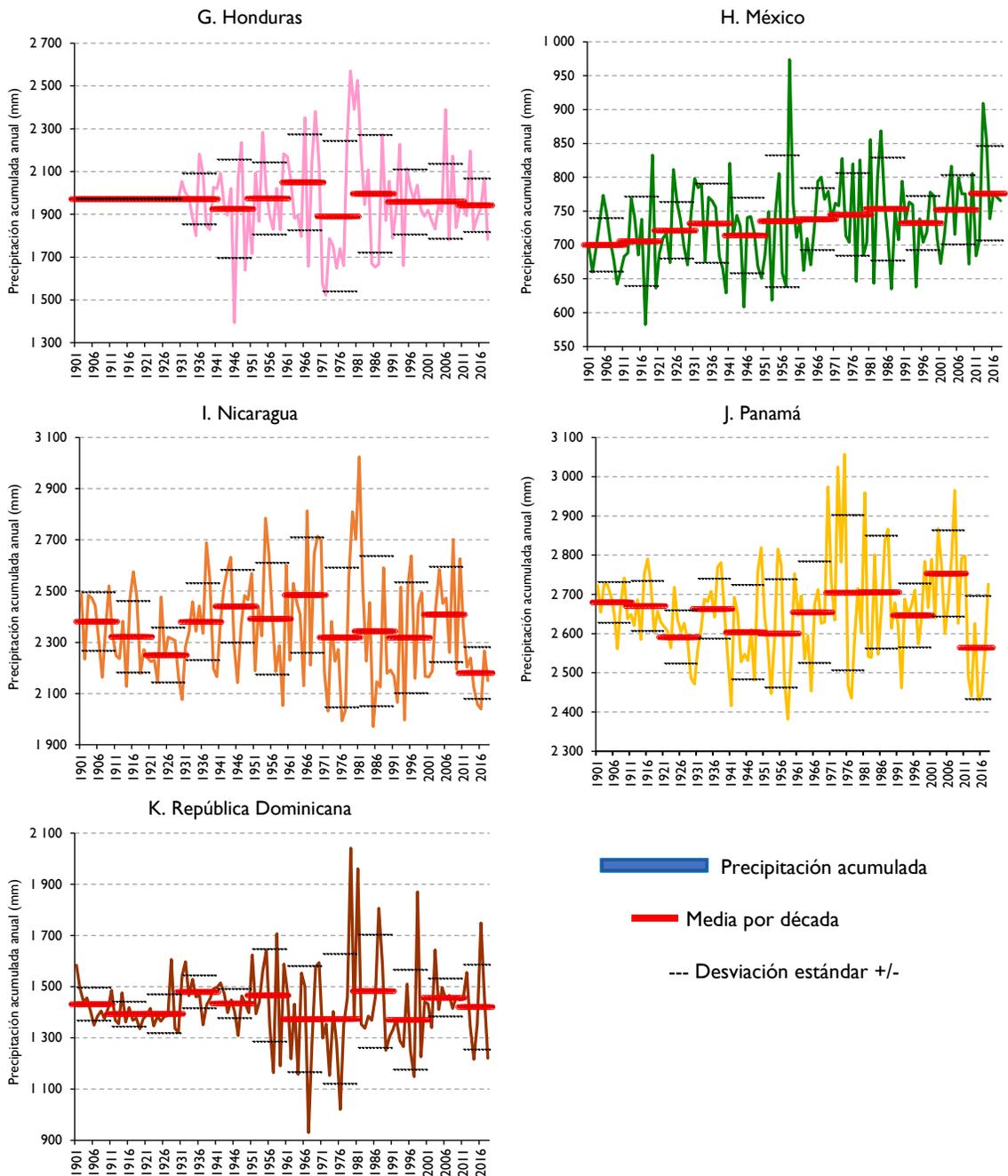
a) Precipitación acumulada anual nacional

Para evidenciar la existencia de cambios en las tendencias²⁶ de la precipitación se analizaron las medias por década y su desviación estándar desde principios de 1900 hasta 2018 para cada país de la región. En el gráfico IV.3 se presenta la precipitación acumulada anual por país, la media por década y la suma y resta de una desviación estándar. La poca variabilidad en los datos anteriores a 1930 puede significar ausencia de observaciones o baja calidad en la información de ese período. También, hay que considerar que la precipitación varía significativamente de una región a otra dentro de un país, por consiguiente, los promedios por país pueden ocultar grandes diferencias subnacionales, asimismo, los datos anuales ocultan la variación intraanual.

²⁶ Las tendencias son cambios graduales de incremento o decremento en el tiempo de las variables climáticas, como la precipitación.

Gráfico IV.3
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: precipitación acumulada anual, promedio y desviación estándar por década y país, 1901-2018
 (En milímetros)





Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

Nota: la línea roja representa la media por década, la línea negra punteada es +/- una desviación estándar.

Al igual que en el análisis de Hidalgo y otros (2017), no se observan cambios en las tendencias que representen una mayor o menor cantidad de precipitación en los datos por país. Los cambios o variabilidad generalmente se asocian a la presencia de factores climáticos extremos como sequías, lluvias atípicas o huracanes. Puede observarse que en Costa Rica, El Salvador y Honduras la variabilidad ha sido incluso menor en las últimas décadas, mientras que la variabilidad en Nicaragua, Panamá y la República Dominicana se ha incrementado. Sin

embargo, con los datos agregados por país no se puede concluir que existe alguna tendencia en estos cambios.

El efecto de las actividades humanas sobre la variabilidad natural de ciertas variables climáticas se ha detectado estadísticamente sobre todo a partir de la década de 1980 (Meehl y otros, 2007; Barnett y otros 2008 en Hidalgo y otros, 2017). Esta detección se ha relacionado con procesos climáticos en latitudes medias que son sensibles a la temperatura, como la acumulación de nieve y los flujos de nieve en las cuencas. En general, los cambios observados en la precipitación de las regiones de latitud media muestran menos zonas con cambios en la tendencia de la precipitación en comparación con los cambios en la temperatura. En una región como México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana, donde los cambios en las tendencias de precipitación son pequeños, la amplitud de las anomalías de precipitación asociadas a causas climáticas naturales son la mayor contribución a la variabilidad.

La contribución de las causas climáticas naturales al total de la varianza de la precipitación en los componentes intraanual, decenal y de tendencia se estimaron en 84%, 14% y 2%, respectivamente, en Centroamérica (Hidalgo y otros, 2015; Hidalgo y otros, 2017). Comprender la variabilidad climática a través del tiempo es clave, pues este es un gran paso para hacer frente a los retos del cambio climático (Zebiak y otros, 2014). La variabilidad climática en forma de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), por ejemplo, afecta muchos aspectos socioeconómicos como la producción agrícola, la seguridad alimentaria, la salud, la ocurrencia de desastres, entre muchos otros (Zebiak y otros, 2014).

Cuadro IV.1
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: promedio de la precipitación acumulada anual y desviación estándar por país y período, 1960-2018
(En milímetros)

País	Climatología 1960-1990	Desviación estándar	1991-2000	Desviación estándar	2001-2010	Desviación estándar	2011-2018	Desviación estándar
Belice	2 198	269	2 216	189	2 175	288	2 299	312
Costa Rica	2 918	290	2 827	286	2 926	294	2 557	307
Cuba	1 339	200	1 308	116	1 433	199	1 368	120
El Salvador	1 730	291	1 736	219	1 718	156	1 677	154
Guatemala	2 707	294	2 713	251	2 720	253	2 732	336
Haití	1 448	253	1 303	244	1 523	283	1 410	280
Honduras	1 984	298	1 956	160	1 959	184	1 940	134
México	744	63	732	42	751	54	776	75
Nicaragua	2 389	278	2 317	228	2 408	196	2 179	108
Panamá	2 690	162	2 646	86	2 753	116	2 564	141
República Dominicana	1 415	236	1 371	205	1 457	78	1 420	177

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

La variabilidad de la precipitación en la región no se ha modificado significativamente en el tiempo. En general, se observan cambios no significativos, que no han repercutido en grandes modificaciones de la variabilidad de la precipitación acumulada anual. En el cuadro IV.1 se muestran los promedios de precipitación acumulada anual por país. En el cuadro se registran ligeros cambios en los promedios y en la desviación estándar en los

diferentes períodos, en comparación con la climatología 1960-1990. El Salvador y Nicaragua presentan reducciones en su desviación estándar en todos los períodos, es decir, una ligera disminución en su variabilidad. El resto de los países tienen ligeros aumentos y reducciones en la desviación estándar, pero no se observa una tendencia clara.

b) Precipitación acumulada mensual nacional

El análisis del ciclo anual de precipitación del centro y sur de México, así como de la mayor parte de los demás países revela un régimen que se caracteriza por una distribución bimodal, con dos precipitaciones máximas en el año, aproximadamente en junio y septiembre-octubre, una estación seca de noviembre a abril y una canícula entre julio y agosto. El inicio de la temporada de lluvias generalmente es en mayo. Existe una variación latitudinal de las fechas de inicio de la temporada de lluvia en Centroamérica. Un inicio más temprano (principios de mayo) en el sur y tardío (fines de mayo) en el norte. El segundo máximo de precipitación suele ser más húmedo que el primero. En general, la precipitación del invierno y principios de la primavera, que va de noviembre a mayo, suele representar menos del 20% de la precipitación acumulada anual de Centroamérica (Taylor y Alfaro, 2005).

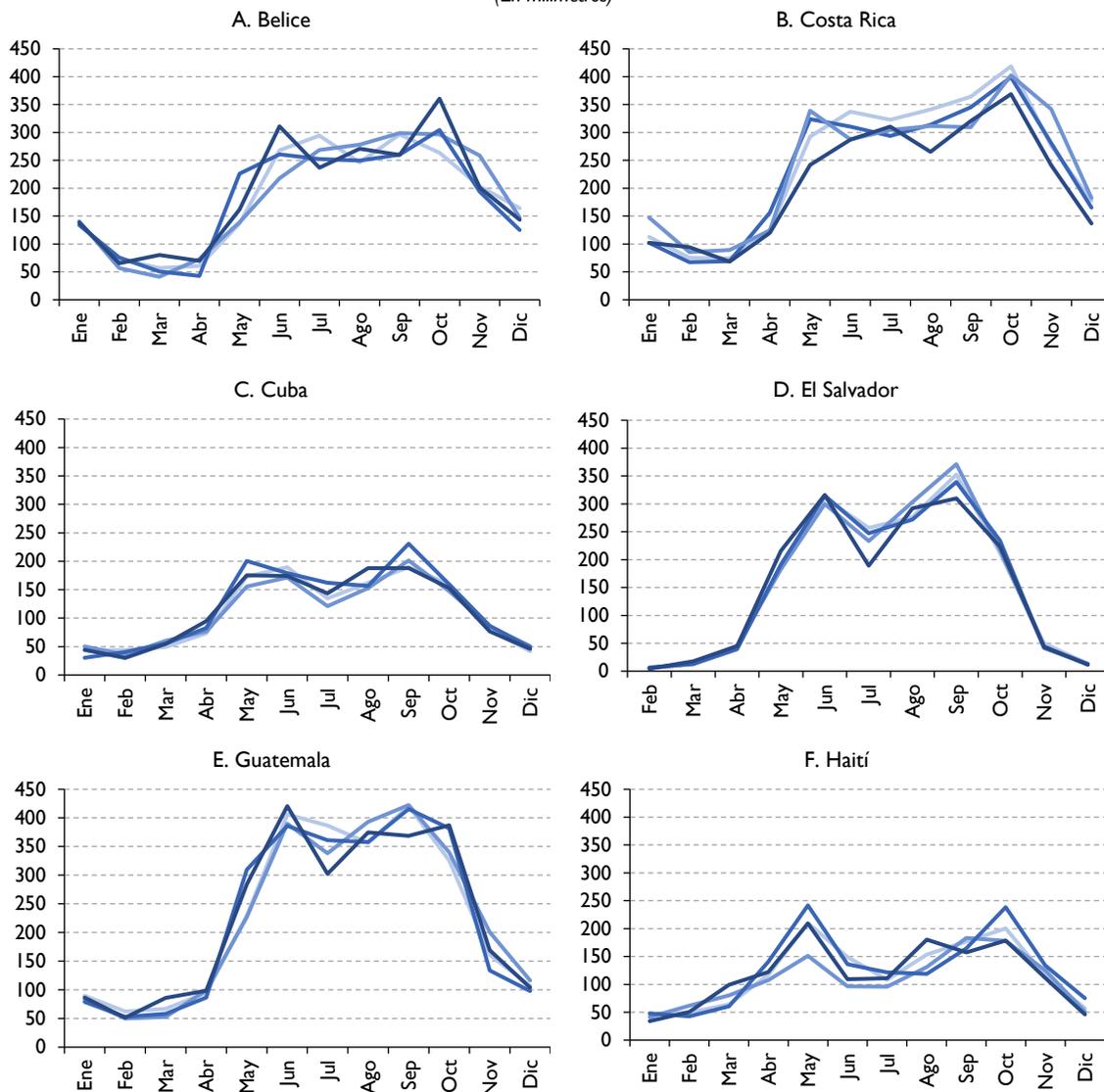
El breve período seco de julio a agosto se conoce como veranillo, canícula o sequía de medio verano (MSD, por sus siglas en inglés) (Magaña y otros, 1999). Existe cierta variación latitudinal en las fechas de inicio de la MSD o canícula, un inicio más temprano en la ladera del Pacífico sur y un inicio más tardío en la pendiente del Caribe Norte. La MSD o canícula está asociada con fluctuaciones en la intensidad y ubicación de la ITCZ del Pacífico oriental. Los cambios en los vientos divergentes (convergentes) de la costa oeste del sur de México y Centroamérica determinan su evolución.

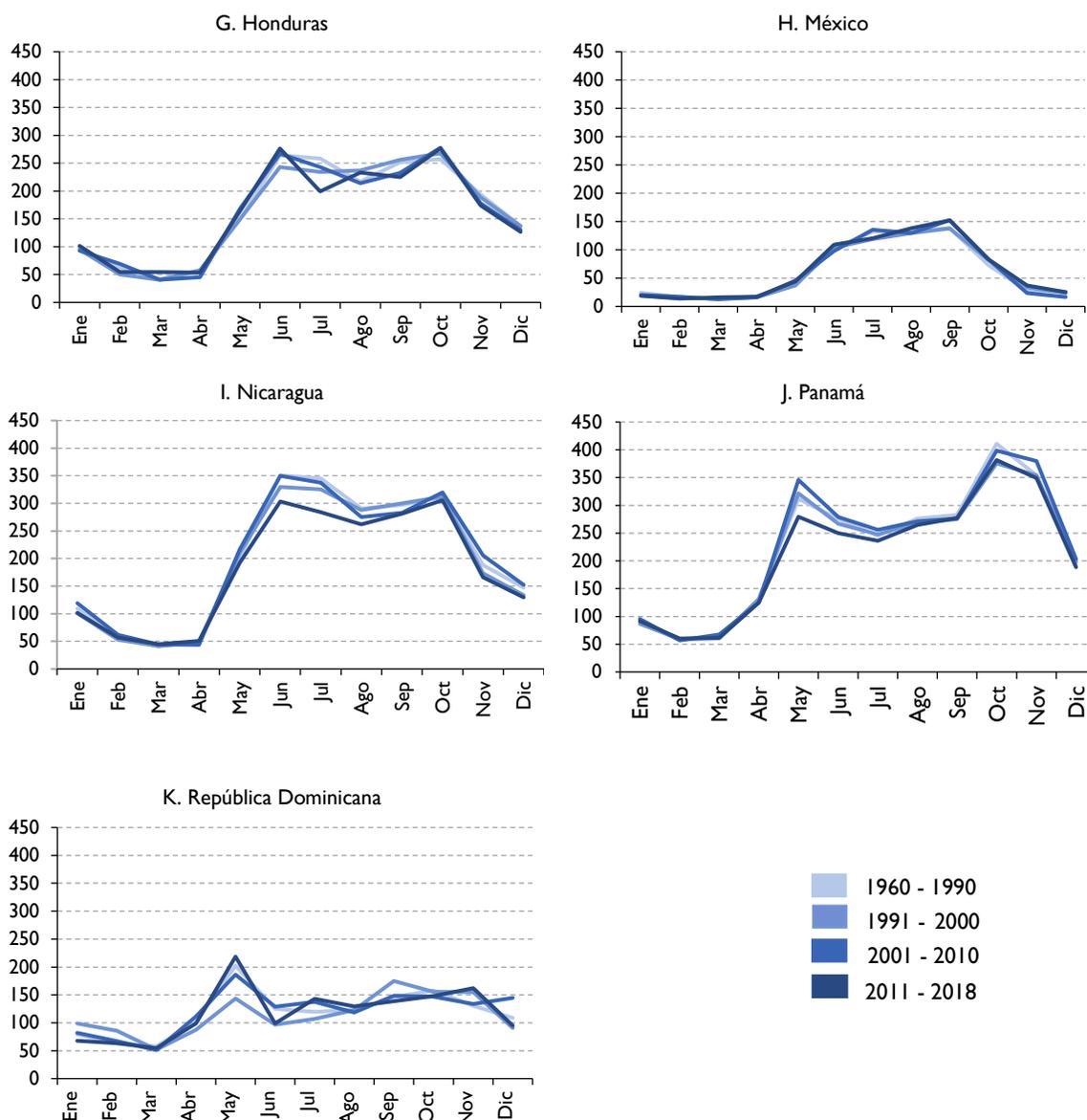
La intensificación de los vientos alisios durante julio y agosto y el forzamiento orográfico de las montañas sobre la mayor parte de Centroamérica dan como resultado una precipitación máxima a lo largo de la costa del Caribe y una precipitación mínima a lo largo de la costa del Pacífico (Magaña y otros, 1999). La mayor parte de la variabilidad de la precipitación en la región se debe a cambios intraanuales en lugar de tendencias a largo plazo (Hidalgo y otros, 2017). Incluso si no existieran cambios significativos en la precipitación, las tendencias de calentamiento en la región pueden tener graves consecuencias en la hidrología, ya que los aumentos en la evapotranspiración pueden producir reducciones significativas en la escorrentía y en la disponibilidad de agua (Hidalgo y otros, 2013).

En el Caribe las diferencias en topografía y orientación con respecto a los vientos alisios influyen en gran medida en la cantidad de lluvia recibida por los territorios insulares. En general, las islas más grandes y montañosas de las Antillas Mayores (Cuba, Haití y la República Dominicana) reciben mayores cantidades de lluvia. Igualmente, reciben la mayor parte de la precipitación anual en los meses de verano. Los territorios del noroeste del Caribe (este de Cuba, República Dominicana y Haití) tienen un ciclo anual de precipitación bimodal, con un pico inicial entre mayo-junio y un segundo máximo mayor en octubre. Además, poseen un claro descanso de verano en la lluvia similar a la canícula o MSD de Centroamérica. Sin embargo, el inicio de la canícula tiende a ser más tardío que en Centroamérica, y sucede a mediados y fines de julio y principios de agosto.

Las costas caribeñas de Honduras, Costa Rica y Panamá exhiben un segundo régimen de precipitación. Es difícil definir una estación seca para esta región, ya que la lluvia es casi homogénea entre enero y mediados de octubre, con acumulaciones típicas de entre 180 mm y 300 mm por mes. El período representa aproximadamente el 60% del total anual. Desde mediados de octubre hay un marcado aumento en la acumulación de precipitaciones hasta el final del año, con un máximo a principios de diciembre. Lo anterior está relacionado con una convergencia de humedad máxima al final del año en la región sureste. No hay un mínimo de lluvia en julio como en el resto de la región (Taylor y Alfaro, 2005). En el gráfico IV.4 se muestra el ciclo anual de precipitación por país para diferentes períodos: la climatología 1960-1990 y los promedios de los períodos 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2018. El promedio por país muestra el ciclo bimodal de precipitación con el inicio de la temporada de lluvia en mayo y dos máximos uno en junio y otro en septiembre-octubre, así como la canícula entre julio y agosto.

Gráfico IV.4
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: precipitación acumulada por país, mes y período, 1960-2018
 (En milímetros)





Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

En Belice el ciclo anual de precipitación es bimodal, y presenta una precipitación acumulada mensual entre junio y octubre de 200 mm a 300 mm. Los máximos de precipitación son mayores en el último período (2011-2018). Las mayores diferencias en la precipitación durante las décadas analizadas se generaron en la época lluviosa. Entre los meses de enero a abril los cambios entre décadas fueron mínimos. En este país no se observa una disminución significativa de la precipitación durante la canícula.

En Costa Rica el ciclo bimodal de la precipitación incluye los máximos en mayo y octubre. Este último es el mayor y puede alcanzar una precipitación mensual de alrededor de 400 mm. El promedio del ciclo de lluvia en este país muestra un decremento en la última década, principalmente durante el primer máximo de precipitación (mayo). Asimismo, se

observa un ligero decremento de la precipitación durante la canícula (agosto) a lo largo del tiempo.

En Cuba el ciclo de precipitación también es bimodal, y los máximos de precipitación superan los 200 mm mensuales. La canícula ocurre entre julio y agosto, con una reducción de la precipitación de alrededor de 100 mm. A lo largo de las décadas analizadas no se observan cambios significativos a través del tiempo, excepto un ligero decremento en los máximos de precipitación en la última década.

En El Salvador el ciclo bimodal está marcado por dos máximos de precipitación: el primero tiene lugar en junio, y alcanza una precipitación de 300 mm; el segundo ocurre en septiembre, y puede alcanzar una precipitación mensual de alrededor de 380 mm. En el último período analizado (2011-2018) se observa un decremento en el segundo máximo y también una canícula más pronunciada en julio.

Los dos máximos de precipitación en Guatemala superan los 400 mm. El ciclo anual de precipitación indica una precipitación entre enero y abril menor a 100 mm. En las décadas analizadas no se observan grandes cambios en el ciclo anual, solo en el último período un ligero decremento en el segundo máximo y una canícula más seca.

En Haití los máximos de precipitación pueden llegar hasta 250 mm de precipitación mensual en los meses de mayo y octubre. Su ciclo también es bianual, con un decremento significativo en la precipitación entre julio y agosto, generando un período seco (canícula), con precipitaciones que disminuyen hasta 100 mm. Entre los meses de diciembre y marzo la precipitación también es menor a 100 mm.

En Honduras no se observan cambios significativos a través del tiempo en su ciclo anual de precipitación. El período de lluvia ocurre entre mayo y octubre. Sus máximos son en junio y octubre, cuando la precipitación puede llegar a alrededor de 280 mm mensuales, durante el período de la canícula la precipitación se reduce alrededor de 200 mm. De enero a abril la precipitación es menor a 100 mm.

La forma del ciclo de precipitación de México no muestra la forma bimodal, característica de los otros países, debido a las diferencias entre los regímenes de precipitación entre las regiones de este país. El promedio de precipitación durante la temporada de lluvias, —es decir, los meses de junio a octubre— es de 150 mm. No se observan cambios significativos en el tiempo para el promedio de precipitación en el país.

El ciclo de precipitación anual de Nicaragua es bimodal, y los máximos de precipitación en junio y octubre superan los 300 mm. El primer máximo (junio) es mayor que el segundo (octubre). Sin embargo, en el último período estudiado (2011-2018) se observa un decremento en la precipitación del primer máximo. La precipitación de enero a abril es menor a 100 mm y en promedio la precipitación durante el período de la canícula se reduce a menos de 300 mm.

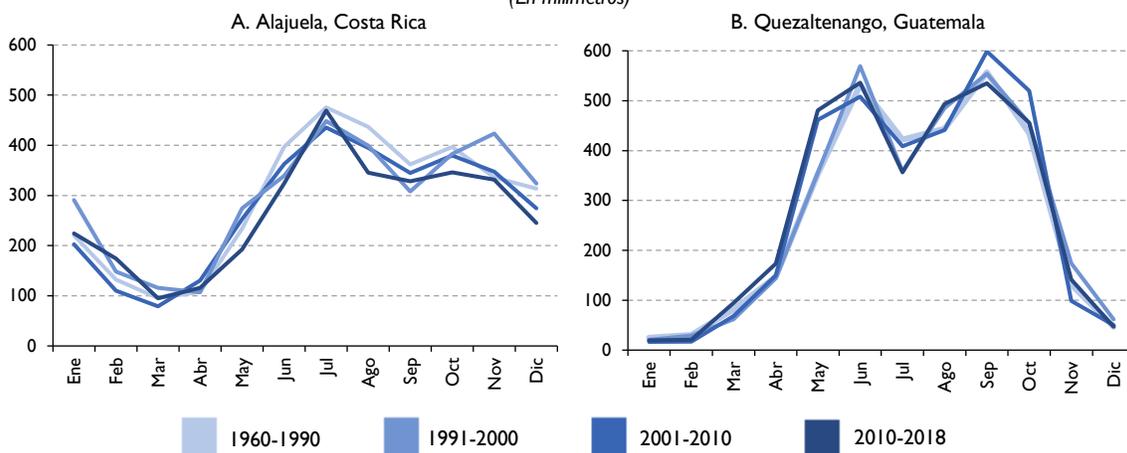
El ciclo anual de precipitación de Panamá es bianual, con dos máximos de precipitación —el primero en mayo, con una precipitación promedio mayor a 300 mm y el segundo en octubre con precipitaciones de alrededor de 400 mm mensuales—. Durante el período de la canícula la precipitación mensual es de alrededor de 250 mm. En el último período, 2011-2018,

se observa un decremento del primer máximo de lluvia, en el resto de ciclo, no se observan cambios significativos.

En la República Dominicana se observan cambios en el ciclo anual de precipitación por década. El primer máximo, que generalmente ocurre en mayo, se ha incrementado en las últimas décadas, en el resto de los meses también han ocurrido variaciones. En el segundo máximo de precipitación se ha perdido en la última década, dejando una precipitación promedio de alrededor de 150 mm.

No obstante, los datos por país no muestran las grandes diferencias subnacionales y subregionales. A manera de ejemplo, a continuación se muestra la mayor variación intraanual que existe en dos departamentos de la región: Alajuela (Costa Rica) y Quezaltenango (Guatemala) (véase el gráfico IV.5). En Alajuela se observa una mayor variación intraanual que en los gráficos por país, así como cambios en el segundo pico de precipitación a lo largo del tiempo, sobre todo en el último período. Por su parte, en el departamento de Quezaltenango se pueden ver los dos picos de precipitación en junio y septiembre muy marcados y reducciones en ambos en la última y penúltima década.

Gráfico IV.5
Alajuela (Costa Rica) y Quezaltenango (Guatemala): precipitación acumulada, por mes y período, 1960-2018
(En milímetros)



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

En el análisis de Hidalgo y otros (2017) sobre variabilidad climática en Centroamérica se encontró que los cambios en las tendencias anuales de precipitación no fueron significativos. Lo anterior se debe a que la mayor parte de la variabilidad de las series temporales de precipitación se establece a escalas intraanuales en lugar de tendencias a largo plazo. No obstante, los autores indican que incluso sin cambios significativos en la precipitación, el aumento de temperatura puede tener graves consecuencias en la hidrología de la región.

c) Precipitación acumulada por departamento

Los datos de alta resolución espacial son ideales para determinar patrones espaciales y apoyar los estudios de variabilidad y cambio climático. La variabilidad climática de la región se analizó con datos del CRU TS, versión 4.03, para el período 1960-2018. La primera parte del

análisis consiste en visualizar las tendencias de precipitación y su ciclo anual (sección anterior). En la siguiente sección se utilizaron los datos de precipitación acumulada anual con resolución de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ (aproximadamente 55 km) para comparar las décadas 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2018 con la climatología de referencia 1960-1990. Estos datos son particularmente importantes para la región, ya que permiten visualizar la variabilidad a través del tiempo en una región de alta heterogeneidad climática y al mismo tiempo ayudan al proceso de toma de decisiones a escala local, ya sea a nivel departamento, municipio o cuenca.

De acuerdo con la climatología 1960-1990, la precipitación acumulada anual varía en un rango amplio entre México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana (véase el mapa IV.1). Esto se debe a la diversidad en las condiciones topográficas de esta región y las diversas regiones climáticas entre los países. Precipitaciones de menos de 600 mm acumulados anuales son típicas en el norte de México y niveles de precipitación entre 600 mm a 1.200 mm son comunes en el centro de México. Por su parte, una precipitación acumulada anual entre 1.200 mm a 1.800 mm es característica del sur de México, Cuba, Haití y la República Dominicana, en casi todo El Salvador y la costa del Pacífico de Nicaragua (noroeste) y el sur de Honduras.

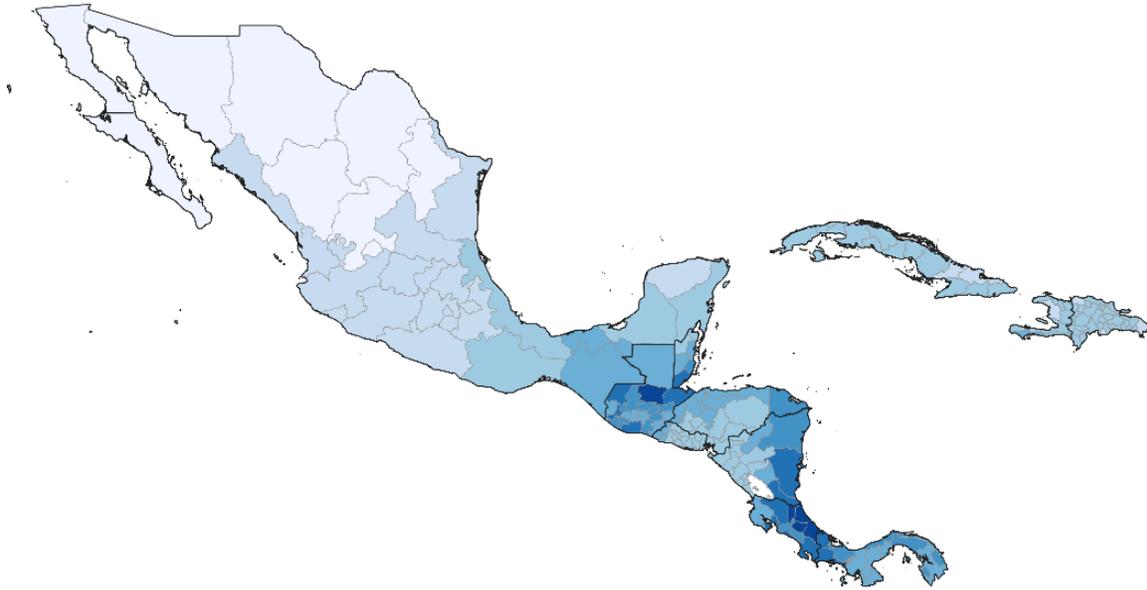
Asimismo, se presentan con frecuencia niveles de precipitación acumulada anual de entre 1.800 mm a 2.400 mm en el Petén y centro de Guatemala, parte central de Belice, norte de Honduras (costa del Atlántico), noreste de Nicaragua y la costa del Pacífico de Panamá. En cambio, la zona montañosa de Guatemala y parte este de la costa Atlántico de Honduras (Gracias a Dios), Nicaragua, Costa Rica y Panamá, al igual que las regiones costeras del Atlántico de Belice y Guatemala, reciben en promedio precipitaciones superiores a 2.400 mm acumulados anuales. En los siguientes períodos no se observa un cambio importante en la distribución espacial de la precipitación, y pocos departamentos pasan de un rango a otro. Sin embargo, este análisis se complementa con los cambios o anomalías de la precipitación que se presentan en el mapa IV.2.

El cambio en precipitación en el período 1991-2000 con respecto a la climatología 1960-1990 sugiere condiciones más secas, sobre todo el norte de México, Haití y Guantánamo (Cuba) (véase el mapa IV.2). En Haití sucedieron los mayores decrementos, ya que en algunos departamentos las reducciones llegaron hasta 17%. También se observan decrementos de precipitación —si bien en menor medida— en el centro de México, así como en la mayor parte de Centroamérica y la República Dominicana, con reducciones menores al 10%. No obstante, existen regiones donde la precipitación se incrementó ligeramente —no más del 10%— como en el sur de México, Belice, la zona de Petén y el occidente de Guatemala, el oriente de El Salvador, la costa Pacífico de Honduras y la parte occidental de Cuba.

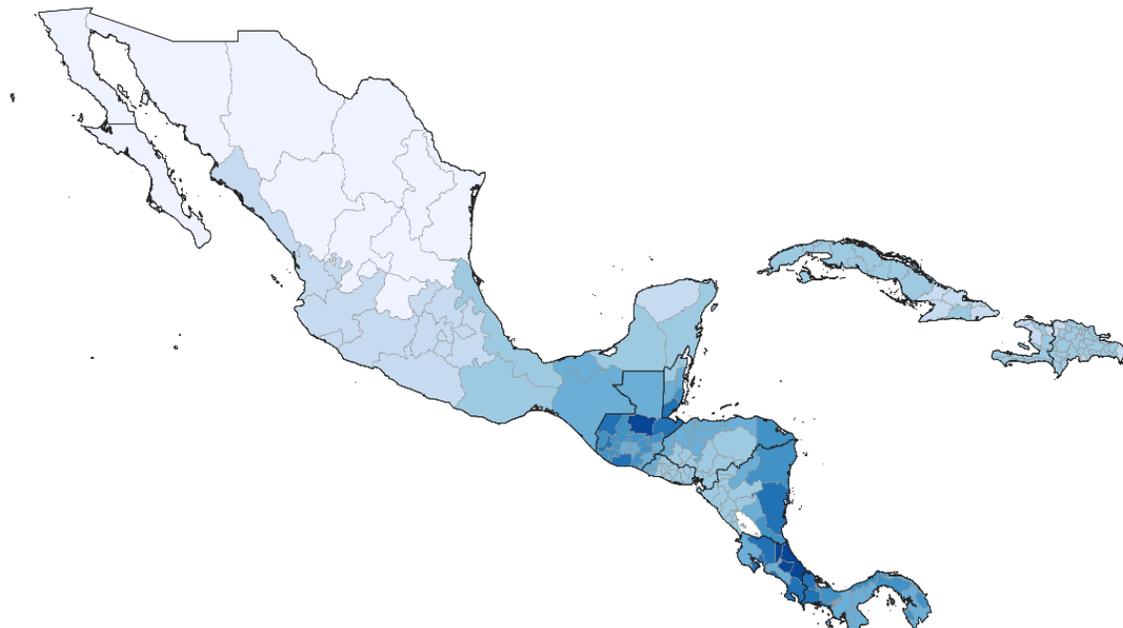
Entre tanto, 2001-2010 fue un período con mayor precipitación con respecto a la climatología base. No obstante, en algunos estados del norte de México, sobre todo la península de Baja California y Sonora, se presentaron condiciones más secas y el decremento llegó hasta el 18%. En Chihuahua, Sinaloa, Nayarit, Jalisco y Colima (México), Huehuetenango, Quiché y la región nororiente de Guatemala, Honduras, El Salvador y la región del Pacífico de Nicaragua y Costa Rica, el decremento fue menor al 10%. En el resto de la región la precipitación aumentó en menos del 10%. Los departamentos de Mayabeque y Matanzas (Cuba) y Grand'Anse (Haití), superaron el 10%.

Mapa IV.1
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: precipitación acumulada anual
por departamento y período, 1960-2018
(En milímetros)

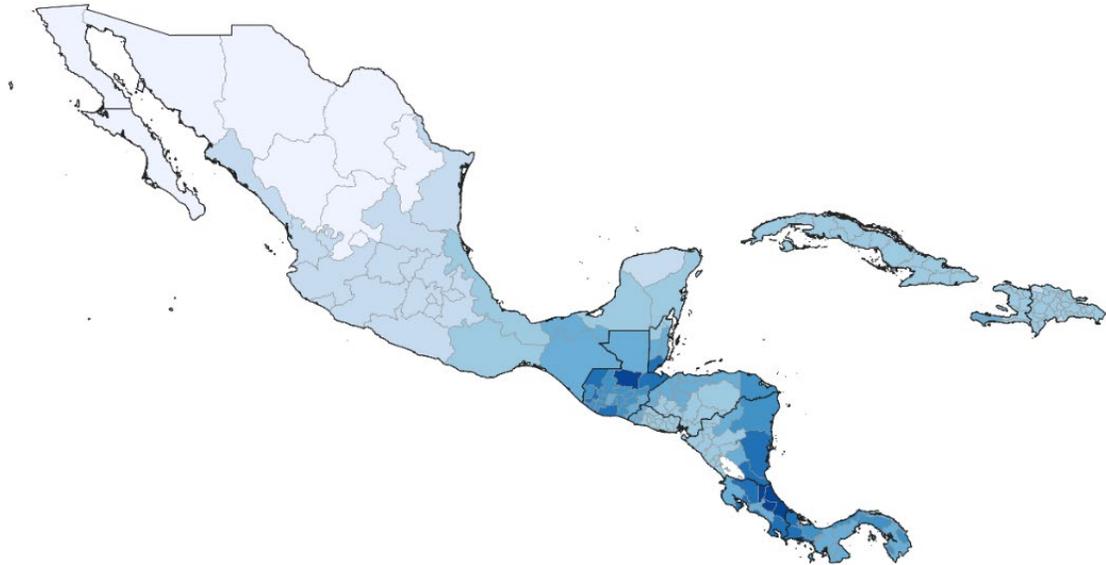
A. 1960-1990



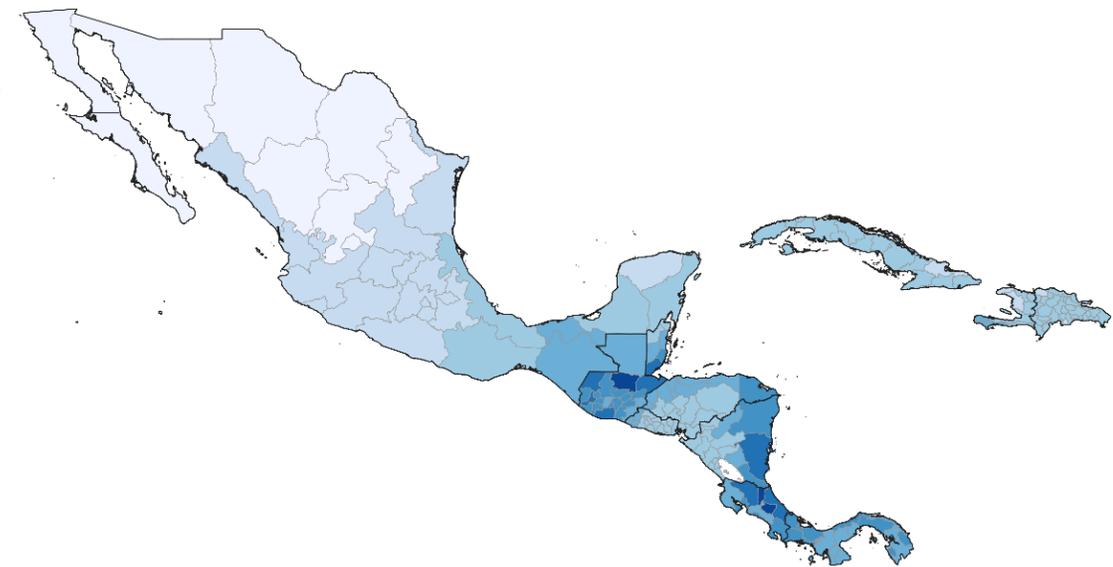
B. 1991-2000



C. 2001-2010



D. 2011-2018



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

Nota: Los datos por departamento se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$ (aproximadamente 55 km) para cada área correspondiente. El concepto “departamento” se refiere a la segunda división administrativa como distrito, estado, provincia y comarca.

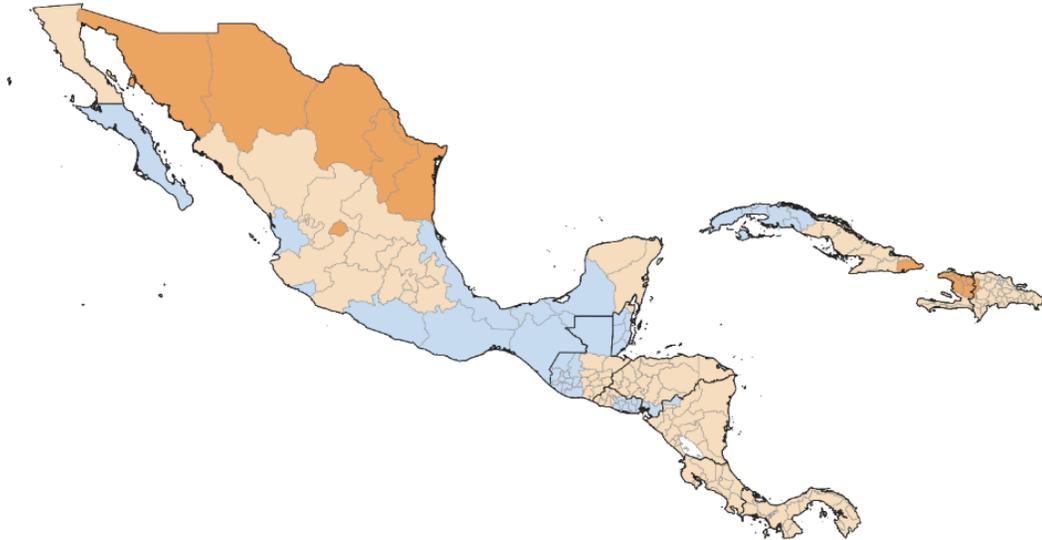
El período de 2011 a 2018 también fue un lapso con mayor precipitación en México, Guatemala, Belice y Cuba, con respecto a la climatología de referencia 1960-1990, aunque el incremento no sobrepasó el 10%. Entre tanto, en el resto de la región centroamericana se

presentaron condiciones más secas. En promedio en Centroamérica la precipitación se redujo menos del 10%. La reducción mayor fue en el departamento de San José en Costa Rica.

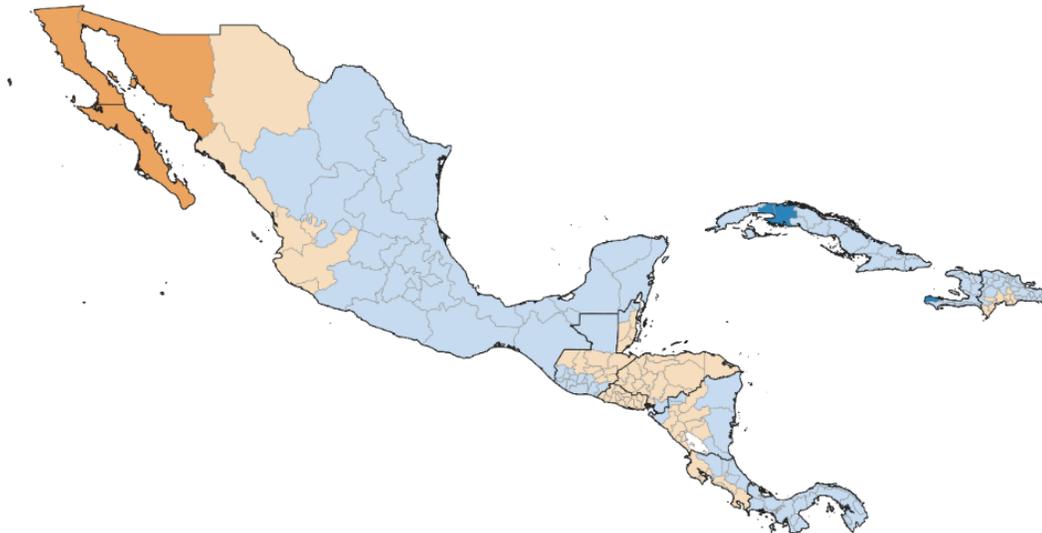
En el cuadro IV.2 se indica el porcentaje de departamentos que cambió bajo diferentes rangos en los diferentes períodos analizados. En este cuadro se presenta el porcentaje del número departamentos, mas no la extensión geográfica que representan. La primera columna muestra el porcentaje de departamentos por país en el período 1991 a 2000 donde la precipitación se incrementó en más del 10% con respecto a la climatología 1960-1990. Después, se muestra la columna donde aumentaría del 0% al 10% y le siguen los intervalos donde disminuyó la precipitación.

Mapa IV.2
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: anomalía de la precipitación acumulada
por departamento y período, 1960-2018
(En porcentajes)

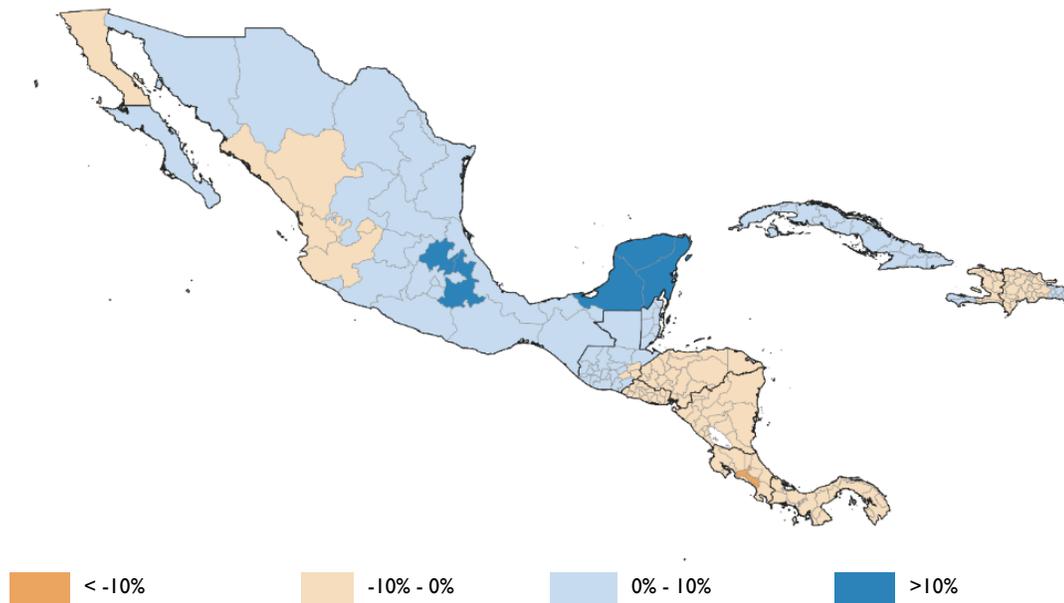
A. 1991-2000 en comparación con 1960-1990



B. 2001-2010 en comparación con 1960-1990



C. 2011-2018 en comparación con 1960-1990



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

Nota: Los datos por departamento se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ (aproximadamente 55 km) para cada área correspondiente. El concepto "departamento" se refiere a la segunda división administrativa, como distrito, estado, provincia y comarca. Las anomalías se calcularon con respecto a la climatología 1960-1990.

Cuadro IV.2
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: departamentos por anomalía de la precipitación acumulada anual, 1991-2018
 (En porcentajes)

Países	1991-2000				2001-2010				2011-2018			
	>10	0-10	-10-0	<-10	>10	0-10	-10-0	<-10	>10	0-10	-10-0	<-10
Belice		83,3	16,7			33,3	66,7			100,0		
Costa Rica			100			57,1	42,9				85,7	14,3
Cuba		50,0	43,8	6,3	12,5	87,5				100,0		
El Salvador		57,1	42,9				100,0				100,0	
Guatemala		54,5	45,5			59,1	40,9			86,4	13,6	
Haití			50,0	5,0	10,0	90,0				30,0	70,0	
Honduras		11,1	88,9			5,6	94,4				100,0	
México		28,1	53,1	18,8		75,0	15,6	9,4	15,6	65,6	18,8	
Nicaragua		5,9	94,1			35,3	64,7				100,0	
Panamá			100,0			100,0					100,0	
República Dominicana		3,1	90,6	6,3		75,0	25,0			15,6	84,4	

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

Belice, El Salvador y Guatemala son los países donde la precipitación se incrementó en más del 50% de los departamentos de 1991 a 2000, si bien este aumento fue menor al 10%. En este período, en la mayoría de los departamentos se observó una disminución de la precipitación de hasta el 10%, destacando Costa Rica, Panamá, Nicaragua, la República Dominicana y Honduras. Asimismo, en algunos departamentos de México, Cuba, Haití y la República Dominicana la precipitación disminuyó más del 10%.

En el período 2001-2010, en algunos departamentos de Cuba y Haití la precipitación aumentó más del 10% en 13% y 10% de los departamentos. En un alto porcentaje de los departamentos de la región aumentó la precipitación en menos del 10%. En el período 2011-2018, en el 16% de los departamentos de México la precipitación se incrementó más del 10%. En la mayoría de los departamentos de México, Guatemala, Belice y Cuba la precipitación se incrementó hasta un 10%. Pero la mayoría de los departamentos de Haití, la República Dominicana, Costa Rica, El Salvador, Honduras, Nicaragua y Panamá experimentó un decremento en la precipitación de hasta el 10%. Costa Rica fue el único país donde la precipitación decreció, en más del 10% en el 14% de sus departamentos.

B. Escenarios de cambio climático

La emisión continua de GEI causará un mayor calentamiento y cambios en todos los componentes del sistema climático, y muchos de esos cambios no han tenido precedentes en el planeta. De acuerdo con el IPCC (2013a) se espera que el ciclo del agua se intensifique con un clima más cálido. El aire caliente puede contener más humedad, ya que la atmósfera puede contener aproximadamente un 7% más de vapor de agua por cada grado Celsius de calentamiento. Las observaciones desde la década de 1970 indican un aumento del vapor de agua presente en la superficie terrestre y en la atmósfera. De esta manera las proyecciones indican que la evaporación y la precipitación se intensificarán ante un clima más cálido.

Como se explicó en los primeros capítulos, las simulaciones de los modelos climáticos, llevadas a cabo en quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas, utilizan un conjunto de escenarios denominados trayectorias de concentración representativas (RCP). En todas las RCP, las concentraciones atmosféricas de CO₂ son más elevadas al final del siglo respecto del presente, como resultado de un aumento de las emisiones de CO₂ acumuladas en la atmósfera durante el siglo XXI.

Desde que se presentaron los informes del IPCC ha habido mejoras en la simulación de los patrones de las precipitaciones a escala continental. Sin embargo, a escala regional, las simulaciones de las precipitaciones no ofrecen tan buenos resultados —en algunos casos consecuencia de la incertidumbre relativa a las observaciones—. Actualmente, los modelos del CMIP5 reproducen mejor algunos fenómenos climáticos importantes. Por ejemplo, existe un nivel de confianza alto en que las estadísticas de los monzones y el fenómeno El Niño-Oscilación Sur (ENOS), basadas en simulaciones de múltiples modelos que han mejorado desde el AR4. Asimismo, en la actualidad se han incluido en los modelos climáticos más procesos de nubes y aerosoles, así como sus interacciones, pero sigue existiendo un nivel de confianza bajo en la representación y cuantificación de estos procesos mediante los modelos climáticos.

Aunque, la simulación de los patrones de precipitación a escala global ha mejorado desde el AR4, los resultados de los modelos son mejores para proyectar los cambios en la temperatura que los de la precipitación. La correlación del patrón espacial entre las precipitaciones anuales medias modelizadas y las observadas ha aumentado de 0,77 para los modelos de que se disponía en el AR4 a 0,82 para los modelos actuales del AR5. Pese a que se

cuenta con mejores simulaciones, a escala regional, la incertidumbre en las observaciones genera que la precipitación no se simulaba tan bien (IPCC, 2013a).

Las estimaciones de los escenarios climáticos sugieren cambios no uniformes en el ciclo global del agua, en respuesta al calentamiento durante el siglo XXI. Se acentuará el contraste de las precipitaciones entre las regiones húmedas y secas, así como entre las estaciones húmedas y secas, aunque podrá haber excepciones regionales. Existe un nivel de confianza alto en que el fenómeno ENOS seguirá siendo el modo dominante de variabilidad intraanual en el Pacífico tropical, con efectos que se sentirán a escala mundial durante el siglo XXI. Debido al aumento de humedad existente, es probable que a escala regional se intensifique la variabilidad en la precipitación conexas al fenómeno ENOS.

No obstante, debido a que las variaciones naturales en la amplitud y el patrón espacial de ese fenómeno son grandes, persiste un nivel de confianza bajo en cualquier cambio proyectado concreto para el siglo XXI, en relación con el fenómeno ENOS y los fenómenos regionales conexos (IPCC, 2013a). En el capítulo II del presente documento se encuentra un resumen sobre cambios de los fenómenos meteorológicos en la región en los modelos del CMIP5.

Se prevé asimismo que ocurran cambios en el ciclo del agua con un clima más cálido. Se prevé que la precipitación a escala global aumente gradualmente en el siglo XXI, pero que este aumento sea muy inferior a la tasa de incremento de vapor de agua en la tropósfera. Los cambios en la precipitación media en un mundo mucho más cálido no serán uniformes, ya que en algunas regiones se experimentarán aumentos, en otras disminuciones y algunas no tendrán ningún cambio.

Es probable que las masas terrestres situadas en latitudes elevadas y en algunas zonas de latitudes medias registren un mayor volumen de precipitación debido a la mayor capacidad de almacenamiento de agua en una tropósfera más cálida. También, es muy probable que la precipitación media disminuya en las zonas subtropicales y que en muchas regiones áridas y semiáridas de latitud media y subtropicales, el nivel de precipitación sea menor. Está previsto que los mayores cambios en la precipitación en el norte de Eurasia y América del Norte se produzcan en invierno. Asimismo, es probable que la escorrentía aumente en latitudes septentrionales altas y que este aumento sea coherente con el aumento previsto de la precipitación en esas regiones (IPCC, 2013a).

A escala regional los cambios en la precipitación podrán estar dominados por una combinación de variabilidad interna natural, forzamiento volcánico y efectos de los aerosoles antropógenos. En los próximos decenios es probable que se produzca un aumento de la evaporación en muchas regiones. Sin embargo, existe un nivel de confianza bajo en relación con los cambios proyectados de la humedad del suelo y las escorrentías superficiales²⁷. A corto plazo, es probable que la frecuencia e intensidad de las precipitaciones aumente sobre la superficie terrestres. Estos cambios están principalmente causados por el aumento del contenido de vapor de agua en la atmósfera, pero también por cambios en la circulación atmosférica. El efecto del forzamiento antropógeno a escala regional es menos obvio, ya que

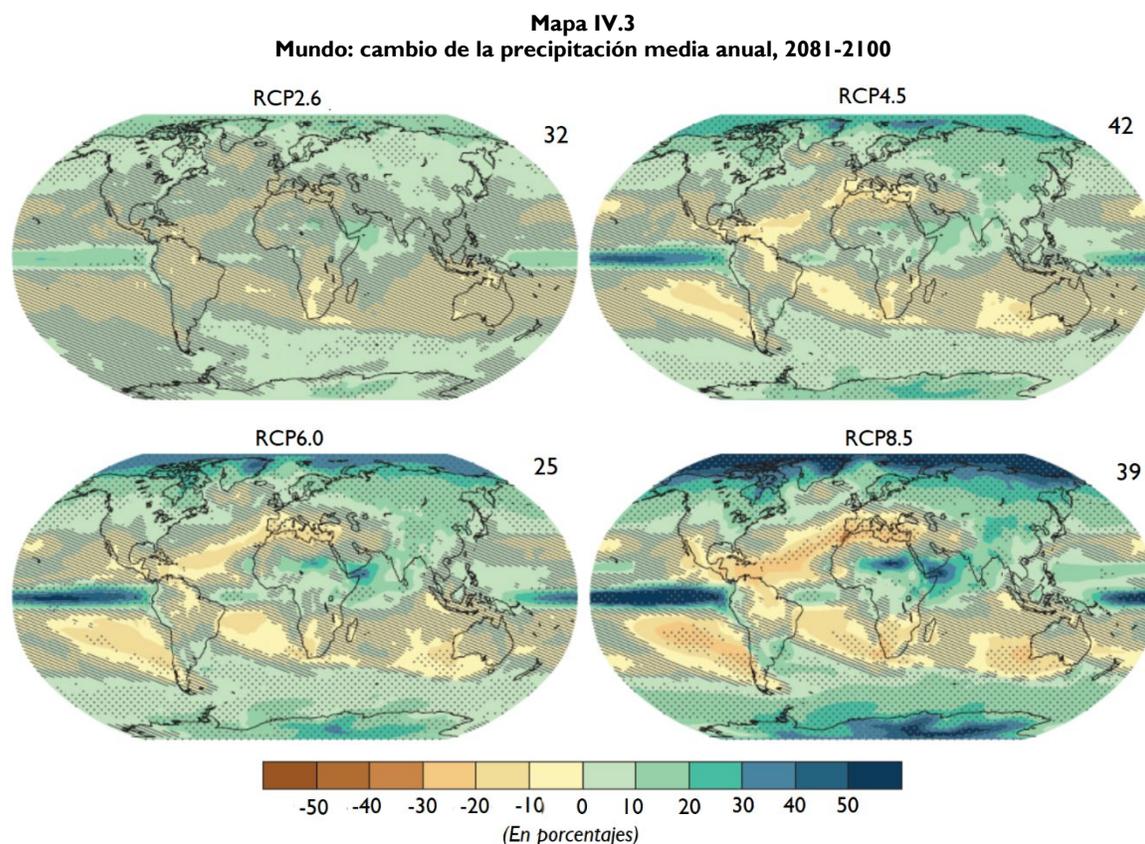
²⁷ Las proyecciones a escala regional y global de la humedad del suelo y la evaporación siguen siendo relativamente inciertas en comparación con otros aspectos del ciclo del agua.

como se mencionó anteriormente los cambios a escala regional estarán muy afectados por la variabilidad natural y los cambios de uso del suelo.

Es prácticamente seguro que el aumento de la temperatura media global de la superficie terrestre provoque un aumento de la precipitación global a largo plazo. Se espera que la precipitación media global aumentará a una tasa menor que el vapor de agua en la atmósfera. Para escenarios distintos al RCP2.6 es probable que el aumento global sea del 1% al 3%. Para el escenario RCP2.6 el rango podría ser entre el 0,5% al 4% a fines del presente siglo (IPCC, 2013a). En el mapa IV.3 se muestra el cambio de las precipitaciones para los cuatro escenarios RCP en el planeta. Los cambios en el promedio de precipitaciones en un mundo más cálido mostrarán una variación espacial significativa en el escenario RCP8.5. Algunas regiones experimentarán aumentos, otras, disminuciones, y habrá regiones que no experimenten cambios significativos.

Existe un nivel de confianza alto en que —conforme aumenten las temperaturas globales— se agudizará el contraste de la precipitación media anual entre regiones secas y húmedas y entre la estación húmeda y la seca en la mayor parte del mundo. De acuerdo con el escenario RCP8.5, el patrón general de cambio indica que en latitudes altas es muy probable que a fines del siglo XXI se produzcan precipitaciones más abundantes debido al aumento de la humedad específica en una tropósfera más cálida, así como al aumento del transporte de vapor de agua desde los trópicos. En el escenario RCP8.5 es probable que a fines del presente siglo muchas regiones áridas y semiáridas de latitudes medias y subtropicales experimenten menos precipitaciones y es probable que en muchas regiones húmedas de latitudes medias aumenten las precipitaciones (IPCC, 2013a).

Como se mencionó anteriormente, en el sur de México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana el ciclo anual de precipitación tiene una distribución bimodal, con dos picos máximos separados por un período seco denominado canícula, veranillo o *sequía de medio verano* (MSD). Los sectores productivos y en especial la agricultura de esta región se han adaptado a este fenómeno, anticipando su llegada y estimando su duración. Muchos pequeños productores agropecuarios son vulnerables a cambios en este ciclo, los medios de vida de cientos de familias dependen de los rendimientos de sus cultivos de secano. La variabilidad climática puede generar un decremento en los rendimientos agrícolas, debido a cambios en el ciclo, sequías, eventos hidrometeorológicos extremos y aparición de plagas y enfermedades. El cambio climático puede contribuir a agudizar los patrones de hambre estacional y vulnerabilidad de los medios de vida. Por ello resalta la necesidad de desarrollar capacidades de adaptación local, pero ello requiere caracterizar mejor el ciclo y la variabilidad de la precipitación, además de anticipar los posibles cambios de la canícula durante el siglo XXI.



Fuente: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), *Cambio climático 2013, bases físicas. Resumen para responsables de políticas*, contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, T. F. Stocker y otros (eds.), Cambridge y Nueva York, 2013 [en línea] http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGIAR5_SPM_brochure_es.pdf.

I. Climatología regional 1960-1990

El promedio de precipitación por país en la climatología 1960-1990 varía de forma significativa. En esta sección se presentan los mapas de la climatología por municipio de la base de datos WorldClim y CCAFS-Climate, pues estos datos permiten obtener promedios por municipio y por país. En la primera imagen de los mapas IV.3 y IV.5 se presentan los datos de esta climatología. Costa Rica es el país que presenta el mayor nivel de precipitación acumulada anual, con 2.656 mm anuales como promedio simple de los cantones, en tanto que los menores niveles de precipitación acumulada promedio se presentan en México, con 1.045 mm anuales.

El promedio de precipitación acumulada en Belice fue de 2.025 mm como promedio de los distritos²⁸. El rango de precipitación es amplio entre los distritos de este país. La precipitación máxima que se presentó en este período fue de 2.875 mm, en tanto que el mínimo fue de 1.434 mm. Costa Rica es el país con el mayor nivel de precipitación promedio en la región. El máximo de precipitación por cantón llegó a 4.512 mm y el mínimo fue de 1.655 mm. En Cuba el promedio de precipitación fue de 1.347 mm. En este país la dispersión de la

²⁸ Para Belice no se obtuvo la división municipal y se trabajó con su primera división administrativa.

precipitación es una de las más bajas, con una desviación estándar de 157 mm. Los niveles de precipitación acumulados variaron entre el máximo, de 2.062 mm, y el mínimo, de 858 mm.

De acuerdo con la climatología 1960-1990, en El Salvador el promedio de la precipitación acumulada anual fue de 1.873 mm. Al interior de este país se presentó un máximo por municipio de 2.235 mm y un mínimo 1.398 mm, en tanto que la desviación estándar fue la menor de la región, con 133 mm. El promedio de precipitación acumulada en Guatemala fue de 1.814 mm, con gran variación entre el máximo y mínimo por municipio, ya que su desviación estándar fue la mayor de la región, con 785 mm. El máximo de precipitación acumulada fue de 4.241 mm y el mínimo de 800 mm.

La precipitación promedio de Haití fue de 1.589 mm, con un máximo de 2.285 mm y un mínimo de 1.039 mm. Honduras presentó un promedio de precipitación acumulada anual de 1.596 mm, con diferencias entre el máximo de 2.841 mm y un mínimo de 935 mm. El promedio de precipitación en México fue el menor de la región, ya que en este país el máximo de la precipitación anual fue de 4.028 mm y el mínimo de 75 mm. En Nicaragua el promedio de precipitación acumulada anual fue de 1.701 mm, con un máximo por municipio de 4.846 mm y un mínimo de 888 mm; su desviación estándar también es una de las mayores en la región, con 622 mm. En Panamá la precipitación acumulada anual promedio fue de 2.532 mm, y la precipitación varió en este país por municipio entre 3.528 mm y 1.143 mm. La precipitación acumulada anual promedio en la República Dominicana fue de 1.359 mm, con un máximo de 2.060 mm y un mínimo de 719 mm.

Por regiones, la climatología indica diferencias en los niveles de precipitación acumulada anual. La zona más seca se encontró en el norte y noroeste de México, y la más húmeda en la costa atlántica de Centroamérica, Costa Rica y algunos municipios de la región norte y occidente de Guatemala. En el norte y noroeste de México el promedio de precipitación fue menor que en el resto de la región. De acuerdo con la climatología 1960-1990 la precipitación promedio fue menor a 600 mm acumulados al año. En la región oeste, centro, el golfo de México y la península de Yucatán la precipitación estuvo entre 600 mm a 1.200 mm acumulados al año.

Algunos municipios del suroeste y sureste de México, Cuba, Haití, la República Dominicana, la costa Pacífico de Nicaragua, la parte central de Honduras (con excepción de Gracias a Dios), el centro y Petén en Guatemala tuvieron un promedio de precipitación entre 1.200 mm a 1.800 mm acumulados al año. La mayor parte de El Salvador, costa Pacífico de Guatemala, Belice y oriente de la costa atlántica de Panamá, así como algunos municipios del centro de Guatemala presentaron una precipitación entre 1.800 mm a 2.400 mm acumulados anuales. La región norte de Guatemala, sur de Belice, costa atlántica de Honduras y Nicaragua, Costa Rica y occidente y centro de Panamá presentaron precipitaciones mayores a los 2.400 mm acumulados al año.

2. Escenarios RCP

Entre los impactos del calentamiento global en la región se esperan cambios en el ciclo e intensidad de la precipitación. Estos cambios tienen el potencial de afectar las actividades económicas, especialmente actividades agropecuarias con impactos directos en la seguridad alimentaria. Para analizar estos cambios, en esta sección se utiliza el ensamble de los tres

modelos seleccionados (CESM1_CAM5, MPI_ESM_LR y MIROC5). La capacidad de estos modelos para simular la media regional y variabilidad de la precipitación y temperatura mensuales y las características de Oscilación del Sur (ENSO) de El Niño fue evaluada por Hidalgo y Alfaro (2015), y se analiza en el capítulo II del presente documento. Se utilizó un ensamble para reducir la incertidumbre de los modelos y generar proyecciones robustas del clima futuro. Se utilizaron las proyecciones bajo dos escenarios de emisiones futuras o RCP. La trayectoria más extrema es representada por el RCP8.5; por su parte, el RCP4.5 supone acciones de mitigación de GEI con emisiones decrecientes a mediados del siglo XXI.

En los gráficos IV.7 y IV.9 se muestran el ciclo anual de precipitación y la variabilidad intraanual futura de la precipitación con los RCP4.5 y RCP8.5 respectivamente para todos los países. Se muestran los modelos y el ensamble de los modelos CESM1_CAM5, MPI_ESM_LR y MIROC5. Knutti y Sedláček (2012) mencionan que los MCGAO no han convergido en sus proyecciones y la convergencia entre ellos puede ser un proceso lento. No obstante, las nuevas generaciones de modelos representan los procesos climáticos con mayor detalle y existe mayor confianza en sus proyecciones. Los modelos del CMIP5 muestran mejoras en las proyecciones de precipitación en los trópicos, es decir, en América Central y África, Medio Oriente, Sudeste de Asia y Australia.

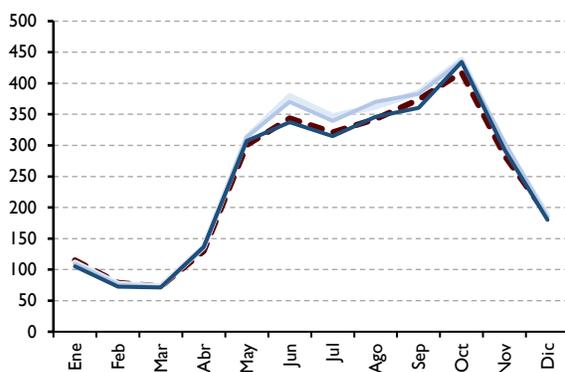
Sin embargo, las incertidumbres de las proyecciones han sido similares en los sucesivos informes del IPCC. Knutti y Sedláček (2012) argumentan que definir el progreso en la modelización climática en términos de reducir las incertidumbres es limitado. Para mostrar la incertidumbre y variación que existe entre los diferentes modelos utilizados en los gráficos siguientes se muestran sus diferentes proyecciones. Primero se muestra un ejemplo de los cambios proyectados durante el siglo XXI utilizando el RCP8.5 para Costa Rica (véase el gráfico IV.6). En el gráfico se separó la información por modelo y cortes de tiempo para su fácil visualización. En la parte A del gráfico se incluye la climatología 1960-1990 y el ensamble de los tres modelos (líneas azules) y en las partes B, C y D se presenta cada modelo considerado.

En el caso de Costa Rica se observa un cambio en la variabilidad intraanual a través del tiempo, con mayor precipitación entre junio y septiembre en 2030 y 2050, después una reducción en el mismo período de precipitación para regresar a los niveles de la climatología al finalizar el presente siglo. Se observa que hay diferencias entre los tres modelos, ya que mientras el modelo CESM1_CAM5 proyecta una reducción significativa en la precipitación al fin de siglo, sobre todo en los meses de junio a septiembre, el modelo MPI_ESM_LR proyecta un incremento de junio a agosto, pero con un decremento en mayo y septiembre. Los ensambles o promedios de los modelos están contenidos en el gráfico IV.6.A, no se muestran grandes cambios proyectados durante el siglo XXI. En el gráfico se representa el promedio por país, y puede esconder la gran diversidad regional al interior del país. Sin embargo, los distintos modelos muestran cambios en la variabilidad intraanual desde 2030 y hacia el fin del siglo XXI y cambios en la intensidad de la canícula (véase el gráfico IV.6).

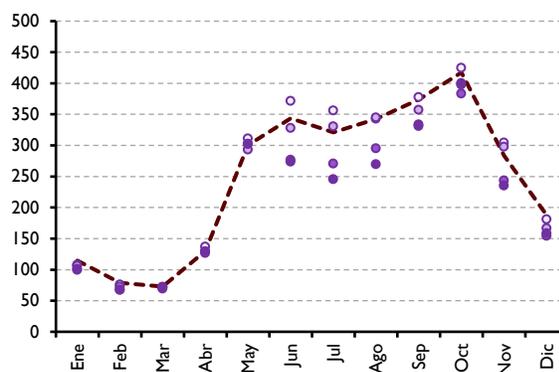
Gráfico IV.6
Costa Rica: precipitación acumulada por mes y periodo, climatología 1960-1990 y diferentes modelos RCP8.5,
cortes 2030, 2050, 2070 y 2080

(En milímetros)

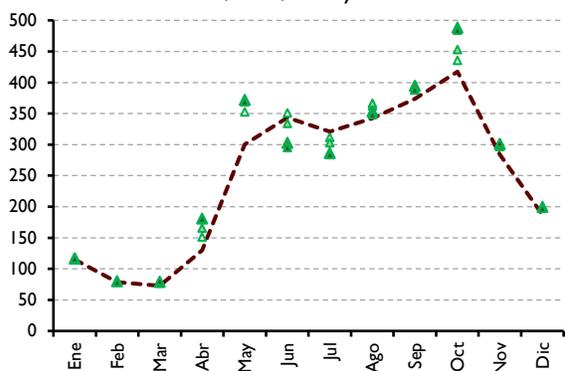
A. Precipitación intraanual, 1960-1990, 2030, 2050, 2070 y 2080



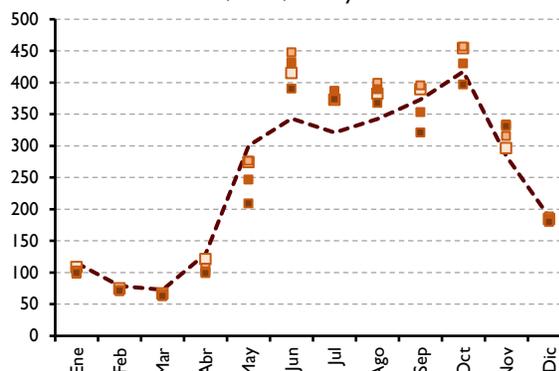
B. Climatología 1960-1990 y modelo CESMI_CAM5 a 2030, 2050, 2070 y 2080



C. Climatología 1960-1990 y modelo MIROC 5 a 2030, 2050, 2070 y 2080



D. Climatología 1960-1990 y modelo MPI_ESM_LR a 2030, 2050, 2070 y 2080

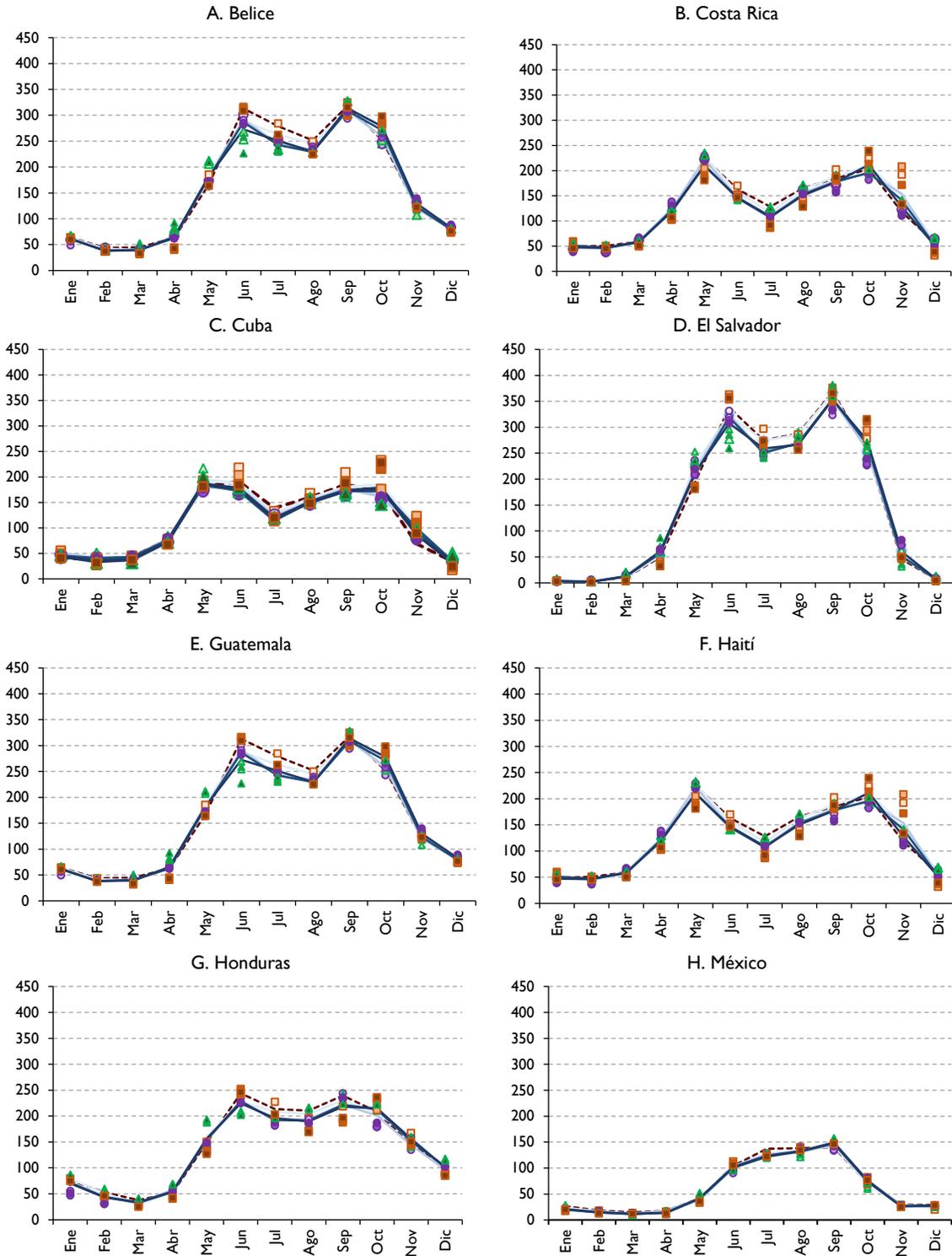


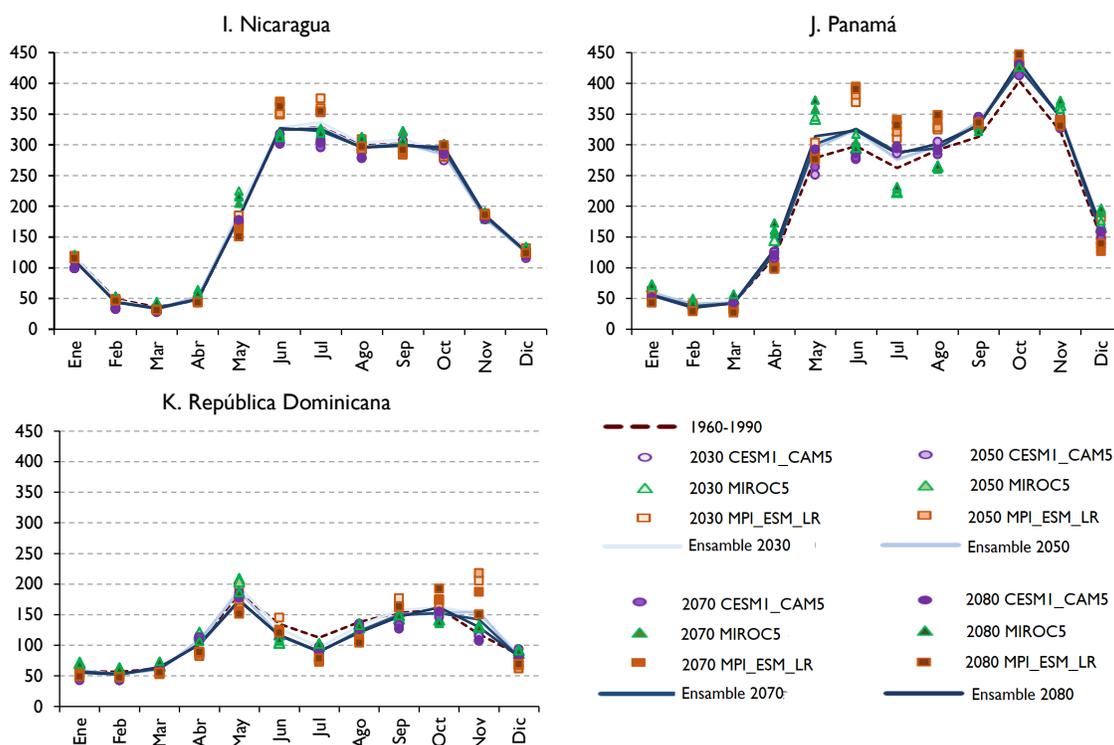
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Programa de Investigación sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS-CGIAR), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

3. Escenario RCP4.5

En el gráfico IV.7 se muestran los cortes 2030, 2050, 2070 y 2080 considerando el escenario RCP4.5, que supone un proceso de mitigación a fines del presente siglo. Como se mencionó anteriormente, la línea punteada es la climatología 1960-1999. En general no se observan grandes cambios en los patrones de precipitación estacional a nivel país. No obstante, en la mayoría de los casos habría una reducción de la precipitación durante la estación lluviosa de mayo a octubre. Las reducciones serían menores en Cuba, Haití, México y Nicaragua. Podrían generarse reducciones un poco más significativas en Belice, Honduras, Guatemala, El Salvador y la República Dominicana. También habría ligeros incrementos, como en el caso de Costa Rica y Panamá. En todos los gráficos se muestra la variabilidad que existe entre los tres modelos utilizados, lo cual permite considerar la incertidumbre de las predicciones futuras principalmente en la época lluviosa.

Gráfico IV.7
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: precipitación acumulada por país, mes, período, climatología 1960-1990 y escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
(En milímetros)



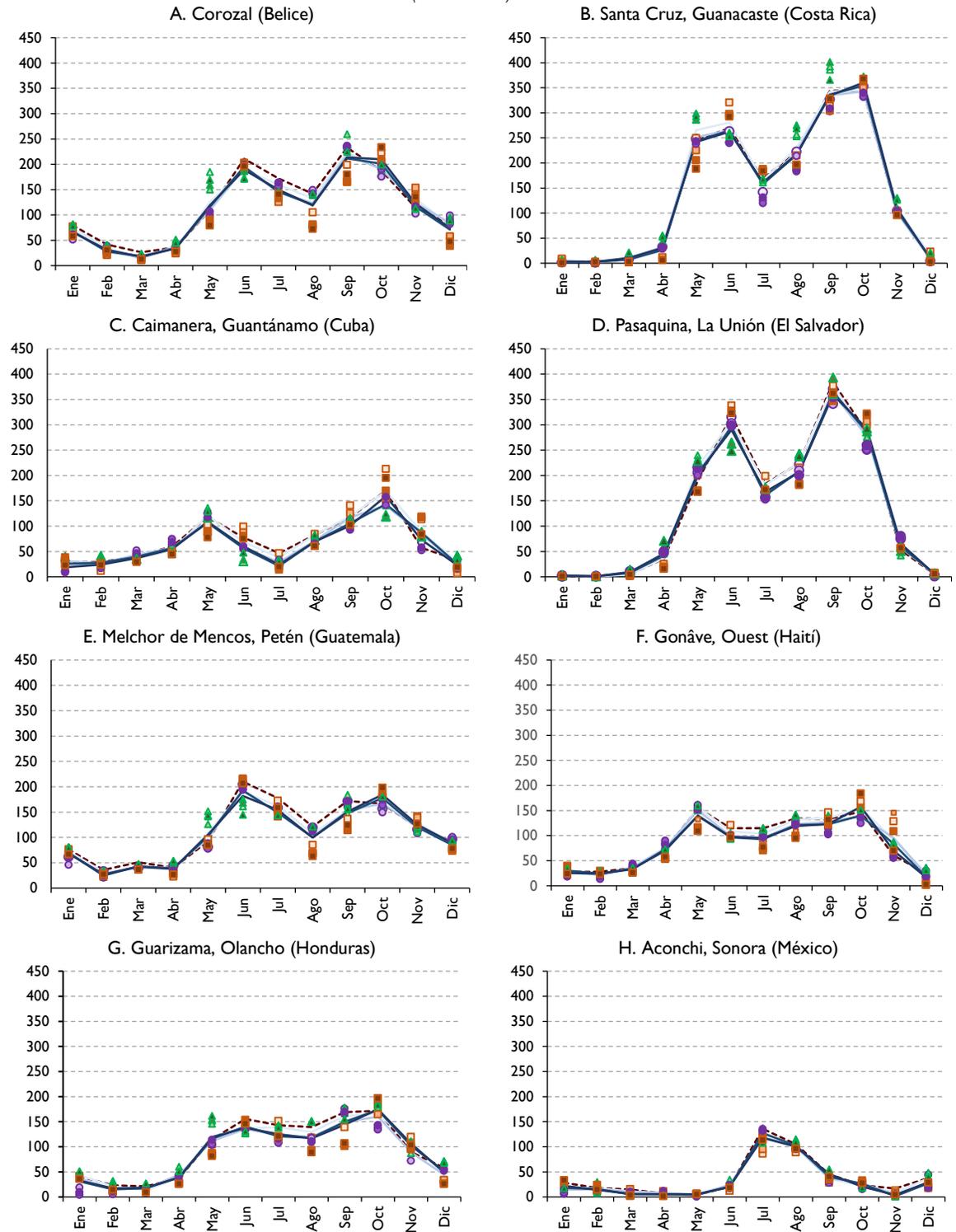


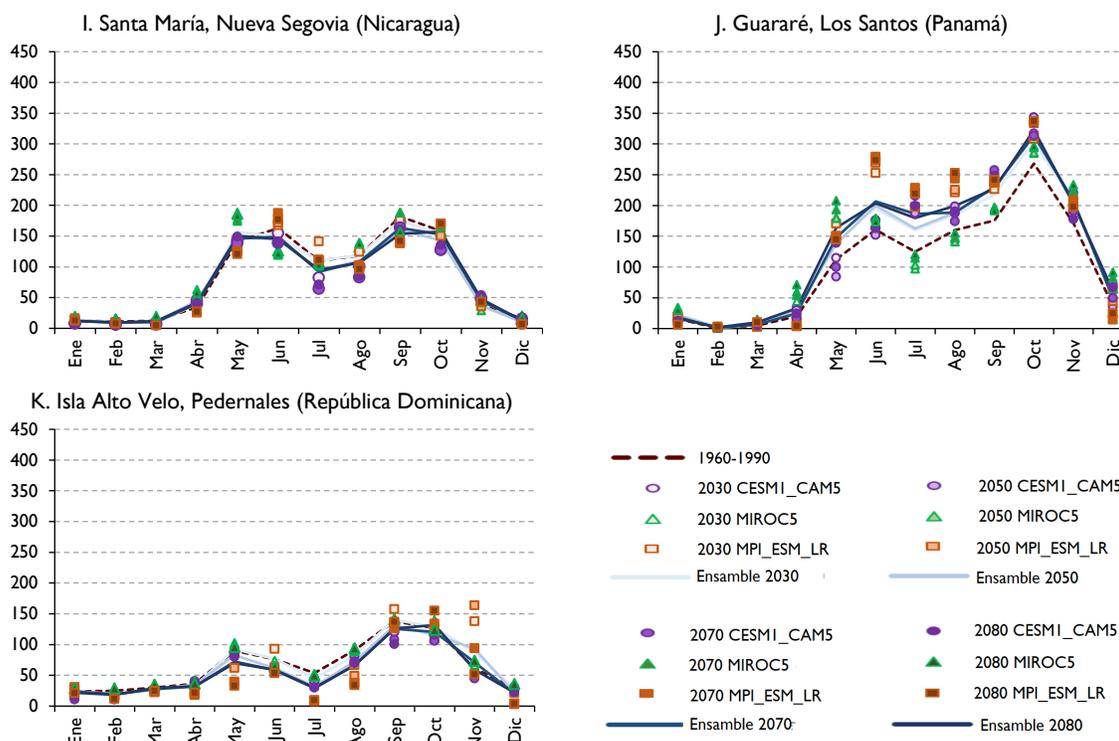
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Programa de Investigación sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS-CGIAR), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

El cambio en los patrones estacionales por país utilizando los dos diferentes escenarios, RCP4.5 y RCP8.5, representa el promedio del país y puede no ser tan significativo. Lo anterior se debe a que los promedios por país ocultan las grandes diferencias geográficas regionales. Por tal motivo se eligió un municipio por país y se hizo el mismo ejercicio; la selección de estos municipios consistió en elegir aquellos que permitieran visualizar los mayores cambios. El objetivo es analizar los cambios a una menor escala geográfica, teniendo en cuenta que las bases de datos disponibles permiten hacer este tipo de análisis. En este caso solamente se presenta un municipio por país, pero la información disponible permite replicar este tipo de ejercicio para todos los municipios de la región, o incluso regiones geográficas particulares como cuencas o coordenadas geográficas específicas, pero teniendo presente que áreas muy pequeñas pueden tener características no representativas de su entorno.

En el gráfico IV.8 se muestra el ejemplo de los resultados del ejercicio por municipio. En este gráfico se ilustran los cambios proyectados para fines del siglo XXI con el escenario RCP4.5 para los diferentes municipios seleccionados por país y es comparable con el que muestra el RCP8.5 para los mismos municipios (véase el gráfico IV.10). Al igual que con los resultados por país, la mayoría de los cambios se produce durante el período de lluvia de mayo a octubre y en casi todos los casos están marcados por una reducción de la precipitación durante estos meses. Es decir, disminuyen los dos picos de precipitación y se acentúa la canícula. En el gráfico IV.8 también se muestra la variabilidad entre los modelos que indica la incertidumbre y variabilidad en las proyecciones futuras.

Gráfico IV.8
Municipios seleccionados de México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: precipitación acumulada, por mes, período, climatología 1960-1990 y escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
(En milímetros)





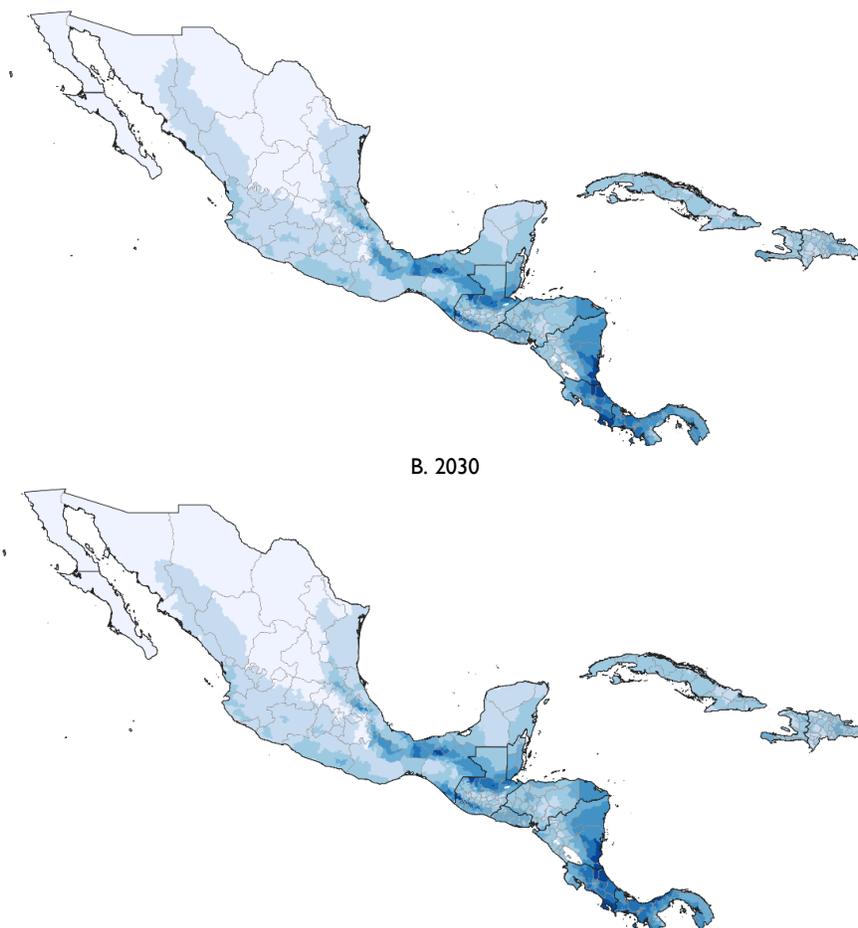
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Programa de Investigación sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS-CGIAR), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

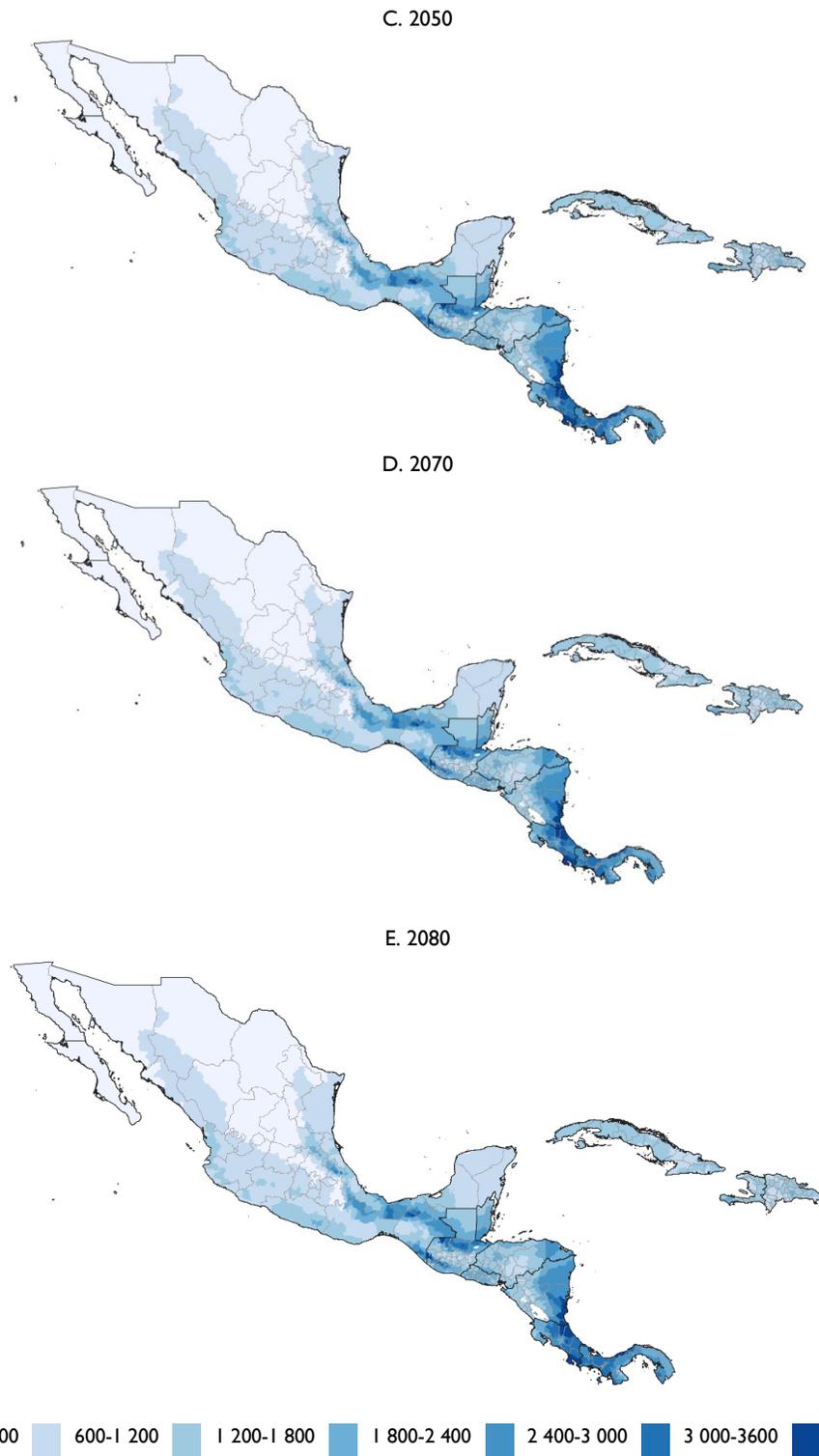
No se observan cambios significativos por municipio con el escenario RCP4.5, salvo en Guararé, Los Santos (Panamá), donde habría un incremento en la precipitación en casi todos los meses. Podrían ocurrir pequeños cambios en Corozal (Belize); Melchor de Mencos, Petén (Guatemala); Guarizama, Olancho (Honduras); Santa María, Nueva Segovia (Nicaragua) e Isla Alto Velo, Pedernales (República Dominicana). De acuerdo con este escenario, habrá períodos de canículas más marcados desde 2030 en los municipios de Belize, El Salvador, Cuba, Guatemala, Haití, Honduras, Nicaragua y la República Dominicana. Por otra parte, algunos municipios no verían cambios significativos, por ejemplo, Santa Cruz, Guanaste (Costa Rica), Caimanera, Guantánamo (Cuba), Gonâve, Ouest (Haití) y Aconchi, Sonora (México).

En los mapas IV.4 y IV.6 se muestra la precipitación acumulada de la climatología 1960-1990 y los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 para los cortes 2030, 2050, 2070 y 2080. A partir de 2030 —considerando los escenarios analizados— se observan cambios en el nivel de precipitación promedio acumulada al año. De acuerdo con el escenario RCP4.5 durante el presente siglo la región seca —con niveles bajos de precipitación— se ampliaría y se extendería en el norte de México. En Centroamérica, se ampliaría lo que se denomina Corredor Seco Centroamericano, principalmente las regiones centrales de Guatemala, Honduras y Nicaragua. Las regiones húmedas (niveles altos de precipitación) seguirían siendo la costa atlántica de Nicaragua, Costa Rica y Panamá, así como algunos municipios del occidente y norte de Guatemala. También habría menos precipitación en la parte sur de Cuba y suroeste de la República Dominicana.

La descripción de los datos por país se obtuvo con el promedio simple de los datos por municipio contenidos en el mapa IV.4. En el escenario RCP4.5 desde 2030 la precipitación acumulada anual en Belice se reduciría un 3% con respecto a la climatología de referencia 1969-1990, en 2050 y 2070 la reducción sería del 5% y del 4% a 2080. La variabilidad de la precipitación entre los municipios no se incrementaría en ese país. En Costa Rica el promedio de la precipitación acumulada se incrementaría en un 4% en 2030 y un 2% a 2080, y la variabilidad entre la precipitación de los municipios se mantendría. En promedio, la precipitación acumulada anual en Cuba se incrementaría un 2% en 2030 y se reduciría un 2% a 2080; es el único país donde la variabilidad de la precipitación entre municipios se incrementa hasta un 15% a 2080.

Mapa IV.4
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: precipitación acumulada anual por municipio y período, climatología 1960-1990 y escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
(En milímetros)
A. 1960-1990





Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Programa de Investigación sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS-CGIAR), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

Nota: Los datos por municipio se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de aproximadamente 1 km para cada área correspondiente. En el caso de Belice es a nivel Distrito debido a la disponibilidad de información. El escenario es el ensamble de los modelos CESMI_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR.

En El Salvador la precipitación se incrementaría un 2% en 2030 y se reduciría un 2% en 2070 y un 1% a 2080. La precipitación en Guatemala se incrementaría un 1% en 2030 y se reduciría un 1% a 2080. En Haití la precipitación se incrementaría un 1% a 2030 y se reduciría un 4% a 2080. En Honduras desde 2030 se reduciría la precipitación un 1% en 2030 y hasta un 4% hacia 2080. México es uno de los países donde el promedio de la precipitación acumulada anual se reduciría en mayor medida, 6% en 2030, 4% en 2050, 6% en 2070 y 4% a 2080. En Nicaragua la precipitación se incrementaría un 3% en 2030, no obstante, a 2080 se mantendría muy similar a la climatología de referencia. Panamá es el país donde la precipitación se incrementaría más, un 8% en 2030 y ese incremento se mantendría a 2080. En este país la desviación estándar se reduce y la variabilidad entre los municipios se reduce hasta un 12% a 2080. En la República Dominicana la precipitación se reduciría hasta un 5% a 2080.

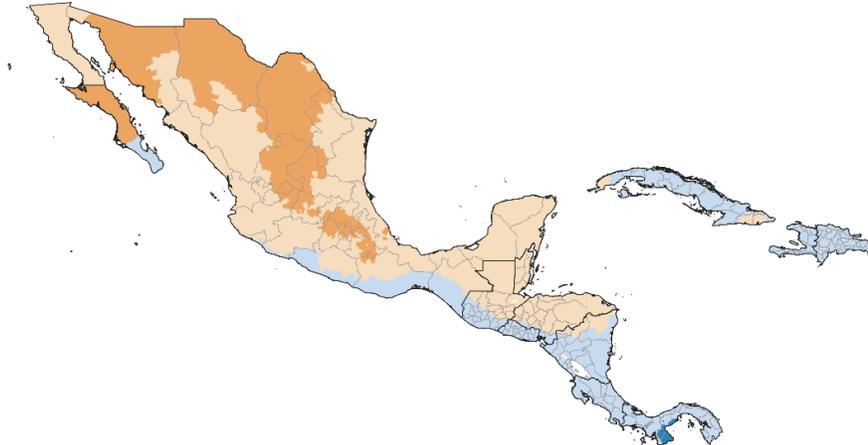
En los mapas IV.5 y IV.7 se muestran los cambios en porcentajes que proyectan los dos escenarios climáticos a los distintos cortes en comparación con la climatología de referencia 1960-1990. En el escenario RCP4.5 se esperaría que hacia 2030 la precipitación disminuiría en la mayor parte de México, Belice, norte y centro de Guatemala, Honduras (con excepción del sur) y algunos municipios del norte de Nicaragua (véase el mapa IV.5). El mayor decremento en la precipitación, mayor del 10%, sería en el norte y algunos municipios del centro de México. En Coahuila el decremento llegaría hasta un 21%. En la costa del Pacífico al sur de México y Guatemala, El Salvador, la mayor parte de Nicaragua, Costa Rica, Panamá, Cuba, Haití y la República Dominicana la precipitación se incrementaría hasta un 10%. En algunos distritos de Los Santos y Herrera en Panamá la precipitación podría incrementarse hasta un 24%.

En el corte 2050 y de acuerdo con las proyecciones del escenario RCP4.5 habría cambios con respecto a la climatología de referencia 1960-1990. Habría un decremento en la precipitación que se extendería por la mayor parte de México, salvo la costa del Pacífico del sur de México. Los estados más afectados serían Sonora y la Península de Baja California, donde la precipitación se reduciría en más del 10%. En algunos municipios de Baja California el decremento podría llegar al 27%. La reducción de precipitación se extendería por la mayor parte de Guatemala, Belice, El Salvador, Honduras y la parte norte de Nicaragua, este y oeste de Cuba, así como Haití y la República Dominicana. Los incrementos sucederían en la costa del Pacífico de México, el sur de Nicaragua, Costa Rica, Panamá y centro de Cuba. Así como en el período anterior, en Los Santos y Herrera en Panamá la precipitación podría incrementarse hasta un 24%.

En el corte 2080 las proyecciones del escenario RCP4.5 indican que en la mayor parte de la región habría un decremento en la precipitación con respecto al período 1960-1990. La región más afectada continuaría siendo el norte de México. No obstante, la región con decrementos mayores al 10% se reducirá significativamente en comparación con las proyecciones de 2030 y 2050. La mayor parte de Guatemala, Honduras, El Salvador, la República Dominicana, así como gran parte de Nicaragua y Cuba también serían afectadas por una reducción en la precipitación, pero no mayor al 10%. Los mayores decrementos se ubicarían en el norte de México, especialmente en Baja California y Sonora con decrementos mayores al 15%. Los aumentos en la precipitación ocurrirían en la costa pacífica del sur de México, Guatemala y Nicaragua, la mayor parte de Costa Rica, Panamá y la parte norte de Cuba.

Mapa IV.5
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: anomalía de la precipitación acumulada anual
por municipio y período, escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
(En porcentajes)

A. 2030 en comparación con 1960-1990



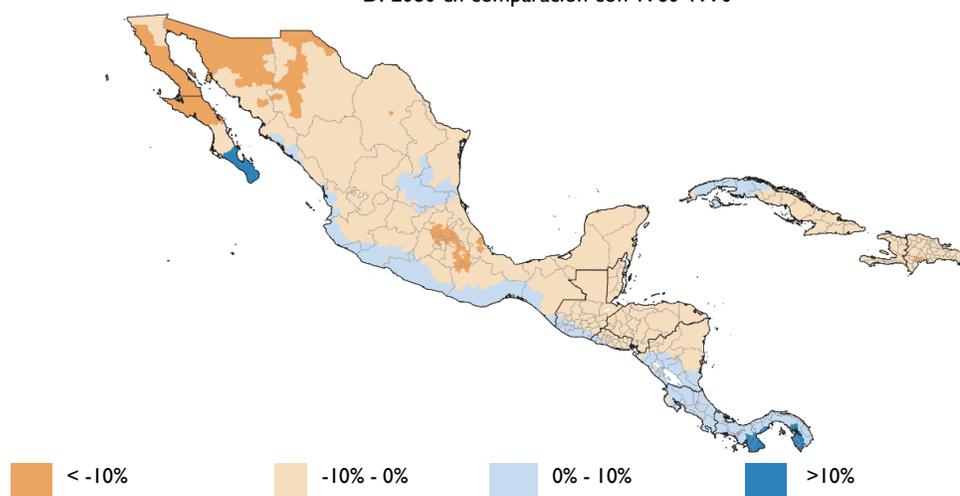
B. 2050 en comparación con 1960-1990



C. 2070 en comparación con 1960-1990



D. 2080 en comparación con 1960-1990



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Programa de Investigación sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS-CGIAR), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

Nota: Los datos por municipio se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de aproximadamente 1 km para cada área correspondiente. En el caso de Belice es a nivel Distrito debido a la disponibilidad de información. El escenario es el ensamble de los modelos CESM1_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR.

Cuadro IV.3
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios por anomalía de la precipitación acumulada anual, escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
 (En porcentajes)

País	2030				2050			
	>10	0 - 10	-10 - 0	<-10	>10	0 - 10	-10 - 0	<-10
Belice			100				100	
Costa Rica		100				93,8	6,2	
Cuba		88,7	11,3			31,5	68,5	
El Salvador		99,2	0,8			12,6	87,4	
Guatemala		68,2	31,8			29,8	69,6	0,6
Haití		100					100	
Honduras		20,1	79,9				99,7	0,3
México		4,7	67,4	27,8	0,1	8,2	79,0	12,7
Nicaragua		89,1	10,9			43,8	56,2	
Panamá	29,3	70,7			29,3	70,7		
República Dominicana		100				2,5	97,5	

País	2070				2080			
	>10	0 - 10	-10 - 0	<-10	>10	0 - 10	-10 - 0	<-10
Belice			100				100	
Costa Rica		88,9	11,1			98,8	1,2	
Cuba		41,7	57,7	0,6		41,1	58,3	0,6
El Salvador		8,4	91,6			22,6	77,4	
Guatemala		17,6	82,1	0,3		32,4	67,6	
Haití			100				100	
Honduras			100				100	
México	0,1	3,8	79,0	17,2	0,1	9,8	75,7	14,4
Nicaragua		43,1	56,9			59,9	40,1	
Panamá	29,3	70,7			34,7	65,3		
República Dominicana			96,2	3,8			91,8	8,2

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Programa de Investigación sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS-CGIAR), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

En el cuadro IV.3 se indica el porcentaje de municipios donde la precipitación cambiaría bajo diferentes rangos para los diferentes cortes analizados bajo el escenario RCP4.5. En el cuadro se muestra el porcentaje en número de municipios, mas no la extensión geográfica del país. En cada período, la primera columna indica el porcentaje de municipios por país donde la precipitación se incrementaría en más del 10% con respecto a la climatología 1960-1990, la segunda indica un aumento de precipitación hasta un 10%, las siguientes muestran el porcentaje de municipios donde habría disminuciones de precipitación hasta un 10% y más del 10%.

Panamá y México son los países donde se presentarían incrementos de la precipitación en más del 10%. Sin embargo, en México el porcentaje de municipios sería menor al 1%. En Panamá en 2030, 2050 y 2070 el 29% de los municipios incrementaría la precipitación acumulada anual en más del 10%, a 2080 sería en el 35% de los municipios. En 2030 un mayor porcentaje de municipios aumentarían su precipitación hasta un 10% con respecto a la climatología 1960-1990, el porcentaje disminuye conforme avanza el tiempo. A final del siglo habría un mayor porcentaje de municipios que disminuirían su precipitación. En 2080 en un mayor porcentaje de los municipios su precipitación disminuiría hasta un 10% con respecto a la climatología 1960-1990. En el 14% de los municipios de México, el 8% de los municipios en República Dominicana y el 0,6% en Cuba la precipitación acumulada anual disminuiría más del 10%.

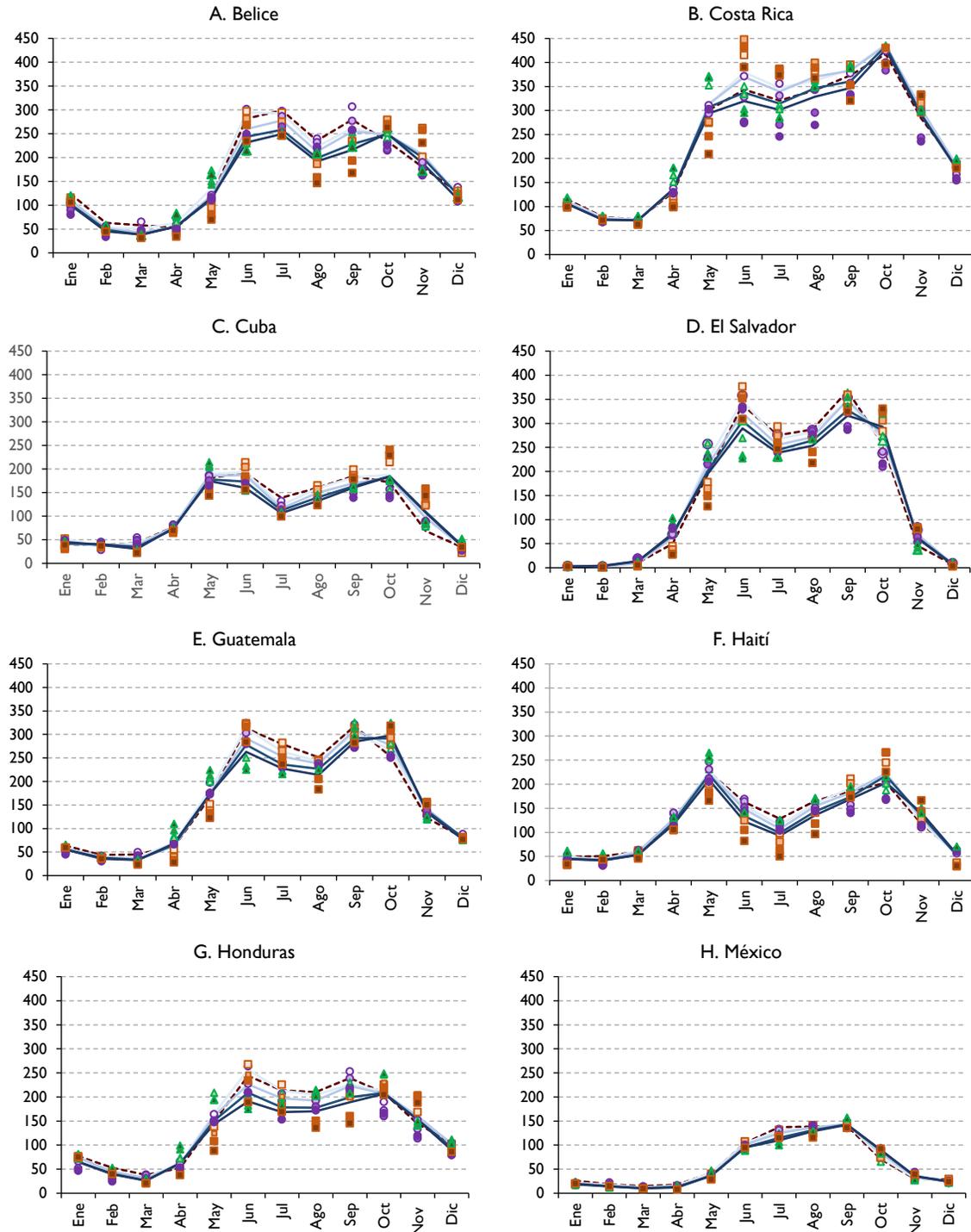
4. Escenario RCP8.5

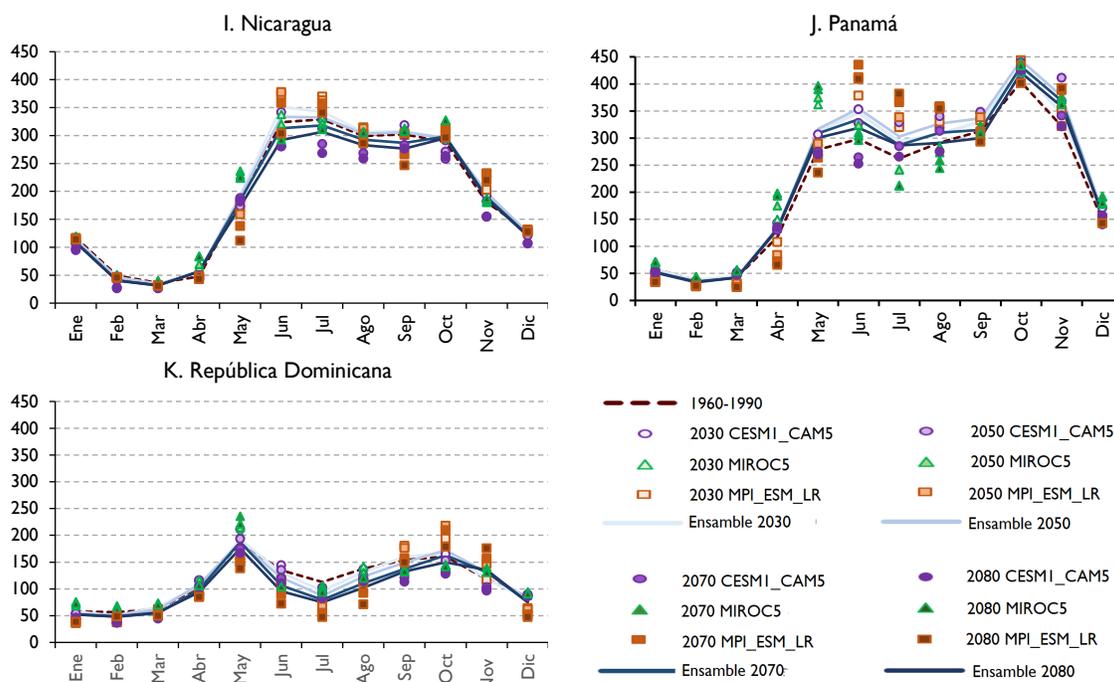
En el gráfico IV.9 se muestran los cambios proyectados en la variación intraanual por país en los cortes 2030, 2050, 2070 y 2080 considerando el escenario RCP8.5 como el más extremo, con un incremento significativo de GEI. Se observan mayores cambios en el patrón de precipitación estacional que con el escenario RCP4.5. Los cambios más significativos sucederían durante la época de estación lluviosa, es decir, durante los meses de mayo a octubre. En general, se esperan reducciones en la precipitación durante estos meses, pero también durante la temporada de canícula. Las proyecciones indican que la precipitación continuaría siendo menor en Cuba y México. Asimismo, podrían existir reducciones más significativas en Belice, El Salvador, Guatemala, Haití, Honduras y la República Dominicana. No obstante, podrían existir incrementos en Panamá. Por su parte Costa Rica y Nicaragua experimentarían incrementos hasta mitad del siglo y a partir de esa fecha se reduciría la precipitación en la época lluviosa.

La intensidad de la canícula varía en la región, sin embargo, los gráficos del escenario RCP8.5 proyectan una mayor reducción de la precipitación en este período, pero también en los dos picos máximos de precipitación. Lo anterior podría indicar una canícula más marcada y larga durante varias semanas entre julio y septiembre que podrían originar problemas de sequía en algunas regiones. Las características de estos cambios en la canícula (inicio, fin, duración e intensidad) tienen implicaciones para los ecosistemas, la producción de cultivos, el sustento de miles de agricultores y en general en todas las actividades económicas de la región. Los agricultores se han adaptado a los períodos de sequía durante siglos y en la mayoría de los casos pueden tener dos siembras de secano al año. El cambio climático representa un reto ya

que la duración e intensidad de la canícula pueden comprometer la siembra de los cultivos y generar período de escasez de alimentos en la región.

Gráfico IV.9
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: precipitación acumulada por país, mes, período, climatología 1960-1990 y escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
 (En milímetros)





Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Programa de Investigación sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS-CGIAR), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

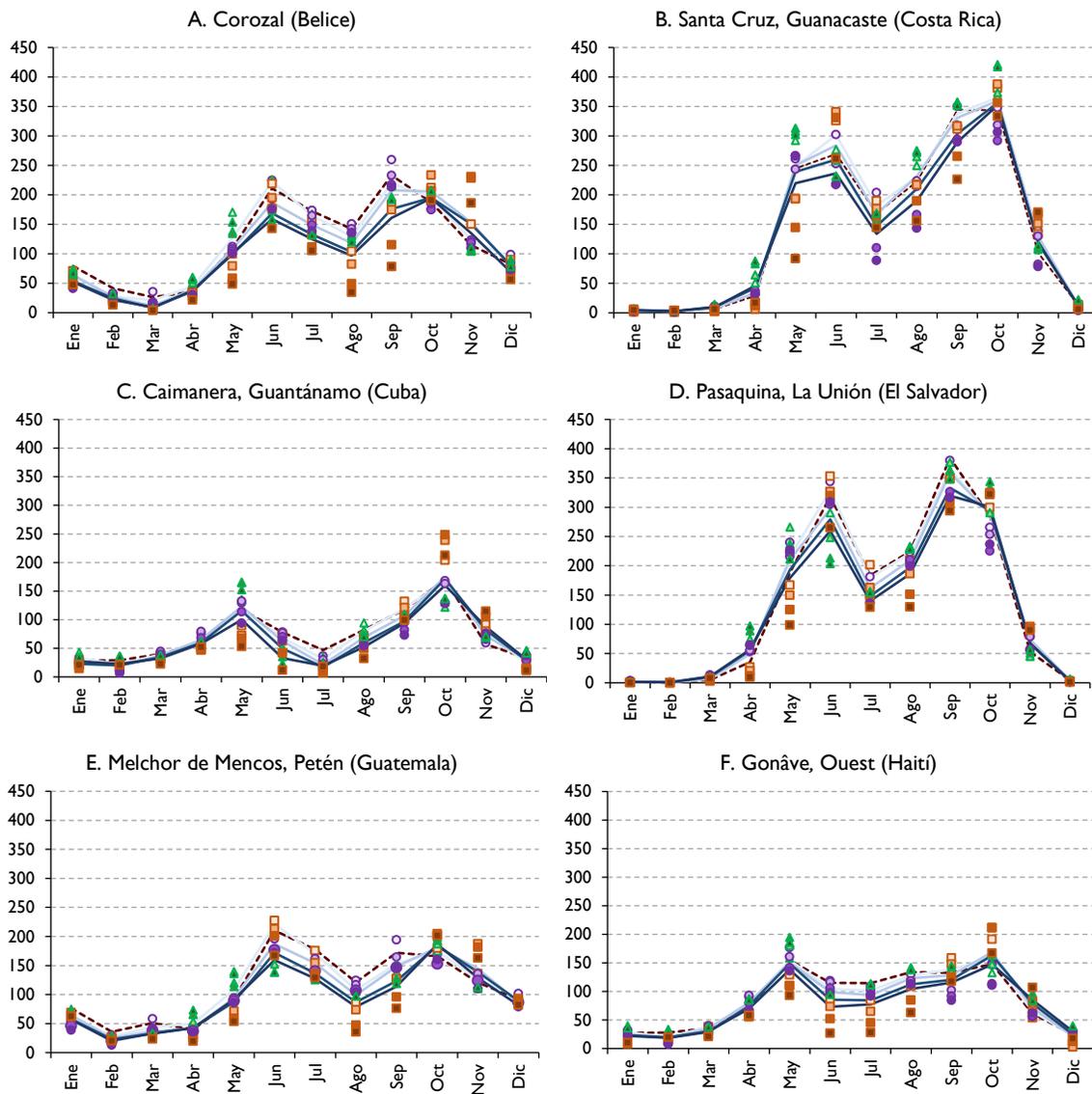
Como se mencionó anteriormente, el cambio en los patrones estacionales por país representa el promedio y ocultan las grandes diferencias geográficas regionales. Se eligió un municipio por país y se replicó el ejercicio mostrado en las gráficas anteriores, la selección se basó en aquellos que permitieran visualizar los mayores cambios. En el gráfico IV.10 se muestra el ciclo anual de precipitación o la variabilidad intraanual de los municipios seleccionados utilizando el escenario RCP8.5 para los distintos cortes analizados, 2030, 2050, 2070 y 2080. En este caso, las proyecciones indican que la reducción en la precipitación durante la época de lluvia sería mayor, los dos picos de precipitación serían menores y la canícula sería más pronunciada. En los gráficos de los diferentes municipios por país se muestra mayor variabilidad entre los modelos utilizados, lo que refleja la incertidumbre entre ellos. Podrían ocurrir reducciones significativas en los meses de agosto en el distrito de Corozal (Belize) y en el municipio de Melchor de Mencos, Petén (Guatemala). Asimismo, reducciones en todos los meses en Guarizama, Olancho (Honduras) y en Santa María, Nueva Segovia (Nicaragua). Igualmente, incrementos significativos estarían ocurriendo en Guararé, Los Santos (Panamá).

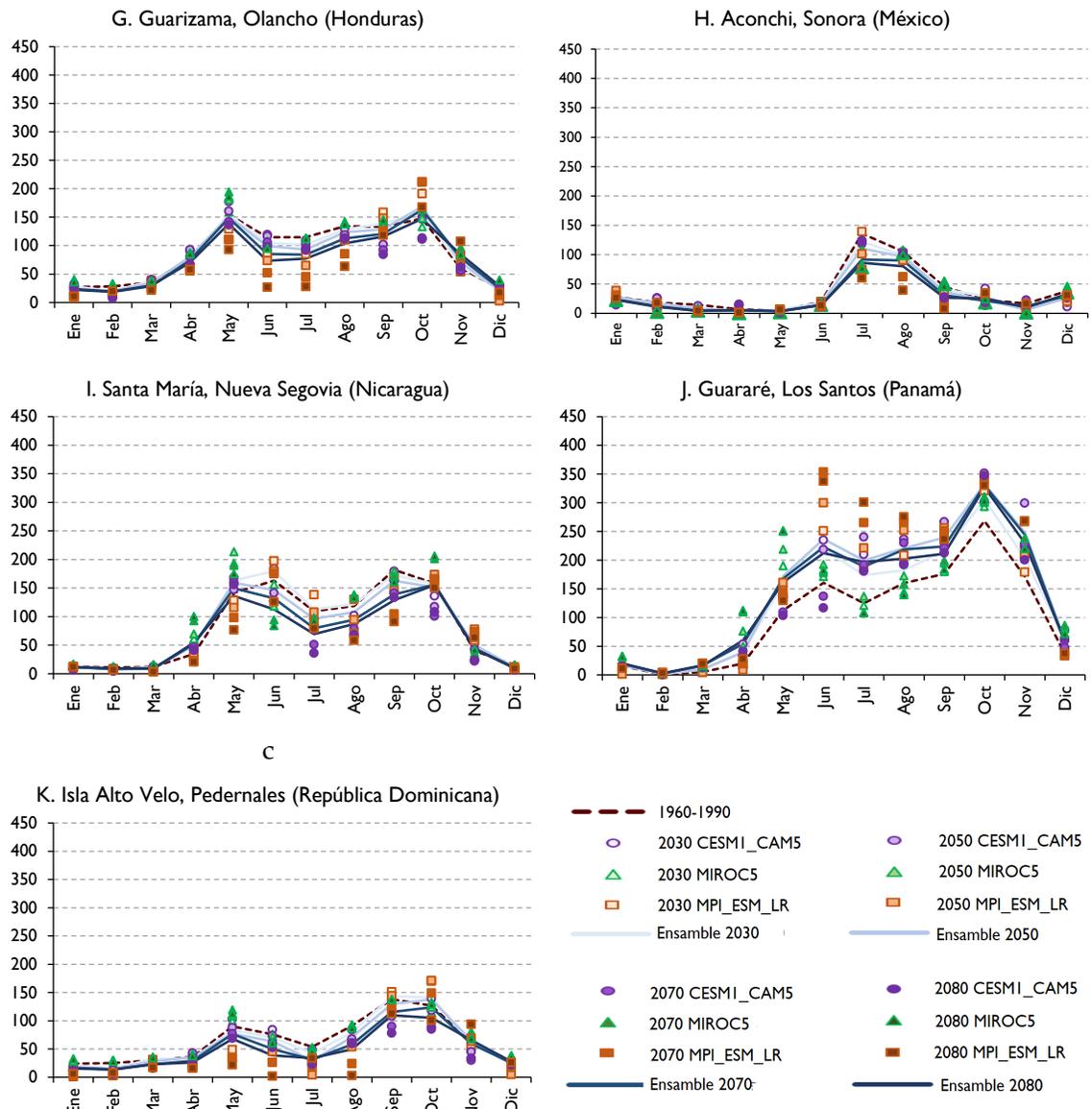
En el mapa IV.6 se muestra la climatología 1960–1990 y el escenario RCP8.5 para los cortes 2030, 2050, 2070 y 2080. Desde 2030 se observan cambios en el nivel de precipitación promedio acumulada al año. Desde mediados de siglo se observa que el área seca (niveles bajos de precipitación) en México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana aumenta (azules más claros). Los modelos reportan más cambios con el RCP8.5 que con el RCP4.5 y para 2080 el escenario RCP8.5 muestra regiones más secas. La evolución de los cambios temporales de la precipitación indica que el mayor cambio ocurre durante la segunda mitad del siglo XXI, antes no se observan cambios tan claros en la precipitación. Es hasta la segunda

mitad del siglo que la precipitación disminuye significativamente en algunas áreas de la región. El calentamiento significativo a mediados y fines de siglo y la reducción de las precipitaciones resultarían en cambios significativos en el ciclo del agua y reducciones significativas de la escorrentía, los cuales pueden influir negativamente en el bienestar de los ecosistemas y sistemas agrícolas de la región. En los capítulos V y VI se muestra la combinación de estas dos variables para definir las condiciones de humedad y la evolución de las épocas secas.

Gráfico IV.10

Municipios seleccionados de México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: precipitación acumulada, por mes, período, climatología 1960-1990 y escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080 (En milímetros)



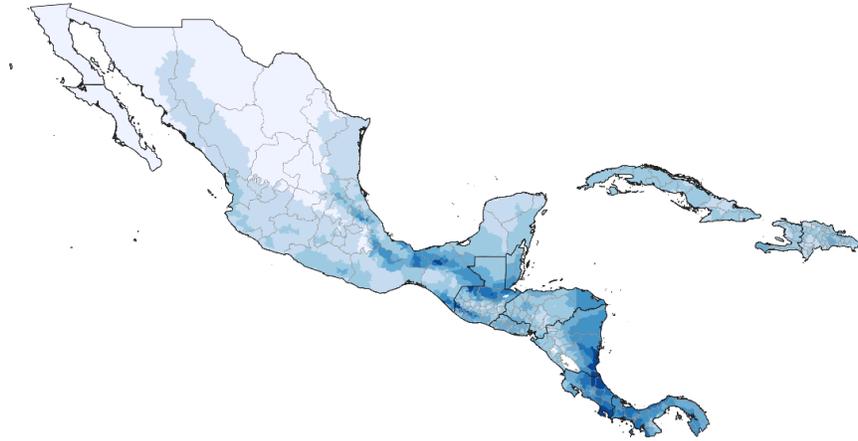


Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Programa de Investigación sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS-CGIAR), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

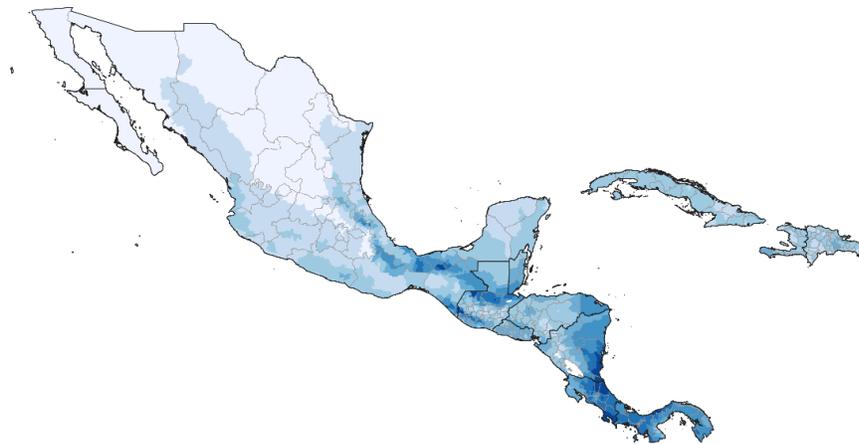
En el mapa IV.6 se promediaron los datos por municipio para obtener la precipitación acumulada anual por país. Bajo el escenario RCP8.5 la precipitación promedio por país se reduciría más que en el escenario RCP4.5. En Belice la reducción sería del 1% en 2030, del 4% en 2050, del 10% en 2070 y del 13% a 2080. En Costa Rica la precipitación acumulada anual aumentaría un 6% en 2030, un 5% en 2050 y se reduciría un 3% a 2080. En Cuba en promedio la precipitación aumentaría un 3% en 2030, no obstante, disminuiría un 6% a 2080; en este país la variabilidad de la precipitación entre los municipios aumentaría significativamente hasta un 15% al final del presente siglo.

Mapa IV.6
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: precipitación acumulada anual por municipio y período, climatología 1960-1990 y escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
(En milímetros)

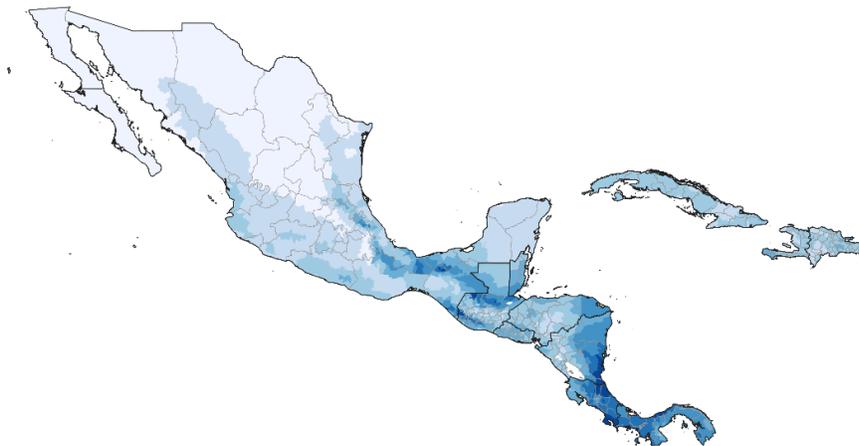
A. 1960-1990

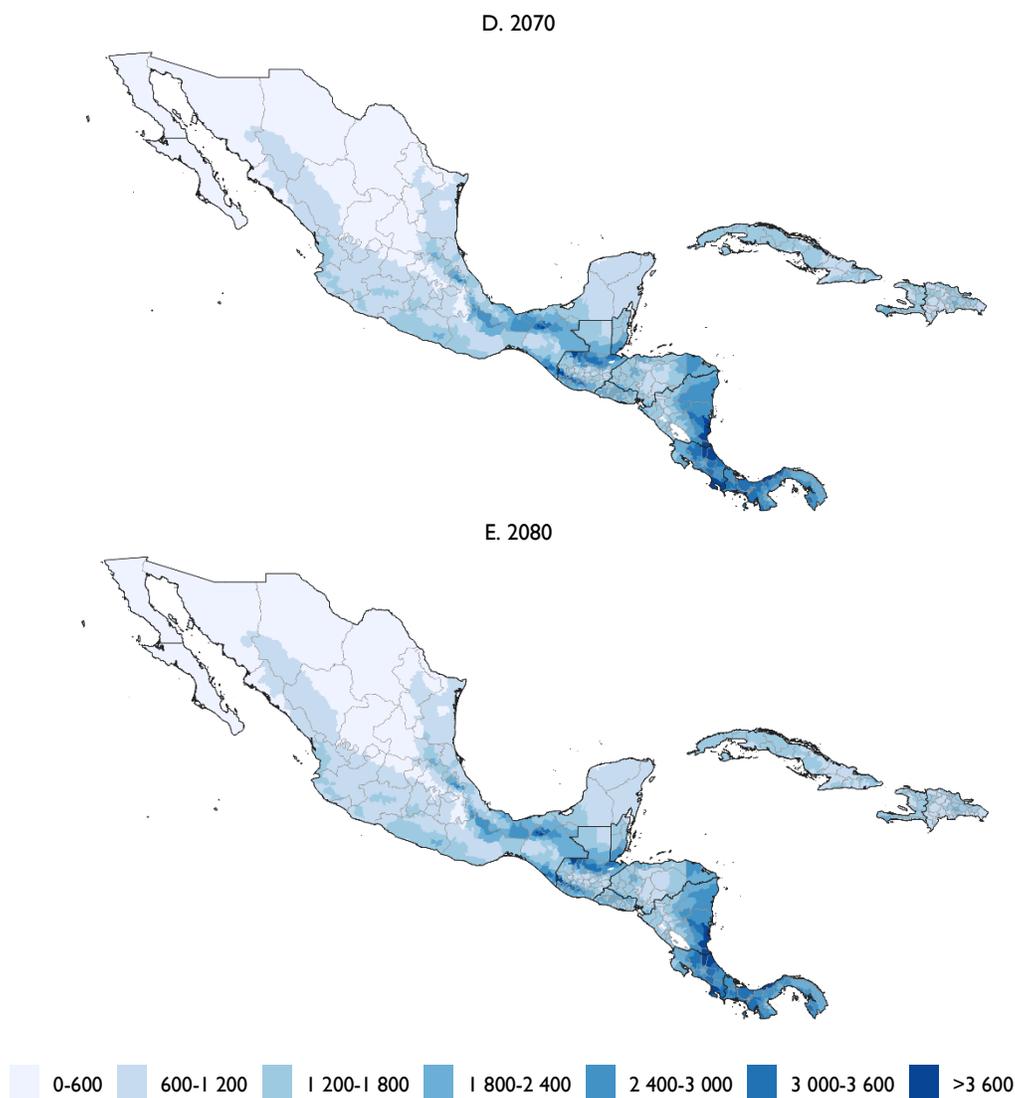


B. 2030



C. 2050





Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Programa de Investigación sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS-CGIAR), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

Nota: Los datos por municipio se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de aproximadamente 1 km para cada área correspondiente. En el caso de Belice es a nivel Distrito debido a la disponibilidad de información. El escenario es el ensamble de los modelos CESM1_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR.

En 2030 en El Salvador la precipitación aumentaría un 2%, sin embargo, al final del presente siglo se reduciría en un 5%. Se espera que en Guatemala el promedio de la precipitación acumulada aumentaría un 1% en 2030, pero se reduciría un 3% a fines del siglo. Haití sufriría reducciones en la precipitación desde 2030, la disminución sería del 1%, y a fines del presente siglo del 9%. Honduras tendría un ligero aumento del 1%, no obstante, después se reduciría hasta llegar al 9% en 2070 y al 12% al final del siglo. México sufriría decrementos desde 2030, que serían del 1% y del 6% a 2080. Nicaragua sufriría un incremento del 5% en 2030, pero a 2080 ocurriría una reducción del 5%. Panamá tendría aumentos en todos los períodos de tiempo, del 10% en 2030, del 13% en 2050, del 9% en 2070 y del 6% a 2080. En este país la variabilidad entre la precipitación de los municipios se reduce hasta un 14% desde 2070.

En el mapa IV.7 se muestran los cambios en porcentaje que proyectan los dos escenarios climáticos a los distintos cortes en comparación con la climatología de referencia 1960-1990. Las estimaciones del escenario RCP8.5 sugieren que a 2030 la precipitación disminuiría con respecto al período 1960-1990 en la mayor parte de México, las regiones del Petén y norte de Guatemala, algunos municipios de la costa atlántica de Honduras, oriente de Cuba, sur de Haití y la mayor parte de la República Dominicana. El mayor decremento en la precipitación ocurriría en algunos municipios del norte de Sonora y Coahuila, donde los decrementos podrían llegar hasta un 18%. El resto de la región experimentarían incrementos incluyendo la costa del Pacífico y la mayor parte de la península de Yucatán en México, la costa del Pacífico de Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, Panamá y la mayor parte de Cuba. Los incrementos superiores al 10% de precipitación estarían en el sur de la península de Baja California y en la costa del Pacífico de Panamá. Los municipios con aumentos en precipitación serían más en este escenario que en RCP4.5.

Considerando este mismo escenario, las proyecciones indican que hacia 2050 las regiones con déficit de lluvia se extenderían hacia Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana. El norte de México sería la región donde la reducción de la precipitación sería mayor al 10%, en el estado de Sonora, el norte de Sinaloa y algunos municipios del occidente del estado de Chihuahua. La reducción de precipitación se extendería al sur de México y la península de Yucatán, pero también a la mayor parte de Guatemala, este de El Salvador, Honduras, norte de Nicaragua, este y oeste de Cuba, Haití y la República Dominicana. No obstante, la precipitación se incrementaría, hasta un 10%, en la costa del Pacífico en el centro y sur de México, costa del Pacífico de Guatemala, oeste de El Salvador, Nicaragua, Costa Rica, Panamá y centro de Cuba. Panamá es el país donde la precipitación podría incrementarse más del 10%.

Hacia 2070, las zonas con menos lluvia se extenderían por toda la región. La región norte y sur de México, Belice, el Petén en Guatemala, este de Honduras y sur de la República Dominicana serían las más afectadas, con reducciones mayores al 10% en la precipitación acumulada anual. Sin embargo, la reducción de la precipitación abarcaría la mayor parte de México y Guatemala, El Salvador, Honduras, este de Nicaragua, sur de Costa Rica, Cuba, Haití y la República Dominicana. Las zonas donde habría incrementos, no mayores al 10%, serían el sur de la Península de Baja California, costa Pacífico del centro y sur de México, costa Pacífico de Guatemala y Nicaragua, norte de Costa Rica, la mayor parte de Panamá y la costa norte de Cuba. Incrementos mayores al 20% de la precipitación, ocurrirían en el Pacífico de Panamá, es decir en algunos municipios de Los Santos, Herrera, Coclé y Darién, así como algunos municipios de la costa del Pacífico de México en Michoacán, Guerrero y Oaxaca.

Se esperaría que al corte 2080 la mayor parte de México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana tendrían una reducción significativa en la precipitación. Decrementos mayores al 10% ocurrirían en la zona noroeste, el golfo de México y península de Yucatán en México, Belice, el Petén en Guatemala, Honduras, algunos municipios en el norte de Nicaragua, el este de Cuba, el sur de Haití y la República Dominicana.

Mapa IV.7
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: anomalía de la precipitación acumulada anual por municipio y período, escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
(En porcentajes)

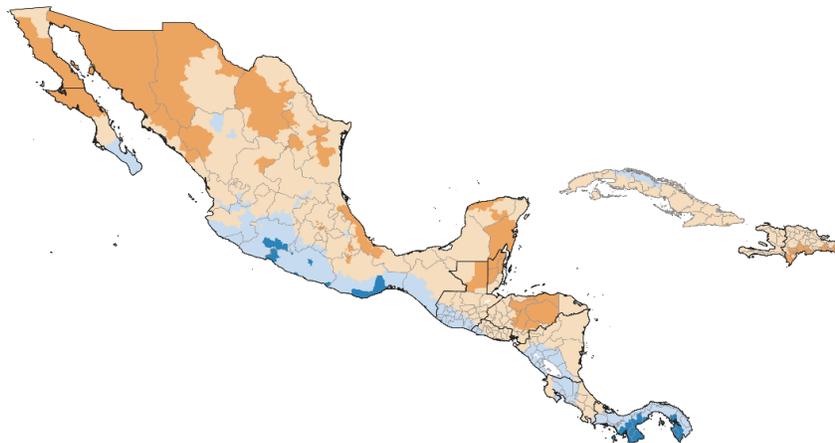
A. 2030 en comparación con 1960-1990

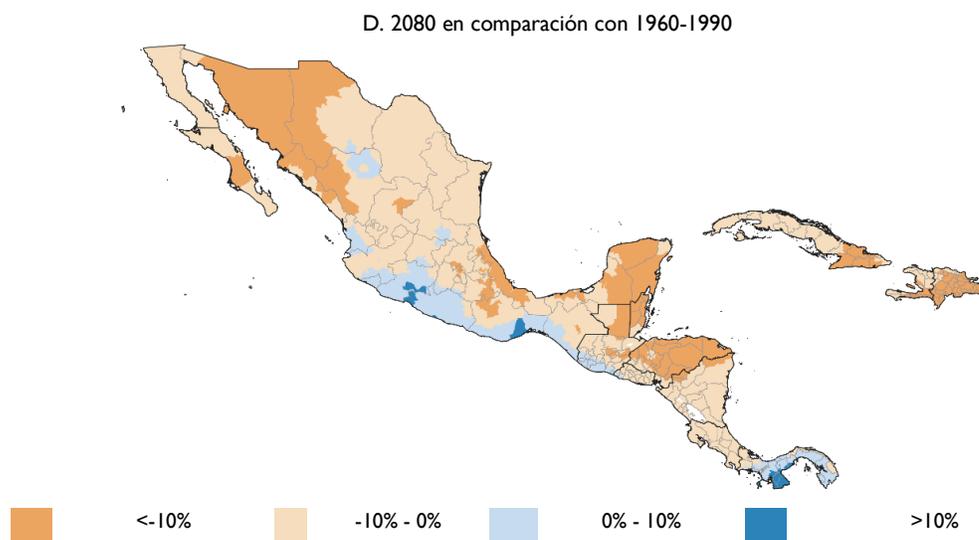


B. 2050 en comparación con 1960-1990



C. 2070 en comparación con 1960-1990





Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Programa de Investigación sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS-CGIAR), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

Nota: Los datos por municipio se obtuvieron como promedio de las rejillas de una resolución de aproximadamente 1 km para cada área correspondiente. En el caso de Belice es a nivel Distrito debido a la disponibilidad de información. El escenario es el ensamble de los modelos CESMI_CAM5, MIROC5 y MPI_ESM_LR.

Se presentarían decrementos menores al 10%, en el norte, centro y sur de México, la mayor parte de Guatemala (excepto la costa del Pacífico), El Salvador, Nicaragua, Costa Rica, centro y occidente de Cuba y norte de Haití. No obstante, habría zonas con incrementos de la precipitación, como la costa del Pacífico del centro y sur de México (aunque la región sería menos extensa que las estimaciones de los cortes 2030 y 2050), la costa del Pacífico de Guatemala, algunos municipios del occidente de El Salvador y la mayor parte de Panamá. Solo algunos municipios del sur de México, Los Santos y Herrera en Panamá tendrían incrementos mayores al 10% de precipitación.

Finalmente, en el cuadro IV.4 muestra el porcentaje de municipios que cambiarían bajo diferentes rangos de precipitación en los diferentes cortes analizados bajo el escenario RCP8.5. Durante el presente siglo México, Guatemala y Panamá serían los países donde en algunos municipios la precipitación se incrementaría en más del 10%. No obstante, en Guatemala y México, el porcentaje de municipios sería menor al 1%. En Panamá el porcentaje de distritos que incrementaría la precipitación en más del 10% sería del 47% en 2030, del 64% en 2050, del 42% en 2070 y del 33% al final del siglo. En 2030 un gran porcentaje de municipios aumentarían su precipitación hasta un 10% con respecto a la climatología 1960-1990, el porcentaje disminuiría conforme se acerca el final del siglo. Al finalizar el presente siglo se esperaría que en un mayor porcentaje de municipios disminuya su precipitación, excepto en Guatemala y Panamá, donde un porcentaje significativo de municipios aumentarían su precipitación en 33% y 45% respectivamente. No obstante, países como Honduras, Belice y la República Dominicana la precipitación disminuye más del 10%, con respecto a la climatología, en más del 70% de sus municipios.

Cuadro IV.4
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios por anomalía de la precipitación
acumulada anual, escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
 (En porcentajes)

	2030				2050			
	> 10	0 - 10	-10 - 0	< -10	> 10	0 - 10	-10 - 0	< -10
Belice		33,3	66,7				100	
Costa Rica		100				100		
Cuba		82,7	17,3			5	5	
El Salvador		100				39,5	60,5	
Guatemala		74,7	25,3			67,6	32,4	
Haití		43,9	56,1				100	
Honduras		91,6	8,4			1,7	98,3	
México	0,2	22,5	75,2	2,2	0,4	23,5	71,2	5,0
Nicaragua		100				83,9	16,1	
Panamá	46,7	53,3			64,0	36,0		
República Dominicana		21,4	78,6			2,5	96,2	1,3

País	2070				2080			
	> 10	0 - 10	-10 - 0	< -10	> 10	0 - 10	-10 - 0	< -10
Belice			33,3	66,7			16,7	83,3
Costa Rica		70,4	29,6				100	
Cuba		10,1	89,3	0,6			73,8	26,2
El Salvador		14,9	85,1			6,1	93,9	
Guatemala	0,3	57,7	39,2	2,8		33,2	56,0	10,8
Haití			100				75,6	24,4
Honduras			68,8	31,2			30,5	69,5
México	0,9	18,9	63,1	17,1	0,4	13,2	61,7	24,7
Nicaragua		53,3	46,0	0,7			86,1	13,9
Panamá	42,7	53,3	4,0		33,3	45,3	21,3	
República Dominicana			62,3	37,7			15,1	84,9

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Programa de Investigación sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS-CGIAR), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

C. Comparación entre los escenarios AR4 y AR5 de cambio climático de temperatura media en Centroamérica

En los escenarios de cambio climático, el primer análisis realizado en la iniciativa ECC CA (CEPAL, CCAD/SICA, UKAID, y DANIDA, 2011) preveía que la precipitación anual acumulada a nivel de país podría sufrir variaciones entre un -0,7% y un 6,2% (con B2) y entre un -3,5% y un 1,8% (con A2) a 2020 con respecto al período 1980 a 2000. No obstante, hacia el corte 2050 se estimaron reducciones en ambos escenarios, que se exacerbarían el resto del siglo, especialmente con A2. A 2100 se estimaron cambios de entre un -2,9% y un -17,4% (con B2) y un -17,5% y un -34,9% (con A2). En los documentos *Impactos potenciales en los patrones intraanuales y espaciales del clima* y *La economía del cambio climático en Centroamérica*

(CEPAL, COSEFIN, CCAD, SICA, UkaID y DANIDA, 2012) se mostraron los resultados para los escenarios B2 y A2 a nivel nacional²⁹ y departamental³⁰.

Las menores reducciones ocurrirían en Panamá y Costa Rica. Todos los modelos arrojaron que en A2 habría mayores reducciones o menores aumentos que en B2. Los aumentos estimados son menores que las reducciones, especialmente en A2. Durante este siglo bajo el escenario B2, los niveles de lluvia tenderían a disminuir ligeramente o permanecerían estables. El escenario A2 presenta ciertas fluctuaciones en precipitación en las próximas dos décadas dependiendo de la región, pero establece una tendencia a la baja que se exagera con el transcurrir del siglo.

En cuanto al patrón intraanual de precipitación de toda la región, se estima que con B2 la lluvia aumentaría al inicio de la temporada en las próximas décadas, posiblemente con un inicio más temprano. Al mismo tiempo, especialmente en la segunda mitad del siglo, bajaría el nivel de precipitación posterior a la canícula, perdiendo la característica bimodal en algunos países. Con A2 se estima que en las próximas décadas el patrón bimodal de precipitación podría exacerbarse, con aumentos en los dos períodos de altas lluvias y disminuciones durante la canícula. Posteriormente, las lluvias del primer período se reducirían progresivamente, dejando un máximo anual único entre octubre y noviembre.

Los patrones intraanuales de las regiones geoclimáticas sufrirían cambios, principalmente con el A2. En el escenario B2 hacia el final del presente siglo, el patrón bimodal del Pacífico se mantendría, pero los meses de lluvia máxima serían mayo a junio y octubre, y la canícula podría ocurrir en julio y agosto. La precipitación disminuiría en algunos departamentos. En el escenario A2, la lluvia del primer período sería menor y el máximo ocurriría en mayo, con una canícula más seca en junio y julio, y el mes más lluvioso sería octubre también en el Pacífico. Algunos departamentos podrían tener nula precipitación entre enero y marzo.

La región del Atlántico presentaría mayor diversidad de patrones de precipitación que en el período histórico. En general, la lluvia disminuiría durante todo el año y la temporada de lluvias sería más variada, especialmente con A2, algunos departamentos tendrían su nivel máximo en junio, en contraste con otros, que no tendrían lluvia ese mes. En la región Centro, el patrón histórico bimodal continuaría con B2, pero con menores niveles de lluvia. Bajo el escenario A2, el patrón bimodal se modificaría, alcanzando un primer máximo muy reducido en mayo, una canícula en junio y julio, algunos departamentos experimentarían nula precipitación y, finalmente, lluvias máximas en septiembre y octubre.

En el Altiplano Occidental guatemalteco el patrón bimodal se mantendría relativamente estable con B2, pero con A2 el primer máximo se reduciría significativamente, la canícula sería mucho más pronunciada y algunos departamentos tendrían nula o muy baja

²⁹ A escala nacional se utilizaron los promedios de los modelos HADCM3, GFDL R30 y ECHAM4 para el escenario B2 y los modelos HADGEM1, GFDL CM2,0 y ECHAM5 para A2. Los cortes en este estudio fueron 2020 (2016-2025), 2030 (2026-2035), 2050 (2046-2055), 2070 (2066-2075) y 2100 (2091-2100) y se usó como referencia la climatología 1980-2000 con datos del CRU TS3.0.

³⁰ A escala departamental se usaron los ensambles de los modelos ECHAM4 y HADCM3 para el escenario B2 y ECHAM4 y HADGEM para A2 con los mismos cortes y climatología de referencia 1950-2000 de la base de WordClim.

precipitación. Habría una segunda temporada de lluvia con máximos en septiembre y octubre en ambos escenarios.

En capítulos anteriores se explicó que los escenarios del AR4 y AR5 no son comparables. En el CMIP3 se utilizaron los escenarios de emisiones (SRES) B1, A1 y A2, mientras que CMIP5 utiliza las RCP. El rango en los escenarios de RCP es mayor porque por primera vez se incluye un escenario de mitigación de bajas emisiones. Knutti y Sedláček (2012) indican que, aunque las proyecciones puedan ser similares entre el CMIP3 y CMIP5, los desarrolladores de modelos han incorporado supuestos o factores previamente ignorados en las proyecciones, por lo que los nuevos modelos capturan la mayoría de los procesos relevantes.

En resumen, los modelos climáticos globales sugieren cambios en el ciclo del agua en respuesta al calentamiento global durante el siglo XXI. Sin embargo, estos cambios no serán uniformes. Algunas regiones experimentarían aumentos de precipitación y otras, disminuciones, e incluso habría regiones que no experimenten cambios significativos. No obstante, existe un nivel de confianza alto en que, conforme aumenten las temperaturas globales, se agudizará el contraste de la precipitación media anual entre regiones secas y húmedas y entre la estación húmeda y la seca. Los cambios estimados en esta copublicación sugieren que la variación en el patrón de precipitación estacional por país en los cortes 2030, 2050, 2070 y 2080 será mayor con el escenario RCP8.5 que con el escenario RCP4.5. En ambos escenarios los cambios más significativos sucederían durante la estación lluviosa. Aun cuando la canícula varía dentro de la región, esta podrá intensificarse con una reducción de la precipitación en este período.

Desde mediados de siglo se observa que el área seca (niveles bajos de precipitación) en la región aumenta. A 2080 y de acuerdo con el RCP8.5 decrementos mayores ocurrirían en la zona noroeste, el golfo de México y península de Yucatán en México, Belice, el Petén en Guatemala, Honduras, algunos municipios en el norte de Nicaragua, el este de Cuba, el sur de Haití y la República Dominicana. Los cambios en la precipitación tendrán implicaciones para la biodiversidad, los ecosistemas, la producción agrícola y en general en todas las actividades económicas de la región.

V. Aridez

En este capítulo se presenta una actualización del índice de aridez incluido en el documento *Impactos potenciales en la aridez y los meses secos* (CEPAL, COSEFIN, CCAD, SICA, UKAID y DANIDA, 2012b) donde se incluye también a México, Cuba y Haití. Como se señala en el manual de indicadores de meteorología de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), es posible producir varios tipos de indicadores hídricos, por ejemplo, humedad del suelo, hidrología, teledetección y mixtos o modelados, la mayoría de ellos utiliza las variables de la temperatura y precipitación. El capítulo ejemplifica el uso de las variables de temperatura y precipitación para generar indicadores hídricos. Las secciones que componen este capítulo son la definición y las clasificaciones climáticas del índice de aridez, evidencia de estudios, los criterios para la elección de la metodología, los resultados históricos por departamento y los resultados de cambio climático por municipio.

A. Definición y clasificaciones climáticas del índice de aridez

La aridez es una condición climática que define el grado en que un clima carece de humedad efectiva que promueve y contribuye a determinar el tipo de ecosistemas que pueden establecerse en una zona geográfica y cuan viable son las actividades productivas como la agricultura (American Meteorological Society, 2006; CEPAL, COSEFIN, CCAD, SICA, UKAID y DANIDA, 2012b). CAZALAC y PHI/UNESCO (2005) recalcan la diferencia entre aridez, sequía y desertificación. La aridez implica un déficit de lluvia permanente y está ligada a otras condiciones climáticas específicas como las temperaturas elevadas, baja humedad del aire y fuerte evaporación y se define por su baja precipitación promedio. La sequía es un déficit de lluvia temporal con relación a los niveles normales y puede tener una duración de uno hasta dos años; cuando el período seco dura una década o más es conocido como desecación. Finalmente, la desertificación es la degradación de la tierra en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas derivado de las variaciones climáticas y las actividades humanas.

La influencia topográfica de la superficie terrestre y la variabilidad de las características meteorológicas determinan una diversidad de climas que se clasifican en tipos climáticos de acuerdo con sus propiedades más o menos homogéneos. Por la diversidad de tipos climáticos por la combinación de las condiciones climáticas, tipo de vegetación y topográficas toda clasificación debe considerar los tipos más generales y representativos (Valdivia, 1977; Rivas, 2018). Existe varios criterios en la literatura para delimitar zonas climáticas a nivel mundial. Entre ellos se han considerado: sistemas que relacionan la precipitación y la evapotranspiración potencial; sistemas basados en la precipitación anual y la temperatura media anual; sistemas basados en el número de meses secos, precipitación, evapotranspiración y el tipo de vegetación; entre otros (CAZALAC y PHI/UNESCO, 2005).

Uno de los primeros criterios para delimitar zonas climáticas fue el establecido por Richard Lang en 1915, y se basó en el volumen de la precipitación acumulada anual y la temperatura promedio anual. La relación entre estas dos variables es conocido también como índice de efectividad de la precipitación o factor de lluvia de Lang. Este índice es considerado de aridez y es calculado con la siguiente fórmula:

$$IL = \frac{P}{T}$$

donde IL es el índice de Lang, P es la precipitación acumulada anual y T es la temperatura media anual. La clasificación climática de este índice es la siguiente:

Cuadro V.1
Clasificación climática del índice de aridez de Lang

Zonas	Valores
Desértico	0-20
Árido	20,1-40
Semiárido	40,1-60
Subhúmedo	60,1-100
Húmedo	100,1-160
Muy húmedo	160

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales de México/Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (SEMARNAT/INECC), *Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático*, Ciudad de México, México, 2019.

De Martonne (1925) propuso una nueva clasificación climática y generó un índice basado en la relación entre precipitación y temperatura, pero ajustando esta última con un valor de 10 unidades. Este ajuste permite que el índice sea útil en zonas donde la temperatura anual o mensual sea menos de cero grados hasta menos 10 °C. Sin embargo, ajustar la temperatura en 10 unidades no ha demostrado ser universal para todas las zonas (Malunda y otros, 2018; Baltas, 2007; Troyo y otros, 2014). Malunda y otros (2018) clasificaron el clima para tres ciudades de Sudáfrica con el índice de De Martonne y mostraron que más de un valor entre 0 y 10 puede ser un ajustador adecuado y que el valor de 10 puede no ser siempre un valor de ajuste adecuado ya que esto puede conducir a una clasificación errónea del clima. Neira (2006) evaluó cinco índices de aridez para Colombia y el resultado para el índice de De Martonne es que clasifica como tierras secas las áreas con valores extremadamente bajos de precipitación. El índice se calcula de la siguiente manera:

$$IDM = \frac{P}{T + 10}$$

Donde IDM es el índice de De Martonne, P es la precipitación acumulada anual y T es la temperatura media anual. El índice se clasifica de la siguiente manera:

Cuadro V.2
Clasificación climática del índice de aridez de De Martonne

Zonas	Valores
Desértico (hiperárido)	De 0 a 5
Semidesierto (árido)	5 a <10
Semiárido de tipo mediterráneo	10 a <20
Subhúmedo	20 a <30
Húmedo	30 a <60
Perhúmedo (muy húmedo)	60

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales de México/Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (SEMARNAT/INECC), *Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático*, Ciudad de México, México, 2019.

Thornthwaite (1948) argumentó que la clasificación climática requiere una mayor comprensión de la variación espacial del presupuesto hídrico y no solo depende de las variaciones de la temperatura y humedad. Propuso un sistema de clasificación con base en el concepto de evapotranspiración potencial o la cantidad de evapotranspiración que ocurriría en un área de tierra (Thomas, 2016). La evapotranspiración se define como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa más la pérdida de agua por transpiración de la vegetación (Thornthwaite, 1948; Penman, 1956; Papadakis, 1980; Perries, 1984).

Thornthwaite buscó una clasificación climática basada en la distribución de las especies vegetales al considerar que en ellos se conjugan los diversos efectos de los elementos del clima. Consideró impreciso tomar directamente los valores de temperatura y precipitación y busco mediciones complejas que resumieran la acción recíproca entre la vegetación y la atmósfera. Identificó a la evapotranspiración como el proceso principal de intercambio de energía y humedad entre la superficie terrestre y la atmósfera. El concepto de evapotranspiración ha sido aplicado para el cálculo de indicadores de humedad o aridez y otros campos de investigación hidrológica (Villarreal, 2017). En el manual de indicadores e índices de sequía de la OMM y la Asociación Mundial del Agua (2017) se pueden ver ejemplos de la evapotranspiración en otros indicadores.

Los factores que intervienen en la evapotranspiración son: el suministro de energía externa principalmente la radiación solar; la capacidad del aire de eliminar vapor, que depende de la velocidad del viento y otras variables; la naturaleza de la vegetación, pues de ello depende su capacidad de reflejar la radiación solar; y la naturaleza del suelo (Sanchez y Garduño, 2008; Villarreal, 2017). Con estos factores Thornthwaite estableció una metodología empírica para la clasificación climática que está compuesta por cuatro índices, el índice Global de humedad y su variación estacional, y el índice de Eficacia térmica y su concentración estival o de verano (Villarreal, 2017).

La FAO y la UNESCO desarrollaron en 1977 el índice climático que consiste en una relación insumo/pérdida de humedad. Para su definición se tomó como base el índice de humedad propuesto por Thornthwaite (1948), el método de Penman (1948) y Meigs (1953). En este índice el insumo es la precipitación del período de estudio y la pérdida es la evapotranspiración durante el mismo período y se expresa con la fórmula (UNEP, 1997; CAZALAC y PHI/UNESCO, 2005):

$$IA_t = \frac{P_t}{ET_t}$$

donde IA es el índice de aridez en el período t , P_t representa la precipitación acumulada anual en el período t y ET_t representa la evapotranspiración del período t .

Este índice se puede utilizar con distintas metodologías de evaluación de evapotranspiración que van desde fórmulas de fácil aplicación y ecuaciones de balance hídrico, hasta modelos con información fisiográfica, meteorológica e hidrométrica detallada ³¹ (CEPAL, COSEFIN, CCAD, SICA, UkaID y DANIDA, 2012b). Los resultados obtenidos con el cálculo del índice de aridez se clasifican de acuerdo con los criterios propuestos por Hassan y Dregne (1997), utilizados en el Atlas Mundial de Desertificación (UNEP, 1997; CAZALAC y PHI/UNESCO, 2005) (véase el cuadro V.3).

Cuadro V.3
Clasificación del índice de aridez del Atlas Mundial de Desertificación

Zonas	Valores
Hiperáridas	< 0,05
Áridas	0,05 a < 0,20
Semiáridas	0,20 a < 0,50
Subhúmedas-secas	0,50 a < 0,65
Subhúmedas-húmedas	0,65 a I
Húmedas	I

Fuente: United Nations Environment Programme (UNEP), *World Atlas of Desertification*, N. Middleton y D. Thomas (eds), second edition, 1997; Centro del Agua para Zonas Áridas de América Latina y el Caribe (CAZALAC)/Programa Hidrológico Internacional-Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (PHI-UNESCO), *Atlas de zonas áridas de América Latina y el Caribe*, PHI-VII documento técnico N° 25, K. Verbist y otros (eds.).

B. Evidencia: estudios previos para la región

En esta sección se describen diferentes estudios de los índices de aridez y el impacto del cambio climático en el nivel de aridez en la región de México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana. La revisión de la literatura incluye un estudio para Centroamérica y otro para México, que considera una clasificación climática en un período base y con el escenario de cambio climático A2 del AR4. Además, se revisa un estudio para Guatemala y otro para la República Dominicana, los cuales clasifican la humedad en un período base, pero también bajo el escenario RCP del AR5. También se incluyen otros estudios que describen las características de humedad para México, el estado de Baja California Sur y Cuba. Todos estos estudios muestran sus resultados en mapas a nivel departamental o mediante rejillas de alta definición.

En el documento CEPAL, COSEFIN, CCAD, SICA, UkaID y DANIDA (2012b), se calculó el índice de aridez por departamento para Centroamérica con la fórmula de UNEP (P/ET) y los criterios considerados por el cuadro V.3. El cálculo de la evapotranspiración usó

³¹ Entre las metodologías de evapotranspiración están la de Thornthwaite (1948), Penman (1948), Meigs (1953), Thornthwaite y Matter (1957), Penman y Monteith (Sys y otros, 1991), Turc (1963), entre otros.

la ecuación de Turc (1963) debido a que solo requiere como variables de entrada la precipitación y temperatura. El estudio utilizó la climatología base 1950-2000 de WorldClim.

Los resultados muestran que toda la región Centroamericana está clasificada como húmeda con valores que van de 2,78 en la provincia de Cartago en Costa Rica a 1,05 en el departamento de Zacapa en Guatemala. Para estimar el impacto de cambio climático se calculó el índice de aridez considerando los escenarios B2 con los modelos ECHAM4 y HADCM3 y A2 con los modelos ECHAM4 y HADGEM. Con ambos escenarios los índices de aridez disminuyen, pero con más severidad en el escenario A2, el escenario más extremo. Para 2100 la parte norte y Pacífico de Centroamérica tendrían los menores valores del índice por debajo de 1,25, incluso cuatro departamentos de Guatemala ubicados en el Corredor Seco Centroamericano ya estarían clasificados como subhúmedo-húmedo (por debajo de 1). Un resultado adicional es que las zonas con mayor humedad, en la zona del Atlántico, son las que verían disminuir su índice de aridez en mayor medida.

Por su parte Gómez y Monterroso (2012) caracterizaron el índice de aridez en México usando también el cálculo de P/ET mostrando sus resultados con mapas de muy alta resolución. Para el cálculo de evapotranspiración potencial usaron métodos que consideran variables de entrada como la velocidad del aire, la radiación, la humedad relativa y la nubosidad, estos son el método de Thornthwaite y Matter (1957) y el método de Penman modificado por Monteith (Sys y otros, 1991), ya que el primero tiene limitaciones en las zonas templadas. Los autores tomaron la climatología base del período 1970-2000 y el porcentaje de superficie de México clasificado como árido fue entre 9,2% y 13,2%, semiárido entre 32,1% y 49,3%, subhúmedo seco entre 6,8% y 8,1% y subhúmedo húmedo y húmedo entre 34,7% y 46,6%, dependiendo del método de evapotranspiración utilizado.

Estos autores estimaron el índice de aridez bajo el escenario A2 para 2050 con los modelos GFDLCM2.0 y HADGEM1. Para el primer modelo la estimación del porcentaje de superficie en la clasificación de árido va entre 0,1% y 7,3%, semiárido entre 39% y 42,6%, subhúmedo seco entre 10,3% y 10,5% y subhúmedo húmedo y húmedo 39,6% y 50,6% dependiendo del método de evapotranspiración. Para el segundo modelo la estimación en la clasificación de árido va entre 23,3% y 32,4%, semiárido entre 29% y 37,1%, subhúmedo seco entre 7,4% y 9,9% y subhúmedo húmedo y húmedo 29,7% y 31,3% dependiendo del método de evapotranspiración. El resultado muestra una disminución de las zonas más áridas y un aumento de las zonas más húmedas de México con el modelo GFDLCM2.0 y con el modelo HADGEM1 el efecto sería contrario.

Pons y otros (2018) clasificaron el clima de Guatemala utilizando el índice de aridez P/ET , así como la clasificación del Atlas Mundial de Desertificación (UNEP, 1997). Para el cálculo de evapotranspiración usaron la ecuación de Thornthwaite (1948). Tomaron el período base 1960-1990 de WorldClim y los cortes 2030, 2050 y 2070 para los escenarios RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5 con el modelo CESM1_CAM5 a una escala de 1 km. En el período base, los resultados muestran al territorio de Guatemala clasificado como húmedo en la mayor parte, sin embargo, el norte de El Petén y la costa del Pacífico tienen un menor rango dentro de esta clase. Mientras que la región localizada entre El Progreso, Chiquimula y Zacapa fue clasificada como subhúmedo seco y semiárido. Las simulaciones sugieren una ampliación del área del Corredor Seco oriental hacia el occidente con un incremento de aridez en ciertas áreas de El Progreso y

Zacapa que pasarían de la clase semiárida a clase árida en 2070 considerando el escenario RCP8.5. Desde 2030 en los tres escenarios habría un incremento paulatino de zonas que pasarían de húmedas a subhúmedas-secas y semiáridas en el Pacífico, el norte de El Petén y el oriente de Guatemala en el escenario RCP8.5.

CEPAL, BID, NDF, INDOCAFE y CNCCMDL (2018) realizaron una clasificación con el índice de aridez de UNEP para la República Dominicana utilizando la fórmula de Turc para la evapotranspiración. El período base fue 1950-2000 de WorldClim y los cortes 2050 y 2070 para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 con el ensamble de los modelos MIROC5 y HADGEM2-ES. Los resultados estimaron que la República Dominicana tuvo un nivel promedio en el índice de aridez de 1,33 (húmedo) en el período 1950-2000, con mayor humedad en La Vega situado en la Cordillera Central (1,60) y menos humedad en el noroeste (Monte Cristi y Valverde), en el sur en las provincias de Bahoruco, Azua y Peravia, y en el oriente en La Romana, La Altagracia y San Pedro de Macorís (entre 1,20 y 1,08). Bajo el escenario RCP4.5 el índice bajaría hasta 1,27 hacia 2050 y 1,25 hacia 2070 a nivel nacional, con Monte Cristi, La Romana, Valverde, San Pedro de Macorís y Bahoruco como las provincias que presentarían las condiciones más secas y San Juan, Santiago y La Vega, las más húmedas. Con el escenario RCP8,5 este índice bajaría a 1,26 hacia 2050 y 1,20 hacia 2070 con una prevalencia más generalizada de condiciones de menor humedad similares a las de las zonas con estas características en el período histórico.

Díaz y otros (2011) hicieron una clasificación de aridez para México utilizando registros de 5.088 estaciones meteorológicas del período 1961-2003. Usaron el método de UNEP (1997) del índice de aridez (P/ET)³². Los resultados muestran que hay una mayor proporción de la superficie de México clasificada como semiárida (35%) seguida de la zona árida (22%) y la zona hiperárida que representa un 1%. Las tres zonas están localizadas principalmente en el norte del país. Las zonas sur-sureste, sierra madre del sur, Sierra Madre Occidental, el Eje Neovolcánico, las Llanuras de la costa del Pacífico y del golfo de México registraron condiciones subhúmeda seca (11%), subhúmeda húmeda (16%) y húmeda (15%).

Troyo y otros (2012) hicieron la evaluación del índice de De Martonne para el estado de Baja California Sur en México y los resultados muestran valores del índice entre 2 y 14, clasificando al estado como desértico, árido y semiárido, con una mayor proporción para la primera clase, mientras que el índice de UNEP clasifica al estado en su mayoría como árido.

Vázquez y otros (2007) utilizaron el índice de aridez de UNEP (P/ET) para delimitar las zonas climáticas de Cuba, el trabajo se efectuó con 591 estaciones meteorológicas del período 1961-2000. Para el cálculo de evapotranspiración usaron los resultados del estudio de Solano y otros (2003) donde se calcula esta variable para el período 1975-2000 con el método de Penman-Monteith. Los resultados muestran al occidente (en Pinar del Río, La Habana y Matanzas), algunas regiones centrales (principalmente Sancti Spiritus) y el oriente sur (Granma, Guantánamo y Santiago de Cuba) de Cuba clasificados como húmedos. No obstante, gran parte del territorio se clasificó como subhúmedo-húmedo y algunas pequeñas áreas en Guantánamo y Las Tunas fueron clasificadas como semiáridas.

³² La evapotranspiración anual la obtuvieron a partir de multiplicar la evaporación media anual de México por el factor 0,8.

C. Elección de la metodología

La selección de un índice de aridez para México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana requirió la revisión de distintas metodológicas de clasificación climática, la exploración de la evidencia de literatura relacionada y considerar la disponibilidad de información. También, se consideró el objetivo de este documento, que es exponer la utilidad de las variables de temperatura y precipitación para generar indicadores. Se descartó el cálculo de evapotranspiración con las metodologías de Thornthwaite o Penman al no tener disponible toda la información que se requiere para su elaboración. A diferencia de los estudios mencionados en la sección anterior, se tuvo la dificultad de caracterizar el clima de 11 países con la misma metodología. Lo anterior requirió hacer pruebas con la metodología de Lang, De Martonne y el índice de UNEP, esta últimas usando la evapotranspiración anual propuesta por Turc (1963).

Después de revisar las metodologías, hacer distintas comparaciones con los resultados de estudios previos y tomar en cuenta las distintas consideraciones metodológicas para cada índice, se eligió como mejor estimador para la clasificación climática de los 11 países al índice de De Martonne, porque caracteriza mejor el clima en el norte de México, el Caribe y Guatemala. En estas regiones se encontraron diferencias con las otras metodologías.

Al usar el índice de UNEP (1997) con el método de Turc se observaron discrepancias en el norte de México. El índice solo registró valores dentro de las clasificaciones de subhúmedo-húmedo en regiones donde la evidencia muestra zona áridas y semiáridas, incluso desérticas, como en el caso de Baja California Sur. Marín (2010) indica que —pese a que la ecuación de Turc se construyó empíricamente comparando las precipitaciones y escorrentías de 254 cuencas—, con el paso del tiempo su aplicación no ha sido acertada en otras cuencas o regiones donde las condiciones climáticas y topográficas son diferentes. La fórmula de Turc anual (1963) puede subestimar el valor de la evapotranspiración en regiones con precipitaciones bajas y temperaturas relativamente altas, características de zonas áridas, lo que daría niveles de evapotranspiración cercanos a los niveles de precipitación (Cruz, 2007; Cruz y otros, 2011). Estas características de temperatura y precipitación se presentan en el norte de México. Por ejemplo, Cruz (2007) calculó la evapotranspiración para la cuenca de La Paz en Baja California Sur en México y modificó ligeramente la fórmula de Turc en su constante para corresponder con las características de la región.

En el Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático de México (SEMARNAT e INECC, 2019), en la estimación de la vulnerabilidad de algunas actividades productivas ante estrés hídrico, utilizan el índice de Lang, ya que este índice genera valores más bajos dentro de su clasificación de aridez, así como de la clasificación desértica. Incluso en el estudio de evaluación de los índices de aridez para Colombia (Neira, 2006) los resultados indican que el índice de Lang es el que mejor caracteriza las zonas desérticas del país y es muy cercano al índice de Thornthwaite. La evaluación realizada con el índice de Lang para el presente documento sobrevaluó los resultados de las clases más secas para muchas zonas de la región. En gran parte del norte de México los resultados de otros estudios indican zonas áridas y semiáridas, sin embargo, el índice de Lang genera zonas desérticas, para Cuba, donde gran

parte del territorio es subhúmedo-húmedo, el resultado con el índice de Lang fue semiárido, y para Centroamérica los niveles de humedad fueron menores que los promedios mostrados con otros índices.

El estudio de Neira (2006) indica que, aunque los resultados del índice de De Martonne no fueron los mejores para Colombia estos son muy cercanos a los obtenidos con el índice de UNEP. Al evaluar los resultados del índice de De Martonne se encontró mayor similitud con las clasificaciones hechas en los estudios anteriores de México, Guatemala, Cuba, la República Dominicana y Centroamérica. Sin embargo, Troyo y otros (2014) indican que la dificultad de la aplicación de este índice es la escasa posibilidad que presenta para realizar comparaciones de regiones cuantitativamente similares por sus niveles de temperatura y precipitación, pero con características diferentes de vegetación. También se considera al índice de De Martonne más como una condición de pluviosidad ya que este cambia su valor de manera directamente proporcional a la magnitud del cambio en la precipitación (Troyo y otros, 2014) sin que haya un factor adicional que cambie las condiciones de humedad. Aún con estas consideraciones, en este documento se optó por utilizar el índice De Martonne por su sencillez y porque al evaluar sus resultados estos fueron consistentes con los de otros estudios en la región. En adelante la referencia al índice de De Martonne será como el índice de aridez.

D. Índice de aridez por departamento: impacto histórico del cambio climático

El índice de aridez es calculado con la fórmula y clasificación de De Martonne (1925).

$$IDM = \frac{P}{T + 10}$$

donde *IDM* es el índice de De Martonne, *P* es la precipitación acumulada anual y *T* es la temperatura media anual. El índice se clasifica de la siguiente manera (véase el cuadro V.2): hiperárida o desértico (0 a 5), árido o semidesierto (5 a 10), semiárido (10 a 20), subhúmedo (20 a 30), húmedo (30 a 60) y perhúmedo o muy húmedo (más de 60).

Con la información histórica de la base del CRUTS4.03 se realizó el cálculo del índice de aridez para el período base 1960-1990 y para las últimas tres décadas. En el mapa V.1 se muestran los resultados para los cuatro períodos a nivel departamental. Los colores van de café oscuro para la clasificación hiperárido (o desértico), a cafés más claros que son zonas áridas, semiáridas y subhúmedas, le siguen 4 rangos de colores verdes para las zonas húmedas y perhúmedas. Las condiciones de húmedo y perhúmedo se dividieron en dos subcategorías para identificar en los mapas cambios entre las regiones más húmedas. Así la clasificación húmedo 1 toma valores del índice de 30 a 45, húmedo 2 de 45 a 60, perhúmedo 1 de 60 a 90 y perhúmedo 2 para valores de más de 90.

En el mapa V.1.A se muestra la caracterización del período base 1960-1990. En general los resultados sugieren lo siguiente:

- La península de Baja California está clasificada como árida.
- En México, los estados que tienen frontera con los Estados Unidos y Zacatecas tienen clasificación de semiáridas.

- La región centro norte, los estados de Morelos y Yucatán en México y la provincia de Monte Cristi en la República Dominicana son clasificados como subhúmedos.
- El resto de la región es clasificada como húmeda y perhúmeda en distintos niveles.
- El primer nivel de humedad se presenta en el Pacífico y el resto de la península de Yucatán en México; el norte de Belice; un grupo de departamentos cercanos al golfo de Fonseca de El Salvador y Honduras; departamentos en el Pacífico y centro de Nicaragua; todo el territorio de Cuba; la parte norte de Haití; y gran parte de la República Dominicana. Los departamentos de este grupo en El Salvador, Honduras y Nicaragua pertenecen a el Corredor Seco Centroamericano.
- En el segundo grupo de humedad se encuentran los estados de Veracruz y Chiapas (México); el resto de El Salvador; el centro de Honduras; Chinandega, Madriz, Estelí y Boaco (Nicaragua); Herrera y Panamá Oeste (Panamá); el sur de Haití; y el noroeste de la República Dominicana.
- El primer nivel de la clasificación perhúmeda incluye al estado de Tabasco en México; el sur de Belice; gran parte del territorio de Guatemala; el Atlántico de Honduras hasta la Costa Caribe Norte y Jinotega en Nicaragua además de Chontales y Río San Juan; Guanacaste y San José en Costa Rica, y gran parte de Panamá.
- Las zonas más húmedas (perhúmedo 2) se localizan en el altiplano Occidental de Guatemala desde Huehuetenango hasta Alta Verapaz además de Escuintla, la Costa Caribe Sur de Nicaragua, el resto de Costa Rica, y Bocas del Toro y Chiriquí en el occidente de Panamá.

En las últimas tres décadas algunas zonas han experimentado cambios en su clasificación. En el período 1991-2000 se observan mayor aridez o pérdida de humedad en gran parte del territorio. Coahuila pasó a condición de aridez, y tres estados del centro norte de México cambiaron de subhúmedos a semiáridos. Mientras que de condición húmeda a subhúmeda pasaron Michoacán en México, el oriente de Cuba en las provincias de Las Tunas y Holguín, y el noroeste de Haití. De perhúmedo a húmedo pasaron Copán, Yoro y Colón en Honduras, Jinotega en Nicaragua, Guanacaste en Costa Rica y Darién en el oriente de Panamá (véase el mapa V.1).

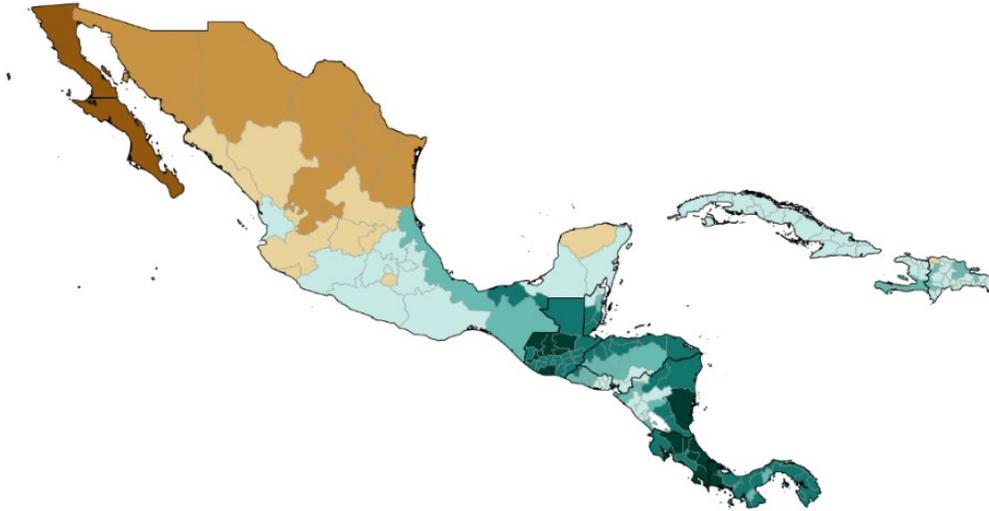
La década de 2001-2010 mostró un cambio contrario al de la década anterior, la región presentó un aumento de humedad en algunas regiones con respecto al período base. En México, el estado de Tamaulipas pasó de semiárido a subhúmedo. Yucatán en México y Monte Cristi en la República Dominicana pasaron de subhúmedo a húmedo. Pinar del Río en Cuba aumentó su condición de humedad. Centroamérica mantuvo las mismas condiciones que la década de 1990. El período 2011-2018 muestra las mismas condiciones en el norte de México que en el período base, pero se mantendrían en general las condiciones de los períodos previos con una pérdida visible de humedad en el Atlántico (véase el mapa V.1).

En el gráfico V.1 se muestra el porcentaje de departamentos que corresponden a cada rango de los mapas del índice de aridez por período, este porcentaje se refiere al número de departamentos y no a la proporción de superficie de la región. En la clasificación de árido el porcentaje de departamentos se ha mantenido en un 1% entre el período base y la última década, la clasificación de semiárido también se mantuvo en un 4%. El mayor aumento fue en la clasificación de húmedo 1, que pasó del 36% al 43% de los departamentos. Las clases que

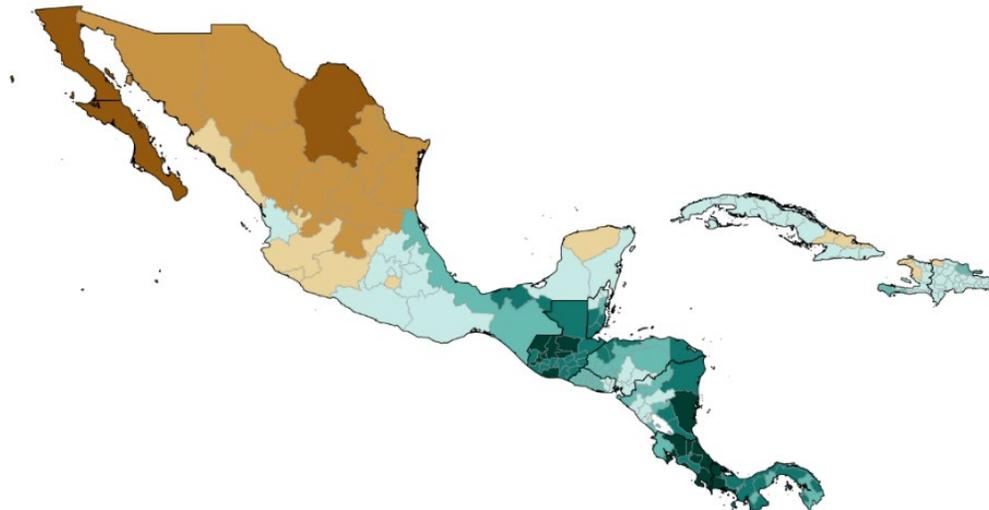
perdieron participación entre los períodos 1960-1990 y 2011-2018 fueron las de subhúmedo que pasó del 5% al 4%, húmedo 2 del 23% al 22%, perhúmedo 1 del 22% al 21% y perhúmedo 2 del 8% al 5%.

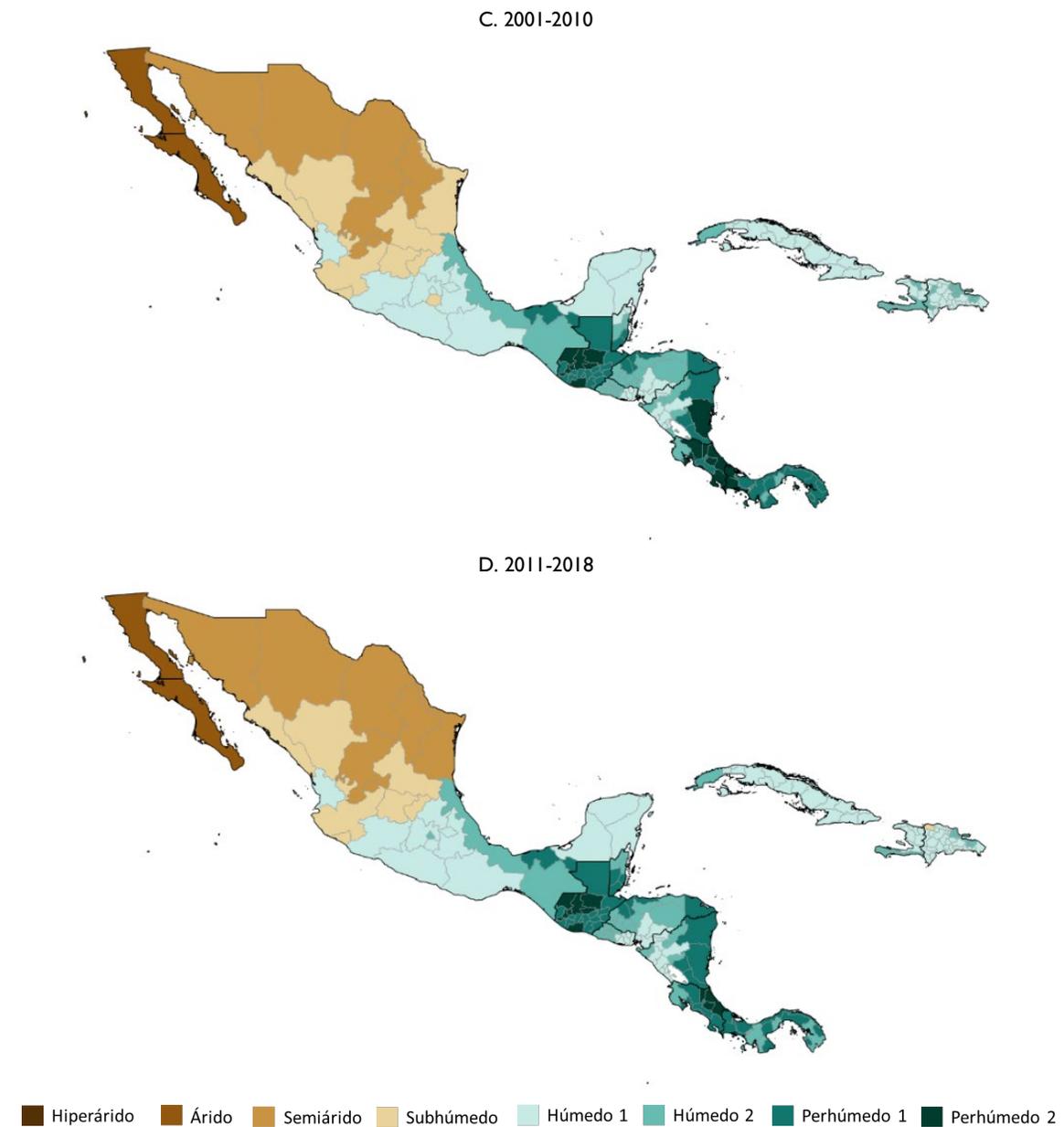
Mapa V.1
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: índice de aridez por departamento y por período, 1960-2018
(En unidades del índice de aridez)

A. 1960-1990



B. 1991-2000

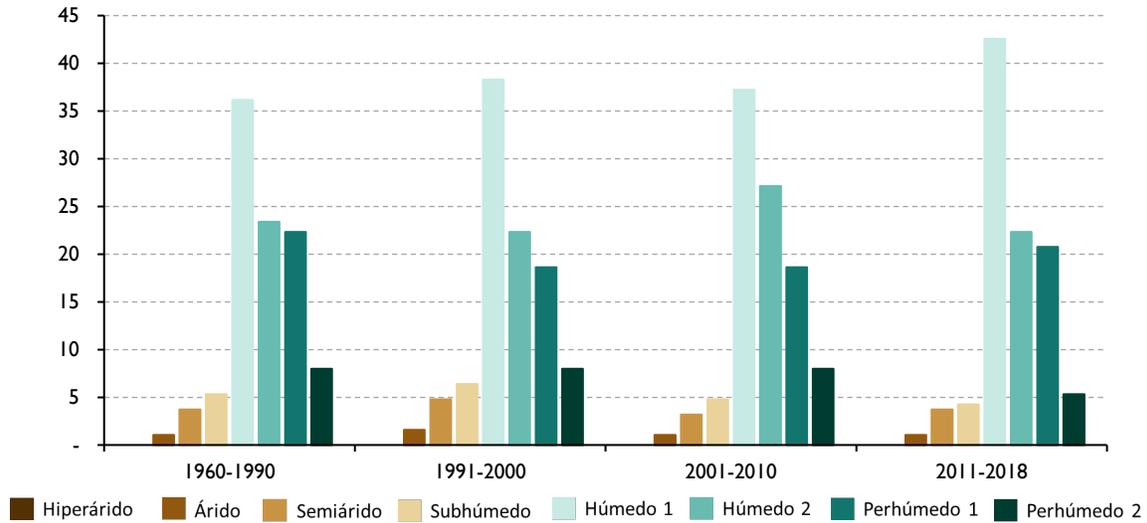




Fuente: Elaboración propia.

En conclusión, el porcentaje de departamentos que tienen el índice de aridez clasificado como húmedo ha aumentado, pero con el valor más bajo (húmedo 1), al mismo tiempo los departamentos más húmedos han disminuido (húmedo 2 y perhúmedo). Por tanto, en las últimas décadas se observa una tendencia a menor humedad en el occidente de la República Dominicana y en Centroamérica, con excepción del Caribe de Costa Rica y el altiplano occidental de Guatemala, mayor humedad en Yucatán y en el centro de México, el norte de Belice, el occidente de Cuba y ningún cambio significativo en el resto de México. Estos cambios se refieren a las clases del índice de aridez de los departamentos, un segundo análisis es visualizar los cambios del valor del índice e identificar cuáles departamentos fueron los más impactados en su humedad por el cambio en temperatura y precipitación.

Gráfico V.1
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: departamentos en cada rango del índice de aridez, por período, 1960-2018
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

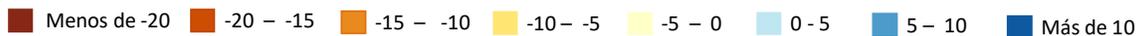
En el mapa V.2 se muestra la variación del índice de aridez en las últimas tres décadas con respecto al período base 1960-1990. Estos mapas complementan los resultados mostrados en el mapa V.1. Con color azul se observan las zonas donde ha aumentado el valor del índice hasta en más de 10 unidades, en tonos amarillos, los departamentos con una disminución de hasta -5 unidades y después los rangos toman colores naranjas y rojos hasta una disminución del valor en más de 20 unidades.

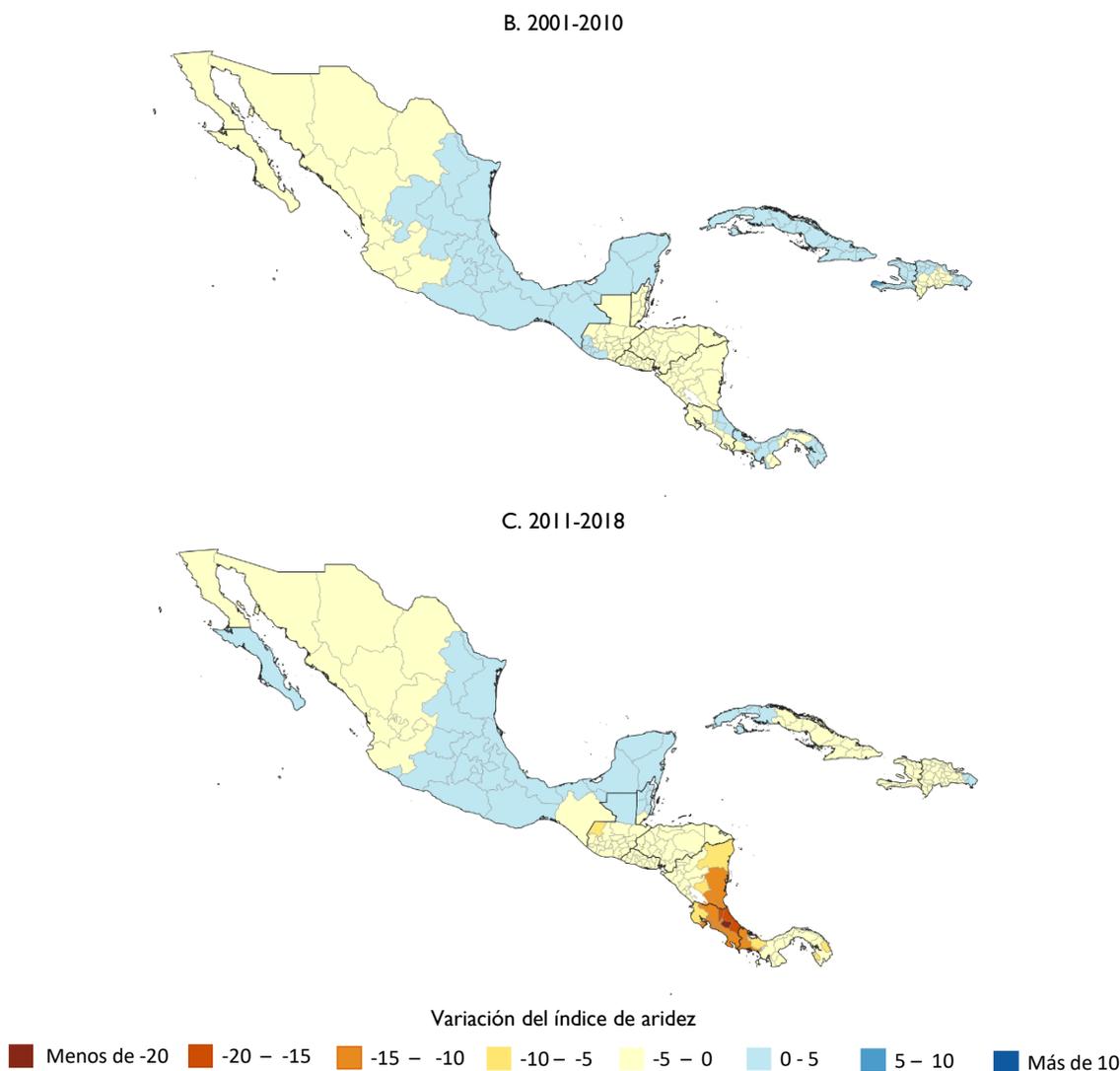
Mapa V.2
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: variación del índice de aridez por departamento y por período con respecto al período 1960-1990, 1991-2018
(En cambio en unidades del índice de aridez)

A. 1991-2000



Variación del índice de aridez





Fuente: Elaboración propia.

Los territorios donde aumenta la humedad hasta en cinco unidades varían en cada década, pero se observan principalmente en Baja California Sur, el sur de México hasta el occidente de Guatemala, El Petén y Belice, así como el oriente de El Salvador y el sur de Honduras, y el occidente de Cuba en la década de 1990. En la primera década del siglo XXI la humedad aumentó en todo el oriente de México desde el norte hasta el sureste, el Pacífico de Guatemala, todo el territorio de Cuba, Haití, el norte y oriente de la República Dominicana y el Atlántico de Costa Rica y Panamá. Entre 2011 y 2018 el aumento fue en Baja California Sur, el oriente de México desde el norte hasta el Pacífico, El Petén y gran parte de Belice, el occidente de Cuba y el oriente de la República Dominicana. El resto del territorio experimentó una pequeña pérdida de humedad de hasta cinco unidades en los dos primeros períodos, pero en el período de 2011-2018 se observa una fuerte pérdida de humedad en las zonas clasificadas como perhúmedas que van del Atlántico de Nicaragua, todo el territorio de Costa Rica y el occidente de Panamá (véase el mapa V.2).

E. Índice de aridez por municipio: escenarios de cambio climático

Para analizar el impacto del cambio climático en el índice de aridez, se utilizaron los datos de los escenarios de cambio climático, es decir las variables de temperatura y precipitación que se analizaron en los capítulos anteriores (escenarios RCP4.5 y RCP8.5 con los cortes 2030, 2050, 2070 y 2080 a nivel municipal) y la climatología base 1960-1990. En los mapas V.3 y V.5 se muestran las estimaciones del índice de aridez del período base y los escenarios respectivos usando los mismos rangos que en el mapa V.1 (véase el cuadro V.2). A nivel municipal se observa mayor detalle de los regímenes de aridez y humedad que a nivel departamental.

I. Período base 1960-1990

En los mapas V.3.A y V.5.A se muestra el detalle de la división municipal. En estos mapas se ubican regiones clasificadas como hiperáridas o desérticas, específicamente en Baja California Sur y en el límite de Baja California con Sonora en México, esta clasificación de las zonas es consistente con la literatura consultada. Como zonas áridas se clasifica el resto de la península de Baja California, la zona costera de Sonora y Sinaloa, el norte del estado de Chihuahua y la parte occidental de Coahuila hasta Durango en el norte de México.

La región semiárida se extiende desde el norte de México al centro del país, en esta clasificación también se encuentran algunos municipios de Hidalgo, Puebla y Yucatán en México, y el municipio de Cristóbal en Independencia en la República Dominicana. La región subhúmeda está marcada desde el norte de México por ambas costas hacia el sur, además de algunos municipios de la península de Yucatán. En el resto de la región se encuentran municipios dentro de esta clasificación, por ejemplo, en Chiapas (México); en Chiquimula y El Progreso (Guatemala); en El Paraíso (Honduras); en Nueva Segovia, Madriz, Matagalpa y Managua (Nicaragua); en Las Tunas y Holguín (Cuba); y en Monte Cristi, Valverde, Bahoruco, Independencia y Azua (República Dominicana).

La zona de la Sierra Madre Occidental desde el estado de Chihuahua hasta Durango en el norte de México se caracteriza por ser una zona húmeda que se extiende hasta el Pacífico (húmedo 1). En este primer nivel de humedad también se encuentra el centro y el golfo de México y el resto de la península de Yucatán y se extiende hasta el norte del Petén y de Belice, así también algunos municipios del centro de Guatemala y de Honduras, municipios del Pacífico de Nicaragua, la región de Azuero en Panamá, gran parte de Cuba, el noroeste de Haití y el oriente y occidente de la República Dominicana. En Haití hay mayor humedad (húmedo 2) en el sur y el oriente mientras que en la República Dominicana la humedad se localiza en el centro. Una de las zonas clasificadas como perhúmeda corre desde el norte del estado de Puebla, Veracruz, Oaxaca, Tabasco, Chiapas en México, el altiplano Occidental de Guatemala, Alta Verapaz, Izabal y el Sur de Belice (perhúmedo 1). La segunda zona perhúmeda es la región del Atlántico de Honduras y Nicaragua y Costa Rica y gran parte de Panamá (perhúmedo 2).

2. Escenario RCP4.5

Los resultados más relevantes en el escenario RCP4.5 se describen a continuación (véase el mapa V.3.):

- Para 2030 aumentarían las zonas clasificadas como áridas en el norte de México. La condición de aridez se extendería en todo el norte de Chihuahua y hacia el estado de San Luis Potosí. En la parte occidental del norte de México —entre Chihuahua y Durango— y en la península de Yucatán algunos municipios pasarían de húmedo a subhúmedo. Aumentarían los municipios en condición de semiárido en Michoacán, Hidalgo, Querétaro y Puebla. En Guatemala se extendería los municipios subhúmedos en Zacapa, Chiquimula, El Progreso y Jalapa. En el centro de Honduras algunos municipios pasarían de húmedo 2 a húmedo 1. Algunos distritos de Nord-Ouest en Haití pasarían a subhúmedo.
- Para 2050 algunos municipios en el norte de México que estaban clasificados como áridos pasarían a semiáridos y sería esta clase la que dominaría gran parte de la superficie del centro y norte de México. El Salvador, Honduras y Nicaragua presentarían pérdida de humedad en algunos municipios, incluso algunos pasarían a la clasificación de subhúmedo en El Paraíso, Madriz, Matagalpa y Managua. En la República Dominicana se extendería la zona subhúmeda en el sur y en La Altagracia y habría presencia de municipios en condición de semiárido.
- En 2070 y 2080 aparecerían nuevas zonas áridas en el norte de México y seguirían perdiendo humedad algunos municipios de México, Honduras, El Salvador, Nicaragua, el oriente de Cuba y el noroeste y suroeste de la República Dominicana.

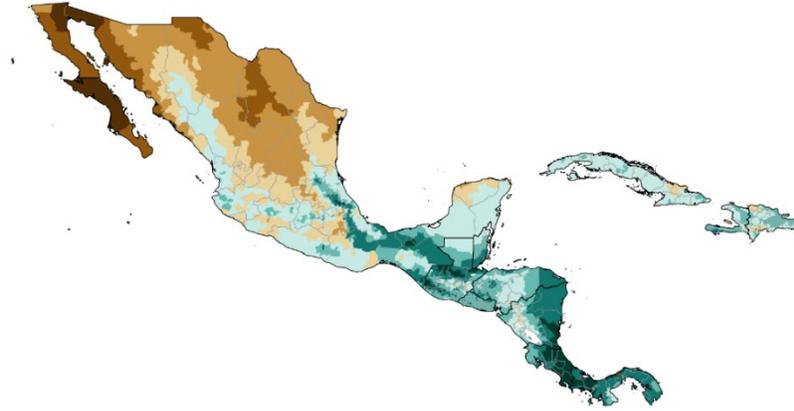
En el mapa V.4 se muestra los cambios del índice de aridez de los municipios expresado en unidades del índice para el escenario RCP4.5. El tamaño de los rangos es de cinco unidades, desde los colores azules que expresan mayor humedad y los amarillos pérdida de humedad o más aridez. En este escenario destaca que los probables cambios en el índice de aridez se darían hacia 2030 y a partir de ese corte habría cierta estabilidad en el indicador. En el mapa V.4 se muestra con más claridad qué zonas serían las más afectadas.

Como se mostró en el análisis histórico, las zonas más afectadas han sido aquellas que tienen un índice de aridez mayor, es decir, las más húmedas. Las variaciones en cada corte se calcularon con respecto al período base 1960-1990. Por corte, los cambios del índice más relevantes serían:

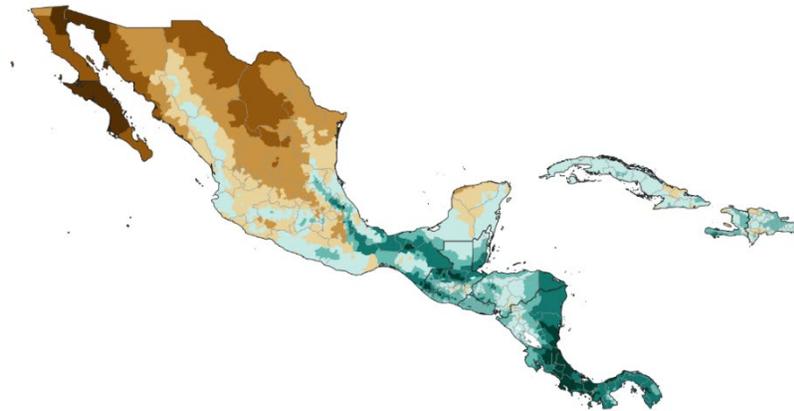
- Para 2030 habría aumentos en el índice en la parte del Pacífico de Oaxaca (México), Guatemala, Nicaragua y Costa Rica, en gran parte de Panamá, con mayor aumento de humedad en la península de Azuero, en el centro de Cuba y en Monte Cristi (República Dominicana). El resto de la región perdería humedad, pero con mayor magnitud en las zonas altas de Chihuahua, en el centro y sur de México y en Alta Verapaz y El Petén (Guatemala).

Mapa V.3
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: índice de aridez por municipio, período 1960-1990 y escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
(En unidades del índice de aridez)

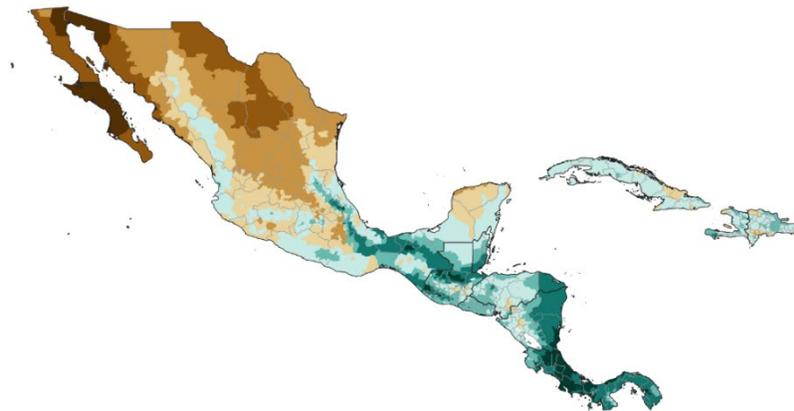
A. 1960-1990



B. RCP4.5 2030

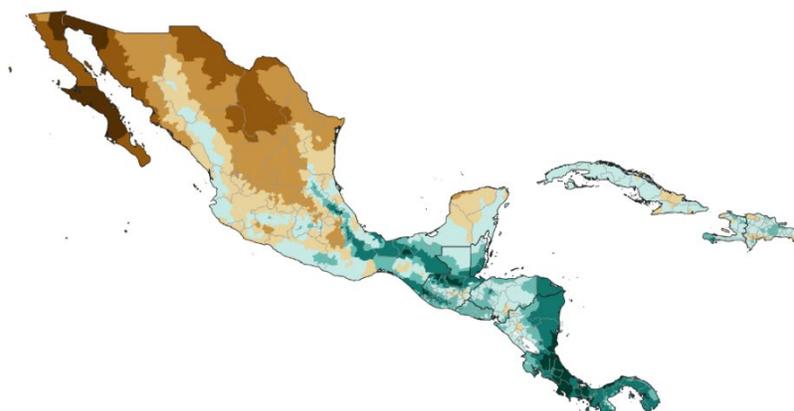


C. RCP4.5 2050

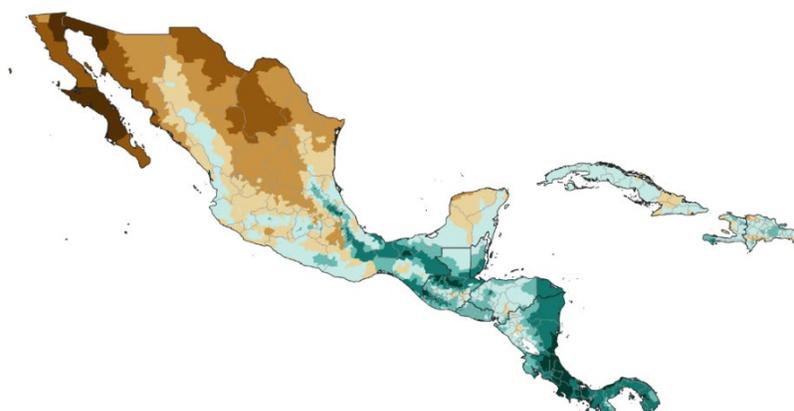


Hiperárido
 Árido
 Semiárido
 Subhúmedo
 Húmedo 1
 Húmedo 2
 Perhúmedo 1
 Perhúmedo 2

D. RCP4.5 2070



E. RCP4.5 2080



■ Hiperárido ■ Árido ■ Semiárido ■ Subhúmedo ■ Húmedo 1 ■ Húmedo 2 ■ Perhúmedo 1 ■ Perhúmedo 2

Fuente: Elaboración propia.

Nota: El concepto “departamento” se refiere a la segunda división administrativa como distrito, estado, provincia y comarca.

- En 2050 seguirían los aumentos con respecto al período base, sobre todo en la península de Azuero (Panamá), que pertenece al Corredor Seco Centroamericano. Habría también aumentos, pero en menor magnitud en gran parte de Panamá y la costa sur Pacífico de México. El resto de la región perdería humedad, pero en mayor medida en el centro de México, y en la región que abarcaría desde Chipas, el altiplano occidental, El Petén, Alta Verapaz e Izabal (Guatemala), Belice, y en gran parte de Honduras.
- En 2070 continuarían los aumentos de humedad, con respecto a 1960-1990, en Panamá y en una pequeña región de la costa de Oaxaca en México. En el resto del territorio disminuye su humedad, las zonas con reducciones de más de cinco unidades del índice aumentan en el noroccidente de México, el golfo de México, el norte y centro de Guatemala, Belice, Honduras, la costa caribe de Nicaragua, municipios de Cartago, San José y Puntarenas en Costa Rica, el sur de Haití y algunos municipios del sur de la República Dominicana.
- Para 2080 —además de Panamá—, habría aumentos de humedad en la costa de Guerrero, Oaxaca y el sur de la Península de Baja California en México. Las reducciones seguirían en niveles similares al corte anterior.

Mapa V.4
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: variación del índice de aridez por municipio,
escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
(En cambio en unidades del índice de aridez)

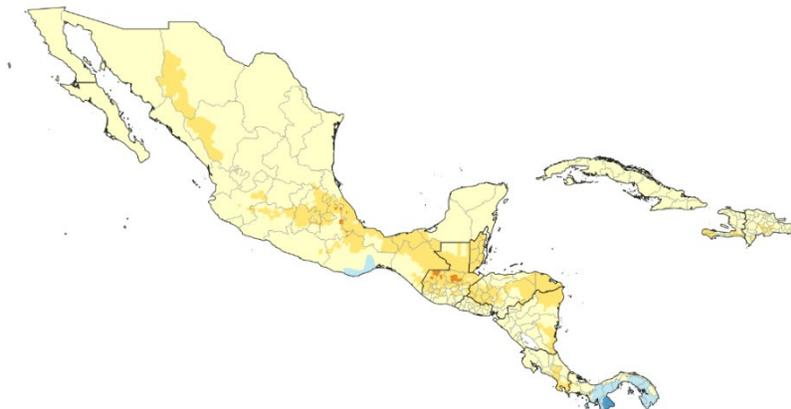
A. RCP4.5 2030 en comparación con 1960-1990



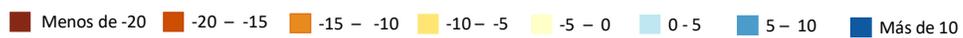
B. RCP4.5 2050 en comparación con 1960-1990



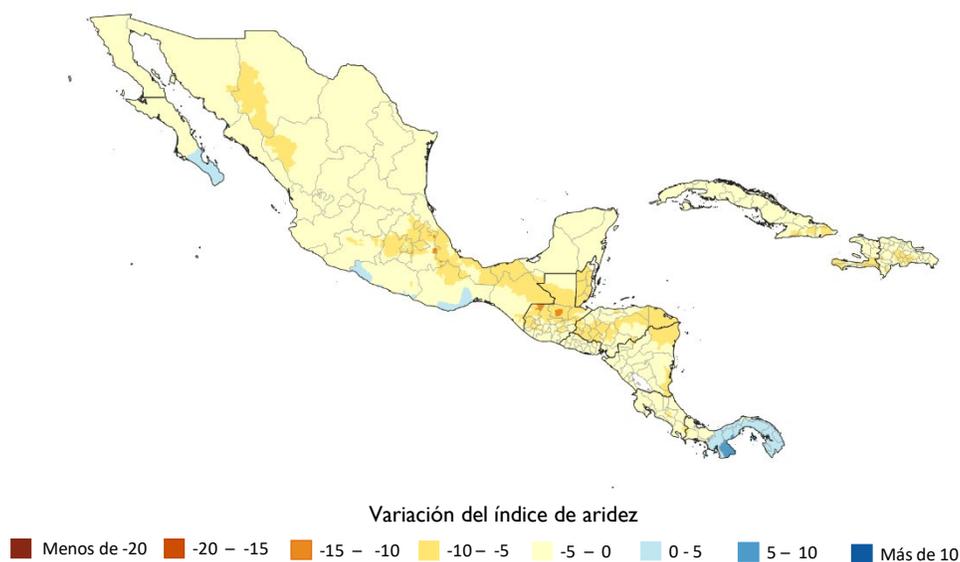
C. RCP4.5 2070 en comparación con 1960-1990



Variación del índice de aridez



D. RCP4.5 2080 en comparación con 1960-1990



Fuente: Elaboración propia.

Nota: El concepto "departamento" se refiere a la segunda división administrativa como distrito, estado, provincia y comarca.

Los mapas V.3 y V.4 muestran que los pequeños cambios en el índice de aridez en el norte de México llevarían a esa zona a dejar de tener un régimen semiárido y pasar a uno árido en los próximos años. Este mismo efecto se vería en pequeñas zonas de la República Dominicana que ya tendría algunos municipios como semiáridos. Los cambios más fuertes en el índice se dan en el sur de México y en el norte de Centroamérica, esto resultaría en una mayor fragilidad en las zonas que se ubican en el Corredor Seco Centroamericano y en casi todo el territorio de Honduras.

Las áreas más afectadas por la mayor reducción del índice, como el sur de México, Guatemala, desde el altiplano occidental hasta Izabal y toda la región del Atlántico desde Nicaragua hasta Panamá, no perderían su condición de húmedas por sus características actuales de muy húmedas. Sin embargo, esta fuerte reducción podría tener impactos en otros rubros como la biodiversidad, los ecosistemas y la agricultura.

3. Escenario RCP8.5

Los resultados más relevantes en el escenario RCP8.5 serían los siguientes (véase el mapa V.5):

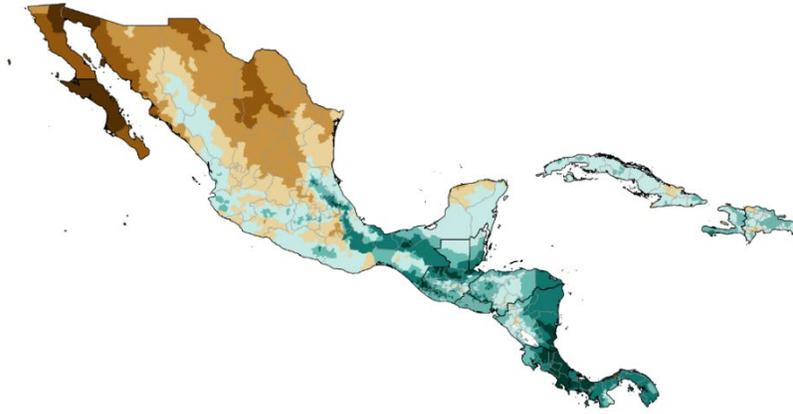
- Para 2030 aumentaría en gran proporción las zonas que cambiarían su régimen de semiárido a árido en el norte de México. Las zonas semiáridas se extenderían en el centro-norte de México. Habría municipios que pasarían de húmedo a subhúmedo como en el occidente, el estado de Veracruz, la península de Yucatán en México, en Zacapa (en el oriente de Guatemala) y en Nord-Ouest (Haití). También se observa una pérdida en los niveles de humedad en el occidente de Honduras, algunos municipios de Haití y la República Dominicana.

- Para 2050 seguirían aumentando los municipios en México que pasarían a condiciones áridas, semiáridas y subhúmedas. En Cuba casi todos los municipios estarían en el rango de la clase de húmedo 1 con excepción del oriente de la isla, y en Haití y la República Dominicana habría una pérdida en el nivel de humedad y además aparecerían zonas subhúmedas en Artibonite y La Altagracia. En Centroamérica los países más afectados serían Honduras en todo su territorio y Nicaragua en el occidente por condiciones de menor humedad y aparición de municipios con la condición de subhúmedos. La región perhúmeda 2 en Guatemala disminuiría en gran parte a perhúmeda 1.
- En 2070 en el estado de Sonora en México aumentaría la zona hiperárida, además habría un notable crecimiento de la zona semiárida en el noreste de México, y aparecerían algunos municipios en la República Dominicana que tendrían estas características (en Monte Cristi, Azua y Baoruco). En el norte de México habría pocas zonas como húmedas. Toda la península de Yucatán estaría en el rango de subhúmedo hasta el norte de El Petén. Entre Olancho, Francisco Morazán y El Paraíso en el oriente de Honduras hasta Madriz en Nicaragua habría una región con niveles de subhúmedo, así como en el oriente de Guatemala. La condición de subhúmeda aumentaría también en el oriente de Cuba, el noroeste de Haití y el sur de la República Dominicana.
- En 2080 aumentarían la condición de subhumedad en el sur de México, en Guatemala se extenderían hacia el centro en los departamentos de Baja Verapaz y Guatemala, en Olancho y Francisco Morazán en Honduras y en gran proporción en la República Dominicana. La zona del Atlántico desde Honduras hasta Panamá continuaría con condiciones de humedad y perhumedad pero con una visible disminución.

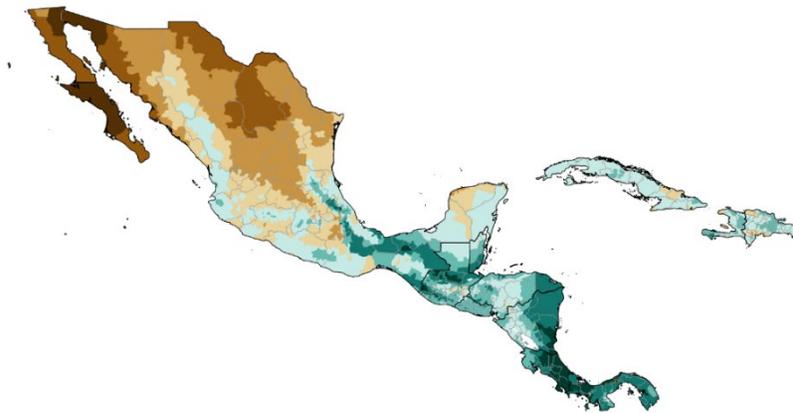
En el corte 2030 los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 muestran cambios similares. La diferencia radica en que la reducción del índice de aridez es mayor en cada corte hasta 2080 en RCP8.5 que en RCP4.5, además de haber un aumento significativo en las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas de la región. En este escenario las islas de Cuba y Haití y la República Dominicana se ven más afectadas a partir de 2050. Para final de siglo El Salvador, el sur de México, Honduras, el norte de Belice y el Petén de Guatemala también estarían en condiciones de menor humedad o como zonas subhúmedas. En general en el escenario RCP8.5 se puede ver una pérdida fuerte de humedad.

Mapa V.5
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: índice de aridez por municipio, período 1960-1990 y escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
(En unidades del índice de aridez)

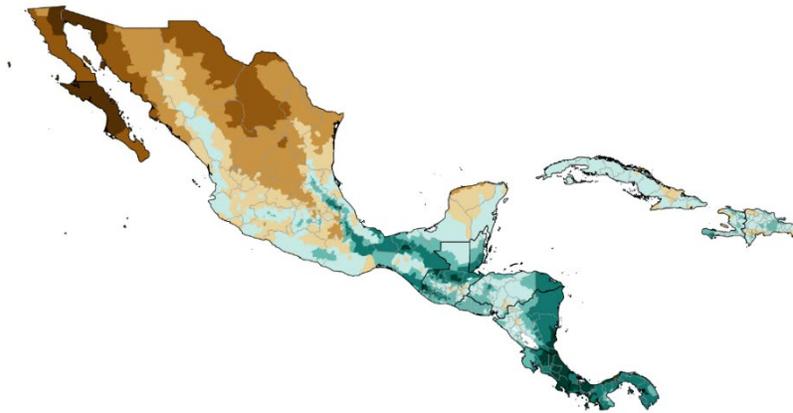
A. 1960-1990



B. RCP8.5 2030

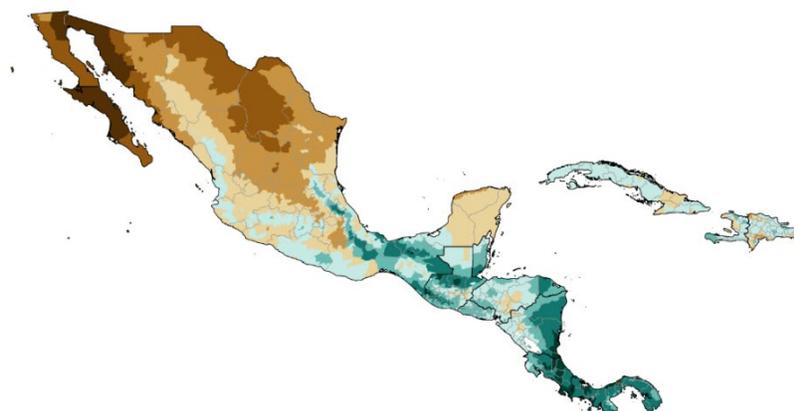


C. RCP8.5 2050

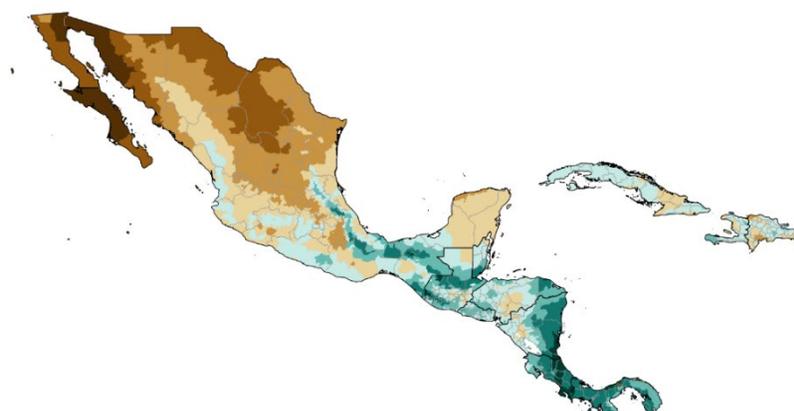


Hiperárido
 Árido
 Semiárido
 Subhúmedo
 Húmedo 1
 Húmedo 2
 Perhúmedo 1
 Perhúmedo 2

D. RCP8.5 2070



E. RCP8.5 2080



Hiperárido
 Árido
 Semiárido
 Subhúmedo
 Húmedo 1
 Húmedo 2
 Perhúmedo 1
 Perhúmedo 2

Fuente: Elaboración propia.

Nota: El escenario es el ensamble de los modelos CESM, MIROC5 y MPI_ESM_LR.

En el mapa V.6 se ilustra la variación del índice con respecto al período base 1960-1990 en el escenario RCP8.5. Los cambios están expresados en unidades del índice y el tamaño de los rangos es de cinco unidades, desde los colores azules que expresan mayor humedad y los amarillos pérdida de humedad o más aridez. Los cambios más relevantes por corte serían:

- En 2030 las zonas con aumento en el índice de aridez (mayor humedad o menor aridez) serían el sur de la península de Baja California, la costa Pacífico de México y Guatemala; el occidente de Nicaragua; Guanacaste, Alajuela y San José (Costa Rica), gran parte de Panamá (el mayor incremento sería en el Pacífico de Panamá) y el centro de Cuba. El resto de la región tendría reducción de humedad. No obstante, el mayor decremento sería en el sur de Chihuahua, en el límite de Puebla con Veracruz, Estado de México, Ciudad de México y Chiapas (México) y en Huehuetenango, Quiché, Alta Verapaz e Izabal (Guatemala).
- En 2050 solo se mantendría un aumento en el índice de aridez en algunas zonas del Pacífico de México, la zona alrededor del lago de Managua y en Panamá (con mayor aumento de humedad en la península de Azuero). El resto tendría reducciones de

humedad, con mayor magnitud en el noroccidente y centro de México, y desde el golfo de México hasta la zona del Atlántico en Honduras. La zona perhúmeda de Guatemala sería la más afectada.

- En 2070 la provincia de Azuero tendría el mayor aumento en el índice de aridez y en menor medida el Pacífico de Panamá al igual que algunos municipios en el Pacífico sur de México. En este corte se acentuarían más las reducciones de humedad en el noroccidente de México, en los límites de Puebla, Veracruz y Oaxaca (México), además desde Chiapas en México hasta Belice, de la zona Atlántico de Honduras hasta la Costa Caribe Norte de Nicaragua, y de la Costa Caribe Sur hasta el centro de Costa Rica, así como algunos municipios en Intibucá, La Paz, Lempira, Cortés y Comayagua en Honduras.
- En 2080, las regiones que tendrían un aumento en el índice de aridez serían la Península de Azuero y pequeñas regiones en el sur de México. Las disminuciones más fuertes se encontrarían en las regiones más húmedas de la región que va desde la zona del golfo de México hasta el occidente de Panamá, pasando por todo el Atlántico de Centroamérica. También habría disminuciones de más de 10 unidades del índice de aridez en el noroccidente de México, el suroeste de Haití y el centro de la República Dominicana.

El escenario RCP8.5 muestra reducciones mayores en las zonas más húmedas de la región, estas reducciones serían mayores a las del escenario RCP4.5 como se muestra en los mapas V.4 y V.6. Habría zonas que verían una reducción en su clasificación climática a áridas, semiáridas y subhúmedas, pese a tener disminuciones más pequeñas en el índice de aridez (entre 0 y 10 unidades del índice), lo que indica la vulnerabilidad climática en la que se encuentran algunas regiones.

En resumen, a partir de 2050, el noroccidente de México, del sur de México hasta el occidente de Panamá, el oriente de Cuba, Haití y la República Dominicana tendrían la mayor pérdida de humedad. En el norte y centro de México, Cuba, el Pacífico de Guatemala, El Salvador y Nicaragua, y el oriente de Panamá la reducción del índice sería en menor magnitud. Los resultados en cuanto a los municipios más húmedos y su mayor reducción en Centroamérica son muy cercanos a los resultados encontrados en el documento *Impactos potenciales en la aridez y los meses secos* (CEPAL, COSEFIN, CCAD, SICA, UKAID y DANIDA, 2012) bajo los escenarios B2 y A2 por departamento. Sin embargo, en este estudio se pueden observar diferencias dentro de los departamentos de Centroamérica tanto en la clasificación climática como en el cambio en el índice, incluidos los departamentos más pequeños. Adicionalmente, hay una caracterización de una mayor área de zonas subhúmedas e incluso se tendrían cuatro municipios como semiáridos en Guatemala y uno en Honduras en 2080, los cuales no se identifican en el nivel departamental.

Mapa V.6
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: variación del índice de aridez por municipio y período, escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
(En cambio en unidades del índice de aridez)

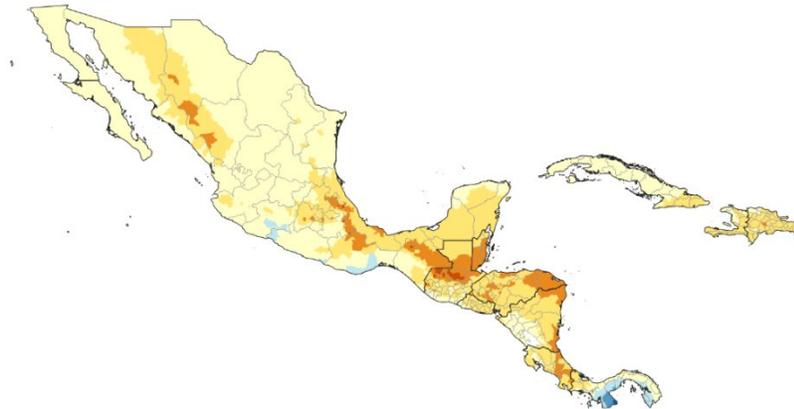
A. RCP8.5 2030 en comparación con 1960-1990



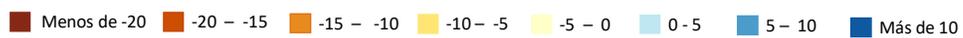
B. RCP8.5 2050 en comparación con 1960-1990



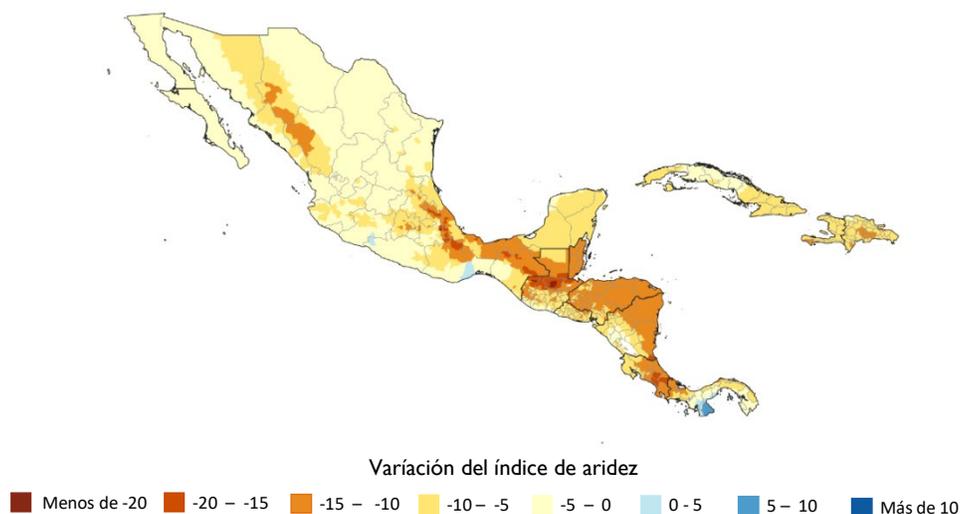
C. RCP8.5 2070 en comparación con 1960-1990



Variación del índice de aridez



D. RCP8.5 2080 en comparación con 1960-1990



Fuente: Elaboración propia.

Nota: El concepto "departamento" se refiere a la segunda división administrativa como distrito, estado, provincia y comarca.

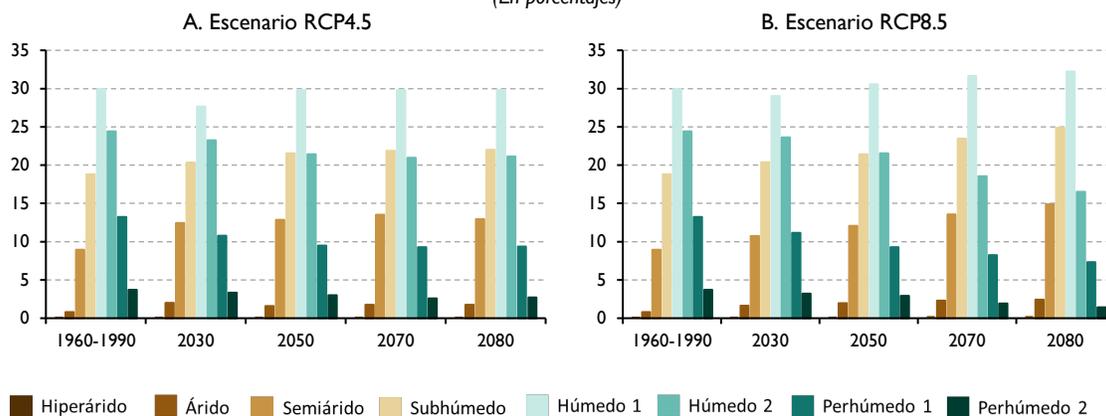
La combinación del análisis espacial entre el índice de aridez y sus variaciones puede ser de gran utilidad para generar posibles medidas de adaptación. El análisis muestra que se puede analizar algún municipio, cuenca o región y hacer distintas combinaciones con los resultados obtenidos. Por ejemplo, municipios que seguirían siendo perhúmedos pueden requerir medidas de adaptación en biodiversidad, ecosistemas, agricultura, infraestructura o salud si el escenario indica una variación significativa del índice de aridez; algunos municipios podrían seguir siendo húmedos con reducción no significativa en el índice de aridez y las medidas de adaptación necesarias serían mínimas. Por otra parte, estarían los municipios que pasarían de húmedo a subhúmedo lo cual requeriría medidas acordes a su nueva clasificación aun con un cambio pequeño en el índice.

En el gráfico V.2 se muestra la proporción de municipios en cada clase del índice de aridez incluidos en los mapas V.3 y V.5, se incluye los cortes de tiempo y los dos escenarios climáticos analizados. La proporción resultaría diferente si se considerara la superficie de cada municipio, ya que el tamaño de cada municipio es muy heterogéneo. Para el período base 0,2% de los municipios es clasificado como hiperárido; en el escenario RCP4.5 se mantendría en la misma proporción, pero en el escenario RCP8.5 subiría al 0,3% en 2070. En los mapas se muestran que si se considerara la superficie esta proporción podría ser mayor.

Entre el período 1960-1990 y el corte 2080, en el escenario RCP4.5, la proporción de municipios clasificados como perhúmedo 2 pasaría de 4% a 3%, perhúmedo 1 pasaría de 13% a 9% y húmedo 2 de 24% a 21%, mientras que en el escenario RCP8.5 la proporción de municipios sería de 1%, 7% y 17% respectivamente en 2080. En el mismo período habría un aumento de municipios en las clasificaciones más secas, en RCP4.5 la proporción de municipios subhúmedos pasaría de 19% a 22%, los semiáridos de 9% a 13% y los áridos de 1% a 2%. En el escenario RCP8.5 la proporción de municipios de húmedo 1 pasaría de 30% a 32% entre 1960-1990 y 2080, y la proporción de subhúmedo sería de 25%, semiárido 15% y árido 2% en 2080. En ambos escenarios la condición de húmedo 1 sería la de mayor porcentaje y a partir de 2070 la condición de subhúmedo sería la segunda clasificación en la región. Sin embargo, se debe

tener en cuenta que en el norte de México la superficie de los municipios es mayor que en el resto de la región por lo que las condiciones de hiperárido, árido y semiárido son de mayor importancia.

Gráfico V.2
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios en cada rango del índice de aridez, periodo 1960-1990 y escenarios RCP4.5 y RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
 (En porcentajes)

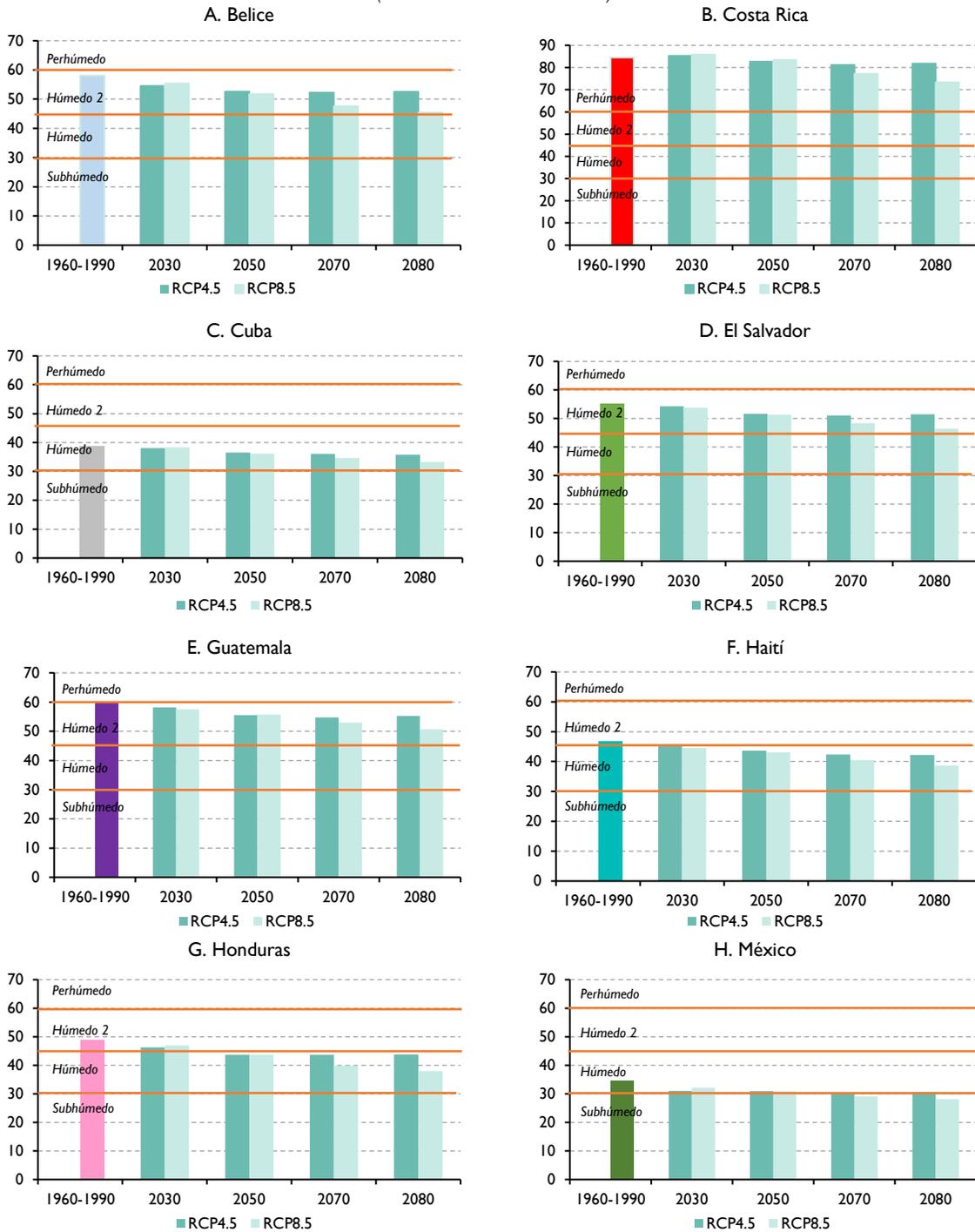


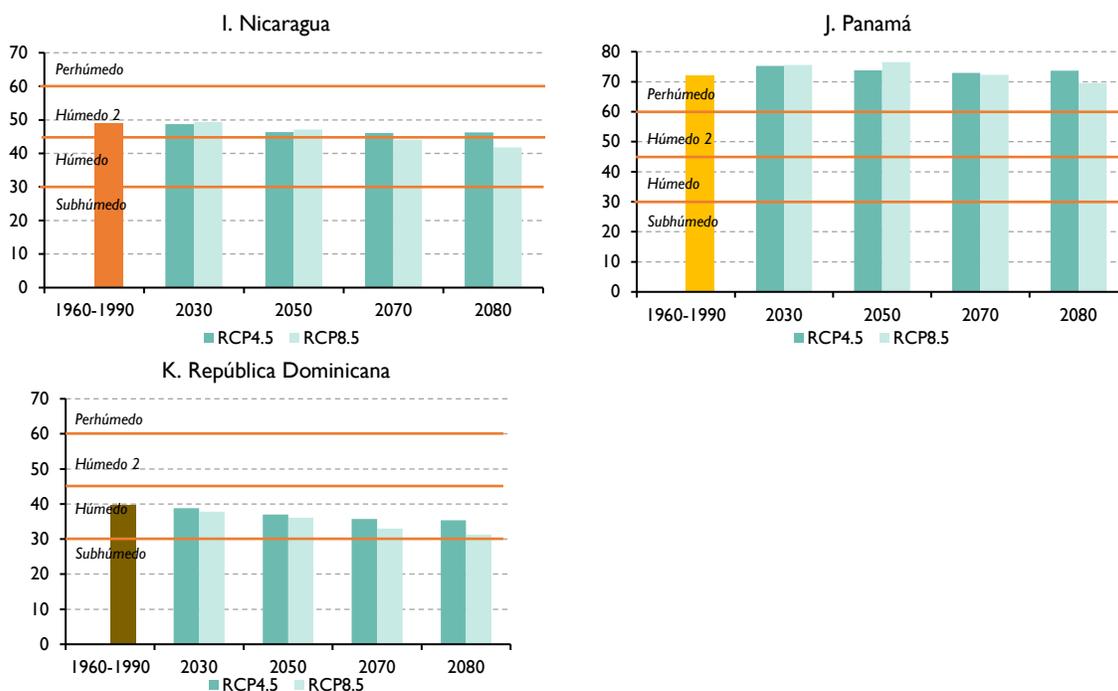
Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico V.3 se muestra el índice de aridez por país representado por el promedio del valor de sus municipios entre 1960-1990 y 2080 en los escenarios de cambio climático. En términos generales Costa Rica, Guatemala y Panamá tienen el promedio más alto del índice de aridez y sobrepasan el valor de 60 en el período de 1960-1990 que los clasifican como perhúmedo. Mientras que Belice, El Salvador, Haití, Honduras y Nicaragua tienen un valor entre 45 y 60 y se clasifican en húmedo 2 en el período base. Cuba, México y la República Dominicana tienen el valor promedio más bajo, pero aún son clasificados como húmedo. En el caso de México hay un mayor peso en la mayor cantidad de municipios en el sur que son húmedos y perhúmedos con respecto al norte.

En ambos escenarios los índices de aridez por país disminuirían al 2080 con una mayor velocidad a partir de 2050 en el escenario RCP8.5 con excepción de Panamá cuya reducción se daría en 2080 mientras en el escenario RCP4.5 habría aumento de humedad en ese país. En el escenario RCP4.5 disminuirían en mayor magnitud los promedios nacionales del índice en Belice, Honduras y Guatemala al 2080, y en RCP8.5 los de mayor impacto negativo serían Belice, Costa Rica y Honduras. Haití, Honduras y Nicaragua pasarían del nivel húmedo 2 a húmedo 1 y el índice de México pasaría de húmedo 1 a subhúmedo en el escenario RCP8.5 (véase el gráfico V.3).

Gráfico V.3
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: promedio por municipio del índice de aridez por país, período 1960-1990 y escenarios RCP4.5 y RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
 (En unidades del índice de aridez)





Fuente: Elaboración propia.

El cuadro V.4 es un ejemplo de la información que se puede crear a nivel municipal y que permitiría generar indicadores territoriales para distintos usos, como generar políticas de adaptación diferenciadas. Evaluar los impactos del cambio climático por municipios permite tener más herramientas y conocimientos en cada tema de interés. En el cuadro se muestran, por país, los municipios con menos y más cambios en el índice de aridez en los dos escenarios en el corte 2080 y su clasificación de aridez en ese corte, con excepción de Belice, en cuyo caso solo hay información a nivel de distritos.

En Belice, Guatemala y la República Dominicana los municipios que tendrían el menor y mayor cambio en el índice de aridez en el escenario RCP4.5 también lo tendrían en el RCP8.5. En Cuba no hay coincidencias entre los municipios que tendrían el menor y mayor cambio en ambos escenarios. Entre tanto en El Salvador, Honduras, Nicaragua y Panamá hay similitud en los dos escenarios en el municipio con menor disminución y en Costa Rica, Haití y México se repite el municipio en ambos escenarios en el municipio con un mayor impacto negativo en el índice.

Se puede observar que los municipios en cada país que tendrían un mayor cambio negativo en el índice serían los clasificados como perhúmedos y húmedos en ambos escenarios, es decir, su nivel de humedad es tan grande que los hacen más sensibles a cambios en temperatura y precipitación. Sin embargo, los municipios con menor impacto están en condición de subhúmedo o semiárido o pasaron a esta condición por lo que sus condiciones climáticas actuales los colocan en mayor vulnerabilidad. Destaca el distrito de Pedasí, Los Santos (Panamá) con aumento en el índice de aridez en ambos escenarios y sería el mayor en la región y estaría clasificado como húmedo en 2080. La mayor reducción en la región en RCP4.5 sería el municipio de Chalchicomula, Puebla (México) y en RCP8.5 el municipio de

San Pedro Carchá, Alta Verapaz (Guatemala), ambos municipios se mantendrían como perhúmedos (véase el cuadro V.4).

Cuadro V.4
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios con menor y mayor variación del índice de aridez por país, escenarios RCP4.5 y RCP8.5, corte 2080 con respecto al período 1960-1990
(En cambio en unidades del índice de aridez)

	Escenario RCP4.5, 2080		Escenario RCP8.5, 2080	
	Menor diferencia	Mayor diferencia	Menor diferencia	Mayor diferencia
Belice	-4,57 Corozal (Húmedo)	-6,55 Toledo (Perhúmedo)	-10,84 Corozal (Húmedo)	-14,80 Toledo (Perhúmedo)
Costa Rica	-0,69 Belén, Heredia (Perhúmedo)	-5,67 Paraíso, Cartago (Perhúmedo)	-7,04 Carrillo, Guanacaste (Húmedo)	-19,10 Paraíso, Cartago (Perhúmedo)
Cuba	-1,29 La Habana Vieja, Ciudad de la Habana (Húmedo)	-5,64 Baracoa, Guantánamo (Húmedo)	-3,39 Morón, Ciego de Ávila (Subhúmedo)	-8,74 Buey Arriba, Granma (Húmedo)
El Salvador	-1,35 Acajutla, Sonsonate (Húmedo)	-6,53 San Fernando, Chalatenango (Perhúmedo)	-4,02 Acajutla, Sonsonate (Húmedo)	-12,81 Perquín, Morazán (Húmedo)
Guatemala	-0,43 Champerico, Retalhuleu (Húmedo)	-11,03 San Pedro Carchá, Alta Verapaz (Perhúmedo)	-0,82 Champerico, Retalhuleu (Húmedo)	-21,85 San Pedro Carchá, Alta Verapaz (Perhúmedo)
Haití	-3,09 Fort-Liberté, Nord-Est (Húmedo)	-5,89 Les Cayes, Sud (Perhúmedo)	-5,32 Môle-Saint- Nicolas, Nord- Ouest (Subhúmedo)	-10,51 Les Cayes, Sud (Perhúmedo)
Honduras	-2,95 Morolica, Choluteca (Subhúmedo)	-7,48 Belén Gualcho, Ocotepeque (Húmedo)	-7,40 Morolica, Choluteca (Subhúmedo)	-14,56 Juan Francisco Bulnes, Gracias a Dios (Perhúmedo)
México	+0,80 Pochutla, Oaxaca (Húmedo)	-13,85 Chalchicomula de Sesma, Puebla (Perhúmedo)	+0,88 Zirándaro, Michoacán (Semiárido)	-21,43 Chalchicomula de Sesma, Puebla (Húmedo)

	Escenario RCP4.5, 2080		Escenario RCP8.5, 2080	
	Menor diferencia	Mayor diferencia	Menor diferencia	Mayor diferencia
Nicaragua	-0,90 San Francisco Libre, Managua (Subhúmedo)	-5,85 Kukra Hill, Región Autónoma de la Costa Caribe Sur (Perhúmedo)	-3,31 San Francisco Libre, Managua (Subhúmedo)	-15,27 San Juan del Norte, Río San Juan (Perhúmedo)
Panamá	+9,16 Pedasí, Los Santos (Húmedo)	-5,09 Renacimiento, Chiriquí (Perhúmedo)	+9,29 Pedasí, Los Santos (Húmedo)	-12,44 Changuinola, Bocas del Toro (Perhúmedo)
República Dominicana	-2,08 San Fernando, Monte Cristi (Semiárido)	-7,01 Constanza, La Vega (Húmedo)	-3,80 San Fernando, Monte Cristi (Semiárido)	-13,47 Constanza, La Vega (Húmedo)

Fuente: Elaboración propia.

En resumen, con la combinación de los cambios de temperatura y precipitación en el siglo XXI, el índice de aridez muestra variaciones desde 2030, la disminución del índice se generaliza a largo plazo en la región, en ambos escenarios, lo que significa menos humedad o mayor aridez. Las condiciones de aridez puede ser muy sensibles de una región a otra, por lo que los análisis deberían hacerse a pequeña escala e identificar las características sociales, económicas y ambientales de dicha zona o región, con el fin de diseñar políticas de adaptación apropiadas, así como el cálculo de otros indicadores que caractericen mejor el clima local y que tomen en cuenta la vegetación específica del territorio, además de la estimación de la evapotranspiración usando radiación y horas de sol al día, entre otras variables.

VI. Meses secos

El índice de aridez calculado en la sección anterior sirve para evaluar el régimen de humedad en dos dimensiones: espacial y temporal. El índice de aridez clasifica el régimen de humedad en un determinado momento en el tiempo, en este documento se evaluó para un período base, de 1990 a 2018 por década, y los cortes 2030, 2050, 2070 y 2080. El análisis de índice de aridez debe ser complementado con indicadores que midan las variaciones en la disponibilidad de agua para poder describir las temporadas de déficit y exceso de agua, por ejemplo, midiendo los meses secos. Tener bien definida la longitud de la estación seca ayuda al manejo del agua en la agricultura de riego y en el consumo humano y tiene influencia en la distribución ecológica de las especies (UNESCO, 2006).

Pueden existir regiones muy húmedas con una estación seca más larga, esto quiere decir que estas regiones con grandes precipitaciones anuales tendrían una concentración de la precipitación en pocos meses, lo que implica daños a los cultivos e inundaciones y en el resto del año posibles sequías. A medida que la estación seca se alarga y se intensifica, sobre todo en los ecosistemas más áridos, la productividad de la vegetación y la biomasa disminuyen. Los suelos cada vez más secos tardan más en recuperarse, lo que lleva a temporadas de crecimiento efectivas más cortas de la vegetación. Por otra parte, los cambios en la estación húmeda no se trasladan a la estación seca, porque el exceso de agua no se almacena y probablemente se pierde como flujo subterráneo o escorrentía fluvial (Murray-Tortarolo y otros, 2016).

En este documento se utilizará el método de clasificación bioclimática de Gaussen (1956) para contabilizar los meses secos en cada período histórico y futuro con cambio climático y para cada área administrativa de la región. El objetivo es mostrar y diferenciar espacialmente la evolución de la extensión de las estaciones seca y húmeda y como estas estaciones y áreas puede ser impactada por el cambio climático. Delimitar las estaciones seca y lluviosa es fundamental para la agricultura de la región que consta de una siembra de primera y postrera en gran parte del territorio y para la definición de los ecosistemas existentes. Este capítulo comprende una sección de definición y clasificación de los meses secos, seguido de la evidencia en estudios previos para la región, los resultados históricos a nivel departamental y finalmente los resultados de cambio climático a nivel municipal.

A. Definición y clasificación de los meses secos

De acuerdo con el método de clasificación bioclimática de Gaussen (1956) se establece que en una climatología la distribución de la temperatura y la precipitación durante el curso del año tiene mayor importancia que sus medias anuales. Gaussen considera un mes ecológicamente seco cuando la precipitación total mensual expresada en milímetros es igual o inferior a dos

veces el valor de la temperatura del mismo mes expresada en grados centígrados (Baltas, 2007; CIP, 1995; Escobar y otros, 2003):

$$P_i \leq 2T_i$$

donde P_i es la precipitación del mes i y T_i es la temperatura del mes i .

Se eligió este criterio de meses secos por la disponibilidad de información (solo se requiere las variables de temperatura y precipitación) y la facilidad de generar el indicador. Sobre el hecho de que la extensión de la sequía biológica depende de la humedad del aire, Gaussien suplió la ecuación anterior y caracterizó un mes seco de acuerdo con el volumen de precipitación (Baltas, 2007):

- Menos de 10 mm y temperatura media mensual menor de 10 °C
- Menos de 25 mm y temperatura media mensual entre 10 °C y 20 °C
- Menos de 50 mm y temperatura media mensual entre 20 °C y 30 °C
- Menos de 75 mm y temperatura media mensual mayor de 30 °C

A los meses continuos clasificados como secos o húmedos, desde un punto de vista climático, se les denomina estación seca y lluviosa (Toledo, 1980), misma que en cada región tiene un comienzo y una duración distinta.

B. Evidencia en estudios previos para la región

En el estudio *La economía del cambio climático en Centroamérica: Impactos potenciales en la aridez y los meses secos* (CEPAL, COSEFIN, CCAD, SICA, UKAID y DANIDA, 2012b) se realizó el cálculo de los meses secos utilizando el criterio de la *Guía metodológica para la elaboración del mapa del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe* (UNESCO, 2006) en donde se considera que un mes seco es aquel en el que la precipitación es menor al 50% de la evapotranspiración en un área determinada. Es decir, el estudio considera que un mes es seco cuando la precipitación es insuficiente para recuperar al menos la mitad de la humedad perdida por evapotranspiración.

Este documento mostró una estación seca para más del 50% de los departamentos que se encuentran en el Pacífico y Centro de Centroamérica entre diciembre y abril, y para el 75% en el altiplano occidental guatemalteco entre diciembre y marzo en el período base 1950-2000. En el Atlántico más del 50% de departamentos en marzo tuvieron mes seco y en menos de 50% entre noviembre y febrero en la misma región. Abril y noviembre se presentan como mes seco para Centroamérica en menos del 50% de los departamentos.

En 2100 en el escenario B2 de cambio climático disminuirían los departamentos con abril como mes seco en el Atlántico, Pacífico y Centro de Centroamérica y un aumento de departamentos para noviembre como mes seco. Mientras que en A2 habría un aumento de departamento en abril como mes seco en Atlántico, y en noviembre y diciembre una reducción de departamentos para toda la región. En este escenario habría otro hecho que es la aparición de algunos departamentos en junio y julio como meses secos (CEPAL, COSEFIN, CCAD, SICA, UKAID y DANIDA, 2012b).

En el presente estudio se optó por no usar el criterio ya que la fórmula de evapotranspiración de Turc (1963) es para el cálculo anual y no mensual. El cálculo de evapotranspiración mensual de Turc requiere ajustes y variables que no están disponibles para el documento como un factor de corrección mensual, la humedad relativa y la radiación solar (Marín, 2010; Turc, 1961).

Ceballos (2002) construyó un mapa bioclimático, utilizando diagramas de Gausson para poder determinar los períodos secos para la provincia de Sancti Spiritus en Cuba. Utilizó seis estaciones meteorológicas y 40 pluviómetros con al menos 27 años de observaciones. La mayor parte de la superficie de la provincia consta de 3 y 4 meses secos y se caracteriza por altitudes de entre 20 msnm y 313 msnm, la costa sur de la provincia es la de más meses secos con 5 y 6 meses secos con altitud de entre 0 y 25 msnm, la costa norte de la provincia registra 3 y 4 meses secos y la región suroccidental de la provincia es la que tiene más meses secos con 1 y 2 meses secos en las regiones que van de 200 msnm a 600 msnm y 0 meses secos en las zonas de más de 600 msnm.

Villers y otros (2009) estimaron el impacto del cambio del número de meses secos en la floración y desarrollo del fruto del café en la región de Huatusco en Veracruz. Relacionaron el número de meses secos y el nivel de precipitación con las etapas fenológicas del café. Este estudio concluye que la floración del café puede verse afectada ya que en lugar de presentarse cuatro meses secos (diciembre a marzo) se podría concentrar en dos meses secos (febrero y marzo) con cambio climático en el modelo GFDL-R30, lo que reduciría el número de flores probablemente a la mitad y propiciaría la aparición de enfermedades. Bajo el modelo CCCM se mantendrían los 4 meses secos, pero la sequía se daría con mayor intensidad, lo que también afectaría la floración.

C. Meses secos por departamento: impacto histórico del cambio climático

En el mapa VI.1 se muestra la clasificación por departamentos de meses secos en cuatro períodos históricos. Los colores van desde azul fuerte para aquellos departamentos que tienen 0 y 1 mes seco en el año, le siguen tonos de azul más claros para 2, 3 y 4 meses secos. Luego cuatro tonos de café de claro a oscuros para departamentos entre 5 y 12 meses secos. Los períodos históricos analizados son los mismos de los capítulos anteriores. Se considera al período base la climatología 1960-1990 y las décadas 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2018. La caracterización del período base se describe a continuación (véase el mapa VI.1):

- Con 0 y 1 mes seco se ubicaban el estado de Tabasco, los departamentos ubicados en el Atlántico de Centroamérica, incluyendo El Petén y el altiplano occidental de Guatemala hasta Bocas del Toro en Panamá. También tienen 0 y 1 mes seco las provincias de Pinar del Río y Holguín en Cuba, el norte y sur de Haití y gran parte del territorio de la República Dominicana.
- Entre 2 y 4 meses secos se encontraron el resto de Cuba, Haití, la República Dominicana, Panamá, Costa Rica y Guatemala. También algunos departamentos de Nicaragua y Honduras y cinco estados del sur y sureste de México.

- Las zonas entre 0 y 4 meses secos en México y Centroamérica se clasifican como perhúmedas, de acuerdo con el índice de aridez (véase el capítulo V). En estas zonas la estación seca fue corta. En Cuba, Haití y la República Dominicana, clasificados como húmedos, la estación seca también fue corta.
- En el período base, los departamentos con 5 y 6 meses secos se localizaron en El Salvador y en la zona del Pacífico de Honduras y Nicaragua, esta región se encuentra dentro del Corredor Seco Centroamericano. Además de Yucatán, Durango y el oriente de México, desde Tamaulipas en el norte hasta Oaxaca en el sur.
- La región con 7 y 8 meses secos se localizó en el estado de Nuevo León y en el occidente de México, desde el norte hasta el estado de Guerrero en el Pacífico. En México se presentaron departamentos con 9 a 12 meses secos. Estos se localizaron en Coahuila y la Península de Baja California. Estas zonas coinciden con la clasificación árida y semiárida a nivel estado en el norte de México (véase el capítulo V).

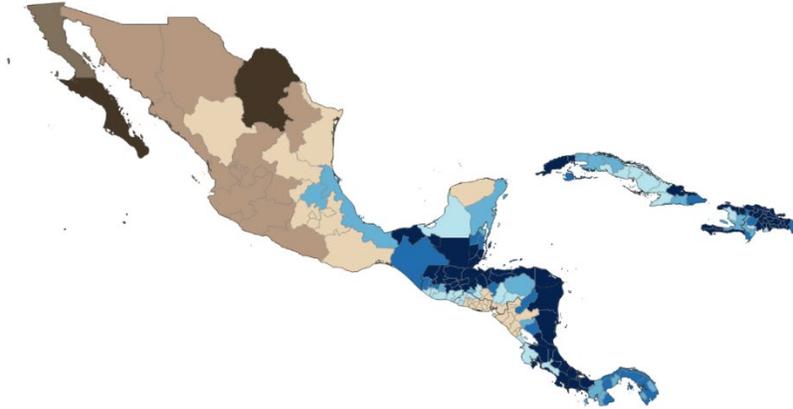
En las últimas tres décadas se ha generado un aumento de meses secos con respecto al período base en gran parte de la región. Para la década de 1990 en México hubo un aumento a 10 y 11 meses secos en Sonora y Chihuahua y a 7 y 8 meses secos en Durango, Tamaulipas y San Luis Potosí, mientras que Campeche subió a 5 y 6 meses secos. En Centroamérica, por un lado, el aumento de meses secos se produjo en Guanacaste en Costa Rica e Intibucá en Honduras. Por otra parte, hay algunas regiones que mostraron una reducción en el número de meses secos como la Península de Baja California, Hidalgo y Chiapas en México y varias provincias de Cuba. El resto de la región no mostró cambios (véase el mapa VI.1).

Para el período 2001-2010 en México en la península de Baja California aumentó de nuevo el número de meses secos a 11 y 12, y en Veracruz y en Quintana Roo se incrementaron los meses secos a tres y cuatro con respecto al período 1991-2000. En Cuba algunas provincias aumentaron a 2 y 3 meses secos. En Centroamérica los departamentos del centro de Honduras sufrirían aumentos de hasta 5 y 6 meses secos. Mientras que se presentaron disminuciones de meses secos en México en Tamaulipas, San Luis Potosí y Guerrero que pasaron de 7 y 8 meses secos a 5 y 6, Coahuila pasó de 11 y 12 meses secos a 9 y 10 e Hidalgo de 5 y 6 meses secos a 4 con respecto al período 1991-2000. Asimismo, también hubo reducción de meses secos en Guanacaste en Costa Rica al pasar de 5 y 6 meses secos a 4 y Jinotega y Chontales en Nicaragua pasaron de 3 meses secos a 2 (véase el mapa VI.1).

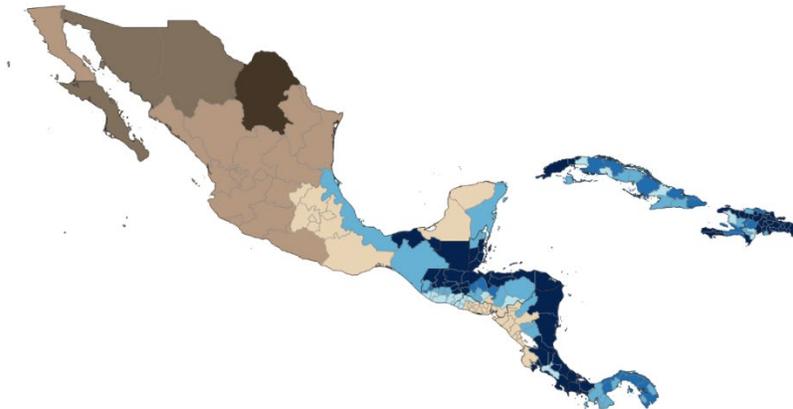
Para el último período, 2011-2018, hubo un aumento de meses secos en el norte de México, en Coahuila a 11 y 12 meses secos, en Sinaloa a 9 y 10 meses secos y en Tamaulipas a 7 y 8 meses secos. También continuó el aumento de los meses secos en Guanacaste en Costa Rica a 5 y 6 meses secos. Las provincias de Cienfuegos y Las Tunas en Cuba aumentaron a 7 y 8 meses y en Mayabeque, Matanzas, Sancti Espíritus, Ciego de Ávila pasaron de 3 a 4 meses secos. En el sur de Haití aumentaron a 2 meses secos. Por otra parte, disminuyó la estación seca en 2011-2018, con respecto al período 2001-2010, en el golfo de México —desde Veracruz hasta la península de Yucatán—, además de la Ciudad de México y Tlaxcala en el centro de México, el norte de Honduras, en algunos departamentos del sur y el altiplano occidental de Guatemala y en Artibonite en Haití (véase el mapa VI.1.D).

Mapa VI.1
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: meses secos al año por departamento,
promedio 1960-2018
(En número de meses secos)

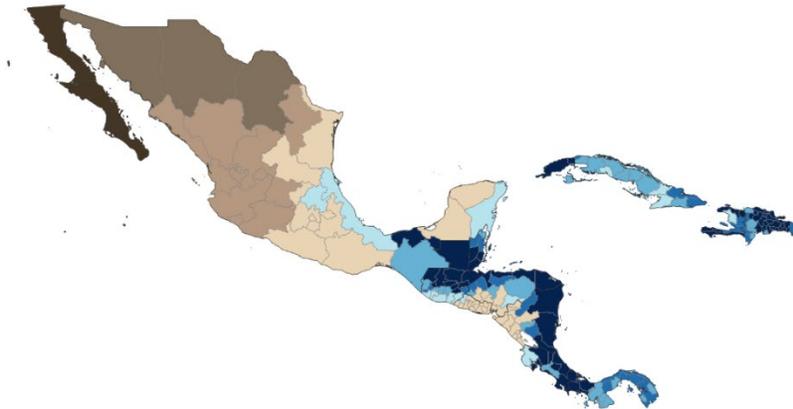
A. 1960-1990

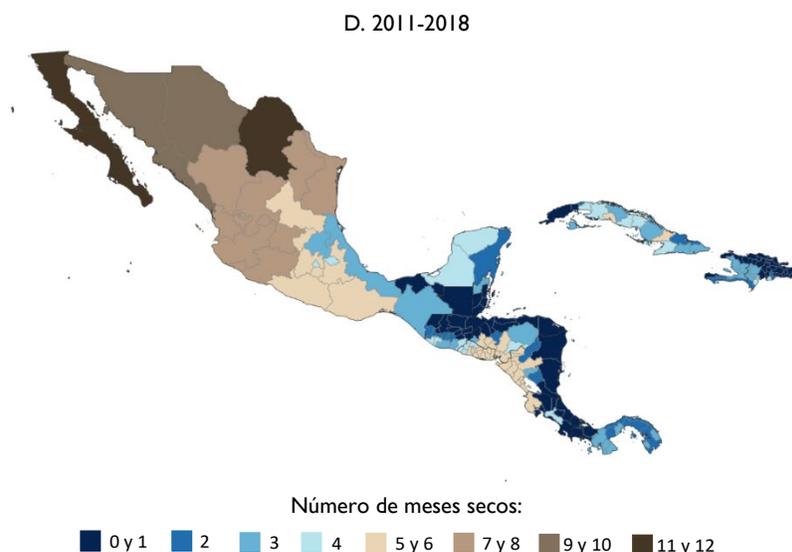


B. 1991-2000



C. 2001-2010





Fuente: Elaboración propia.

D. Meses secos por municipio: escenarios de cambio climático

En el análisis del impacto de cambio climático sobre el número de meses secos al año a nivel municipal se utilizaron los escenarios de cambio climático de temperatura y precipitación de los capítulos tres y cuatro para los mismos cortes de tiempo. Los mapas VI.2 y VI.3 muestran las estimaciones del número de meses secos del período base y los escenarios respectivos usando los mismos rangos que el mapa VI.1. A nivel municipal se observa mayor detalle la cantidad de meses secos que tiene cada área y región que a nivel departamental.

I. Período base 1960-1990

En los mapas VI.2.A y VI.3.A se muestran los meses secos a nivel municipal considerando el período 1960-1990. A diferencia del análisis departamental aquí se observa a mayor detalle el comportamiento por región de la extensión de la estación seca. En Belice los distritos del sur tienen 0 o 1 mes seco, y en los distritos de Orange Walk y Corozal hay 3 meses secos.

En Costa Rica gran parte del territorio tiene 0 o 1 mes seco. En el norte de Alajuela hay 2 meses secos. En el norte de San José y Puntarenas hay 3 meses secos. Entre Guanacaste y el norte de Puntarenas hay 4 meses secos. Mientras que, en los cantones de Carrillo, Santa Cruz, Nicoya, Hojancha y Nandayure en Guanacaste tienen 5 y 6 meses secos, estos municipios forman parte del Corredor Seco Centroamericano.

En Cuba, la región oriente y occidente de la isla tienen entre 0 y 2 meses secos. El resto de la isla se divide en el norte con 4 meses secos y el sur con 5 y 6 meses secos. En El Salvador los municipios tienen 5 o 6 meses secos con excepción de algunos municipios en Cabañas y Chalatenango que tienen una extensión de 4 meses secos.

En Guatemala, la región del norte de El Petén tiene 3 meses secos, luego en la parte central de ese departamento hay 2 meses secos. Desde el sur de El Petén hasta los departamentos de Huehuetenango, Quiché, Alta Verapaz e Izabal hay 0 y 1 mes seco. En el

altiplano occidental de Guatemala hay municipios con 4 meses secos, mientras que en el Pacífico y el oriente del país los municipios tienen 5 y 6 meses secos. Esta zona con más meses secos es parte del Corredor Seco Centroamericano.

En Haití hay 0 y 1 mes seco en el norte y en los departamentos de Sud, Grand'Anse y Nippes. Se tienen 2 meses secos en el sur, 3 meses secos en el centro y 4 meses secos en l'Artibonite.

En Honduras hay 0 y 1 mes seco en toda la región del Atlántico y en una pequeña región central del país (entre Cortés, Comayagua y Santa Bárbara). En Yoro y parte de Cortés, Comayagua y Santa Bárbara hay 2 meses secos. En el oriente y algunos municipios del occidente del país hay 3 meses secos. Con 4 meses secos se encuentran Lempira, Intibucá, La Paz y Francisco Morazán. Mientras el sur de Honduras tiene 5 y 6 meses secos, esta región es parte del Corredor Seco Centroamericano.

En Nicaragua, las regiones están bien delimitadas; están los municipios del Caribe con 0 y 1 mes seco, los municipios del centro entre 2 y 4 meses secos y los municipios de la región del Pacífico con 5 y 6 meses secos. Esta región forma parte del Corredor Seco Centroamericano.

En México la zona con 0 y 1 mes seco se encuentra cerca del golfo de México, desde el sur del estado de San Luis Potosí hasta el sur en Chiapas y Tabasco. Alrededor de estos municipios hay otros municipios de entre 2 y 4 meses secos; en este rango también se encuentra la parte del caribe de la península de Yucatán y la cordillera de la Sierra Madre Occidental. Con 5 y 6 meses secos está el resto del sur y del golfo de México, así como gran parte del centro del país y parte de la Sierra Madre Occidental. Con 7 y 8 meses secos se encuentra el occidente y algunas regiones en el norte, mientras que en gran parte de los estados de Chihuahua, Coahuila y Baja California y parte de Durango, Sonora, Sinaloa y Baja California Sur hay 9 y 10 meses secos. Con 11 y 12 meses secos está Baja California Sur, el municipio de Mexicali en Baja California, los municipios de la costa de Sonora, el municipio de Ascensión en el norte de Chihuahua, en distintas regiones de Coahuila y en el noroccidente de Nuevo León. Esta región con más meses secos coincide con su clasificación de desértico o hiperárido del capítulo V.

En el occidente de Panamá (Bocas del Toro, Chiriquí y la comarca de Ngäbe Buglé) así como en Colón hay 0 y 1 mes seco. El resto de la región tiene 2 y 3 meses secos con excepción de los municipios de las costas de Los Santos y Herrera que tienen 5 y 6 meses secos, estos municipios con más meses secos de la Península de Azuero son parte del Corredor Seco Centroamericano.

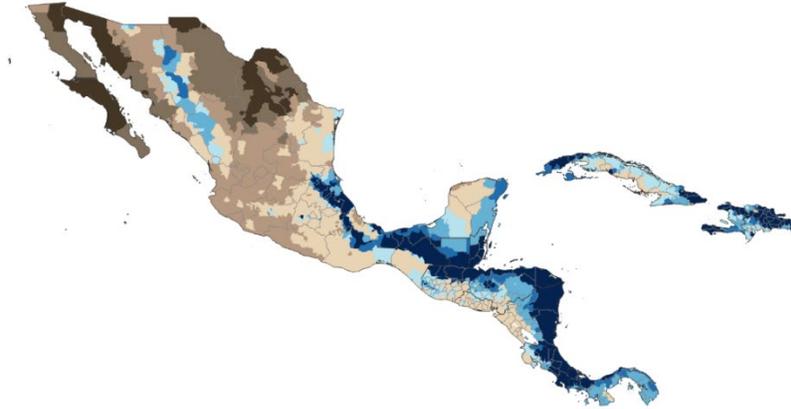
En la República Dominicana gran parte del territorio tiene 0 y 1 mes seco. Entre 2 y 4 meses secos está el occidente del país. También hay algunos municipios en las provincias de Valverde y Azua con 5 y 6 meses secos.

2. Escenario RCP4.5

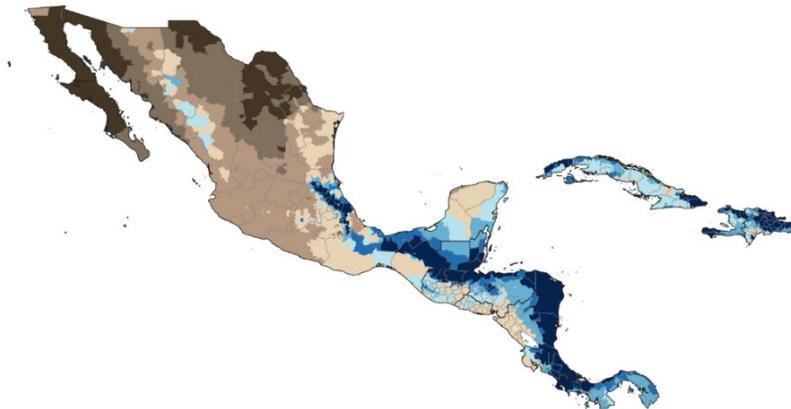
En los mapas VI.2.A a VI.2.C se muestra la evolución de los meses secos de manera espacial en el escenario de cambio climático RCP4.5.

Mapa VI.2
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: meses secos al año por municipio, período 1960-1990 y escenario RCP4.5, cortes 2030, 2050 y 2080
(En número de meses secos)

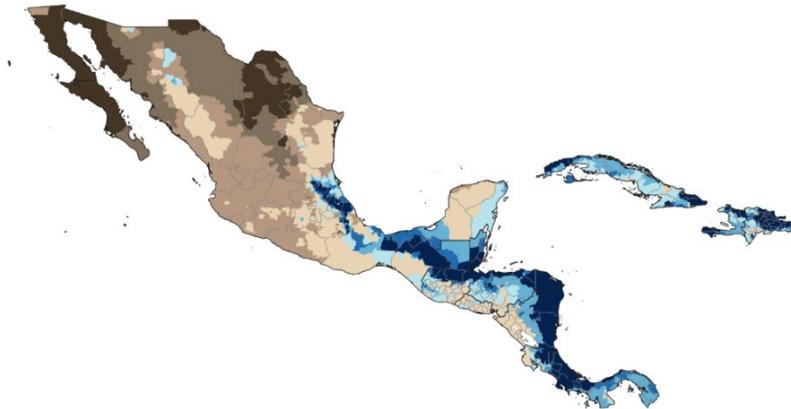
A. 1960-1990



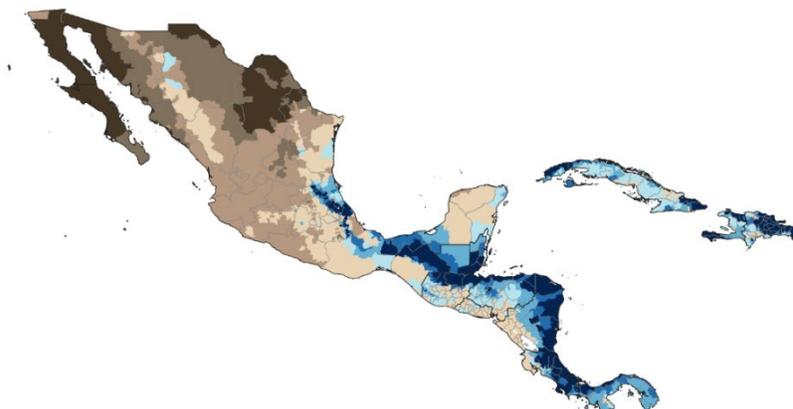
B. Escenario RCP4.5 2030



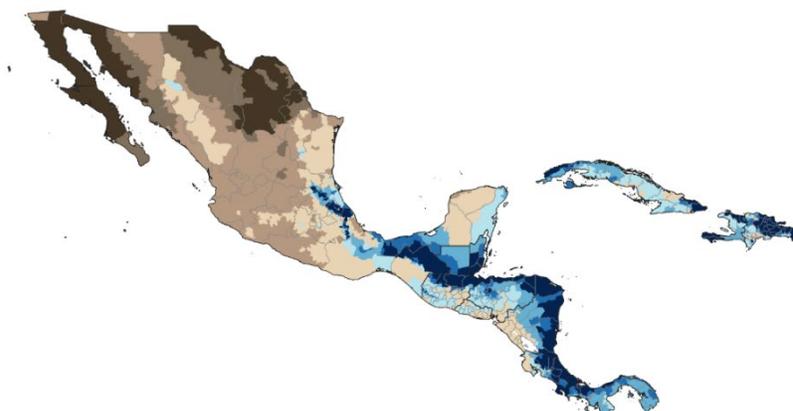
C. Escenario RCP4.5 2050



D. Escenario RCP4.5 2070



E. Escenario RCP4.5 2080



Número de meses secos:



Fuente: Elaboración propia.

Nota: El concepto "departamento" se refiere a la segunda división administrativa como distrito, estado, provincia y comarca.

- Para 2030 se observa que en el norte de México aumentarían los municipios que tendrían más de 5 meses secos, y la clasificación de 7 y 8 meses sería la que más crecería. Las condiciones también cambiarían el sur de México, por ejemplo, en Oaxaca ya no habría municipios con 0 y 1 mes seco. En 2030 habría municipios en la región que podrían acortar su período seco a menos de 4 meses secos como en Cuba, la península de Azuero en Panamá y algunos municipios del sur de Guatemala, el occidente de El Salvador y el sur de Honduras, estos municipios pertenecen al Corredor Seco Centroamericano.
- Para 2050 los cambios principales serían en algunos municipios en Durango, Tamaulipas, Michoacán y Guerrero en México y municipios en Santa Ana, Chalatenango, San Salvador y Cuscatlán que regresarían a 5 y 6 meses secos con respecto a 2030.

- Para 2070 lo más destacado sería que en la zona de Atlántico de Nicaragua habría municipios que pasarían de 0 y 1 mes seco a 2 meses secos. En el occidente de México la región tendría en mayor proporción 6 y 7 meses secos.
- Para el final del presente siglo los municipios con menos de 4 meses secos en el norte de México serían muy pocos. Gran parte de México estaría caracterizado por tener entre 5 y 8 meses secos. En Centroamérica habría menos municipios con 5 y 6 meses secos y estos pasarían a áreas con 4 meses secos, principalmente en el Corredor Seco de Guatemala, El Salvador y Honduras. En Cuba habría menos municipios con 5 y 6 meses secos en el sur, pero aparecerían una nueva zona con esta característica en Las Tunas y Holguín. En Nord-Ouest, Sud-Est y Ouest (Haití) y en Monte Cristi, Azua, San Juan, Bahoruco e Independencia (República Dominicana) habría zonas que aumentarían sus meses secos entre 3 y 6 meses secos con respecto al período base donde dominaban los 0 a 2 meses secos.

El escenario RCP4.5 muestra en 2030 un aumento de municipios que aumentarían sus meses secos, pero a partir de 2050 existiría cierta variabilidad. Algunos municipios podrían regresar a su condición anterior, otros como en el Corredor Seco Centroamericano tendrían un mes adicional clasificado como lluvioso y otros aumentarían los meses de su estación seca. Este resultado para el Corredor Seco Centroamericano se debe a un posible incremento en la precipitación en el mes de noviembre para los municipios ubicados en esta región, principalmente en los municipios del Pacífico.

3. Escenario RCP8.5

En el mapa VI.3 se muestra la evolución del escenario de cambio climático RCP8.5.

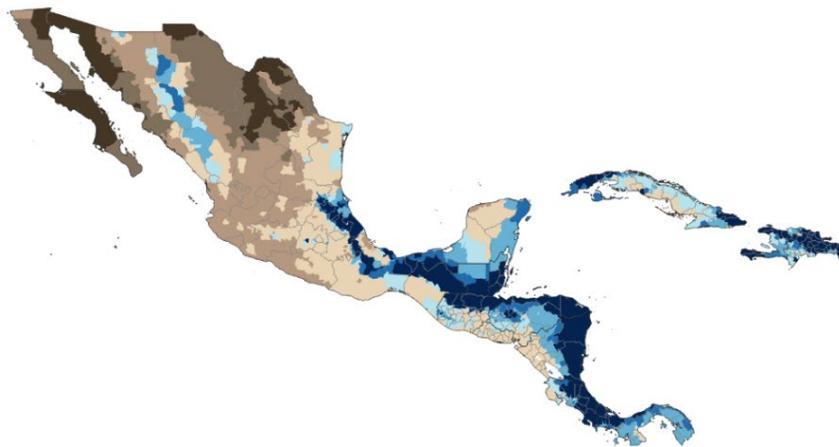
- En 2030 se observa un aumento rápido de meses secos en la Sierra Madre Occidental de México, colocando a casi todo el norte con más de 7 meses secos. También aumentarían las condiciones más extremas, de 11 y 12 meses secos en la península de Baja California y en el estado de Coahuila. En el sur de México, en Campeche y Quintana Roo aumentarían los meses secos. En el sur de la República Dominicana, algunos municipios pasarían a estaciones secas de 5 y 6 meses secos. No obstante, también habría algunos municipios en los que los meses secos disminuirían como en el caso del sur y occidente de Cuba y algunos municipios del Corredor Seco Centroamericano que se encuentran en Guatemala, El Salvador y la península de Azuero en Panamá (véase el mapa VI.3.B).
- Para 2050 comenzaría una disminución mayor de municipios con menos de 4 meses secos en la zona del golfo de México. Cuba se caracterizaría por tener zonas mayoritariamente de 4 meses secos. En la zona del Atlántico de Honduras y Nicaragua y en Puntarenas (Costa Rica) habría algunos municipios que se caracterizaban por tener 0 y 1 mes seco que pasarían a 2 meses secos (véase el mapa VI.3.C).
- En 2070 el norte y centro de México ya tendrían zonas de más de 5 meses secos en todo el territorio dominado por el rango de 7 y 8 meses secos. También habría un incremento de territorio con 11 y 12 meses secos en el norte de México. Honduras podría tener un incremento de meses secos en El Paraíso al igual que la mayor parte de los departamentos de la Costa Caribe Norte y Sur de Nicaragua. Cuba tendría municipios en Matanzas, Camagüey y Las Tunas con 5 y 6 meses secos que se caracterizaban por

tener 4 meses secos. En la República Dominicana, tanto en Bahoruco en el sur como en Monte Cristi en el norte, aparecerían municipios con 7 y 8 meses secos (véase el mapa VI.3.D).

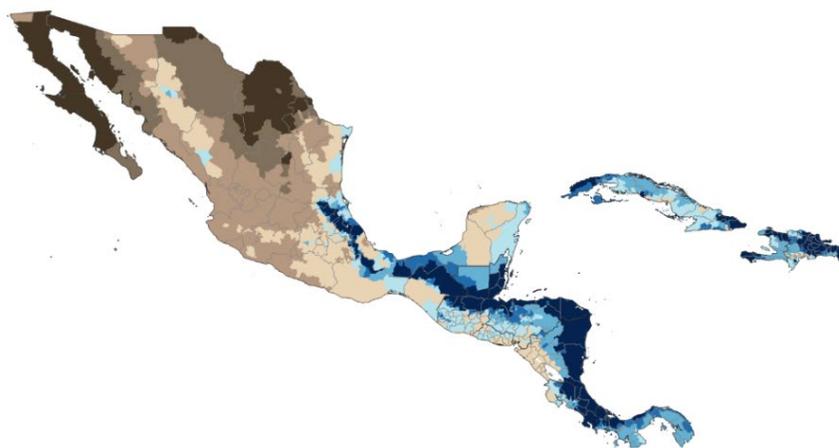
- Para 2080 seguirían incrementando los meses secos en Veracruz y Quintana Roo en México, en Olancho en Honduras, en la costa caribe norte en Nicaragua y en el sur de la República Dominicana principalmente. Un hecho relevante podría ser la disminución de meses secos en el occidente y la costa Pacífico de Guatemala y el occidente de El Salvador: podría haber 4 meses secos para final del siglo en esta región, donde en el período base hay 5 y 6 meses secos. Esta zona podría sufrir un mayor aumento en la temperatura que se combinaría con un aumento en la precipitación en algunos meses que se caracterizan como secos en el período base (véase el mapa VI.3.E).

Mapa VI.3
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: meses secos al año por municipio, período 1960-1990 y escenario RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
 (En número de meses secos)

A. 1960-1990



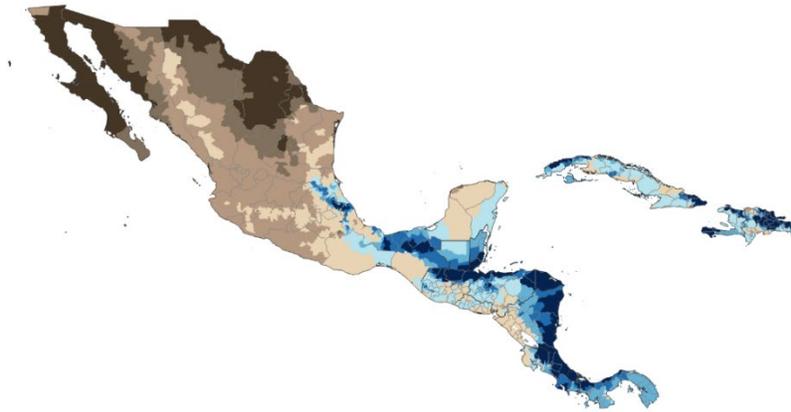
B. Escenario RCP8.5 2030



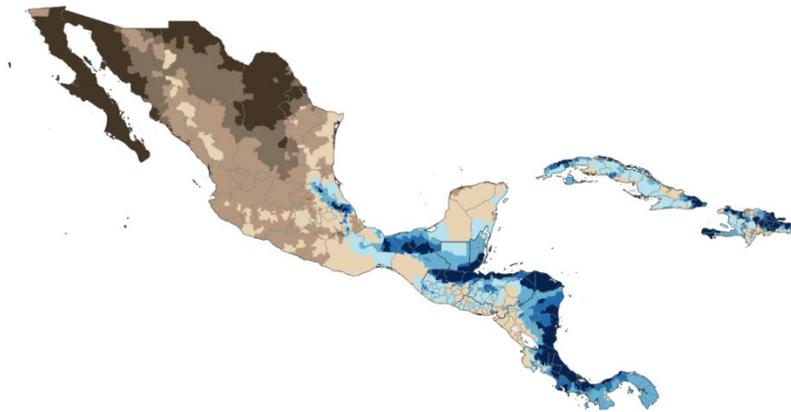
Número de meses secos:



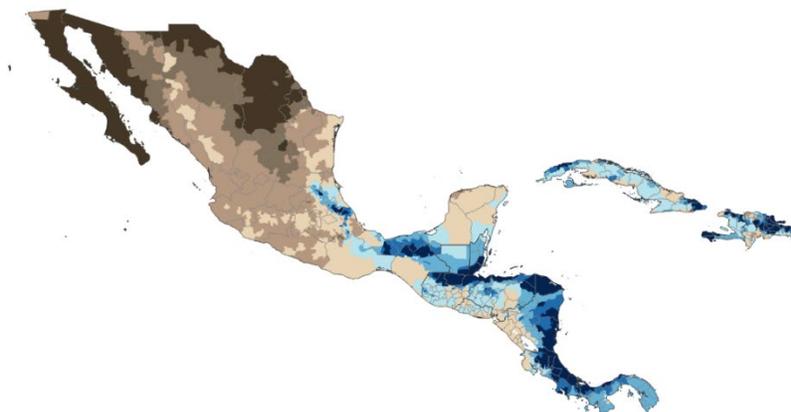
C. Escenario RCP8.5 2050



D. Escenario RCP8.5 2070



E. Escenario RCP8.5 2080



Número de meses secos:



Fuente: Elaboración propia.

Nota: El concepto "departamento" se refiere a la segunda división administrativa como distrito, estado, provincia y comarca.

4. Comparativo de escenarios RCP4.5 y RCP8.5 por país

Para comparar los resultados entre escenarios se calculó la proporción de municipios que se clasifican en cada rango de meses secos, esto se hizo por país para identificar los cambios dentro de las fronteras nacionales. En el gráfico VI.1 se muestra la proporción de municipios en cada rango de número de mes seco por país; para cada escenario se encontraron los siguientes resultados:

- En Belice se mantendría la proporción de 3 meses secos en 35% de los distritos hasta 2080 y solo habría un cambio en 2030 con la aparición de 2 meses secos y la reducción de 0 y 1 mes seco en el escenario RCP4.5. En contraste en el escenario RCP8.5, el primer cambio vendría en 2050 con una reducción de 67% a 33% de distritos en 0 y 1 mes seco y el aumento de 33% a 67% de los distritos en 2 y 3 meses secos, y en 2080 aparecería un distrito con 4 meses secos (véase el gráfico VI.1.A).
- En Costa Rica habría un comportamiento similar en ambos escenarios con cierta estabilidad en cada rango. Los cantones con 0 y 1 mes seco disminuirían de 49% a 43% del período base a 2080 en RCP4.5 y a 37% en RCP8.5. La proporción de cantones que más aumentaría es el de 4 meses, que en RCP4.5 pasaría de 20% de municipios en el período 1960-1990 a 23% en 2080 y a 27% en RCP8.5 (véase el gráfico VI.1.B).
- En Cuba, los municipios con 4 meses secos representan la mayor parte del país en el período base, seguirían siendo la mayoría en ambos escenarios y pasarían de 34% de los municipios en 1960-1990 a 39% en RCP4.5 y 52% en RCP8.5 en 2080. Los municipios con 0 y 1 mes seco disminuirían más, ya que pasarían del 27% en el período base al 13% en el RCP4.5 y al 6% en el RCP8.5 en 2080 (véase el gráfico VI.1.C).
- En El Salvador solo hay municipios que tienen entre 4 y 6 meses secos. En ambos escenarios disminuirían los municipios del rango de 5 y 6 meses secos en la misma proporción aproximadamente y pasarían de 78% en el período 1960-1990 a 36% en RCP4.5 en 2080 y 35% en RCP8.5 (véase el gráfico VI.1.D).
- En Guatemala disminuirían la proporción de municipios con el rango de más y menos meses secos para que predominen las zonas con 4 meses secos que pasarían de 33% en el período base a 46% en RCP4.5 en 2080 y 55% en RCP8.5 (véase el gráfico VI.1.E).
- En Haití habría un decrecimiento de distritos entre 0 y 2 meses secos, en el período base representaban 76% y en RCP4.5 serían 54% en 2080 y disminuirían de una forma más rápida en RCP8.5 pues representarían 43% en 2080 (véase el gráfico VI.1.F).
- En Honduras en 2030 habría un aumento en la proporción de municipios con 4 meses secos en los dos escenarios y pasarían de 26% en 1960-1990 a 44% en RCP4.5 en 2080 y 46% en RCP8.5. En RCP8.5 aparecerían 2% de los municipios con 7 y 8 meses secos en 2080 (véase el gráfico VI.1.G).
- En México hay representación de todos los rangos de meses secos. Aquí se observa que en el escenario RCP8.5 los municipios con 11 y 12 meses secos pasarían de 2% en el período base a 4% en 2080, sin embargo, cabe aclarar que en términos de superficie representaría mucho más, pues son municipios grandes ubicados en el norte del país. La proporción de municipios con 0 y 1 mes seco disminuiría de 15% de los municipios en el período base a 9% en RCP4.5 en 2080 y 4% en RCP8.5. En el período 1960-1990 la mayor proporción de municipios eran los que tenían 5 y 6 meses secos con 41%. En el

escenario RCP8.5 la mayoría de los municipios se colocaría con 7 y 8 meses secos con 38% en 2080 (véase el gráfico VI.1.H).

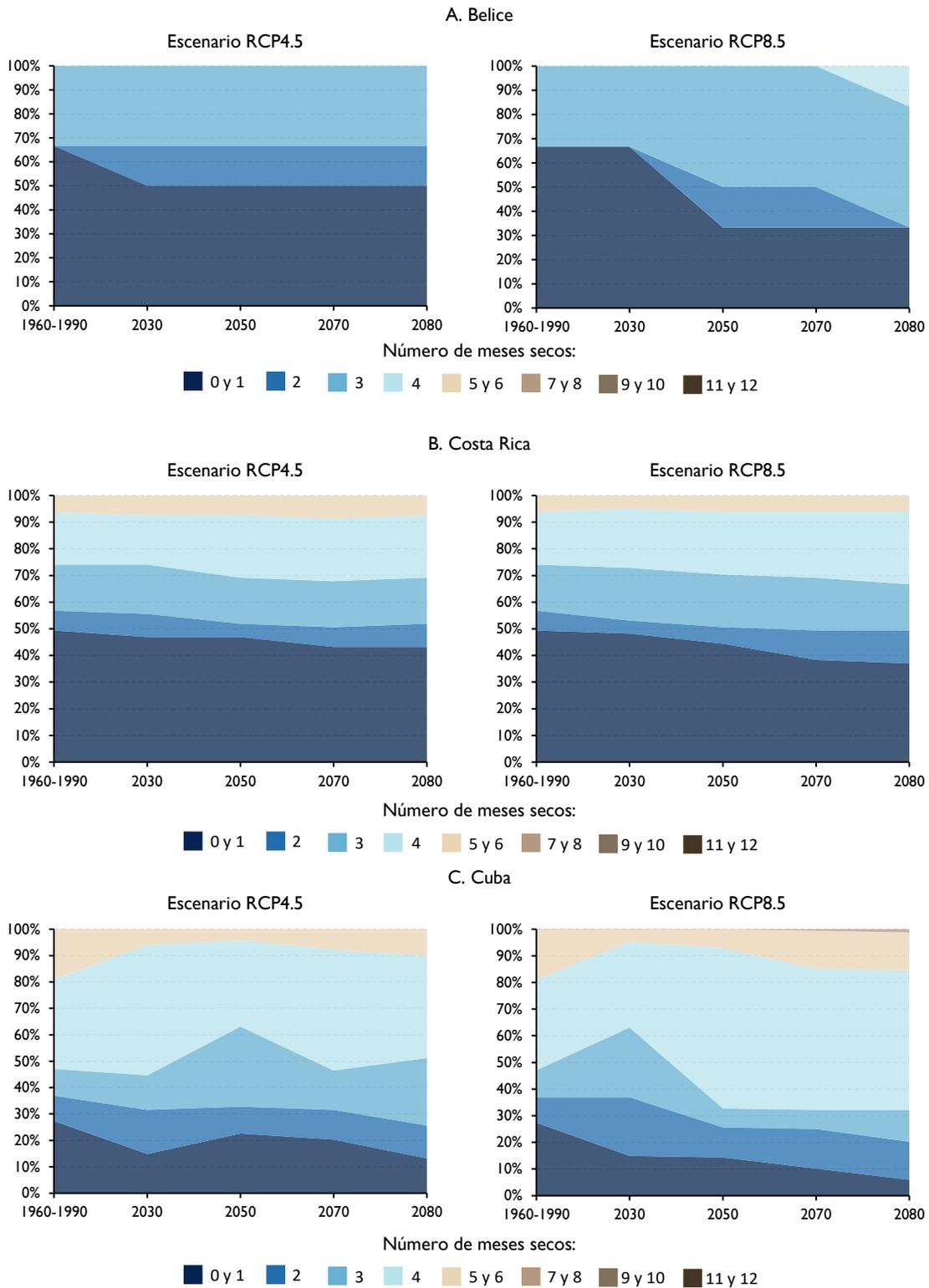
- En Nicaragua había una proporción de 60% de municipios con 5 y 6 meses secos en el período 1960-1990, estos se encuentran en el Corredor Seco Centroamericano, en 2080 esta proporción se mantendría en 62% y 63% en RCP4.5 y RCP8.5 respectivamente. El cambio más relevante sería la disminución en RCP8.5 en los municipios con 3 meses secos de 22% de los municipios en 1960-1990 a 15% en 2080 (véase el gráfico VI.1.I).
- En Panamá habría una disminución de distritos en 5 y 6 meses secos en mayor medida en RCP4.5 desde 2030, esta disminución se reflejaría en distritos con menos meses secos. También disminuirían los distritos con 0 y 1 mes seco que pasarían de 23% en 1960-1990 a 16% en RCP4.5 en 2080 y 14% en RCP8.5. Habría un fuerte aumento de municipios con 3 meses secos en RCP8.5 que representarían el 61% en 2080 (véase el gráfico VI.1.J).
- En la República Dominicana habría una fuerte disminución de los municipios con 0 y 1 mes seco de 56% en el período base a 30% en 2080 en RCP8.5 y los municipios con 5 y 6 meses secos aumentarían de 6% a 22% respectivamente en el mismo escenario. También se destaca, en el escenario RCP8.5, el posible aumento de municipios con 7 y 8 meses secos que representarían 8% y la aparición de 1% de municipios con 9 y 10 meses secos en 2080 (véase el gráfico VI.1.K).

En resumen, en la región predominan los municipios con 5 y 6 meses secos, que disminuirían de 38% en el período 1960-1990 a 30% en RCP4.5 en 2080 y 29% en RCP8.5. De los 1.307 municipios que se encontraban en el rango de 5 y 6 meses secos en el período base 1960-1990 el 14% de estos municipios pasarían a 4 meses secos y 15% tendrían más de 7 meses secos en 2080 en el escenario RCP4.5; y en el escenario RCP8.5 16% de estos municipios pasarían a 4 meses secos y 25% aumentarían a más de 7 meses secos. Los municipios con 0 y 1 mes seco pasarían de 18% en 1960-1990 a 12% en RCP4.5 en 2080 y 7% en RCP8.5 (véase el gráfico VI.1).

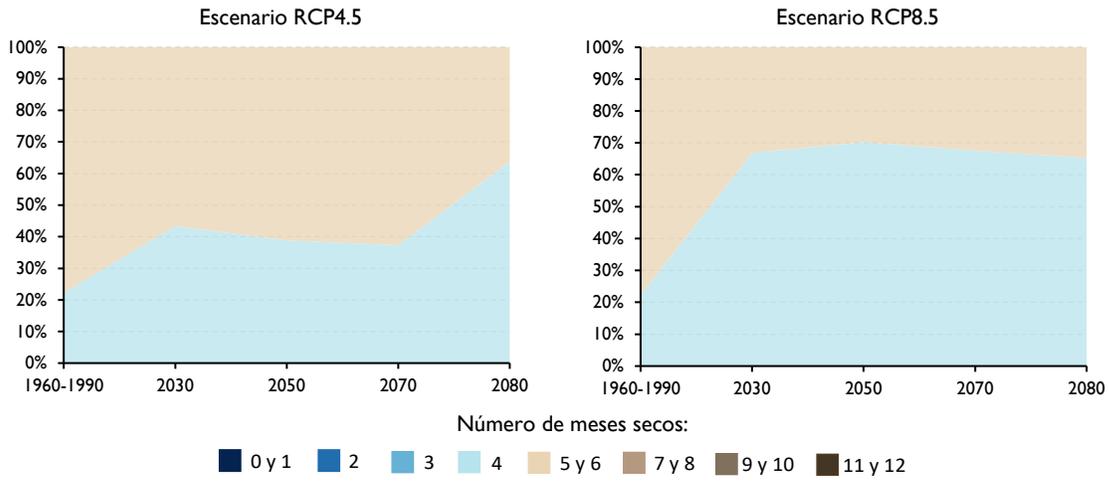
Además de conocer la evolución de los números de meses secos en el año por municipio es importante identificar el cambio de la extensión en la estación seca, es decir, revisar cuáles meses se clasificarían como secos o viceversa. En el cuadro VI.1 se ilustra el porcentaje de municipios que tiene condición de mes seco por mes y por país. Los resultados son distintos por país y se puede ilustrar la extensión de la estación seca y su proporción en el territorio para cada uno de los escenarios de cambio climático en los cortes 2030 y 2080.

Un ejemplo de cómo leer estos cuadros es el siguiente: en Belice en el período 1960-1990 en los meses de enero y de mayo a diciembre no hubo distritos con características de mes seco, 33% de distritos caracterizaron los meses de febrero y marzo como mes seco y el 50% de los distritos tuvieron a abril como mes seco. A partir de estos datos, se puede asumir que el 33% de distritos de Belice tienen una estación seca de 3 meses que va de febrero a abril y el 17% de distritos solo tienen abril en su estación seca y el 50% no tiene una estación seca. Para verificar la proporción de municipios correspondiente a una estación seca es necesario revisar cada uno de los municipios para saber si repiten como seco en cada mes. Sin embargo, los resultados del cuadro VI.1 permiten establecer una aproximación de cómo se comportaría la extensión de la estación seca en cada país.

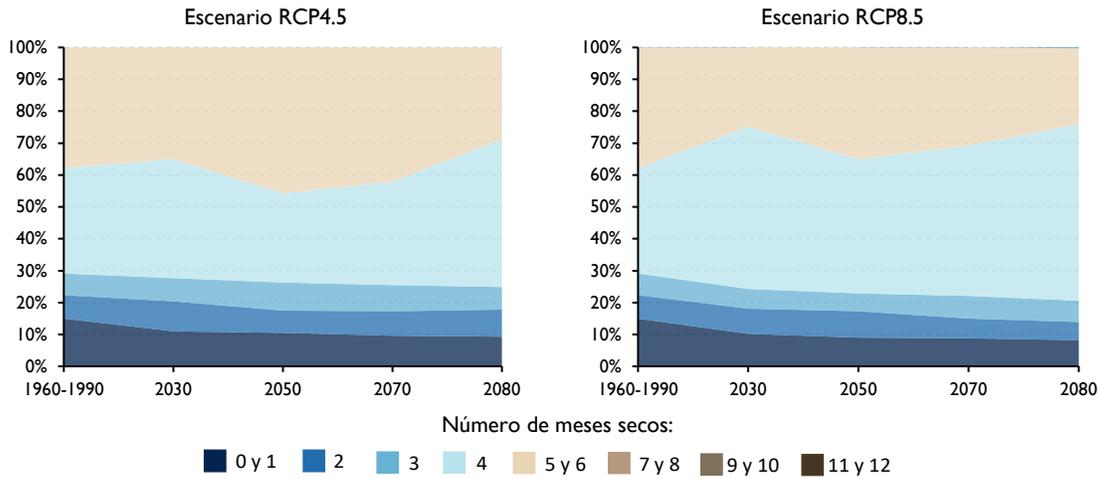
Gráfico VI.1
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios por número de meses secos por país, período 1960-1990 y escenarios RCP4.5 y RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
 (En porcentajes)



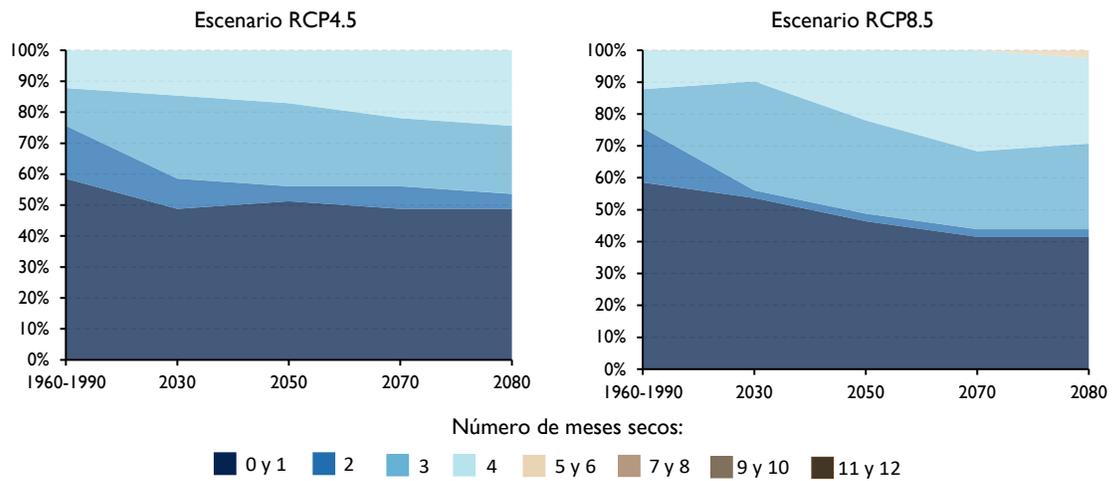
D. El Salvador



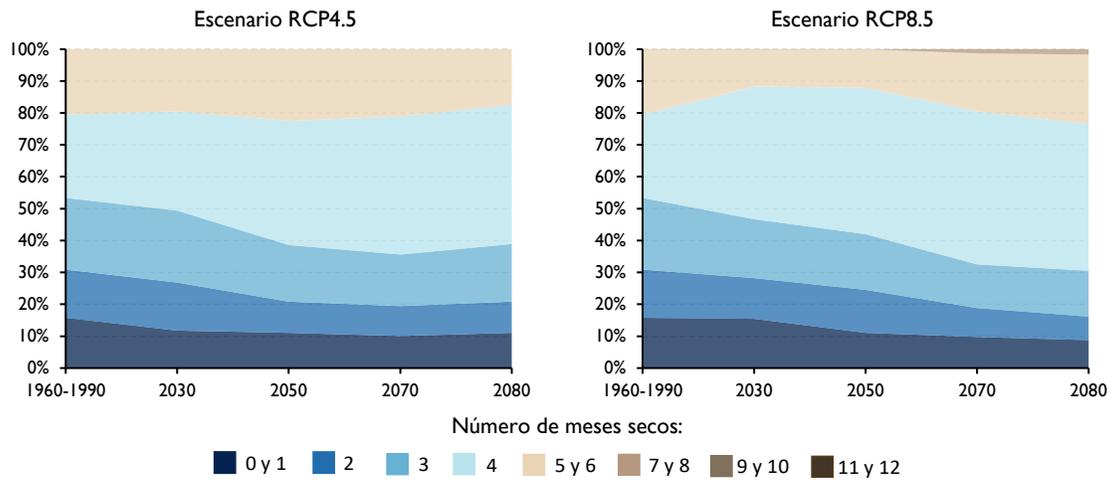
E. Guatemala



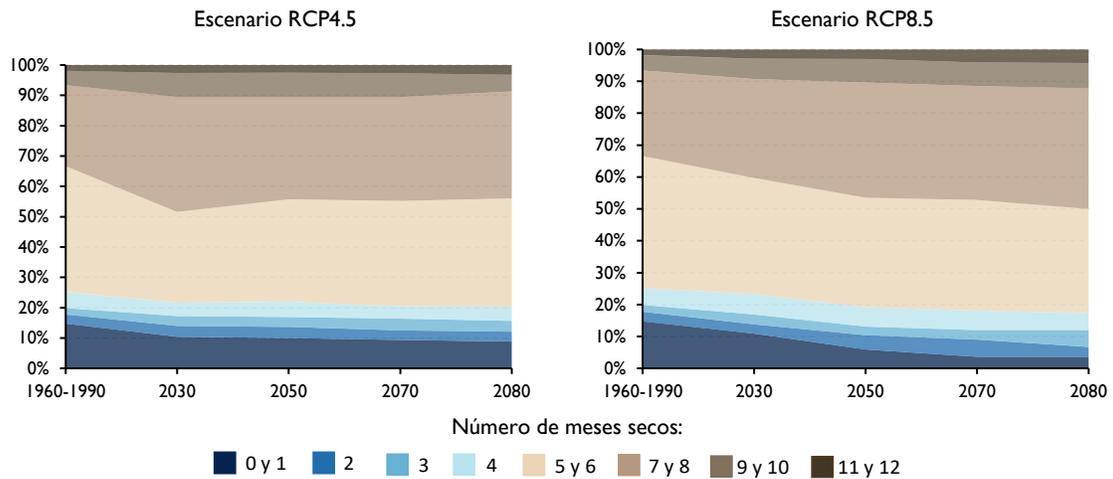
F. Haití



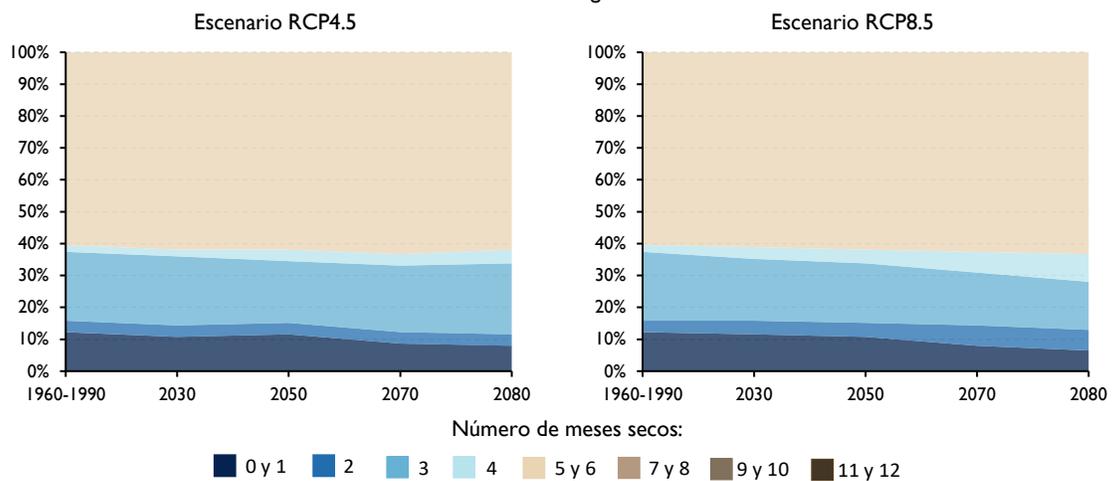
G. Honduras



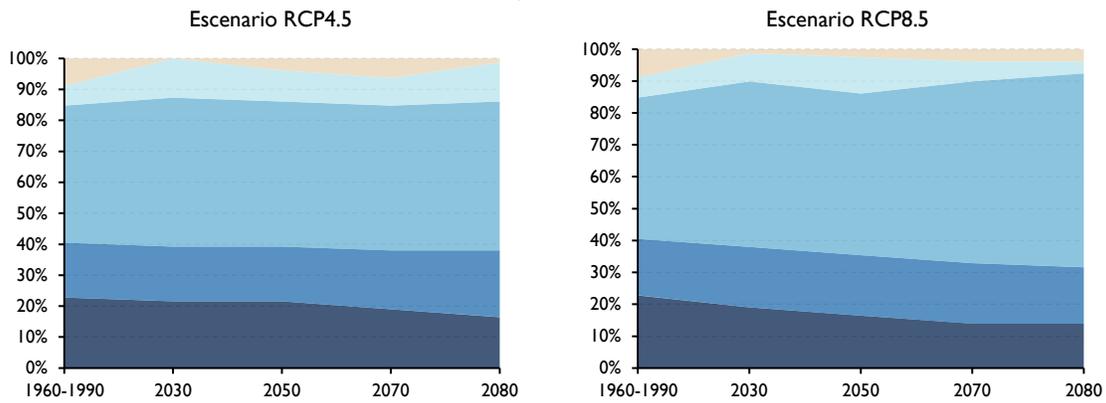
H. México



I. Nicaragua



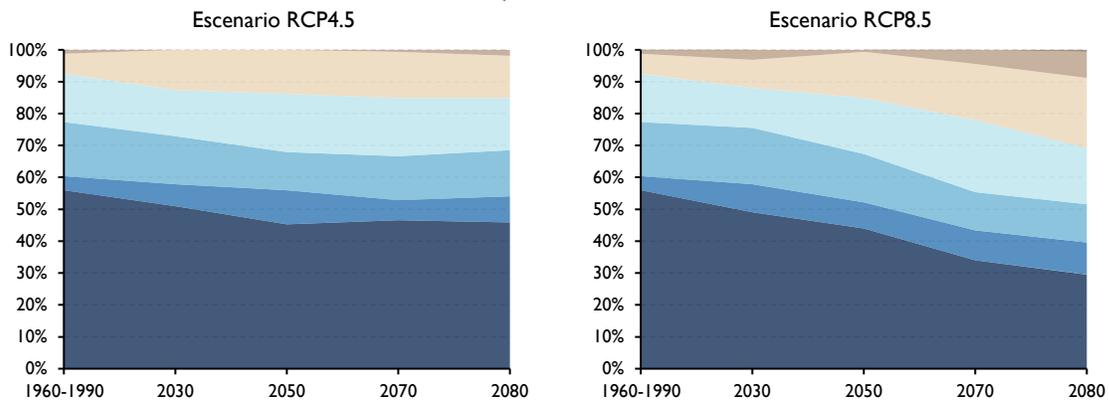
J. Panamá



Número de meses secos:



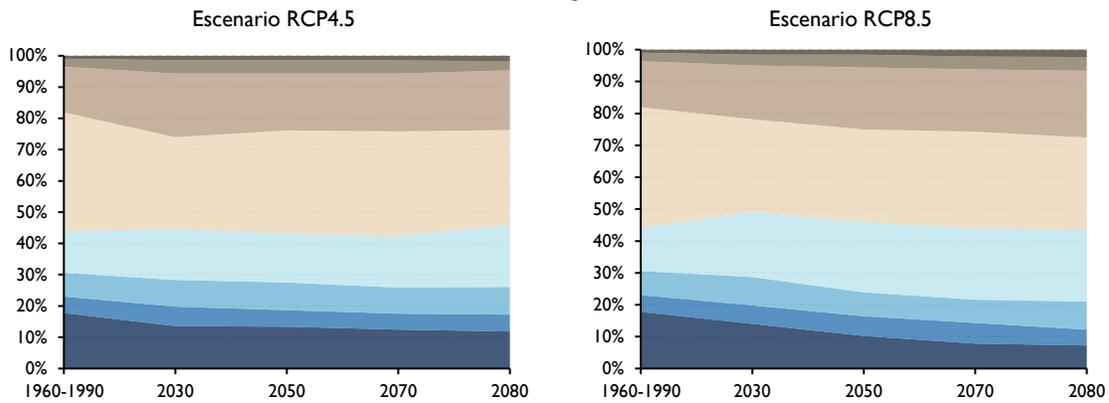
K. República Dominicana



Número de meses secos:



L. Región



Número de meses secos:



Fuente: Elaboración propia.

Continuando con el análisis de Belice, se observa que en menos del 50% de los distritos su estación seca se da entre febrero y abril en el período base. En el escenario RCP4.5, en 2030 y 2080, el 67% de los distritos tendrían una estación seca en marzo y abril. En el escenario RCP8.5 en 2030 aumentarían los distritos que tendrían el mes de marzo como seco y disminuirían los distritos que tendrían abril como seco, y en 2080 se tendría 67% de municipios con una extensión seca entre febrero a abril. Para 17% de los distritos se tendrían ya una estación seca desde enero a abril y el 100% de distritos ya tendría al menos un mes seco que sería el mes de marzo en 2080 (véase el cuadro VI.1).

En el período 1960-1990, alrededor del 44% de los cantones de Costa Rica tuvieron su estación seca entre enero y marzo y un porcentaje de alrededor de 15% su estación seca sumaría diciembre y abril. Para el mes de abril no habría cambios en RCP4.5 en 2080, pero aumentarían a 26% los cantones que tendrían como temporada seca entre diciembre y marzo. En RCP8.5 habría una ligera disminución de cantones con mes seco para abril desde 2030. En diciembre habría un aumento en el porcentaje de cantones que lo tendrían como mes seco, y serían alrededor del 30% en 2080 y continuaría un aumento de cantones que tendrían mes seco entre enero y marzo que serían al menos 56% de los cantones en 2080 (véase el cuadro VI.1).

En Cuba habría más variedad de cambios. En alrededor del 60% de los municipios de Cuba la estación seca va de diciembre a marzo, para 20% también se incluye noviembre y hay 2% de municipios que tienen como meses secos abril o julio en el período base 1960-1990. El primer cambio notable es que aquellos municipios que tienen a noviembre como mes seco dejan de serlo en ambos escenarios desde 2030. Para 2080 la estación seca va de diciembre a marzo en el escenario RCP8.5 en 67% de los municipios. En ambos escenarios hay un crecimiento de municipios que considerarían a julio clasificado como mes seco. En el escenario RCP8.5 aparece para un pequeño grupo de municipios que considerarían a junio como mes seco y para ambos escenarios agosto se sumaría como mes seco hacia 2080 (véase el cuadro VI.1).

En El Salvador la totalidad de los municipios tienen su período seco entre diciembre y marzo en el período 1960-1990, y no sufrirían cambios en ambos escenarios en 2030 y 2080. Alrededor de la mitad de los municipios tienen como meses secos abril o noviembre en el período base, lo que da una estación seca de 5 o 6 meses en 44% de los municipios entre noviembre y abril. En RCP4.5 pasarían de 55% de municipios como secos en abril en 1960-1990, a 29% en 2080 y de 44% en noviembre a 8% respectivamente, esto llevaría a que en 2080 a lo más habría 8% de municipios con una extensión de la estación seca de 6 meses, de noviembre a abril. En RCP8.5 pasarían de 55% de municipios como secos en abril en 1960-1990, a 20% en 2080 y de 44% en noviembre a 15% respectivamente, es decir, en 2080 en el 15% de los municipios la estación seca se extendería 6 meses, de noviembre a abril (véase el cuadro VI.1).

En Guatemala 75% de los municipios tienen su estación seca entre diciembre y marzo y alrededor de un 30% suman abril o noviembre como mes seco en el período 1960-1990. En ambos escenarios de cambio climático crecerían ligeramente los municipios que tendrían como mes seco el período de diciembre a marzo. En 2080, serían 77% de los municipios con la estación seca entre diciembre y marzo en el escenario RCP4.5 y en RCP8.5 serían 81%. Mientras que la proporción de municipios que tienen el mes de abril como seco disminuiría de 36% a 28% entre el período base y 2080 y noviembre de 31% a 23% en RCP4.5, y en RCP8.5 pasarían a 25% y 19% respectivamente en cada mes en 2080 (véase el cuadro VI.1).

En Haití alrededor de un tercio de los distritos tiene una temporada seca entre diciembre y febrero, y para un 17% de distritos se incluye marzo en el período 1960-1990. Considerando los escenarios de cambio climático el porcentaje de municipios con estación seca entre diciembre y febrero llegaría hasta 46% en 2080 en el escenario RCP4.5 y 49% en RCP8.5. Para el 27% de municipios se incluiría marzo en RCP4.5 en 2080 y 39% en RCP8.5. En julio desde 2030 aparecerían 2% de distritos como mes seco en ambos escenarios y hasta 7% en 2080 con RCP8.5. También habría 2% de distritos con junio y agosto como mes seco en RCP8.5 en 2080. Este resultado significaría una canícula más severa en estos distritos (véase el cuadro VI.1).

En Honduras febrero y marzo son secos en la mayoría de los municipios; para al menos el 43% se suman diciembre, enero y abril en la estación seca y para el 12% se incluye noviembre en el período 1960-1990. Con cambio climático en ambos escenarios hay un gran aumento de municipios que suman a enero como mes seco y pasarían del 55% de municipios en 1960-1990 al 68% en RCP4.5 en 2080 y 77% en RCP8.5. En abril y noviembre disminuirían los municipios clasificados como meses secos, lo que acortaría la estación seca en algunos municipios. Hacia fines de siglo y considerando el escenario RCP8.5 aparecería un pequeño porcentaje de municipios que sumarían como secos a los meses entre mayo y julio (véase el cuadro VI.1).

En México más del 70% de los municipios tienen un período seco que va de noviembre a abril en 1960-1990, y en el resto de los meses hay diferentes grupos de municipios que los ubican como secos, principalmente en el norte del país. En el escenario RCP4.5 en 2030 todos los meses aumentarían los municipios que los clasifican como secos con excepción de noviembre. En el escenario RCP8.5, 80% de los municipios tendría una estación seca de diciembre a abril en 2080, mientras que en noviembre habría menos municipios que lo caracterizarían como mes seco con respecto al período base (véase el cuadro VI.1).

En Nicaragua hay una marcada estación seca entre diciembre y abril en más del 61% de los municipios en el período 1960-1990. El mes de marzo podría ser un mes seco en 99% de los municipios en 2080 en el escenario RCP8.5 y 63% de municipios tendrían una estación seca entre diciembre y abril en el escenario RCP4.5 en 2080 y 68% en RCP8.5. Noviembre mostraría una disminución de municipios que lo tendrían como mes seco desde 2030 (véase el cuadro VI.1).

En Panamá la estación seca para gran parte de los distritos (65%) se da entre enero y marzo y en el 15% de los distritos incluye abril y para el 9% se suma diciembre en el período 1960-1990. Para algunos distritos abril y diciembre dejarían de ser secos, incluso en 2030 podría haber cero distritos que consideren a diciembre como mes seco en RCP4.5. Por otra parte, aumentarían los distritos que tendrían meses secos entre enero y marzo, y en RCP4.5 serían 68% de los distritos con esta estación seca en 2080 y 71% en RCP8.5 (véase el cuadro VI.1).

En la República Dominicana menos de la mitad de sus municipios tienen meses secos entre diciembre y marzo en el período base 1960-1990, además hay algunos municipios que llegan a tener meses secos en abril, junio, julio, agosto y noviembre, no obstante, estos no son mayores al 9%. Con cambio climático habría un fuerte incremento en el porcentaje de municipios que consideran a febrero como mes seco desde 2030, en ambos escenarios. Al final del siglo en el RCP8.5 podría haber una estación seca entre diciembre y marzo para alrededor del 43% de municipios. En este mismo escenario podría haber una segunda estación seca entre junio y agosto en al menos un 21% de municipios (véase el cuadro VI.1).

Para la región hay una estación seca para el 48% de los municipios que va de noviembre a abril en el período base. Con cambio climático, en ambos escenarios, el período dominante podría ser de diciembre a abril con aumento en el porcentaje de los municipios que considerarían a estos meses como secos, llegaría a 62% en RCP4.5 en 2080 y a 64% en RCP8.5. Entre mayo y septiembre podría haber un aumento de municipios que los calificarían como secos, en mayor medida en los meses de mayo y julio lo que da la posibilidad de mayores períodos secos en la primera mitad del año en el escenario RCP8.5, esta característica se daría en municipios de México, Cuba, Haití, Honduras y la República Dominicana (véase el cuadro VI.1).

Cuadro VI.1
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: municipios con mes seco,
por país y por mes, periodo base 1960-1990 y escenarios RCP4.5 y RCP8.5, cortes 2030 y 2080
(En porcentajes)

Mes	RCP4.5					RCP8.5				
	1960-1990	2030	2080	2030	2080	1960-1990	2030	2080	2030	2080
	Belice					Costa Rica				
Enero	0	0	0	0	17	44	48	53	51	56
Febrero	33	33	33	33	67	51	52	56	52	64
Marzo	33	67	67	67	100	51	53	53	52	60
Abril	50	67	67	33	67	15	16	15	11	12
Mayo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Junio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Julio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Septiembre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Octubre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Noviembre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Diciembre	0	0	0	0	0	20	20	26	22	30
	Cuba					El Salvador				
Enero	60	55	51	35	67	100	100	100	100	100
Febrero	65	68	80	77	78	100	100	100	100	100
Marzo	66	86	85	75	93	100	100	100	100	100
Abril	2	7	8	4	13	55	52	29	25	20
Mayo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Junio	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
Julio	2	4	8	7	15	0	0	0	0	0
Agosto	0	0	2	0	5	0	0	0	0	0
Septiembre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Octubre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Noviembre	21	0	2	0	0	44	7	8	9	15
Diciembre	79	86	81	85	88	100	100	100	100	100
	Guatemala					Haití				
Enero	81	82	84	84	87	41	44	46	41	54
Febrero	86	88	90	89	92	32	54	51	54	56
Marzo	76	81	84	85	89	17	27	27	12	39
Abril	36	36	28	24	25	0	0	0	0	0
Mayo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Junio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Julio	0	0	0	0	0	0	2	5	2	7
Agosto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Septiembre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Octubre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Noviembre	31	19	23	20	19	0	0	0	0	0
Diciembre	75	77	77	77	81	37	37	51	49	49

Mes	RCP4.5			RCP8.5		1960-1990	RCP4.5		RCP8.5	
	1960-1990	2030	2080	2030	2080		2030	2080	2030	2080
Honduras						México				
Enero	55	54	68	64	77	73	77	82	82	87
Febrero	75	78	84	84	88	82	85	89	86	93
Marzo	89	93	93	93	98	86	92	93	90	97
Abril	47	51	46	24	33	74	84	88	79	95
Mayo	0	0,3	0,3	0	2	35	50	45	40	55
Junio	0	0	0	0	1	10	12	10	11	12
Julio	0	0	0	0	4	5	7	7	7	13
Agosto	0	0	0	0	0	3	4	4	4	7
Septiembre	0	0	0	0	0	3	4	3	3	5
Octubre	0	0	0	0	0	14	19	16	16	14
Noviembre	12	5	6	4	12	72	72	75	67	65
Diciembre	43	47	47	48	58	74	78	76	77	80
Nicaragua						Panamá				
Enero	62	64	67	65	68	65	66	68	68	71
Febrero	86	88	90	88	94	76	80	84	81	86
Marzo	92	96	96	95	99	77	78	80	78	86
Abril	86	86	88	81	83	15	13	14	10	8
Mayo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Junio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Julio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Septiembre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Octubre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Noviembre	5	3	2	1	4	0	0	0	0	0
Diciembre	61	63	63	63	71	9	0	1	1	4
República Dominicana						Región				
Enero	43	44	48	47	53	70	73	77	76	82
Febrero	42	52	56	57	61	79	82	86	84	90
Marzo	35	39	37	30	53	81	87	88	85	93
Abril	7	9	11	9	19	57	62	62	54	64
Mayo	0	0	0	0	0	19	27	24	22	30
Junio	1	1	4	1	26	5	6	5	6	8
Julio	9	21	26	21	42	3	5	5	5	10
Agosto	4	5	8	6	21	2	2	3	2	5
Septiembre	0	0	0	0	3	1	2	2	2	3
Octubre	0	0	0	0	0	8	10	9	9	7
Noviembre	2	0	2	4	1	48	42	44	40	39
Diciembre	25	26	32	30	43	67	71	70	70	75

Fuente: Elaboración propia.

En resumen, gran parte de los municipios de México y el Corredor Seco Centroamericano se caracterizan por tener 5 y 6 meses secos, en comparación con la región del Atlántico que en su mayoría tiene 0 o 1 mes seco y el norte de México con más de 9 meses. Con cambio climático se esperarían cambios en el número de meses secos o cambios en meses que cambiarían de una condición a otra. En municipios de Guatemala y El Salvador habría una disminución en el número de meses secos mientras que en el resto de la región estos aumentarían. Además, en algunos municipios habría meses en la estación húmeda que se considerarían secos. El cambio en la estación seca podría impactar las actividades económicas, principalmente la actividad agrícola de la región, ya que impactaría en el desarrollo fenológico de las plantas que requieren de ciertos períodos secos para la floración o meses de lluvia para la siembra. Cada municipio tendría cambios específicos, por lo que es importante profundizar estos resultados para cada área de interés.

VII. Eventos extremos

El clima global ha cambiado con relación al período preindustrial, no solamente por procesos y ciclos naturales, sino en gran medida por las emisiones de GEI de origen antropogénico. Los cambios incluyen incrementos en el promedio de la temperatura terrestre y oceánica, cambios en los volúmenes de nieve y hielo, elevación en el nivel del mar, aumento en la frecuencia de olas de calor, aumento en la frecuencia y duración de las olas de calor marinas, aumento en la frecuencia e intensidad de eventos de precipitación intensa a escala global, así como a un mayor riesgo de sequía en algunas regiones del planeta.

La temperatura media global de la superficie (GMST por sus siglas en inglés) se había incrementado en promedio 0,87 °C en el período 2006–2015 en relación con 1850–1900 (IPCC, 2018b). Este calentamiento inducido por los seres humanos y los múltiples cambios climáticos que se derivan de él, han desencadenado diversos impactos en los ecosistemas, en las actividades económicas y en el bienestar humano. Asimismo, y de acuerdo con el Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C (IPCC, 2018b) los cambios en el sistema climático han generado modificaciones en la intensidad y frecuencia de climas extremos. En resumen, se estima que los cambios en el clima incluyen el aumento en temperaturas extremas en muchas regiones (alta confianza), aumentos en la frecuencia e intensidad de fuertes precipitaciones y de sequías en algunas regiones (confianza media). Este informe reporta diversas líneas de evidencia, incluida la revisión de la literatura de atribución al cambio climático.

Con base en evidencia del pasado y en la tendencia de aumento de las emisiones de GEI, se esperan mayores impactos en el futuro, entre ellos eventos de temperaturas extremadamente altas, disminuciones de temperaturas extremadamente bajas y aumentos de eventos de precipitaciones intensas y sequías, es decir, modificaciones en los extremos del clima con mayores efectos negativos en los ecosistemas, así como en los sistemas económicos y sociales. En la región de México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana los eventos meteorológicos extremos y el cambio climático tienen gran impacto e influyen directamente sobre los ecosistemas y las actividades económicas.

La biodiversidad es muy sensible a los cambios en el sistema climático ya que el clima influye en la distribución de plantas y animales silvestres. Varios cambios biológicos aparentemente graduales, como la variación en la composición y estructura de la vegetación, están relacionados con las respuestas a fenómenos climáticos extremos (Easterling y otros, 2000). En plantas y animales silvestres podrían generarse extinciones inducidas por el clima, además de generarse cambios fenológicos e inviabilidad de ecosistemas existentes. Algunos hábitats son capaces de adaptarse a pequeñas variaciones climáticas. Sin embargo, la escala de los cambios estimados en las próximas décadas y los eventos extremos, aumentados por el

cambio climático, tendrían efectos tan drásticos y rápidos que los ecosistemas no serían capaces de asimilarlos.

Los impactos de los recientes fenómenos extremos, como olas de calor, sequías, inundaciones, tormentas, ciclones e incendios forestales ponen en relieve la vulnerabilidad y exposición no solo de los ecosistemas sino también de los sistemas humanos a la variabilidad climática (IPCC, 2014a). Actividades económicas como el comercio y transporte pueden afectarse por la presencia de huracanes o tormentas. Otras actividades como el turismo o la producción agropecuaria también tendrán pérdidas significativas debido a eventos extremos de mayor magnitud. Por ejemplo, en el sector del turismo, una elevación en el nivel del mar dañaría las zonas litorales, provocaría erosión costera y pérdida de playas.

Asimismo, los eventos extremos podrían generar pérdida de sitios arqueológicos, en áreas naturales y en su biodiversidad. Por otra parte, la agricultura es una actividad importante para la región y los ciclos agrícolas dependen de la precipitación, en esta región en promedio el 94% de los cultivos son de temporal o secano (FAOSTAT, 2020). También, se espera que algunas enfermedades sensibles al clima pueden incrementar su incidencia y cobertura geográfica, como el dengue o la malaria.

A. Cambio climático y su atribución en los eventos extremos

Desde el primer informe del IPCC se han incluido dos líneas de análisis: la detección de cuánto el clima y sus efectos están cambiando con respecto a lo conocido en el pasado reciente y la atribución de qué proporción de las causas de tales cambios tienen un origen asociado con la actividad humana y por lo tanto no se trata de un proceso natural. El IPCC afirma que la detección y la atribución es fundamental para la comprensión científica del cambio climático y para permitir a los tomadores de decisiones gestionar efectiva y eficientemente los riesgos relacionados con el clima (Hegerl y otros, 2010).

Los análisis del IPCC (2014a) han identificado la influencia antropogénica en los cambios de temperatura de la superficie de la tierra, en la atmósfera y en los océanos, así como en los cambios en la criósfera, el ciclo del agua y los eventos extremos. La evidencia excluye el forzamiento solar, los volcanes y la variabilidad interna como los impulsores más fuertes del calentamiento desde 1950. Los análisis de atribución contribuyen a evidenciar más claramente cuánto la influencia humana repercute en los cambios del sistema climático, incluyendo en eventos extremos particulares. La atribución evalúa las contribuciones relativas de múltiples factores causales a un cambio en los fenómenos observados con una asignación de confianza estadística³³. De esta manera se reduce la incertidumbre asociada a las evaluaciones basadas en una sola variable climática. De la evidencia combinada, se ha concluido que es prácticamente seguro que la influencia humana ha calentado el sistema climático global.

En años recientes, es común encontrar en el cambio climático la explicación de los desastres en el mundo. Aunque esta aseveración puede resultar cierta, en muchos de los casos los desastres son la materialización del riesgo, que se forma por la amenaza (condición extrema del clima) y por la vulnerabilidad construida socialmente (Magaña y Galván, 2010). De esta

³³ Un resumen de las definiciones de confianza y probabilidad del IPCC se presentan en el capítulo I.

manera, la detección y atribución a los eventos extremos debe seguir siendo analizada a nivel global y regional, ya que aún resulta difícil explicar estos eventos y su relación con la actividad humana. Lo anterior es fundamental para analizar el comportamiento de la frecuencia e intensidad de los eventos extremos en el futuro y para determinar políticas adecuadas que ayuden a disminuir la vulnerabilidad de la población.

Con el objetivo de aclarar los conceptos de detección y atribución, un grupo de expertos del AR5 estableció definiciones. Por un lado, la detección es el proceso de demostrar que el clima o un sistema afectado por el clima han cambiado en un sentido estadístico definido, sin indicar las razones del cambio. Este cambio se confirma con las observaciones si la probabilidad de que ocurra por causa únicamente de la variabilidad interna es baja, por ejemplo, menor del 10 % (Hegerl y otros, 2010). Por otra parte, se definió a la atribución como el proceso de evaluación de las contribuciones relativas de varios factores causales a un cambio o evento con una evaluación formal de la confianza estadística.

Antes de iniciar el proceso de atribución se requiere determinar la detección de un cambio en la variable observada o en las variables estrechamente asociadas. La atribución busca determinar si un conjunto específico de forzamientos externos o controladores son la causa de un cambio observado en un sistema específico, por ejemplo, el aumento en las concentraciones de GEI puede ser una fuerza para un cambio observado en el sistema climático, a su vez el cambio climático puede ser un factor en el rendimiento de los cultivos o en la masa de los glaciares (Hegerl y otros, 2010).

Evaluar la atribución de eventos extremos puede ayudar a las personas en comunidades afectadas a desarrollar planes de recuperación y resiliencia de acuerdo con su riesgo posible futuro. De la misma manera, los estudios de atribución de cambio climático tienen un valor científico pues ofrecen a expertos del clima la oportunidad de probar y mejorar sus modelos que simulan diferentes tipos de eventos extremos (Lindsey, 2017). Así que la atribución del cambio climático a factores antropógenos requiere un análisis estadístico-dinámico y una evaluación cuidadosa de diversas pruebas para demostrar, dentro de un margen de error predeterminado, que es improbable que los cambios observados sean causados de manera íntegra por la variabilidad interna, que los cambios son congruentes con las respuestas estimadas a una determinada combinación de forzamientos antrópicos y naturales y que los cambios no concuerdan con otras explicaciones físicamente factibles del cambio climático reciente, que excluyen elementos importantes de la combinación de forzamientos externos en cuestión (Magaña y Galvan, 2010).

En el caso del cambio climático antropogénico y su impacto en los eventos extremos se evalúa la atribución con métodos que conllevan múltiples pasos (*multi-step attribution to external forcings*). En los eventos climáticos extremos no siempre es posible estimar de manera confiable la atribución en el cambio de frecuencia e intensidad de un evento determinado a partir de observaciones producidas en un período de tiempo limitado y un reducido número de eventos anómalos. Frente a esta dificultad se puede realizar una evaluación considerando varios pasos para analizar un cambio indirectamente estimado en la probabilidad de tal evento (Hegerl y otros, 2010). La consideración anterior implica que no se puede determinar la atribución de un probable aumento de frecuencia de tormentas tropicales con solo observar el número de eventos en un período determinado, debe haber pasos previos que puedan verificar

la probable contribución de variables como el aumento de la temperatura oceánica y sus implicaciones en la formación de tormentas tropicales, además de tomar en cuenta otras variables que puedan tener relevancia.

Otro de los métodos que Hegerl y otros (2010) identifican es el de la atribución a un cambio en las condiciones climáticas (*attribution to a change in climatic conditions*) que comprende evaluaciones basadas en el conocimiento del proceso (por ejemplo, conocimiento de los eventos extremos) y en la importancia relativa del cambio en las condiciones climáticas para determinar los efectos observados como en la frecuencia u intensidad de los eventos extremo. Este método puede ser el paso final del método de múltiples pasos o puede ser utilizado de forma independiente para evaluar los impactos del cambio climático en una variable de interés. La confianza en las evaluaciones basadas en este método aumentará cuando la atribución del cambio a un factor causal se cuantifique de manera sólida y cuando haya una comprensión firme de los procesos que demuestren un vínculo causal, por ejemplo, el vínculo entre aumento de temperatura y mayor intensidad o frecuencia en tormentas o el vínculo de temperaturas elevadas con disminución de los rendimientos de los cultivos.

Zhai, Zhou y Chen (2018) hacen una revisión de los estudios de atribución del cambio climático, tanto de las metodologías de evaluación como de los resultados. Los autores encontraron que los estudios de atribución se dividen en tres áreas: la primera, la atribución de cambios a largo plazo en las variables climáticas y los extremos del clima; la segunda, la atribución de impactos relacionados con el clima en los sistemas humanos, físicos, marinos y terrestres; y tercero, la atribución de los eventos meteorológicos o climáticos extremos. Estos autores destacan el método conocido en la literatura como *optimal fingerprinting* que consiste en comparar los cambios climáticos simulados y observados. Este método usa los resultados simulados de los sistemas climáticos en modo espacial, temporal o espacio-temporal para determinar si estos resultados son consistentes con las observaciones y si son significativamente más grandes que la variabilidad interna del sistema climático. Este método también es útil para distinguir los mecanismos de los forzamientos. La mejor forma de hacer estas comparaciones es realizando simulaciones climáticas en el mundo actual y en el mundo contrafactual donde en este último las simulaciones se realizan sin la influencia antropogénica.

Otro método ha sido utilizar solo los datos observados para distinguir entre los cambios causados por el forzamiento radiativo y la variabilidad interna, las conclusiones obtenidas con este método han sido consistentes con la metodología de las simulaciones (Hegerl y Zwiers, 2011; y Zhai, Zhou y Chen, 2018). Tanto la metodología de las simulaciones como la de los datos observados usan técnicas estadísticas para la atribución de cambios a largo plazo en variables climáticas o eventos extremos clasificadas en dos categorías: análisis multivariado para el método de *optimal fingerprinting*, e inferencia bayesiana para el método de datos observados por su ventaja de integrar múltiples fuentes de datos.

El IPCC ha evaluado el posible impacto del cambio climático antropogénico en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos para determinar si el calentamiento global causado por los seres humanos ha sido uno de los determinantes que influyen en la probabilidad e intensidad de un evento climático extremo (para ver las definiciones de los niveles de probabilidad y confianza véase capítulo I).

En cuanto a temperaturas superficiales extremas el AR4 concluyó que es probable que se hayan visto afectadas por el forzamiento antropogénico. Los estudios evaluados en el AR5 mostraron evidencia sólida del forzamiento antropogénico en los cambios de temperaturas extremas. En el ejercicio de la evaluación de atribución se separó la influencia de los forzamientos antropogénicos de los naturales en las temperaturas extremas diarias a escala global, y en algunos casos se evaluó a nivel continental y subcontinental. La conclusión fue que los resultados son más claros para la influencia del forzamiento antropogénico desde mediados del siglo XX (Bindoff y otros, 2013). El reporte especial del IPCC de calentamiento global de 1,5 °C también revisó la literatura más reciente y determinó que existe una alta confianza de una disminución general en el número de días y noches fríos y un aumento general en la cantidad de días y noches cálidos a nivel mundial por efecto de la actividad humana (Hoegh-Huldborg y otros, 2018).

En el AR4 no se estableció una relación causa-efecto entre los cambios en el forzamiento externo y la precipitación extrema, por lo que se concluyó que los aumentos en la precipitación extrema no eran consistentes con la influencia antropogénica durante la segunda mitad del siglo XX (Hegerl y otros, 2007). No obstante, la revisión hecha en el AR5 concluye que la precipitación extrema aumentará con el aumento de temperatura. Se llegó a esta conclusión por una combinación de evidencias, sin embargo, este resultado es aún incierto y puede variar en el tiempo. De igual manera, las observaciones y los cambios futuros proyectados por los modelos indican un aumento en la precipitación extrema asociada al calentamiento global. Hay evidencia de influencia antropogénica en varios aspectos del ciclo hidrológico global que implica un aumento en las precipitaciones extremas. Ante la dificultad de simular la lluvia extrema por parte de los modelos y los limitados datos observados (Seneviratne y otros, 2012), se considera que existe una confianza media de que el forzamiento antropogénico ha contribuido a más precipitaciones extremas en la segunda mitad del siglo XX en regiones donde los datos observados son suficientes para la evaluación (Bindoff y otros, 2013).

El AR4 concluyó que la probabilidad de riesgo de sequía era mayor debido al forzamiento antropogénico en la segunda mitad del siglo XX. Por su parte, el reporte especial de eventos extremos (SREX) (IPCC, 2012) evaluó la atribución en la sequía y determinó que había una confianza media en que la influencia antropogénica ha contribuido a algunos cambios en los patrones de sequía observado en la segunda mitad del siglo XX, pero mostró que en algunas regiones había poca confianza de esta influencia (Seneviratne y otros, 2012).

El AR5 evaluó la nueva evidencia observada y las nuevas simulaciones de la variabilidad climática natural y forzada y determinó que las conclusiones del AR4 deben tomarse con mayor cautela con respecto a las tendencias de las sequías. Consideró que no hay evidencia suficiente para respaldar una confianza media o alta de la atribución al cambio climático de los cambios en la sequía en las áreas terrestres globales en el siglo XX (Bindoff y otros, 2013). La sequía no solo depende de la precipitación, es un fenómeno complejo que depende también de la temperatura, la velocidad del viento, la radiación solar y condiciones no atmosféricas como la humedad del suelo y las condiciones del suelo (Seneviratne y otros, 2012; Sheffield y otros, 2012; Bindoff y otros, 2013). La última revisión de literatura del reporte de 1,5 °C del IPCC sugiere que las emisiones antropogénicas han aumentado la probabilidad de años de sequía en algunas regiones como en el mediterráneo (Gudmundsson y Seneviratne, 2016; Gudmundsson y otros., 2017; Hoegh-Huldborg y otros, 2018).

El AR4 concluyó que no se detectó una influencia antropogénica en los ciclones extratropicales (véase el capítulo II para su descripción e influencia en la región) debido a la gran variabilidad interna y los cambios en los sistemas observados. El AR5 detectó cambios de estos ciclones hacia los polos, algunos estudios citan varios factores causales como el calentamiento oceánico y cambios en la circulación a gran escala debido a los efectos de forzamiento externo (Butler y otros, 2010). Con respecto a cambios en la intensidad de estos ciclones el AR5 reconoce que son complicados de evaluar, pues la vinculación con la temperatura media global no es simple (Ulbrich y otros, 2009; O’Gorman, 2010). En conclusión, se espera que la actividad ciclónica extratropical cambie poco bajo el forzamiento moderado de los GEI (O’Gorman y Schneider, 2008; Ulbrich y otros, 2009; Bengtsson y Hodges, 2011; Butler y otros, 2010).

En cuanto a las tormentas tropicales, incluyendo los ciclones o huracanes, el AR4 concluyó con una mayor confianza que los factores antropogénicos no han contribuido a un aumento en la intensidad de las tormentas tropicales (Hegerl y otros, 2007). Las observaciones sugieren un aumento global en las intensidades de los ciclones tropicales (Elsner y otros, 2008) pero es difícil atribuir estos cambios a causas particulares (Knutson y otros, 2010). El AR5 concluyó que hay poca confianza en cualquier aumento a largo plazo en la actividad de los ciclones tropicales³⁴ a nivel global. Sin embargo, en la región del Atlántico norte existe una confianza media de que la reducción del forzamiento por aerosoles ha contribuido al menos en parte al aumento observado en la actividad de los ciclones tropicales desde la década de 1970. El AR5 consideró aun como incierto si los cambios pasados en la actividad de los ciclones tropicales estuvieron fuera del rango de variabilidad interna natural (Bindoff y otros, 2013).

El reporte especial del IPCC de calentamiento global de 1,5 °C (Hoegh-Huldborg y otros, 2018) recopiló evidencia posterior al AR5 sobre la tendencia decreciente en el número global de ciclones tropicales y energía ciclónica acumulada globalmente, en las últimas cuatro décadas. Sin embargo, hay resultados contradictorios en cuanto a la significancia de esta tendencia, principalmente por los períodos cortos de análisis que complican la evaluación. En general, hay poca confianza para atribuir los cambios en el número de ciclones tropicales globales al cambio climático. En cuanto a la intensidad de los ciclones tropicales la evidencia recopilada en el reporte del IPCC (Hoegh-Huldborg y otros, 2018), indica que no hay una tendencia clara sobre un aumento en la fuerza de estos eventos, ni con las observaciones históricas, ni en las simulaciones de los modelos del CMIP5. La mayoría de los estudios indica incrementos en el número global de ciclones tropicales muy intensos (huracanes categoría 4 y 5) bajo altos niveles de calentamiento global (Knutson y otros, 2015; Sugi y otros, 2017; Hoegh-Huldborg y otros, 2018), no obstante algunos estudios contradicen estos hallazgos (Yoshida y otro, 2017); por tanto el IPCC estima que con un aumento de entre 3 °C a 4 °C el número global de ciclones tropicales disminuiría mientras que el número de ciclones muy intensos aumentaría con una confianza media (Hoegh-Huldborg y otros, 2018).

Desde el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (Hegerl y otros, 2007), hay evidencia directa de la influencia antropogénica sobre las precipitaciones extremas. El AR5 generó un estudio sobre detección, atribución y pruebas indirectas del aumento esperado en las precipitaciones extremas debido a la evidencia de la influencia antropogénica en varios

³⁴ Si se intensifica el ciclón tropical, se conoce como tormenta tropical.

aspectos del ciclo hidrológico global (Bindoff y otros, 2013). Se reportó que, con un nivel de confianza alto, se esperaba que la intensidad de los episodios de precipitaciones extremas aumente con el calentamiento global. En las regiones en donde las observaciones fueron suficientes para proceder con una evaluación, existe un nivel de confianza medio de que el forzamiento antropogénico ha contribuido a la intensificación de precipitaciones extremas a escala global durante la segunda mitad del siglo XX (Bindoff y otros, 2013).

A continuación se hace una breve revisión de literatura adicional sobre la influencia antropogénica en eventos extremos. Coumou y Rahmstorf (2012) realizaron un análisis de eventos extremos con base en dos parámetros, un umbral límite y los eventos récords fuera del límite. Estos autores encontraron complicaciones para determinar la atribución, debido a la falta de comprensión de la relación entre los forzamientos y los procesos climáticos, así como la ausencia de datos homogéneos y la dificultad de modelar la precipitación. Los autores concluyen que los estudios de atribución serán realmente efectivos cuando se comprendan mejor las razones detrás de los cambios observados. Aumentar la resolución espacial de los modelos podría ser una solución. También, observan que de acuerdo con la información satelital la intensidad de las tormentas aumentó entre 1980 y 2005, pero aún no se puede determinar si estas se encuentran dentro o fuera de la variabilidad natural. Finalmente, sugieren que los eventos extremos sin precedentes pueden generarse por procesos naturales, como el fenómeno de El Niño, en combinación con un clima cambiante.

Fischer y Knutti (2015) estudiaron la contribución humana en la ocurrencia de olas de calor y fuertes precipitaciones. Ellos estimaron la fracción de dichos eventos extremos que es atribuible al calentamiento global. Este análisis observó tendencias significativas en los extremos de temperatura y precipitación en las últimas décadas, los cuales son atribuidos a la influencia humana. Aunque ninguno de los eventos extremos fue exclusivamente antropogénico en un sentido determinista, el cambio climático ha cambiado sus probabilidades, lo que puede expresarse como un cambio en la fracción de riesgo atribuible. Al calentamiento actual de 0,85 °C, considerado como un aumento de temperatura observada desde tiempos preindustriales, se le atribuye alrededor del 18% de las precipitaciones diarias moderadas extremas. Se estima que, con un incremento de 2 °C de temperatura, la fracción de precipitación extrema atribuible a la influencia humana aumentaría aproximadamente a 40%. Alrededor del 75% de los extremos cálidos diarios moderados sobre la tierra son atribuibles al cambio climático. Estos eventos extremos son los que tienen mayor fracción antropogénica y esa contribución aumenta de forma no lineal con el calentamiento adicional.

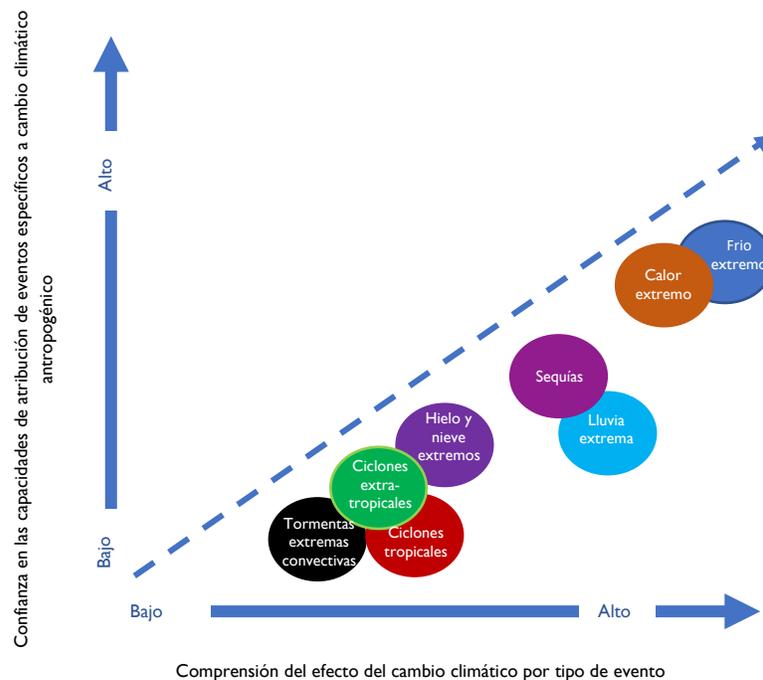
Martínez-López y otros (2018) analizaron la tendencia de precipitación acumulada anual desde hace más de un siglo en la Ciudad de México y mostraron que hay una tendencia positiva de mayor lluvia, que no solo puede atribuirse al calentamiento global. Los factores, que pueden influir son la urbanización que produce islas urbanas de calor, el cambio de uso de suelo, y la oscilación natural a largo plazo (anomalías alternadas húmedo-seco en un período de un par de siglos de evidencia). Liu y otros (2019) analizan la temperatura de la troposfera baja como un factor que influye en la humedad del aire donde por cada grado centígrado la humedad aumenta 7%. A su vez este cambio de humedad afecta la variabilidad de lluvias, y la presencia de ciclones tropicales. No obstante, este estudio no encontró un cambio significativo en la intensidad de las tormentas tropicales como consecuencia del calentamiento global, usando un modelo de clima global de alta resolución donde se dividió a

los ciclones en cuatro categorías con base en la escala Saffir-Simpson para cada cuenca oceánica.

Como se mencionó anteriormente, cuando es difícil realizar la atribución de un solo paso (método que atribuye un cambio observado dentro de un sistema a un forzamiento externo con un modelo explícito de la respuesta de la variable a los forzamientos e impulsores externos) para una variable es posible llevar a cabo la atribución con el método de múltiples pasos, donde primero se atribuye un cambio observado en los fenómenos meteorológicos al cambio climático y por separado se atribuye el cambio climático a los forzamientos externos como las emisiones antropogénicas de GEI (Zhai, Zhou y Chen, 2018).

Zhai, Zhou y Chen (2018) y el National Academies of Sciences (NAS) (2016) concluyeron que actualmente existe una alta confiabilidad de atribución al cambio climático antropogénico en los eventos relacionados con temperatura como las ondas de calor o frío, tanto en la magnitud y frecuencia. Hay confiabilidad media en el caso de precipitación extrema y sequías. Finalmente, la menor confiabilidad se presenta en eventos como huracanes, ciclones tropicales, incendios forestales y tormentas severas, este nivel de confiabilidad se debe a la necesidad de simulaciones con alta resolución, aun no hechas, y a la limitada información histórica. En el diagrama VII.1 se ilustra la relación del nivel de entendimiento de los efectos del cambio climático en cada evento y el nivel de confianza para atribuir el efecto del cambio climático antropogénico en cada evento (NAS, 2016).

Diagrama VII.1
Evaluación de la ciencia de la atribución del cambio climático para diferentes tipos de eventos



Fuente: Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina de los Estados Unidos (NAS), *Attribution of Extreme Weather Events in the Context of Climate Change*, Washington, D.C., The National Academies Press, 2016.

B. Tendencia histórica de los eventos climáticos extremos

El índice de riesgo climático (CRI por sus siglas en inglés) de la organización *German Watch* califica el impacto de los eventos extremos (tormentas, inundaciones, extremos de temperatura y olas de calor y frío) en un *ranking* de países, en el que el país con el número más bajo es el más vulnerable. Los resultados del CRI 2020 se basan en un ranking de 181 países del año 2018 y del período 1999 a 2018. Los principales resultados indican que en el mundo entre 1999 y 2018 murieron 495.000 personas como consecuencia directa de más que 12.000 fenómenos meteorológicos extremos y las pérdidas económicas ascendieron a unos 3,54 billones de dólares. Las olas de calor fueron una de las principales causas de daños en 2018. La evidencia científica reciente ha establecido un vínculo claro entre el cambio climático y la frecuencia y severidad del calor extremo (Eckstein y otros, 2019).

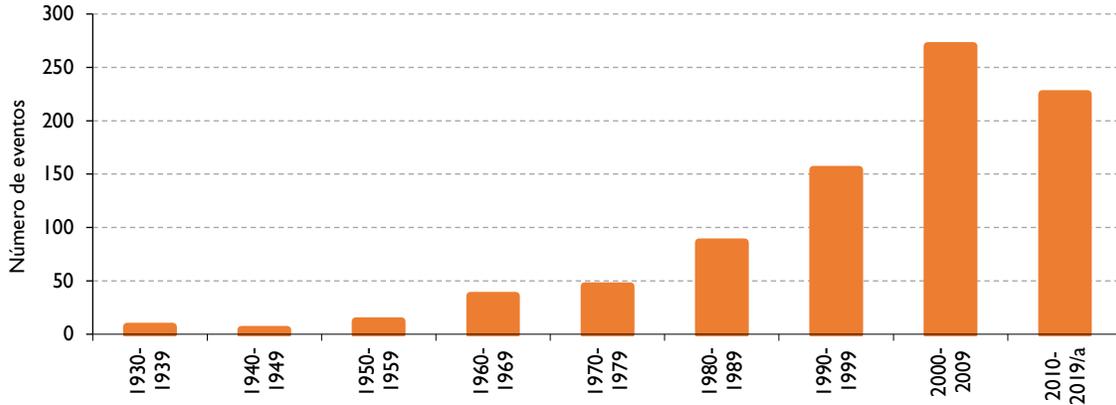
Los resultados del CRI del período 1999-2018 indican que Haití se encuentra entre los países más afectados por eventos climáticos extremos, es el país con mayores impactos recibidos en la región, y se ubica en la tercera posición de la clasificación, Guatemala en la posición decimosexta, El Salvador en la vigésimo quinta, Belice en la trigésima segunda, Nicaragua en la trigésima octava, Honduras en la cuadragésima segunda, la República Dominicana en la quincuagésima, México en la quincuagésima cuarta, Costa Rica en la nonagésima quinta y Panamá en la posición centésima decimoctava.

Considerando el aumento de eventos extremos en los últimos años, el mismo indicador anual arroja que los países de la región a menudo resultan entre los diez primeros lugares de riesgo: la República Dominicana segundo en 2004; Guatemala primero, Haití en sexto, Honduras séptimo y México en decimo en 2005; Nicaragua tercero en 2007; Belice noveno en 2008; El Salvador primero en 2009; Guatemala segundo y Honduras quinto en 2010; El Salvador cuarto y Guatemala noveno en 2011; Haití primero en 2012; México en cuarto en 2013 y Haití primero en 2016 (Anemüller y otros 2006; Harmeling y otros 2007; Harmeling, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012; Kreft y Eckstein, 2013; Kreft y otros 2014, 2015, 2016, Eckstein y otros 2017, 2018 y 2019).

México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana son parte de una región que se ha caracterizado por un alto grado de exposición a las amenazas geoclimáticas y una alta vulnerabilidad (CEPAL y otros, 2011). Durante las últimas décadas, se ha registrado un número creciente de eventos extremos que incluyen tormentas, inundaciones y sequías. En el gráfico VII.1 se muestra el incremento sostenido en el número de eventos registrados con la base de datos EM-DAT ³⁵, especialmente a partir de la década de 1970. En la última década puede parecer que se presentaron un menor número de eventos, sin embargo, esta serie aún no se ha completado, ya que las cifras para los últimos años son preliminares.

³⁵ Para que un evento sea registrado en la base de datos de EM-DAT se deben de cumplir al menos uno de los siguientes criterios: 10 o más muertes de personas; 100 o más personas sean afectadas, lesionadas o hayan perdido sus hogares; haya una declaración del estado de emergencia del país o una apelación para asistencia internacional. Notar que posiblemente haya un subregistro de eventos en las primeras décadas de la serie.

Gráfico VII.1
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: número de eventos extremos, 1930-2019^a
 (Número de eventos)



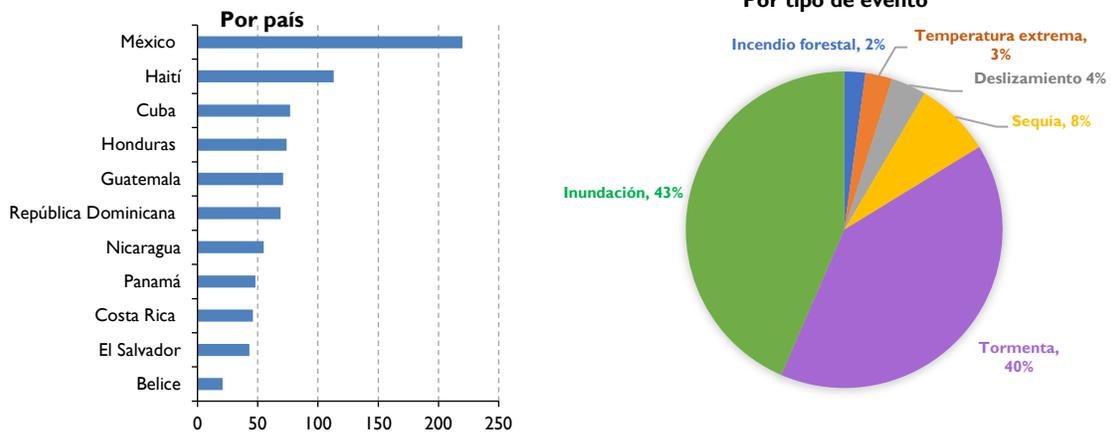
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de Emergency Events Database (EMDAT), The OFDA/CRED International Disaster Database, Bruselas, Bélgica, UCLouvain [base de datos en línea] www.emdat.be.

Nota: incluye tormentas y huracanes, inundaciones, sequías, temperaturas extremas e incendios forestales.

^a Datos preliminares.

En la región entre 1930 y 2019 se registraron alrededor de 840 eventos asociados a fenómenos climáticos. Debido a su extensión geográfica, México fue el país con el mayor número de eventos y Belice el que registró menos. No obstante, pese a su menor extensión geográfica, Haití presentó 113 eventos. Los eventos más recurrentes en la región fueron las inundaciones y tormentas con 43% y 40% respectivamente, le siguen en importancia las sequías (8%), los deslizamientos (4%), las temperaturas extremas (3%) y los incendios forestales (2%).

Gráfico VII.2
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: distribución de los eventos extremos climáticos, 1930-2019^a
 (En número y porcentaje de eventos registrados)



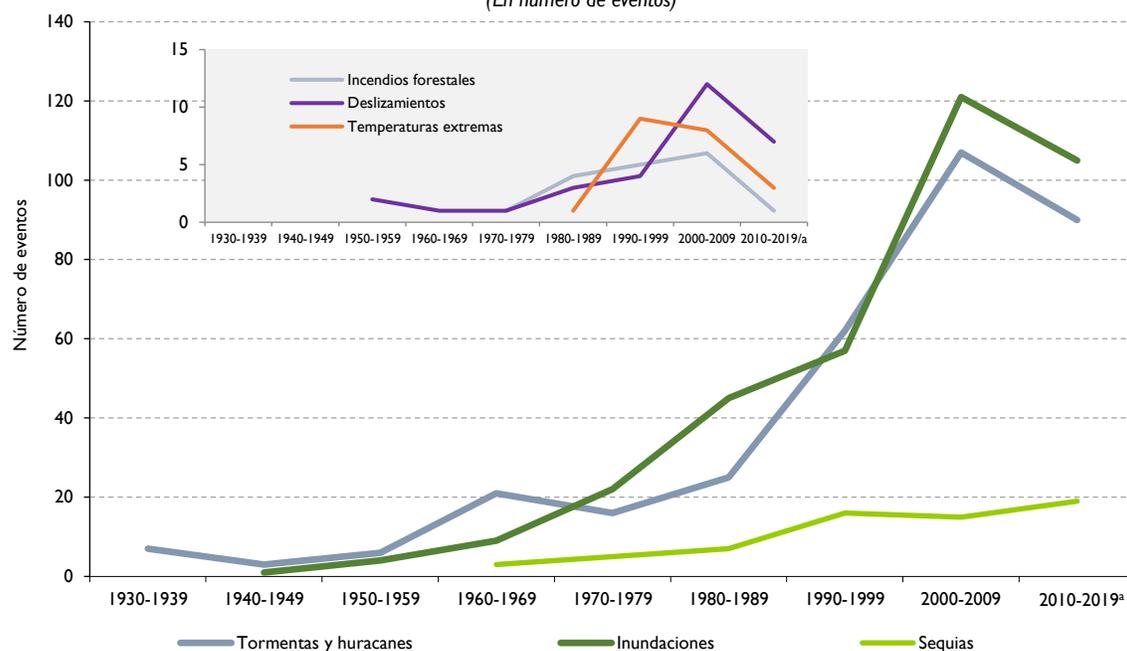
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de Emergency Events Database (EMDAT), The OFDA/CRED International Disaster Database, Bruselas, Bélgica, UCLouvain [base de datos en línea] www.emdat.be.

Nota: Los eventos extremos por país incluyen tormentas y huracanes, inundaciones, sequías, deslizamiento, temperaturas extremas e incendios forestales.

^a Datos preliminares para 2019.

En el tiempo se observa un incremento sostenido del número de eventos, sobre todo tormentas, huracanes e inundaciones (véase el gráfico VII.3). En cuanto a las tormentas y huracanes, en las décadas de 1980 y 1990 se reportaron 25 y 62 eventos respectivamente en la base de datos de EM-DAT. En el período 2000 a 2009 se reportaron 107 tormentas y huracanes en la región. Las cifras preliminares para el período 2010 a 2019 reportaron 90 tormentas y huracanes en la región. El impacto de estos eventos en la población y la economía de la región es significativo. Por ejemplo, se estima que el huracán Mitch en 1998 afectó a más de 600.000 personas y tuvo un impacto económico de alrededor de 8.000 millones de dólares (CEPAL, 2011).

Gráfico VII.3
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: evolución temporal de los eventos extremos registrados, 1930-2019^a
 (En número de eventos)



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de Emergency Events Database (EMDAT), The OFDA/CRED International Disaster Database, Bruselas, Bélgica, UCLouvain [base de datos en línea] www.emdat.be.

^a Datos preliminares para 2019.

En la región también ha ocurrido una gran cantidad de inundaciones. En las décadas de 1980 y 1990 el número reportado en la base de datos de EM-DAT fue de 45 y 57 respectivamente; durante el período 2000 a 2009 tuvieron lugar 121 inundaciones y para el período 2010 a 2019 se reportaron de modo preliminar 105 inundaciones en la región. Las sequías también son eventos frecuentes en la región. En la década de 1980 se registraron 7 eventos de sequía; en la década de 1990 fueron 16; en el período 2000 a 2009 se registraron 15 y las cifras preliminares para el período 2010 a 2019 registran 19 eventos. En menor medida también han ocurrido eventos como temperaturas extremas, aluviones, incendios y deslizamientos. Hay cierta distribución geográfica de los eventos extremos, por ejemplo, en las regiones costeras son más frecuentes las tormentas y huracanes, y hay zonas con tierras altamente inestables con suelos arenosos y volcánicos más propensos a deslaves (Restrepo y Álvarez, 2006).

I. Sequía

Como ya fue presentado en la sección anterior, los eventos de sequías se han incrementado significativamente en la región en las últimas décadas. Los registros preliminares para 2010 a 2019 son de 19 eventos. Los países con mayor número de sequías reportadas en este período fueron Honduras, El Salvador, Guatemala, Nicaragua y Cuba. Las sequías se asocian a procesos de degradación ambiental, lo que, combinado con condiciones climáticas adversas, incrementa su recurrencia. En Centroamérica una alta proporción de eventos de sequía se han presentado en todo el territorio, especialmente en la región denominada Corredor Seco Centroamericano, ya definida en el capítulo II. En esta zona la sequía se relaciona con la distribución anómala de la precipitación dentro del período lluvioso, especialmente cuando inicia la lluvia, el receso de la canícula y su reinicio. El Corredor Seco Centroamericano es severamente afectado por un fenómeno cíclico de sequía y es de alta vulnerabilidad en la vertiente del Pacífico, que cruza todos los países (CEPAL y otros, 2011).

El Proyecto Regional Corredor Seco Centroamericano (FAO, 2012) generó un mapa que brinda tres niveles de intensidades de sequía potencial (Severa, Alta y Baja) (véase el mapa VII.1). Las características de la sequía severa es una precipitación baja (800 mm-1.200 mm/año) y más de 6 meses secos. La sequía alta se caracteriza por precipitación media (1.200 mm-1.600 mm/año) y de 4-6 meses secos y la baja se caracteriza por una precipitación alta (1.600 mm-2.000 mm/año) y 4-6 meses secos.

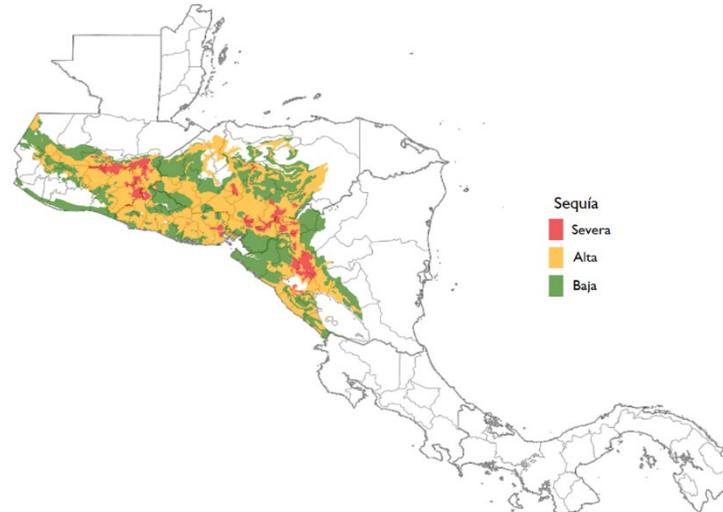
De los 53 millones de hectáreas de superficie de Centroamérica, un 30% está ubicado en el Corredor Seco Centroamericano. De la superficie total del Corredor Seco Centroamericano, un 50,5% se encuentra clasificada en zona de sequía de efectos altos y un 42% de la superficie en zona donde la sequía es de efectos bajos, debido a que son valles favorecidos por la precipitación o terrenos de elevación (cerros, serranías, entre otros) donde, además, hay más probabilidades de lluvias por efectos orográficos, y solo un 7,5% se clasifica en zona de efectos de sequía severa (véase el mapa VII.1). Honduras es el país que tiene más superficie conformando el corredor (42,1% de la superficie total del corredor), sin embargo, es Guatemala el país con mayor área de afectación potencialmente severa, seguido de Nicaragua.

En el mapa VII.2 se muestra el número de eventos de sequías que se ha registrado en EMDAT, durante dos períodos, 1980-1999 y 2000 a 2018. Entre 1980 y 1999 se registraron sequías en el norte de México, en algunas zonas de Centroamérica que se encuentran en el lado del Pacífico y en Cuba. En México, se registraron dos episodios de sequía en los estados de Chihuahua, Coahuila, Sinaloa y Durango y en los departamentos de Chinandega y León (Nicaragua). También se pueden distinguir las zonas donde se presentó un episodio de sequía, en el norte de México, en los estados de Sonora, Nuevo León y Nayarit; Chiquimula (Guatemala); el sur de Honduras; la costa Pacífico de Nicaragua y Costa Rica; el departamento de Panamá (Panamá); Matanzas y este de Cuba, y en el oeste de Haití.

En el período 2000 a 2019 los eventos de sequías se incrementaron con relación a las dos décadas anteriores y en algunas zonas se llegaron a presentar hasta seis eventos. En México se registró un mayor número de sequías en la región norte y cercana al golfo de México. Los estados más afectados fueron Sonora, Coahuila y San Luis Potosí. En este período más reciente, la mayor parte de Centroamérica fue afectada por lo menos un episodio de sequía, con un aumento de frecuencia especialmente en el Corredor Seco Centroamericano que abarca zonas

centrales de Guatemala, Honduras, El Salvador y Nicaragua y áreas específicas de Costa Rica y Panamá. Igualmente, en Cuba ocurrieron varios eventos de sequía en la mayor parte de su territorio y en Haití la sequía se presentó en el norte y suroeste de su territorio (véase el mapa VII.2).

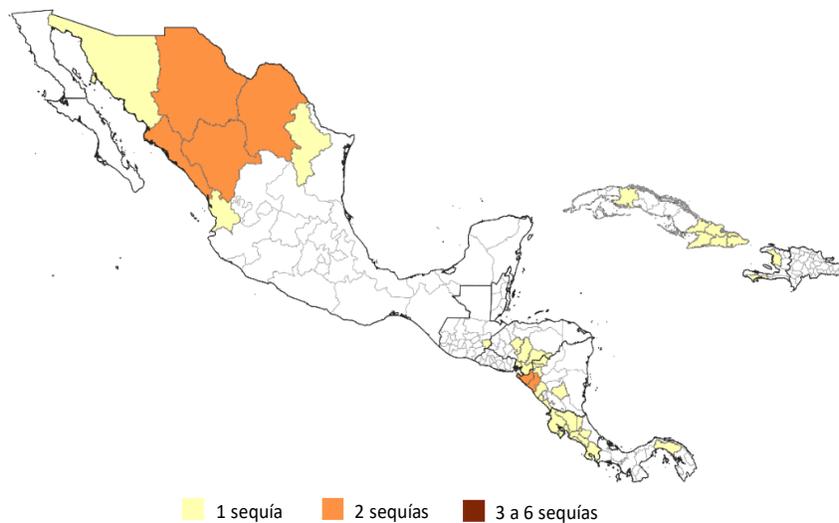
Mapa VII.1
Centroamérica: Corredor Seco
(En número de meses secos)

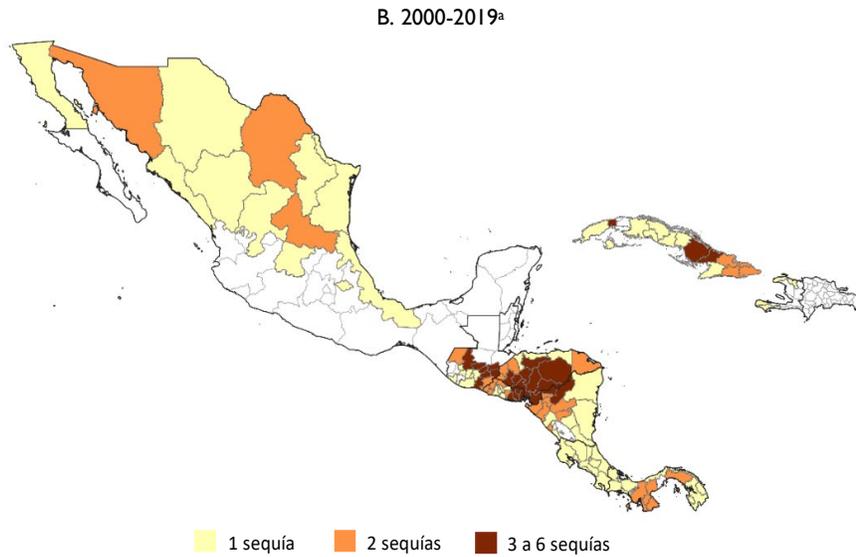


Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), *Estudio de caracterización del Corredor Seco Centroamericano*, Roma, Italia, 2012.

Mapa VII.2
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: eventos de sequía por departamento, 1980-2019^a
(En número de eventos)

A. 1980-1999



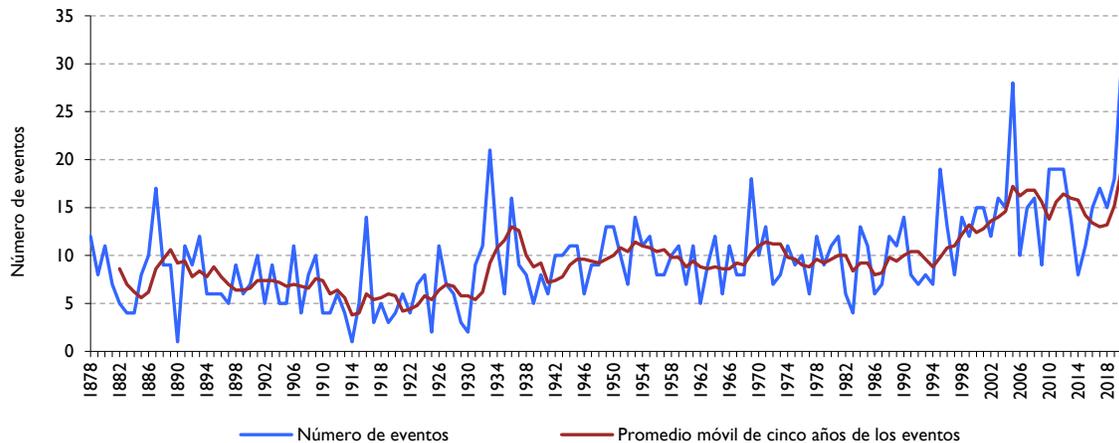


Fuente: Elaboración propia, sobre la base de Emergency Events Database (EMDAT), The OFDA/CRED International Disaster Database, Bruselas, Bélgica, UCLouvain [base de datos en línea] www.emdat.be.
^a Datos preliminares para 2019.

2. Tormentas y huracanes

El número de huracanes y tormentas tropicales se ha incrementado en los últimos años en las latitudes medias, por ejemplo, en el Atlántico Norte. En el gráfico VII.4 se presenta el número de huracanes y tormentas de acuerdo con la base de datos de huracanes (HURDAT, por sus siglas en inglés) y el Centro Nacional de Huracanes (National Hurricane Center, NH, por sus siglas en inglés) de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, por sus siglas en inglés) desde 1878 hasta 2020. Los datos registran una enorme volatilidad. No obstante, el promedio móvil de cinco años permite observar un aumento en el número de tormentas y huracanes desde aproximadamente 1930 y después, de nuevo, a partir de aproximadamente 1990.

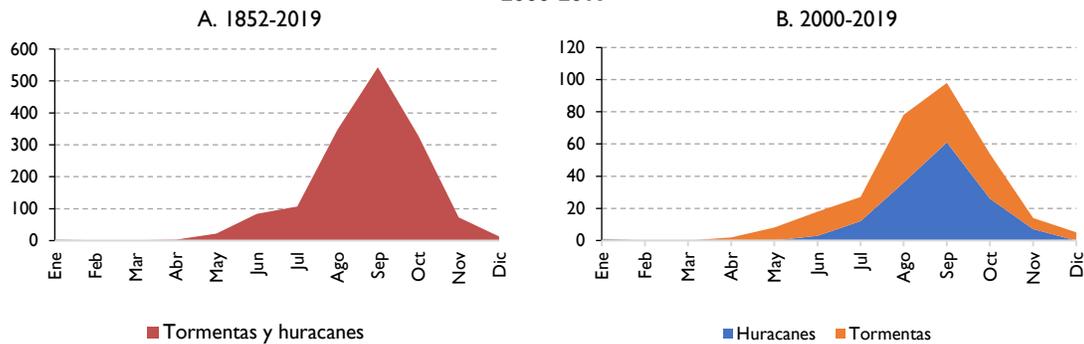
Gráfico VII.4
Océano Atlántico norte: número de huracanes, tormentas tropicales y subtropicales, 1878-2020
 (En número de eventos por año y promedio móvil de cinco años de los eventos)



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información del National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center [sitio web] <https://www.nhc.noaa.gov/>.

La temporada oficial de huracanes para el Atlántico Norte (el océano Atlántico, el mar Caribe y el golfo de México) es del 1 de junio al 30 de noviembre, sin embargo, se llegan a presentar desde abril. En el gráfico VII.5 se muestra el número de tormentas y huracanes de 1852 a 2019 y de 2000-2019, observándose una concentración de los eventos desde mediados de agosto hasta fines de octubre. Los datos para el último período permiten especificar entre el número de huracanes y tormentas (véase el gráfico VII.5.B). Así se puede observar que el período de tormentas es más prolongado que el de huracanes. Tanto para tormentas como para huracanes el mayor número se presenta en septiembre.

Gráfico VII.5
Océano Atlántico norte: número de huracanes, tormentas tropicales y subtropicales por mes, 1852-2019 y 2000-2019

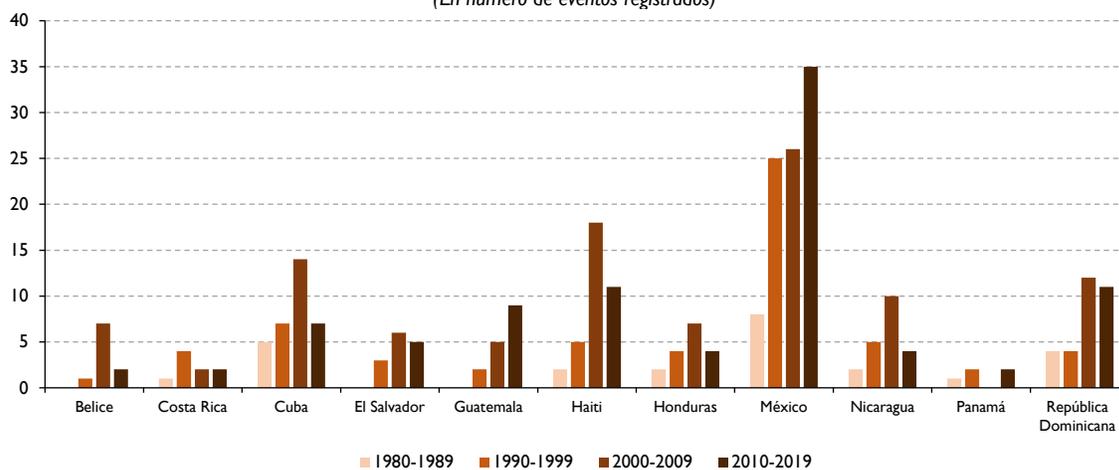


Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información del National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center [sitio web] <https://www.nhc.noaa.gov/>.

La región ha sido afectada por un alto número de tormentas y huracanes que tocaron su territorio, los eventos se han incrementado a través del tiempo en la mayor parte de los países. México tiene el registro más alto en todos los períodos analizados del gráfico VII.6. Belice, El Salvador y Guatemala no tienen registros de tormentas en el período 1980-1989, mientras que Panamá no presentó eventos en el período 2000-2009. Hasta el momento los datos indican que podrían haber decrecido el número de tormentas en el período 2010 a 2019 en Belice, Cuba, El Salvador, Honduras, Nicaragua y la República Dominicana con respecto al período 2000-2009, sin embargo, los datos para la última década aún son preliminares y no se puede concluir con respecto a la década completa.

Con respecto a la distribución espacial de las tormentas y huracanes, se observan regiones más expuestas a este tipo de eventos. En general, las regiones en riesgo abarcan casi la totalidad de las costas del Caribe, Atlántico y del Pacífico. En Centroamérica, el sur de Belice y Nicaragua han experimentado los huracanes de mayor intensidad (entre 3 y 5) en el período 1977-2006. Las intensidades en la costa norponiente de Honduras oscilan entre 2 y 3. Podría esperarse que los territorios de la costa del Atlántico pudiesen ser de los más expuestos. Los huracanes del Caribe inducen o jalan la zona de convergencia intertropical (ZCIT) hacia el norte de Centroamérica, que provoca "temporales" (serie de días con lluvias intensas o con acumulados altos), generando inundaciones y deslizamientos en zonas más amplias que las afectadas directamente por un huracán (CEPAL y otros, 2011).

Gráfico VII.6
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: tormentas registradas, por país, 1980-2019^a
 (En número de eventos registrados)



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de Emergency Events Database (EMDAT), The OFDA/CRED International Disaster Database, Bruselas, Bélgica, UCLouvain [base de datos en línea] www.emdat.be.

^a Datos preliminares.

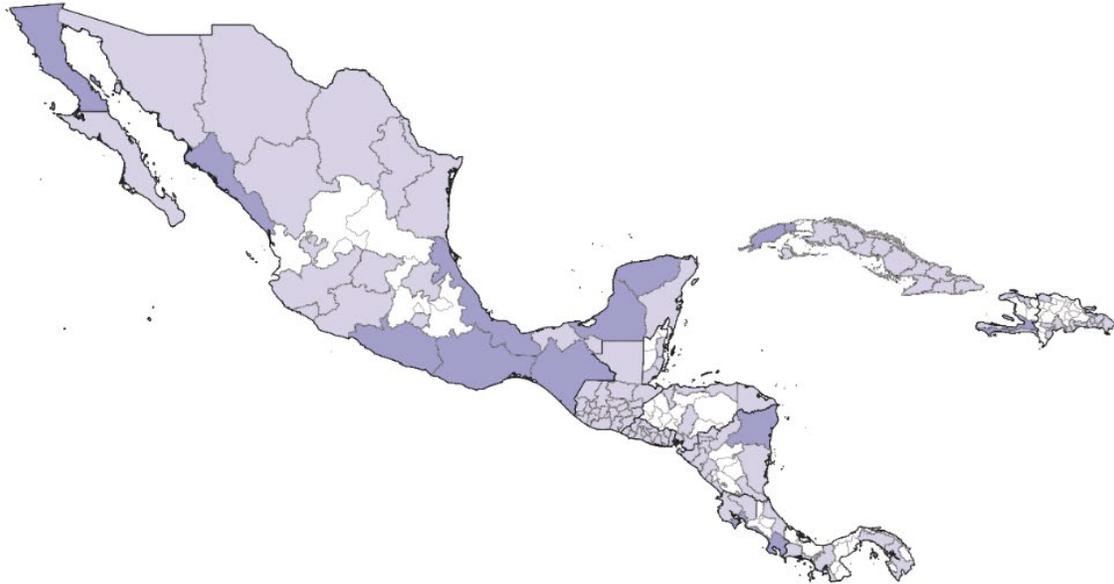
Los mapas siguientes muestran el número de tormentas y huracanes registradas en México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana en los períodos 1980 a 1999 y 2000 a 2019. En el período 1980 a 1999 las zonas donde impactaron un mayor número de eventos (entre 4 y 6 eventos) se concentraron en el norte de México, en los estados de Baja California y Sinaloa, así como en el sureste y suroeste de México. La Región Autónoma de la Costa Caribe Norte (RACCN) (Nicaragua), Puntarenas (Costa Rica), Pinar del Río y Artemisa (Cuba) y el sur del territorio de Haití también estuvieron entre las zonas más afectadas (véase el mapa VII.3).

El número de tormentas y huracanes registradas se incrementó en el período 2000 a 2019 con relación al período anterior. Las zonas donde se presentó un mayor número de tormentas (más de siete eventos) fueron el norte, el Pacífico, el sureste y suroeste de México. Igualmente, en este período la mayor parte del territorio de Cuba, Haití y la República Dominicana fue más afectado por tormentas y huracanes. En Centroamérica los departamentos de Cortés (Honduras), Ahuachapán, La Libertad y San Salvador (El Salvador), y RACCN (Nicaragua) fueron los más afectados (véase el mapa VII.3).

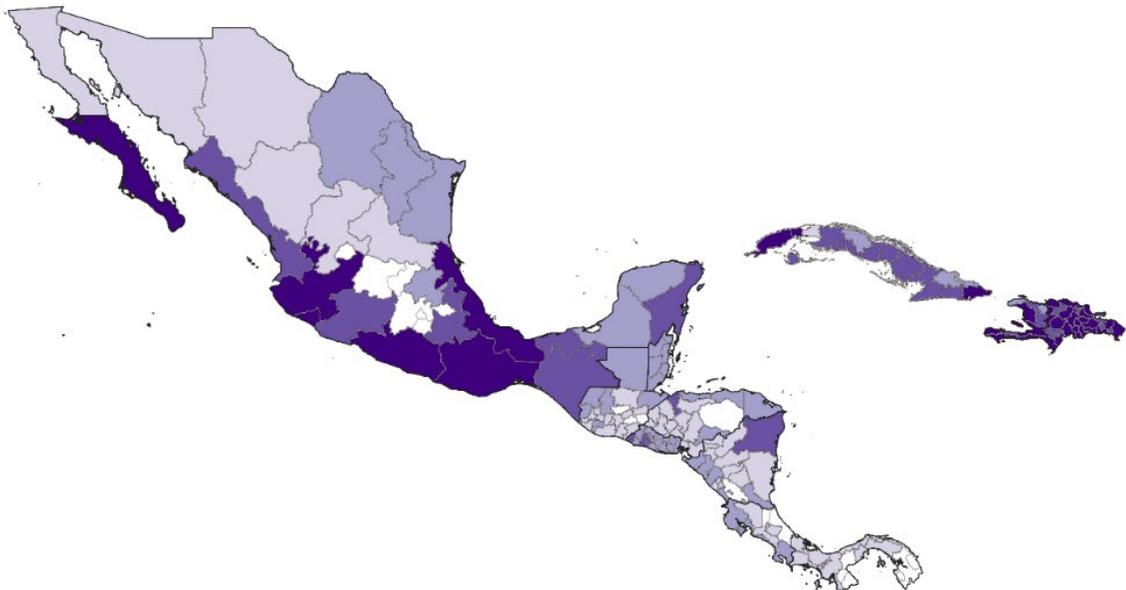
Utilizando los períodos 1980-1999 y 2000-2019 de los mapas anteriores, en el gráfico VII.7 se muestra el número de huracanes y tormentas para el Atlántico Norte y su temporalidad. El pico de la temporada sigue siendo en septiembre. No obstante, es posible observar el incremento significativo en el número de huracanes y tormentas durante todo el año en el período 2000 a 2019, pero sobre todo durante el mes de agosto. Se observa también que la temporada se adelanta y hay presencia de huracanes y tormentas desde el mes de marzo.

Mapa VII.3
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: tormentas y huracanes que impactan tierra por departamento, 1980-2019^a
(En número de eventos)

A. 1980-1999



B. 2000-2019^a

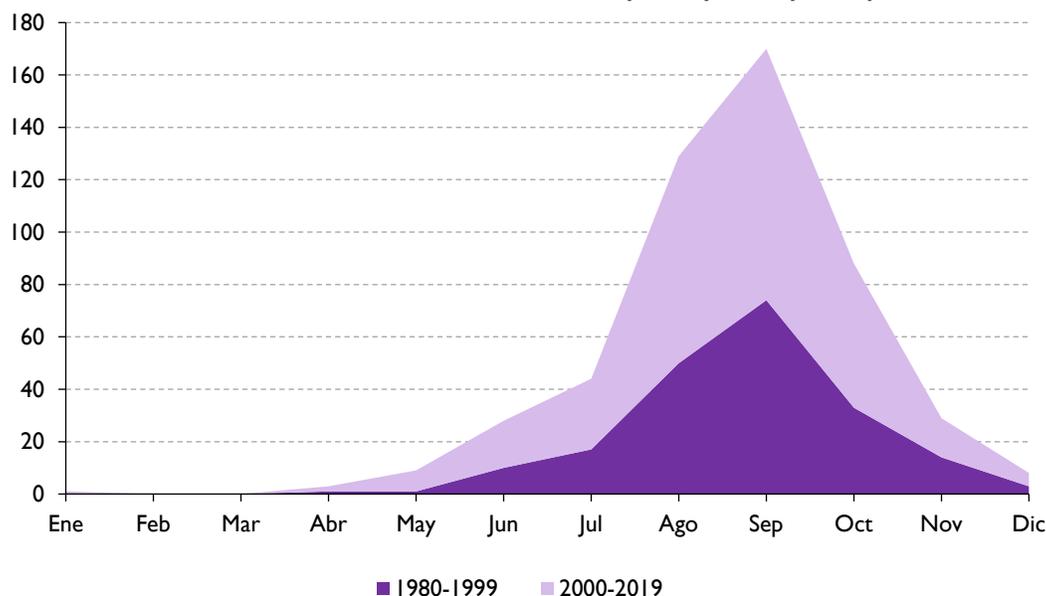


■ 1 a 3 eventos ■ 4 a 6 eventos ■ 7 a 9 eventos ■ 9 a 21 eventos

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de Emergency Events Database (EMDAT), The OFDA/CRED International Disaster Database, Bruselas, Bélgica, UCLouvain [base de datos en línea] www.emdat.be.

^a Datos preliminares para 2019.

Gráfico VII.7
Océano Atlántico norte: número de huracanes, tormentas tropicales y subtropicales por mes, 1980-2019



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información del National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center [sitio web] <https://www.nhc.noaa.gov/>.

3. Inundaciones

Las inundaciones son los eventos que, debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta, o falla de alguna estructura hidráulica provocan un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar, generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no llega, ocasionando daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura. Los patrones de inundaciones más recurrentes y abundantes se presentan en las riberas de los ríos, las zonas bajas y las zonas costeras. En Centroamérica las mayores inundaciones han ocurrido a lo largo de la costa y buena parte del norte de Belice. Las costas y los territorios circundantes a ríos y lagos de Guatemala presentan una recurrencia similar.

El Salvador muestra un patrón de mayor riesgo en la costa y particularmente en los territorios ribereños del río Lempa en todo su trayecto. El patrón de riesgo por inundaciones de Honduras se concentra en ambas costas. Nicaragua presenta dos territorios significativos de riesgo (TSR) por inundaciones: la región costera y sur-poniente de la RACCN y la zona costera de Chinandega. Las inundaciones extremas de Costa Rica afectan principalmente los territorios de Guanacaste y el norte de las provincias de Alajuela, Heredia y Limón. Panamá es el país con la menor incidencia de inundaciones extremas reportada, y su territorio más expuesto es una franja de la provincia de Darién (PNUMA, PNUD, EIRD y Banco Mundial, 2010 en CEPAL y otros, 2011).

México es afectado por inundaciones provenientes de diferentes fenómenos hidrometeorológicos, de junio a octubre las lluvias más intensas están asociadas con la acción de ciclones tropicales, y durante el invierno los frentes fríos son la principal fuente de lluvia. A estos fenómenos se suman el efecto ejercido por el accidentado relieve del territorio del país, y su orientación con respecto a la circulación atmosférica que trastoca las características de la

lluvia en las cadenas montañosas (lluvia orográfica), además del convectivo³⁶, que ocasiona tormentas de corta duración y poca extensión, pero muy intensas (CENAPRED, 2004).

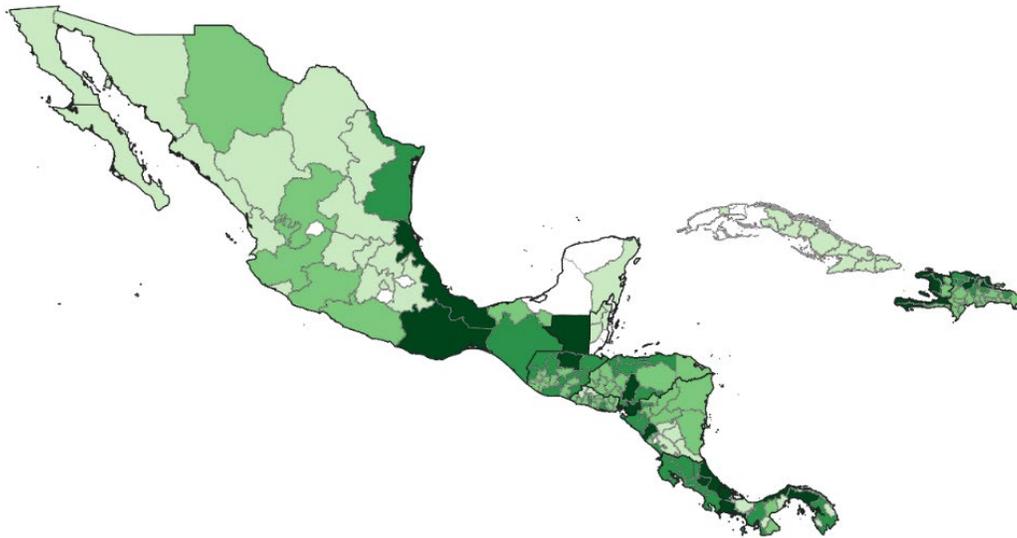
Mapa VII.4
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: inundaciones por departamento, 1980-2019^a

(En número de eventos)

A. 1980-1999



B. 2000-2019^a



1 a 3 eventos 4 a 6 eventos 7 a 9 eventos 9 a 14 eventos

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de Emergency Events Database (EMDAT), The OFDA/CRED International Disaster Database, Bruselas, Bélgica, UCLouvain [base de datos en línea] www.emdat.be.

^a Datos preliminares para 2019.

³⁶ Las lluvias convectivas tienen su origen en el calentamiento de la superficie terrestre, ya que algunas áreas de la superficie de la tierra absorben mejor que otras los rayos solares, por ello, el aire en contacto con esas "zonas cálidas" llega a calentarse más que en los alrededores, lo que da lugar a corrientes verticales con las que asciende el aire caliente húmedo. Estas corrientes al llegar a la capa de la troposfera se enfrían rápidamente, produciéndose la condensación del vapor de agua y formándose nubes densas.

De acuerdo con lo reportado en EMDAT, el número de eventos de inundaciones se ha incrementado en México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana. Entre 1980 y 1999 las zonas donde se registraron un mayor número de inundaciones fueron en el norte, oriente y sur de México y en gran parte de las costas Pacífico y Atlántico en Centroamérica. En particular, se registraron un mayor número de eventos (4 a 6 eventos) en el estado de Veracruz (México), la costa Atlántico de los departamentos de Cortés, Atlántida y Yoro (Honduras), Limón y Cartago (Costa Rica) y la provincia de Panamá. Casi todo el territorio de Cuba y Haití registró inundaciones, con más frecuencia en el este y sur respectivamente. En la República Dominicana la región norte fue la más vulnerable (véase el mapa VII.4).

En el período 2000 a 2019 casi todos los estados o departamentos de la región registraron al menos un evento. En México los estados más afectados fueron Veracruz y Oaxaca. En Centroamérica fueron el Petén y Alta Verapaz (Guatemala); Francisco Morazán y Choluteca (Honduras); Managua (Nicaragua); Limón y Cartago (Costa Rica); Bocas del Toro, Chiriquí, Colon y Panamá (Panamá); Puerto Plata, Espaillat, Maria Trinidad Sánchez, Duarte y Santiago (República Dominicana) y la mayor parte del territorio de Haití registraron más de nueve eventos de inundaciones (véase el mapa VII.4).

4. Extremos de temperatura

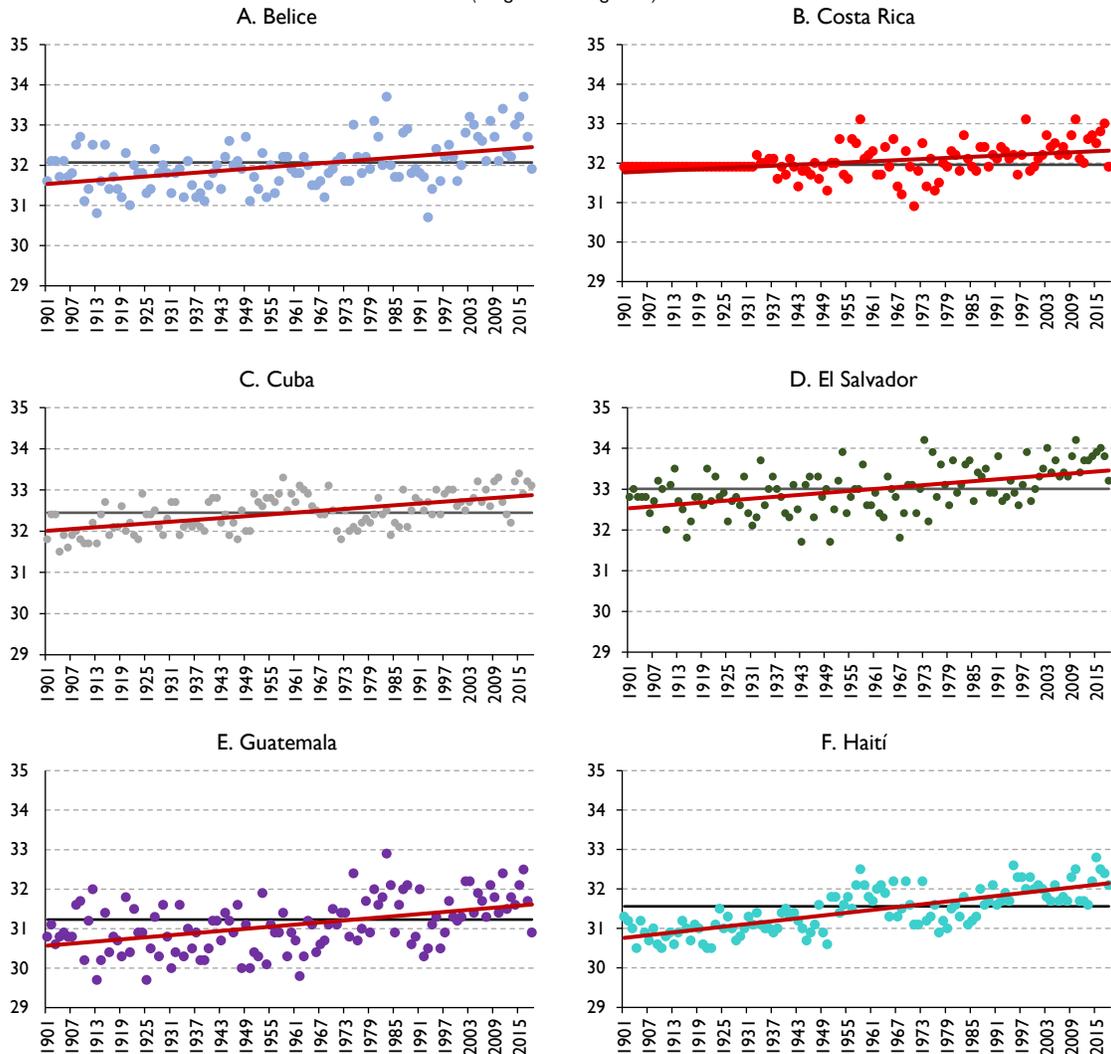
La emisión de GEI ha contribuido a los cambios en la frecuencia e intensidad de las temperaturas extremas diarias. A escala global y de acuerdo con el AR5 es muy probable que el número de días y noches fríos haya disminuido y el número de días y noches cálidos haya aumentado. La probabilidad de ocurrencia de las olas de calor observadas en algunas localidades se ha incrementado. Factores como la urbanización también pueden afectar a temperaturas extremas en algunas regiones, pero se espera que este efecto sea pequeño en el promedio global (IPCC, 2014a).

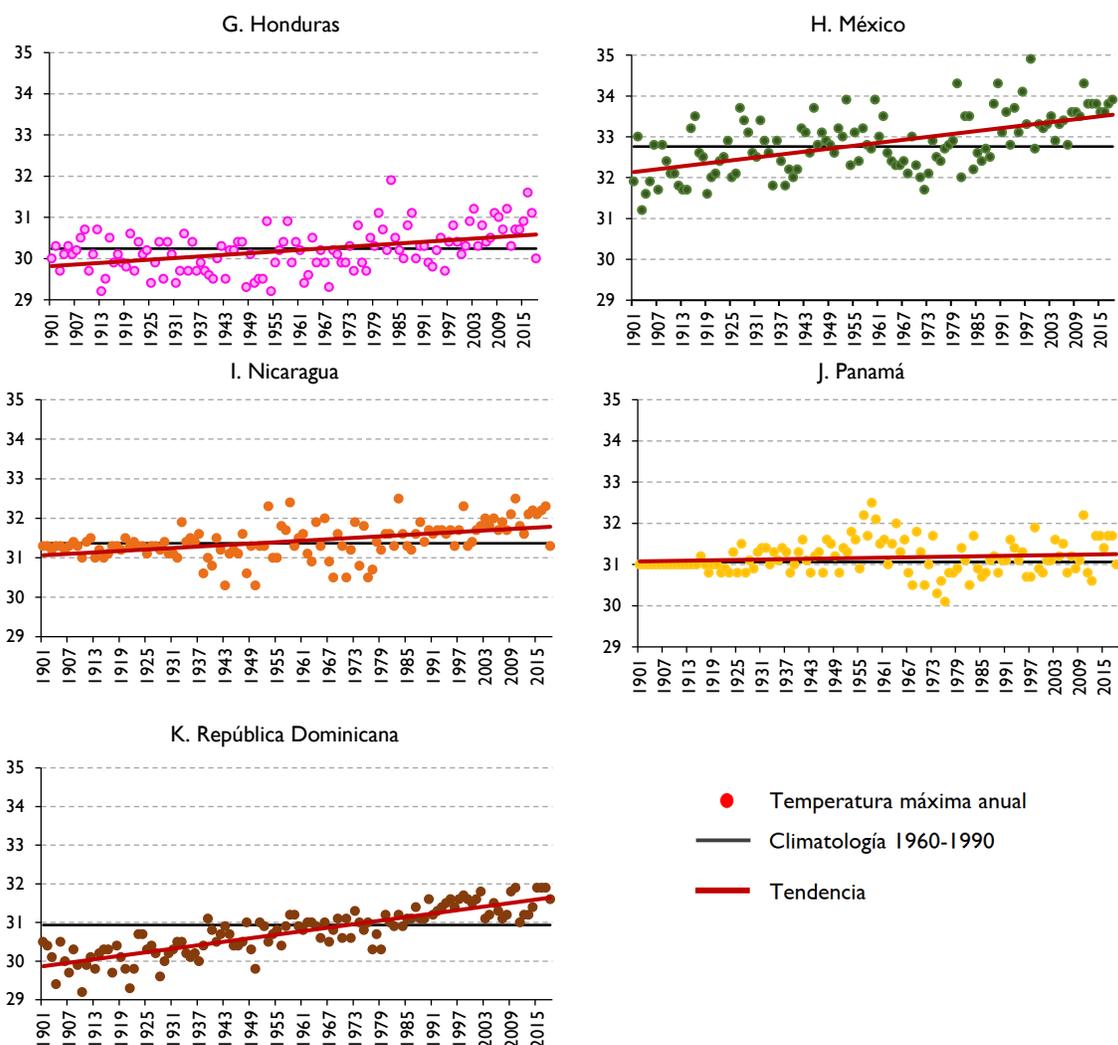
Schleussner y otros (2017) utilizaron el sistema de análisis de la temperatura de la superficie terrestre (GISTEMP) del Instituto Goddard de Investigaciones Espaciales para evaluar los cambios globales observados en los índices de extremos en el período 1991–2010 con respecto al período 1960–1979 y encontraron una diferencia de aproximadamente 0,5 °C. Otros estudios han encontrado cambios sustanciales debidos al calentamiento de 0,5 °C sobre todo en los índices relacionados con los extremos fríos y calientes, así como para el indicador de duración de la ola de calor (Warm Spell Duration Indicator, WSDI por sus siglas en inglés). En particular, identificaron que una cuarta parte de la tierra ha experimentado una intensificación de los extremos de temperatura (temperatura máxima en el día más caluroso del año) en más de 1 °C y una reducción en la intensidad de los extremos fríos en al menos 2,5 °C (temperatura mínima en la noche más fría del año).

En el gráfico VII.9 presenta los datos del promedio de temperatura máxima mensual para el período 1901 a 2018 por país. Se puede observar un cambio en la temperatura máxima, la media de la temperatura máxima mensual se ha incrementado en la mayoría de los países, a excepción de Panamá. En la región, el promedio de la temperatura máxima se ha modificado. En el período 1901 a 1930 fue de 29,38 °C, en el período 1931 a 1960 fue de 29,46 °C, de 1961 a 1990 se mantuvo en 29,44 °C y en el período de 1991 a 2018 se incrementó a 30,01 °C (véase el gráfico VII.9).

El mayor nivel de la temperatura máxima mensual presentada en la región corresponde a El Salvador, en el período 1901-1930 fue de 33,6 °C (abril de 1912), en el período 1931-1960 de 33,9 °C (marzo y abril de 1958) y en el período 1991 a 2018 de 35,7 °C (marzo de 2010). En el período 1961 a 1990 el nivel máximo de temperatura máxima mensual fue de 34 °C (abril de 1975) y se presentó en Belice. En la mayoría de los países de la región hay una tendencia en el incremento de las temperaturas máximas. Esta tendencia es más pronunciada en Belice, Cuba, El Salvador, Guatemala, Haití, México y la República Dominicana. Tendencias más suaves ocurren en Costa Rica y Panamá (véase el gráfico VII.8). Es probable que el incremento de temperaturas tenga un efecto en los regímenes de incendios forestales, ya que el aumento de temperaturas extremas y una menor disponibilidad de humedad debido a una menor precipitación promueve una mayor frecuencia de incendios en áreas boscosas.

Gráfico VII.8
México Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: temperatura máxima anual, 1900-2018
 (En grados centígrados)





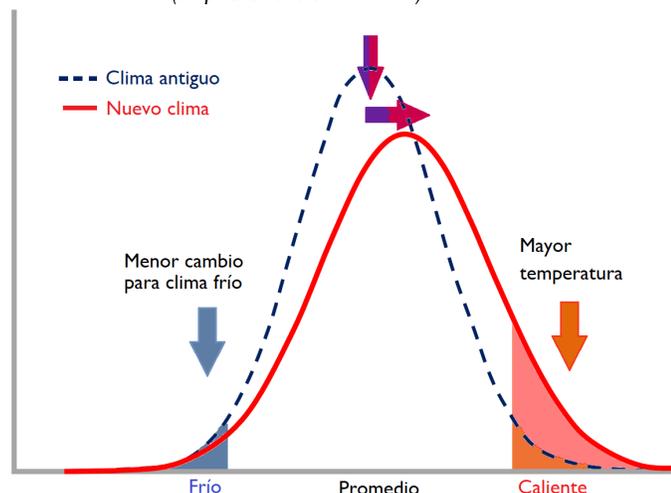
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información de Climatic Research Unit (CRU), CRU TS Version 4.03 [base de datos en línea] https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.03/.

C. Escenarios de cambio climático y eventos extremos

I. Temperatura extrema

El IPCC ha mostrado evidencia de que globalmente han existido cambios en la frecuencia de los eventos extremos de alta temperatura (olas de calor) y en la cantidad de días que exceden los umbrales de temperatura máxima. El cambio climático está cambiando la distribución de probabilidad de la temperatura media. El riesgo de ocurrencia de eventos extremos puede considerarse como un rango continuo de probabilidades, los eventos extremos residen en las colas de baja probabilidad en la distribución. De esta manera el cambio climático ha desplazado la media y las colas de baja probabilidad hacia eventos de calor más intensos (véase el gráfico VII.9).

Gráfico VII.9
Temperatura media: cambios en la media y en la varianza
 (En probabilidad de ocurrencia)



Fuente: Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), *Cambio Climático 2001: informe de síntesis*, Cambridge University Press.

El AR5 menciona que se espera que los incrementos en los extremos de temperatura ocurran en latitudes medias en la temporada cálida y en latitudes altas en la temporada fría. Asimismo, se prevé que los extremos de temperatura ocurran en el centro y el este de América del Norte, el centro y el sur de Europa, la región del Mediterráneo (sur de Europa, el norte de África y el Cercano Oriente), Asia occidental y central y el sur de África. Además, se espera que el número de días excepcionalmente calurosos y las olas de calor aumenten en los trópicos. Igualmente, las proyecciones climáticas indican que en el futuro se espera que aumente la frecuencia no solo de olas de calor, sino de otros eventos como sequías e incendios. En estos últimos, el aumento de las temperaturas contribuye a su propagación y virulencia (IPCC, 2014a).

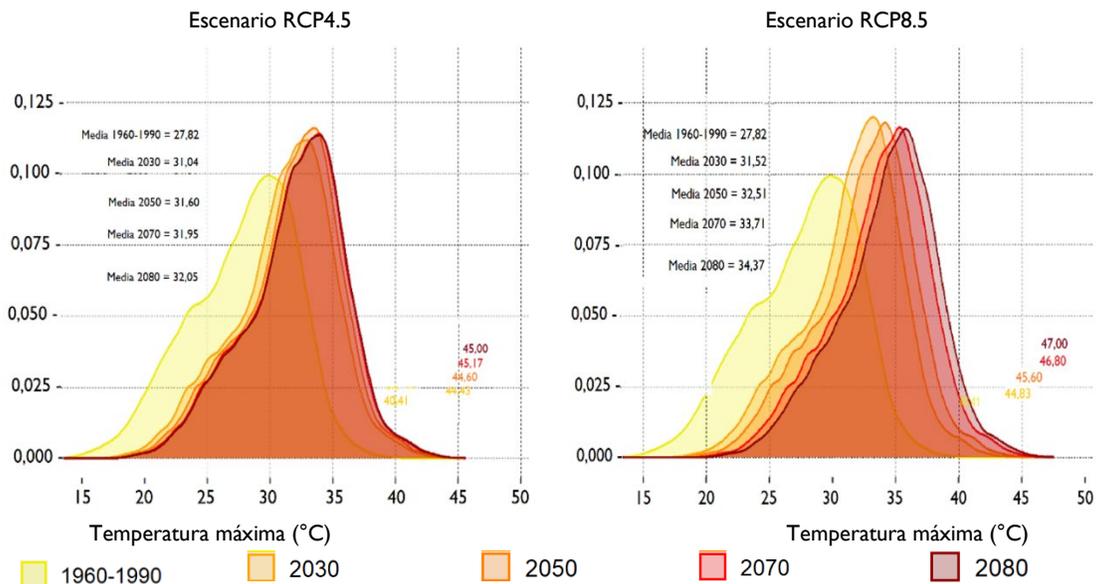
El reporte especial del IPCC de calentamiento global de 1,5 °C (Hoegh-Hulberg y otros, 2018) menciona que varios análisis revelan patrones claros de cambios en los niveles de calentamiento global, por ejemplo, el análisis sobre los cambios en la ocurrencia de olas de calor o número de días cálidos (NHD). En este último, las mayores diferencias se encuentran en los trópicos (alta confianza), debido a la baja variabilidad intraanual de la temperatura que se presenta (Mahlstein y otros, 2011; en IPCC, 2018b), aunque debe aclararse que los cambios absolutos en temperaturas extremas calientes tienden a ser mayores en latitudes medias (alta confianza). Por lo tanto, se prevé que las olas de calor extremas emerjan en los trópicos y después se generalicen. Estos resultados son consistentes con otras evaluaciones recientes mencionadas en el reporte del IPCC (2018b). Coumou y Robinson (2013) encontraron que ante un calentamiento global de 1,5 °C se proyecta que el 20% de la superficie terrestre global, principalmente regiones de baja latitud, experimente temperaturas mensuales muy inusuales durante los veranos. Asimismo, se espera que el porcentaje se duplique ante un aumento de temperatura de 2 °C de calentamiento global.

Por una parte, el calentamiento global conduciría a eventos extremos calientes más frecuentes e intensos en todas las regiones terrestres, así como a períodos cálidos más largos,

que afectarían a muchas regiones densamente habitadas (calificado como muy probable por el IPCC). Con una alta confianza se prevé que los aumentos de temperatura de los días de calor extremo en latitudes medias sean hasta dos veces el aumento de la temperatura media global de la superficie (GMST). Por otra parte, los extremos fríos serían menos intensos y frecuentes, además de que los períodos de frío serían más cortos (muy probable). Muy probablemente las temperaturas extremas en la tierra aumentarían más que la temperatura promedio global.

Los modelos climáticos que estiman la temperatura máxima en México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana sugieren que habrá un aumento en el número de eventos extremos como olas de calor. Es decir, la distribución de probabilidad de la temperatura máxima se modificaría, la media se desplazaría hacia mayores temperaturas y la probabilidad de temperatura mayor a 40 °C se incrementaría. En el gráfico VII.10 se muestra el promedio de la temperatura máxima anual en la región en el período 1960 a 1990, que fue de 27,8 °C. Se espera que el cambio climático desplazaría la media hacia mayores temperaturas. El escenario RCP4.5 sugiere que a 2030 la media sería de 30 °C y a 2080 de 32 °C. Mientras que, con el escenario RCP8.5 la media en 2030 podría llegar a 31,5 °C y en 2080 de 34,3 °C.

Gráfico VII.10
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: distribución de la temperatura máxima, climatología 1960-1990 y escenarios RCP4.5 y RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
 (En densidades de probabilidad)



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Programa de Investigación sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS-CGIAR), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

La temperatura máxima que se presentó en la región en el período 1960 a 1990 fue de 40,4 °C. De acuerdo con el RCP4.5 en 2030 podrían alcanzarse temperaturas de 44 °C y en 2080 de 45 °C. Considerando el RCP más extremo (8,5) se observa que en 2030 podrían presentarse temperaturas de hasta 44,8 °C y en 2080 de hasta 47 °C. Es importante reconocer que los escenarios RCP no prescinden de los fríos extremos, pero disminuye su probabilidad de

ocurrencia. El aumento de la variabilidad compensa parcialmente el cambio hacia eventos más cálidos. Los extremos fríos se vuelven menos frecuentes, pero no desaparecen.

2. Precipitación extrema

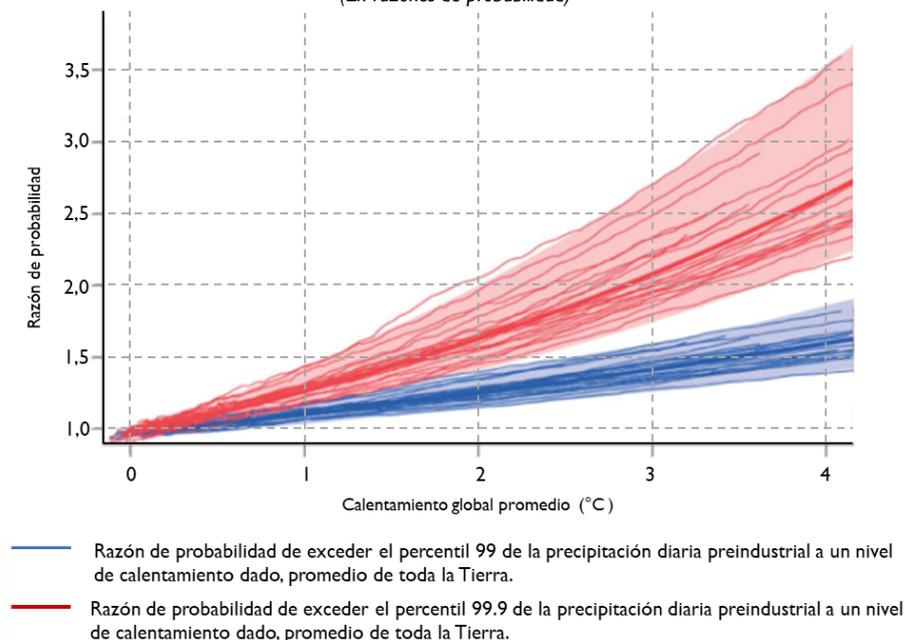
Debido a la gran variabilidad de la precipitación, en general, sus proyecciones son menos robustas que las de temperaturas medias y extremas (alta confianza). El AR5 señala que existe una confianza media en que el forzamiento antropogénico ha contribuido a una intensificación a escala global de fuertes precipitaciones durante la segunda mitad del siglo XX (Bindoff y otro, 2013; en IPCC, 2018b). Asimismo, en ese reporte se evaluaron los cambios en la precipitación asociados con el calentamiento global de $0,5^{\circ}\text{C}$ y se concluye que se pueden identificar aumentos en los extremos de la precipitación máxima acumulada en un día (RX1 day) y la precipitación máxima acumulada en cinco días consecutivos (RX5 day).

Algunos análisis encuentran que los cambios proyectados de precipitaciones fuertes son más inciertos que los de temperaturas extremas. Asimismo, los resultados de los escenarios de precipitación son menos robustos que los de la temperatura media. Algunas zonas de la región serían más propensas de ser afectadas por un probable aumento en la intensidad de los ciclones o tormentas y huracanes o por la mayor cantidad de lluvia que traerían estos eventos. Sin embargo, existe una menor confiabilidad y poca evidencia en la atribución de que el cambio climático aumente la frecuencia o la intensidad de los huracanes y tormentas tropicales.

Debido a la gran variabilidad que existen en los escenarios de cambio climático para la precipitación no es posible identificar tendencias claras en las proyecciones futuras de la precipitación extremas de México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana. Los modelos climáticos para esta región indican la distribución de probabilidad de la precipitación no se modifica significativamente. La media, varianza y forma de la distribución de probabilidad de la precipitación acumulada anual permanecerían sin cambios importantes. No obstante, se esperarían cambios en la distribución de la precipitación interanual.

Como se mencionó anteriormente, los resultados de los escenarios de precipitación son menos robustos que los de la temperatura media. No obstante, el IPCC (2018b) indica que varias regiones muestran diferencias estadísticamente significativas cuando se compara precipitaciones extremas ante incrementos de $1,5^{\circ}\text{C}$ contra un incremento de 2°C de calentamiento global. Los aumentos en precipitaciones extremas son más fuertes cuando se consideran un incremento de 2°C de calentamiento global, y hay una alta confianza de que existe una tendencia hacia aumentos en las precipitaciones extremas ante incrementos en la temperatura. En el gráfico VII.11 se muestra la proporción o razón de probabilidad (PR, por sus siglas en inglés) de superar los umbrales de precipitación preindustrial diaria a un nivel de aumento de temperatura dado. Las líneas azules muestran la razón de exceder el percentil 99 y las rojas el percentil 99,9. Se observa que conforme se incrementa la temperatura existe una mayor probabilidad de que se presenten eventos de precipitación extrema.

Gráfico VII.11
Razón de probabilidad de la precipitación extrema como función del calentamiento global
 (En razones de probabilidad)



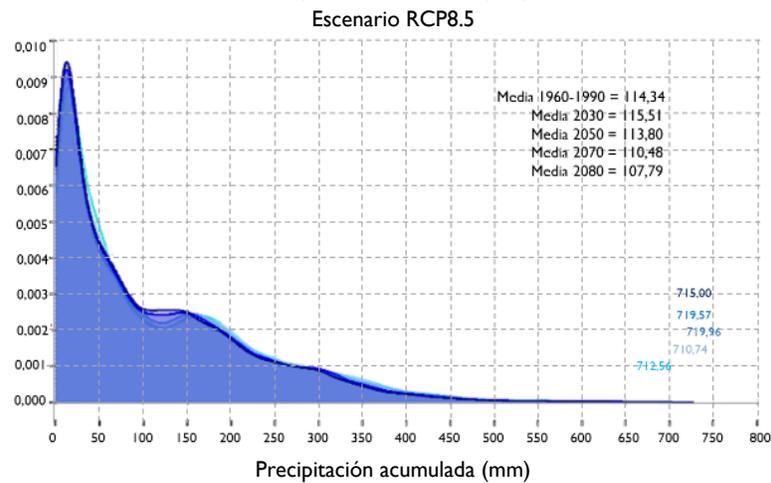
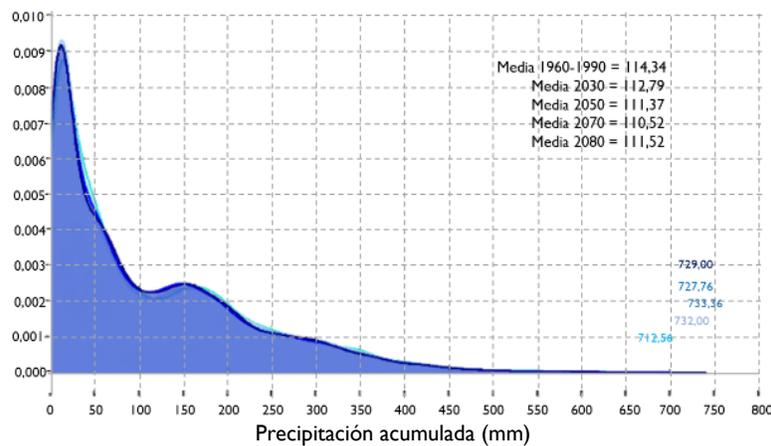
Fuente: Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), *Global Warming of 1.5°C Report*, V. Masson-Delmotte y otros (eds.), 2018.

El Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C (2018) también menciona que se han realizado investigaciones del impacto de un aumento de 2 °C de calentamiento global en distintas regiones. Por ejemplo, el estudio de Déqué y otros (2017) incluido en IPCC, 2018b sobre el impacto de un aumento de 2 °C sobre la precipitación de África tropical. Este autor encontró que la precipitación promedio no muestra una respuesta significativa ante el incremento de temperatura, debido a que el número de días con lluvia disminuye mientras que la intensidad de precipitación aumenta y la temporada de lluvias se retrasa durante el año, con menos precipitaciones a principios del verano y más precipitaciones a fines del verano. En el caso de Europa, estudios recientes (Vautard y otros, 2014; Jacob y otros, 2018; Kjellstrom y otros, 2018; en IPCC, 2018b) han demostrado que un incremento de 2 °C en el calentamiento global se asocia con un aumento en la precipitación media sobre el centro y norte de Europa en invierno, pero solo en el norte en verano, y disminuciones en la precipitación media en el centro y sur de Europa en verano.

En este mismo informe también se indica que se espera que los ciclones tropicales disminuyan en frecuencia, pero aumente el número de ciclones muy intensos (evidencia limitada, baja confianza). Se prevé que las fuertes precipitaciones asociadas con los ciclones tropicales sean más altas con un incremento en el calentamiento global de 2 °C en comparación con uno de 1,5 °C (confianza media). Algunas zonas de la región serán más propensas de ser afectadas por los efectos negativos de un probable aumento en la intensidad de los ciclones o tormentas y huracanes o por la mayor cantidad de lluvia que traerían estos eventos. En el capítulo II se presenta un resumen de los que se espera de las tormentas tropicales y otros sistemas meteorológicos para la región en este siglo de acuerdo con los escenarios del AR5 con sus respectivos niveles de confianza.

Debido a la gran variabilidad que existen en los escenarios de cambio climático para la precipitación no es posible identificar tendencias claras en las proyecciones futuras de la precipitación de México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República (véase el gráfico VII. 12). Los modelos climáticos para esta región indican la distribución de probabilidad de la precipitación no se modificaría significativamente. La media, varianza, forma de la distribución de probabilidad de la precipitación acumulada anual y extremos de precipitación permanecen sin cambios importantes. No obstante, estos son datos promedio por década y se esperarían cambios en la distribución de la precipitación intraanual, como se observó en el capítulo IV.

Gráfico VII.12
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: distribución de la precipitación acumulada, climatología 1960-1990 y escenarios RCP4.5 y RCP8.5, cortes 2030, 2050, 2070 y 2080
(En densidades de probabilidad)
 Escenario RCP4.5



1960-1990 2030 2050 2070 2080

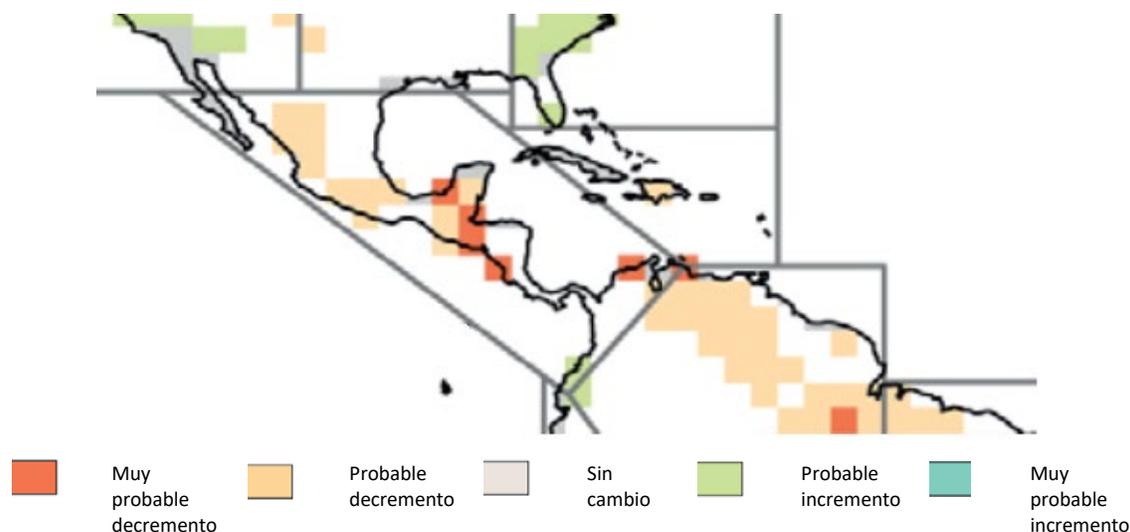
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de WorldClim [sitio web] <http://www.worldclim.org> y Programa de Investigación sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS-CGIAR), Downscaled Data Portal GCM, Spatial Downscaling Data [base de datos en línea] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: transcurso de 2019].

3. Sequía

La frecuencia de las sequías será un factor determinante para el decremento de la producción agrícola, malnutrición y enfermedades relacionadas, migración, cambios en los ecosistemas y la frecuencia con la que ocurren los incendios forestales como de su extensión. En este último caso la gestión del riesgo de incendios debe tener en cuenta la configuración del paisaje, los tipos de cobertura terrestre y el historial de perturbaciones forestales, así como los cambios en el clima. Las evaluaciones sobre sequía que se han realizado ponen de manifiesto la incertidumbre sobre las proyecciones futuras, sobre todo porque éstas incluyen una gran variedad de factores, como los efectos de las concentraciones de CO₂, la eficiencia del uso de agua de las plantas, entre otros (Orlowsky y Seneviratne, 2013; Roderick y otros, 2015; en IPCC, 2018b).

En general, las proyecciones de cambios en la sequía para escenarios de altas emisiones de GEI (RCP8.5) correspondiendo a aumentos de temperatura global de aproximadamente de 4 °C, son inciertas en muchas regiones del planeta. Algunos análisis sugieren que las regiones del norte de latitudes altas muestran respuestas robustas que tienden a aumentar la humedad, mientras que las regiones subtropicales muestran una tendencia a sequías, pero con un amplio rango de respuestas. El reporte especial de eventos extremos (SREX) (IPCC, 2012) indicó que existe una confianza media de que las sequías se intensificarán en el siglo XXI en algunas regiones, como Centroamérica y México, debido a la reducción de las precipitaciones o al aumento de la evapotranspiración. En el mapa VII.5 se muestra un análisis para la región que se deriva de la probabilidad de aumentos o disminuciones en la precipitación menos evapotranspiración (P-E) del CMIP5. Las simulaciones abarcan la gama completa de escenarios de emisión disponibles.

Mapa VII.5
México, Centroamérica, Cuba, Haití y República Dominicana: resumen de la probabilidad de decremento o incremento en la precipitación menos evapotranspiración (P-E)
 (Probabilidad)



Fuente: Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), *Global Warming of 1.5°C Report*, V. Masson-Delmotte y otros (eds.), 2018.

Las regiones del norte de latitudes altas muestran respuestas robustas que tienden a aumentar la humedad, mientras que las regiones subtropicales muestran una tendencia a sequías, pero con un amplio rango de respuestas. La incertidumbre derivada de la elección del modelo climático representa aproximadamente la mitad de la incertidumbre total en la mayoría de las regiones³⁷. Los aumentos o disminuciones en la disponibilidad de agua bajo niveles más altos de calentamiento global, es particularmente incierto en las regiones tropicales y de latitudes medias. Para mayor detalle, en los capítulos V y VI se muestran los cambios en aridez/humedad y los períodos secos en la región con cambio climático. Concluyendo se esperaría que la región, altamente vulnerable, este más expuesta a eventos extremos y experimente mayores impactos negativos en los ecosistemas, sistemas humanos y actividades productivas.

Como se mencionó anteriormente, el índice de riesgo climático ubica a los países de la región entre los más afectados por eventos climáticos extremos, lo que muestra su alto grado de exposición a las amenazas geoclimáticas y una alta vulnerabilidad. Durante las últimas décadas se ha ido registrando un número creciente de eventos extremos que incluyen tormentas, inundaciones y sequías. El IPCC ha identificado que la influencia antropogénica ha influido en los cambios de temperatura de la superficie de la tierra, en la atmósfera y en los océanos, así como en los cambios en la criosfera, el ciclo del agua y los eventos extremos. De acuerdo con la revisión de la literatura existe una alta confiabilidad de atribución en los eventos extremos relacionados con temperatura como las ondas de calor o frío donde el ser humano ha tenido efecto en la magnitud y frecuencia. Asimismo, se continúa estudiando la atribución en otros eventos extremos. Concluyendo, se esperarían que la región, altamente vulnerable, este más expuesta a eventos extremos, entre ellos temperaturas extremadamente altas, precipitaciones intensas y sequías y experimente mayores impactos negativos en los ecosistemas, la biodiversidad, los sistemas económicos y sociales, y en general sobre el bienestar de la población.

³⁷ Las simulaciones consideran todos los escenarios y un subconjunto representativo de 14 modelos climáticos.

VIII. Conclusiones y recomendaciones

La región de México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana es una de las más expuestas a los impactos del cambio climático. Esta región es frecuentemente afectada por sequías, tormentas, huracanes y el fenómeno El Niño-Oscilación Sur (ENOS). El cambio climático está magnificando la intensidad y frecuencia de estos eventos y las vulnerabilidades socioeconómicas de la población. Así, incidirá cada vez más en la evolución económica y social, dado que los factores dependientes del clima son decisivos para las actividades productivas, como la agricultura, el turismo, la hidroelectricidad y el comercio.

El Objetivo 13 de la Agenda 2030 llama a adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos, y las Naciones Unidas y otras instituciones han declarado emergencia climática. Entre las metas de este objetivo está el fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres, incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales, mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación y adaptación al cambio climático, promover mecanismos para aumentar la capacidad para la planificación y gestión eficaz. Para lograr estas metas es necesario tener disponible la mejor información climática histórica y futura a nivel nacional y subnacional.

Para cumplir con esta agenda y fortalecer las medidas específicas de implementación de las políticas públicas nacionales agropecuarias y climáticas, se hace necesario seguir avanzando en el análisis de impactos físicos, económicos y sociales del cambio climático y procesos acumulativos, como la aridez. No obstante, los análisis de impacto y el diseño de medidas requieren contar con información a nivel subnacional para identificar medidas específicas para poblaciones, sectores y regiones que ameritan ser atendidas de manera prioritaria en los esfuerzos de adaptación dentro de cada país y evitar su invisibilización en los promedios nacionales.

La información climática histórica, así como los escenarios de cambios en temperatura, precipitación y sus patrones intraanuales hacia el futuro sugieren mayores riesgos e incertidumbre para actividades productivas como la agricultura, el turismo y la hidroelectricidad. También se incrementan los riesgos a la salud humana e inseguridad alimentaria, sobre todo de un alto porcentaje de la población que habita en el Corredor Seco Centroamericano lo que podría resultar en un incremento de la migración. El efecto combinado del alza de la temperatura y los cambios de la precipitación afectan la disponibilidad de agua en la región. Un mayor calentamiento genera aumentos en la evapotranspiración ocasionando suelos más secos y mayor aridez o menor humedad en algunas regiones. En otras zonas donde los escenarios estiman un posible aumento de precipitación habría mayor humedad con consecuencias para la fenología de las plantas y la aparición de plagas y enfermedades como

la roya, que, sumado a la variabilidad en la precipitación, aumenta el riesgo de disminución en la producción de alimentos y debilitamiento de los ecosistemas para toda la región.

En esta región un sector sensible al cambio climático es el agropecuario, que representa en algunos países un porcentaje significativo del PIB (16% en Nicaragua, 12% en Honduras) y emplea a un alto porcentaje de la población (17% en El Salvador, 30% Honduras). Según las estimaciones de la iniciativa ECC CARD, los rendimientos de maíz, frijol y arroz tenderían a decrecer. Las estimaciones iniciales a nivel regional indican que los rendimientos de maíz disminuirían 35%, los del frijol 43% y el arroz 50% como promedio de Centroamérica en el escenario más pesimista (A2) entre el período 2001-2009 a 2100 si no se toman medidas de adaptación (CEPAL y CAC/SICA, 2013). Estos granos son fundamentales en la provisión de calorías y proteínas en un importante sector de la población de la región (CEPAL, CAC/SICA y SIECA, 2017).

Asimismo, la productividad del café en Centroamérica y la República Dominicana también disminuiría 48% como consecuencia de cambios en la temperatura y precipitación, de este producto depende el sustento de millones de familias en la región (CEPAL y CAC/SICA, 2014). También hay estimaciones del impacto potencial del cambio climático en la biodiversidad y los ecosistemas, ya devastados por la actividad humana. El índice de biodiversidad potencial (IBP) se reduciría aproximadamente 58% a 2100 en el escenario A2 con respecto al período 1950-2000. Los países más afectados serían Guatemala, Nicaragua, El Salvador y Honduras con reducciones entre 75% y 70% del IBP en el escenario A2 (CEPAL y otros, 2011).

En los análisis de la iniciativa ECC CA se estima que los cambios potenciales en la temperatura y en la precipitación generarían mayores riesgos e incertidumbre en la hidroelectricidad. El efecto combinado del alza de la temperatura y los cambios de la precipitación afectan la evapotranspiración en las cuencas y, por ende, su caudal, así como la evaporación en los embalses hidroeléctricos (CEPAL y otros, 2012; CEPAL y otros 2017). Asimismo, los múltiples impactos directos e indirectos del cambio climático exacerbarán las diferentes formas y fuentes de vulnerabilidad de determinadas poblaciones. La región posee un mosaico de nichos ecológicos favorables a la transmisión de enfermedades asociadas a los cambios de clima por su variada topografía y por estar estrechamente limitado por dos océanos. Cerca de la mitad de la población de Centroamérica vive en pobreza y alrededor de una tercera parte en pobreza extrema, especialmente en las zonas rurales. El cambio climático podría incrementar los persistentes niveles de desigualdad socioeconómica.

Desde el inicio del proyecto de la ECC CA en 2008 se han presentado avances en diversas instituciones globales, regionales y nacionales en la generación de información climática y su disponibilidad para el público en general. Con el AR5 del IPCC, instituciones de investigación globales y regionales, como CGIAR-CCAFS, publicaron los resultados de los escenarios de cambio climático, lo anterior incluye un conjunto de modelos y cortes que ellos seleccionaron con acceso fácil para descarga de los usuarios en formato ráster. También, las fuentes de información histórica de datos globales de clima se han actualizado con mayor regularidad. La Unidad de Investigación del Clima (Climate Research Unit, CRU, por sus siglas en inglés) genera información por mes sobre la evolución de la temperatura y precipitación, esta información está disponible en su página web. En la última década, el CRU mejoró sus

métodos de interpolación, su resolución y ha aumentado el número de estaciones meteorológicas. También se ha mejorado el acceso a esta información y los datos globales pueden descargarse también en formato ráster.

Al mismo tiempo, diversos programas de *software* libre permiten leer los archivos ráster, por ejemplo, los *softwares* QGIS, R y Python. La capacitación en estos programas se vuelve fundamental para que las instituciones nacionales avancen en la adquisición de capacidades de gestión, análisis e interpretación de la información. El presente estudio realizó una actualización de la información de los escenarios de cambio climático de temperatura y precipitación, así como un análisis de la información histórica de variables climáticas y de eventos extremos beneficiándose de estos avances.

Como parte de este esfuerzo para fortalecer capacidades técnicas, esta copublicación presenta los pasos que se deben seguir para acceder a esta información y realizar un análisis a nivel subnacional de la información de temperatura y precipitación y sus cambios históricos y futuros, y con base en esta información, generar análisis prospectivo de aridez y meses secos en México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana; y complementar este análisis con la evolución histórica (tormentas tropicales y huracanes, sequías, inundaciones, temperaturas extremas) y prospectiva (temperatura máxima y precipitación extrema) de los eventos extremos que impactan a la región a nivel subnacional. No obstante, hay una variedad de análisis estadístico y visual que expertos de diversas disciplinas pueden realizar dependiendo del objetivo de sus estudios.

Para el análisis histórico se utilizó toda la serie disponible de información SIG de la página web del CRU que va de 1900 a 2018 a nivel mensual de temperatura media y precipitación. Mientras que para el análisis de cambio climático se trabajó con los escenarios del AR5 del IPCC denominados trayectorias de concentración representativa RCP (por sus siglas en inglés) que hacen referencia a la trayectoria de concentración de emisiones, la emisión de contaminantes atmosféricos y el uso de suelo hasta 2100. Estos escenarios identifican su forzamiento radiativo total para el año 2100 que oscila entre 2,6 y 8,5 W/m² (vatios por metro cuadrado) (IPCC, 2014). Se eligió el escenario intermedio RCP4.5 y el escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEL, RCP8.5. El escenario RCP4.5 supone mayores reducciones de emisiones que la sumatoria de las propuestas nacionales en sus NDC registradas para 2030 (PNUMA, 2019), mientras que la trayectoria actual de emisiones es muy cercana a las emisiones del escenario extremo RCP8.5. Tanto para el análisis histórico como de cambio climático los cambios se muestran con respecto al período base 1960-1990. Se utilizaron cuatro cortes futuros que representan períodos de 30 años nombrados como 2030 (2020-2049), 2050 (2040-2069), 2070 (2060-2089) y 2080 (2070-2099). Los principales hallazgos se describen a continuación.

Existe significativa evidencia y mayor certidumbre con respecto a las tendencias de aumento de temperatura. En la última década se han experimentado las temperaturas globales más altas que se tienen registradas desde 1850. En el período de 2011-2019 la anomalía global (superficie y océano) fue de 0,93 °C con respecto al período preindustrial (1850-1900). La anomalía de la temperatura de la superficie terrestre fue de 1,44 °C en la década de 2011-2019 con respecto a la climatología de la era preindustrial y ha sido superior al incremento de la temperatura en los océanos. Todos los países en la región enfrentaron aumentos por arriba de 0,5 °C entre 2011 y 2018 con respecto al promedio 1960-1990, con un rango de 1,05 °C en México

a 0,59 °C en Costa Rica. Todos los meses han presentado aumentos de temperatura con un mayor incremento entre diciembre y febrero en gran parte de la región.

Con el cambio climático los escenarios también indican incrementos diferenciados entre regiones desde 2030. Con el escenario menos extremo RCP4.5 en 2030 se superaría el umbral de 1,5 °C en el norte de México con respecto al promedio 1960-1990, y en el resto de México, el norte de Centroamérica, Haití y la República Dominicana estarían cerca de ese umbral. Mientras Cuba, Nicaragua, Costa Rica y Panamá tendrían incrementos de alrededor de 1 °C. Por otra parte, en el escenario más extremo RCP8.5 ya se superaría la anomalía de 1,5 °C en gran parte de México, Belice, Guatemala, El Salvador y el occidente de Honduras en 2030 con respecto al período 1960-1990, y el resto de la región estaría cerca de esa anomalía. Hacia 2080, con RCP4.5, los aumentos de temperatura, como promedio de las anomalías municipales, estarían en un rango de 1,81 °C en Costa Rica a 2,45 °C en México y con RCP8.5 los incrementos irían de 3,4 °C en Cuba a 4,6 °C en México y Guatemala con respecto al período 1960-1990, con cambios diferenciados entre municipios.

Con respecto a las tendencias de precipitación hay mayor diversidad e incertidumbre. Aunque en los últimos años no hay evidencia de un cambio en la tendencia de la precipitación de la región, hay consideraciones adicionales que deben tenerse en cuenta. Por un lado, las variaciones anuales de precipitación son marcadas y probablemente el factor clave que controla las variaciones hidrológicas intraanuales, los cambios en la temperatura podrían afectar esta variabilidad y especialmente las tendencias en las variables hidrológicas como la escorrentía y la humedad del suelo a través de su influencia en la evapotranspiración. Por el otro, las estimaciones de los modelos climáticos globales sugieren que los cambios que se producirán en el ciclo del agua en respuesta al calentamiento durante el siglo XXI no serán uniformes, sino que podrán presentar una variación espacial significativa, especialmente en el escenario RCP8.5. Algunas regiones experimentarían aumentos y otras, disminuciones, e incluso habría regiones que no experimenten cambios significativos. No obstante, existe un nivel de confianza alto en que, conforme aumenten las temperaturas globales, se agudizará el contraste de la precipitación media anual entre regiones secas y húmedas y entre la estación húmeda y la seca.

Los cambios estimados en el análisis presentado en esta copublicación sugieren que la variación en el patrón de precipitación estacional por país en los cortes 2030, 2050, 2070 y 2080 con el escenario RCP8.5 son mayores que con el escenario RCP4.5. En ambos escenarios los cambios más significativos sucederían durante la época de estación lluviosa, es decir durante los meses de mayo a octubre. En general se esperan reducciones en la precipitación durante estos meses. La canícula, que varía dentro de la región, podrá intensificarse con una reducción de la precipitación en este período. A excepción de México, Nicaragua y Panamá, los demás países de la región podrían experimentar reducciones en los dos picos máximos de precipitación. Lo anterior podría generar una canícula más marcada y prolongada, durante varias semanas entre julio y septiembre, con mayores sequías.

De acuerdo con el análisis del índice de aridez utilizado en este documento, en el período 1960-1990 a nivel departamental, la región norte de México fue clasificada como árida y semiárida, la región del occidente, El Bajío y Yucatán en México se clasificó como subhúmeda, el centro y sur de México, Cuba, Haití, la República Dominicana, el norte de Belice, El Salvador,

el centro y el Pacífico de Honduras y el Pacífico de Nicaragua se clasificaron como húmedo, y Tabasco en México, el sur de Belice, Guatemala, el Atlántico de Honduras y Nicaragua, Costa Rica y Panamá se clasificaron como perhúmedos. En el período 2011-2018 el valor del índice de aridez aumentó (mayor humedad) hasta en cinco unidades con respecto a 1960-1990 en toda la región del golfo de México, en el centro, en el Pacífico sur, en Baja California Sur, la península de Yucatán de México, lo mismo en Belice, el Petén, el occidente de Cuba y en el oriente de la República Dominicana. El resto de la región disminuyó el valor del índice (mayor aridez), con disminución en más de cinco unidades en el Atlántico de Nicaragua, Costa Rica y el occidente de Panamá, que son las áreas más húmedas de la región. Estos cambios han resultado en una disminución de los departamentos clasificados como perhúmedos y una ligera disminución en los clasificados como subhúmedos, y un aumento en los departamentos húmedos entre 2011 y 2018.

A nivel municipal se observa una clasificación del índice de aridez más detallada. En el período 1960-1990 se observan algunos municipios clasificados como hiperárido en la península de Baja California y Sonora en el noroeste de México. Una región más amplia clasificada como árida y semiárida desde el norte hacia el centro de México. Los municipios clasificados como subhúmedos también son encontrados desde el norte hacia el sur y Yucatán en México, y se observan algunos municipios con estas condiciones en Guatemala, Honduras, Nicaragua, Cuba y la República Dominicana. Las regiones húmedas se encuentran desde las partes altas del noroeste de México y en otros municipios del sur y centro de este país, en algunos municipios de Guatemala, en El Salvador, gran parte de Honduras, el Pacífico de Nicaragua y el resto de Cuba, Haití y la República Dominicana.

La zona perhúmeda se encuentra desde el estado de Veracruz hacia el sur de México, Guatemala, Belice y desde la región del Atlántico de Honduras hasta Panamá. Con los escenarios de cambio climático los municipios clasificados como perhúmedos y húmedos sufrirían una mayor pérdida en el valor del índice de aridez en más de 10 unidades a 2080 (mayor aridez) en el escenario RCP8.5 con respecto al período 1960-1990, mientras que en el norte de México reducciones de hasta cinco unidades del índice harían que aumenten los municipios clasificados como semiáridos, áridos e hiperáridos, con mayores cambios en RCP8.5 que en el escenario RCP4.5. La condición de semiárido y subhúmedo serían las clasificaciones que más aumentarían su proporción de municipios en toda la región.

El indicador de meses secos es un complemento del análisis de precipitación para evaluar la estación seca. Este indicador muestra que en el período 1960-1990 predominan los municipios con 5 y 6 meses secos con 38% del total, le sigue la clasificación de 0 y 1 mes seco con 18% de los municipios (principalmente en el Atlántico de Centroamérica), con 7 y 8 meses secos 14%, con 4 meses secos 13%, con 3 meses secos 8%, con 2 meses secos 5% y con más de 9 meses secos 4% de los municipios. En 2080 estas proporciones serían de 30% para 5 y 6 meses secos, 20% para 4 meses secos, 19% para 7 y 8 meses secos, 12% para 0 y 1 mes seco, 9% para 3 meses secos, 5% para 2 meses secos y 5% para más de 9 meses secos en RCP4.5; y en RCP8.5 las proporciones serían de 29% para 5 y 6 meses secos, 22% para 4 meses secos, 21% para 7 y 8 meses secos, 9% para 3 meses secos, 7% para 0 y 1 mes seco, 6% para más de 9 meses secos y 5% para 2 meses secos. De los municipios que dejarían de tener 5 y 6 meses secos algunos incrementarían su número de meses secos a más de 7 meses secos en el norte, centro y pacífico de México y otros disminuirían sus meses secos a 4 meses secos en El Salvador, Guatemala,

Cuba y Panamá principalmente, con mayor proporción a más meses secos en RCP8.5. Estos cambios podrían impactar actividades como la agricultura, la generación de hidroelectricidad y la disponibilidad de agua, así como afectaciones a la salud humana, la biodiversidad y los ecosistemas.

En las últimas décadas, pero sobre todo a partir de la década de 1970, se observa un incremento sostenido en el número de eventos extremos, especialmente tormentas tropicales, huracanes e inundaciones. En cuanto a las tormentas y huracanes, en las décadas de 1980 y 1990, se reportaron 25 y 62 eventos respectivamente en la base de datos de EM-DAT. En el período 2000 a 2009 se reportaron 107 tormentas y huracanes en la región. Las cifras preliminares para el período 2010 a 2019 reportaron 90 tormentas y huracanes en la región. El impacto de estos eventos en la población y la economía de la región es significativo.

En la región también han ocurrido una gran cantidad de inundaciones. En las décadas de 1980 y 1990 el número reportado en la base de datos de EM-DAT fue de 45 y 57 respectivamente. Durante el período 2000 a 2009 tuvieron lugar 121 inundaciones y para el período 2010 a 2019 se reportaron 105 inundaciones en la región, de forma preliminar. Las sequías también son eventos frecuentes en la región. En la década de 1980 se registraron siete eventos de sequía; en la década de 1990 fueron 16; en el período 2000 a 2009 se registraron 15 y las cifras preliminares para el período 2010 a 2019 se registraron 19 eventos. En menor medida también han ocurrido eventos como temperaturas extremas, aluviones, incendios y deslizamientos.

Existe una serie de análisis generados durante las últimas décadas por los gobiernos de la región con el apoyo de agencias de las Naciones Unidas, que arrojan datos sobre las consecuencias económicas de los desastres con respecto a los impactos físicos directos o pérdidas de capital fijo y de inventario. Existe menor información disponible sobre los efectos indirectos y secundarios sobre la actividad económica, como cambios de política fiscal, consecuencias de la reasignación de recursos a largo plazo y pérdidas de capital humano, ya que por lo general este tipo de análisis son omitidos o subestimados. Resulta complejo aislar los impactos específicos de los desastres sobre el crecimiento económico a largo plazo, como impactos sobre la demanda agregada, la función de producción o el gasto público.

Adicionalmente, los efectos observables pueden ser distintos a corto y largo plazo, y dependen del momento del ciclo económico, de la política económica instrumentada en respuesta al desastre y del tipo y magnitud del desastre; además, el impacto neto final del desastre depende del nivel de desarrollo de las instituciones, del ingreso por habitante, del nivel de educación de la población, del grado de apertura de la economía y de los tipos de daño al capital. Los impactos son más intensos en países con poblaciones más vulnerables o donde hay concentración de alguna actividad particularmente afectada por el desastre (CEPAL, 2011).

Los análisis del IPCC (2014) han identificado la influencia antropogénica en los cambios de temperatura de la superficie de la tierra, en la atmósfera y en los océanos, así como en los cambios en la criosfera, el ciclo del agua y los eventos extremos. Desde el primer informe del IPCC se han incluido dos líneas de análisis: la detección de que el clima y sus efectos están cambiando con respecto a lo conocido en el pasado reciente y la atribución de que las causas de tales cambios tienen un origen asociado con la actividad humana y por lo tanto no se trata de un proceso natural. De acuerdo con la revisión reciente de la literatura, incluido el IPCC,

Zhai, Zhou y Chen (2018) y el NAS (2016) concluyeron que existe una alta confiabilidad de atribución en los eventos extremos relacionados con temperatura como las ondas de calor o frío donde el ser humano ha tenido efecto en la magnitud y frecuencia. Hay confiabilidad media de atribución en el caso de precipitación extrema y sequías.

Finalmente, la menor confiabilidad de atribución se presenta en eventos como huracanes, ciclones tropicales, incendios forestales y tormentas severas; este nivel de confiabilidad se debe a la necesidad de simulaciones con alta resolución y una serie histórica más larga. Aunque esta visión aún no se ha comprobado científicamente, la detección y atribución de eventos extremos debe seguir siendo analizada a nivel global y regional. Lo anterior es fundamental para analizar el comportamiento de la frecuencia e intensidad de los eventos extremos en el futuro y para determinar políticas adecuadas que ayuden a disminuir la vulnerabilidad de la población.

Para desarrollar un análisis de los procesos asociados al cambio climático se requiere de información climática de alta calidad y una amplia base de datos sobre clima, sistemas sociales, económicos, biológicos, ambientales y de eventos extremos. La información histórica y los escenarios climáticos son insumos estratégicos para dicho análisis, generalizar su uso ayuda a desarrollar instrumentos prácticos para la implementación de políticas públicas en cambio climático y sectoriales.

Se aprecia un importante avance y fortalecimiento de las instituciones meteorológicas nacionales de la región, que en el caso de los países SICA, bajo la coordinación del Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH) han aumentado sus capacidades y trabajan de manera conjunta con otras instituciones sectoriales en la generación y divulgación de pronósticos a corto plazo de sequía, precipitación, tormentas tropicales y huracanes dirigido a sectores como la agricultura, la seguridad alimentaria y la reducción de desastres. Adicionalmente en 2020 publicaron su visor de escenarios de cambio climático generados con apoyo de Euroclima+ y la Agencia Estatal de Meteorología de España (AEMET).

Igualmente, hay importantes contribuciones de la academia y universidades de la región que han avanzado en el uso, análisis y evaluación de los modelos climáticos que mejor representaron el clima en la región. Esta copublicación tomó en consideración la clasificación de Hidalgo y Alfaro (2015), quienes evaluaron modelos climáticos e hicieron una selección de ellos. La colaboración entre instituciones nacionales, regionales e internacionales también se evidencia en la disponibilidad de datos para su procesamiento como, por ejemplo, la base de datos global de cambio climático CCAFS-Climate, utilizadas en el análisis aquí publicado.

Este documento también responde a la Estrategia de Agricultura Sostenible Adaptada al Clima para la región del SICA 2018-2030 (EASAC) del CAC/SICA (2017) que establece en sus medidas, el fortalecimiento y la articulación de los mecanismos regionales de generación e intercambio de información climática y agroclimática y el fortalecimiento de las bases de datos climáticas regionales, particularmente, en su eje 2 sobre gestión integral del riesgo y adaptación al clima en su línea estratégica 6 sobre mejoramiento continuo de la información y el conocimiento para la gestión del riesgo y la adaptación de la agricultura al cambio climático. De la misma manera, este documento es un apoyo a la Estrategia Regional de Cambio Climático (ERCC) 2018-2022 (CCAD y SICA, 2018) en sus objetivos de adaptación al cambio

climático y reducción de vulnerabilidades, y su eje de implementación de gestión de conocimiento.

En el tema de desastres también se ha fortalecido las capacidades y herramientas del Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres en América Central y República Dominicana (CEPREDENAC) y sus instituciones miembros. Su Política Centroamericana de Gestión Integral del Riesgo (PCGIR) tiene como compromiso mejorar las herramientas de información mediante una plataforma que facilite la comprensión del riesgo y que al mismo tiempo identifique vulnerabilidades, así como la comprensión del cambio climático y su impacto en la vulnerabilidad de la población (CEPREDENAC, 2017).

En México hay mayor disponibilidad de información climática histórica a nivel subnacional del Servicio Meteorológico Nacional y también se ha ampliado la información disponible de escenarios de cambio climático. El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) publicó las capas de anomalías para cuatro de los modelos de circulación general que simulan de mejor manera el clima en México para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 para tres períodos futuros y las variables de precipitación, y temperatura media, mínima y máxima. Por su parte el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) da un seguimiento y realiza la evaluación económica de los diversos desastres que se presentan en México, además elaboró un Atlas Nacional de Riesgo.

Un tema importante en esta agenda se relaciona con las fuentes de financiamiento de estas instituciones generadoras de información y con el acceso de los tomadores de decisiones, técnicos, académicos, científicos y el público en general a las bases de datos, especialmente derivadas de los costos y su comercialización (Basher, 1999). Contar con información disponible de los sistemas meteorológicos nacionales y de las instituciones globales es indispensable para generar análisis relevante para cada país y proponer e identificar más claramente opciones de implementación de políticas de cambio climático y sectoriales. Es indudable la mejora en el acceso y generación de información climática en los últimos años, pero aún hay retos y oportunidades en el tema de datos climáticos y otros sectores relevantes impactados por el cambio climático.

Habiendo concluido este proceso de análisis y discusión de los resultados con el GTCCGIR de CAC, se presentan algunas recomendaciones para acciones futuras:

- Incrementar las capacidades de técnicos nacionales de las instituciones meteorológicas, académicas y sectoriales para acceder y transformar la información histórica y de escenarios de cambio climático; esto es relevante frente al próximo lanzamiento del sexto reporte del IPCC que tendrá nuevos escenarios (AR6). Lo anterior debe acompañarse con programas de fortalecimiento de capacidades y asistencia técnica. Los interesados podrán solicitar cursos sobre el acceso y uso de datos climáticos a diferentes niveles subnacionales.
- Ampliar el uso de herramientas como sistemas de información georreferenciada (SIG) que permitan mejorar el diseño de medidas para reducir la vulnerabilidad o la exposición de poblaciones urbanas y rurales, frente al aumento de la frecuencia de eventos extremos y su probable intensificación a causa del cambio climático.

- Promover el intercambio de conocimiento, experiencias y lecciones aprendidas entre países. Este tipo de actividades podrían institucionalizarse en las diferentes mesas agroclimáticas intrarregionales.
- Divulgar y utilizar la información climática con acceso amplio tanto para los tomadores de decisiones, como para actores relevantes (por ejemplo, los productores, técnicos nacionales y académicos de diferentes disciplinas), con adecuaciones para cada público. Incluye el apoyo, a solicitud de los socios, para proporcionar insumos a comunicadores con el fin de preparar material de divulgación útil para los actores relevantes, como mapas o datos concretos para regiones subnacionales específicas.
- Aumentar el uso de información climática de fuentes globales, nacionales, subnacionales y de estaciones meteorológicas que ayuden a diseñar programas, proyectos y medidas para implementar políticas nacionales de cambio climático y sectoriales, incluyendo las NDC, tanto con respecto a la adaptación como a la mitigación.
- Comunicar el conocimiento sobre los escenarios de cambio climático a todos los sectores de la sociedad, en especial a los de mayor vulnerabilidad y que enfrentarán los posibles impactos negativos, como los pequeños productores de granos básicos y cultivos de exportación como el café. Esto incluye desarrollar material adecuado para distintos públicos, realizar campañas de información pública y crear espacios para la participación e intercambio de información, como las mesas agroclimáticas locales que promuevan varios ministerios/secretarías de agricultura y otras instituciones en la región.
- Fomentar iniciativas de organizaciones y productores agropecuarios para detectar y medir cambios en su clima local y analizar las implicaciones en sus actividades productivas y otras amenazas a su bienestar; esto incluye la comunicación con otros proveedores de información como los servicios meteorológicos, ministerios/secretarías de agricultura y académicos.
- Aumentar los análisis del impacto en sectores económicos y sociales, como salud, pobreza, desigualdad, migración, producción agropecuaria, entre otros, para afinar las propuestas de medidas de adaptación, extensión agrícola, inversión en infraestructura adaptada al cambio climático, medidas de prevención de eventos extremos, sistemas locales y nacionales de registro de datos climáticos y seguros agrícolas. Los análisis deben fortalecer las recomendaciones de adaptación al cambio climático a nivel local, municipal o regional.
- Generar análisis y divulgar datos subnacionales de sectores impactados por el cambio climático como agricultura, pesca, recursos hídricos, seguridad alimentaria, generación de electricidad, enfermedades sensibles al clima, turismo, bosques, biodiversidad, entre otros.
- Avanzar en la implementación de las políticas nacionales de cambio climático en el sector agropecuario en el marco de la EASAC avalada por el Consejo Agropecuario Centroamericano, incluyendo sus estrategias y medidas con respecto a sistemas de información.

Bibliografía

- Abram, N. y otros (2019), "Framing and context of the report", *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, Summary for policymakers*.
- AEMET (Agencia Estatal de Meteorología, Gobierno de España) (2020), *Meteoglosario visual, diccionario ilustrado de meteorología* [en línea] <https://meteoglosario.aemet.es/>.
- Allen, M. R. y otros (2018), "Framing and context", *Global Warming of 1.5°C, An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, V. Masson-Delmotte y otros (eds.).
- American Meteorological Society (2006), *Glossary of Meteorology* [en línea] <http://amsglossary.allenpress.com/glossary>.
- Andrade, S. y otros (2017), "Enfermedades transmitidas por vectores y cambio climático", *Investigación y ciencia*, vol. 72.
- Anemüller, S., S. Monreal y C. Bals (2006), *Global Climate Risk Index 2006: Weather Related Loss Events and Their Impacts on Countries in 2004 and in a Long-term Comparison*, Germanwatch.
- Balmaseda, M. A. y otros (2013), "Distinctive climate signals in reanalysis of global ocean heat content", *Geophysical Research Letters*, vol. 40, N° 9.
- Baltas, E. (2007), "Spatial distribution of climatic indices in northern Greece", *Meteorological Applications*, vol. 14.
- Barnett, T. P. y otros (2008), "Human-induced changes in the hydrology of the western US", *Science*, vol. 319.
- Basher, R. E. (1999), "Data requirements for developing adaptations to climate variability and change", *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 4.
- Bengtsson, L. y K. I. Hodges (2011), "On the evaluation of temperature trends in the tropical troposphere", *Clim. Dyn.*, vol. 36.
- Bertram, C. y otros (2015), "Carbon lock-in through capital stock inertia associated with weak near-term climate policies", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 90.
- Bindoff, N. L. y otros (2019), "Changing ocean, marine ecosystems, and dependent communities", *IPCC Special report on the ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Summary for policymakers*.
- _____(2013), "Detection and attribution of climate change: from global to regional", *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, T. F. Stocker y otros (eds.), Londres, Reino Unido y Nueva York, Estados Unidos, Cambridge University Press.
- Bradstock, R. A. (2010), "A biogeographic model of fire regimes in Australia: current and future implications", *Global Ecology and Biogeography*, vol. 19.

- Budowski, G. (1965), *Distribution of tropical American rain forest species in the light of successional processes*, vol. 15, Turrialba.
- Burkett, V. R. y otros (2014), "Point of departure", capítulo 1, *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Part A: Global and Sectoral Aspects, contribución del Grupo de Trabajo I para el Quinto Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), C. B. Field y otros (eds.), Londres, Reino Unido y Nueva York, Estados Unidos, Cambridge University Press.
- Butler, J. H. y S. A. Montzka (2020), *The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI)* [en línea] <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>.
- Butler, A. H., D. W. Thompson, y R. Heikes (2010), "The steady-state atmospheric circulation response to climate change-like thermal forcings in a simple general circulation model", *Journal of Climate*, vol. 23, issue 13.
- CAC/SICA (Consejo Agropecuario Centroamericano/Sistema de la Integración Centroamericana) (2017), *Estrategia agricultura sostenible adaptada al clima para la región del SICA (2018-2030)*, San José, Costa Rica.
- Cai, W. (2020), "Here's how climate change may make Australia's wildfires more common", entrevistado por Carolyn Gramling, *Science News* [en línea] <https://www.sciencenews.org/article/how-climate-change-may-make-australia-wildfires-more-common>.
- Cai, W., T. Cowan y M. Raupach (2009), "Positive Indian Ocean Dipole events precondition southeast Australia bushfires", *Geophysical Research Letters*, vol. 36.
- Cai, W. y otros (2014), "Increased frequency of extreme Indian Ocean dipole events due to greenhouse warming", *Nature*, vol. 510.
- Calvo, O. D. y otros (2018), "Impactos de las sequías en el sector agropecuario del Corredor Seco Centroamericano", *Agronomía Mesoamericana*, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- CAZALAC/PHI-UNESCO (Centro del Agua para Zonas Áridas de América Latina y el Caribe/ Programa Hidrológico Internacional-Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) (2005), *Atlas de zonas áridas de América Latina y el Caribe*, K. Verbist y otros, PHI-VII documento técnico, N° 25.
- CCAD/SICA (Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo/Sistema de Integración Centroamericana) (2018), *Estrategia Regional de Cambio Climático (ERCC)* actualizada, Plan de acción 2018-2022.
- CCAFS (Research Programme on Climate Change, Agriculture and Food Security) (s/f), Downscaled Data Portal GCM, Programa de Investigación sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS) de CGIAR [sitio web] http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/ [fecha de consulta: 2019].
- Ceballo, O. (2002), "Bioclimatología de los Ecosistemas Naturales en la Provincia de Sancti Spiritus", *ResearchGate* [en línea] https://www.researchgate.net/publication/264782368_Bioclimatologia_de_los_Ecosistemas_Naturales_en_la_Provincia_de_Sancti_Spiritus.
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres) (2004), "Inundaciones", *Serie fascículos*.
- CEPAL/CAC-SICA (Comisión Económica para América Latina y el Caribe/Consejo Agropecuario Centroamericano-Sistema de la Integración Centroamericana) (2014), *Impactos potenciales del cambio climático sobre el café en Centroamérica* (LC/MEX/L.1169), México, D. F.
- _____(2013), *Impactos potenciales del cambio climático sobre los granos básicos en Centroamérica* (LC/MEX/L.1123), México, D. F.

CEPAL/CAC-SICA/SIECA (Comisión Económica para América Latina y el Caribe/Consejo Agropecuario Centroamericano-Sistema de la Integración Centroamericana/Secretaría de Integración Económica Centroamericana) (2017), *Seguridad alimentaria y nutricional en Centroamérica y la República Dominicana: explorando los retos con una perspectiva sistémica* (LC/MEX/TS.2017/29), Ciudad de México.

CEPAL/INDOCAFE/CNCCMDL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe/Instituto Dominicano del Café/Consejo Nacional para el Cambio Climático y Mecanismo de Desarrollo Limpio) (2018), *Café y cambio climático en la República Dominicana: impactos potenciales y opciones de respuesta* (LC/MEX/TS.2018/24), Ciudad de México.

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) y otros (2017), *Impactos potenciales del cambio climático en el ámbito hidroeléctrico en Panamá y la República Dominicana* (LC/MEX/TS.1217/28), Ciudad de México, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)/Fondo Nórdico de Desarrollo (FND)/Banco Interamericano de Desarrollo (BID)/ Secretaría Nacional de Energía de Panamá/Ministerio de Energía y Minas de la República Dominicana MEM).

_____ (2012a), *La economía del cambio climático en Centroamérica. Impactos potenciales en los patrones intraanuales y espaciales del clima. Serie técnica 2012* (LC/MEX/L.1073), México, D. F., Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)/Consejo de Ministros de Hacienda o Finanzas de Centroamérica, Panamá y República Dominicana (COSEFIN)/Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo-Sistema de la Integración Centroamericana (CCDA-SICA)/Departamento del Gobierno Británico de Desarrollo Internacional (UKAID)/Agencia de Cooperación para el Desarrollo de Dinamarca (DANIDA).

_____ (2012b), *La economía del cambio climático en Centroamérica. Impactos potenciales en la aridez y los meses secos* (LC/MEX/L.1074), México, D.F., Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)/Consejo de Ministros de Hacienda o Finanzas de Centroamérica, Panamá y República Dominicana (COSEFIN)/Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo-Sistema de la Integración Centroamericana (CCDA-SICA)/Departamento del Gobierno Británico de Desarrollo Internacional (UKAID)/Agencia de Cooperación para el Desarrollo de Dinamarca (DANIDA).

_____ (2012c), *La economía del cambio climático en Centroamérica: dos casos de impactos potenciales en la generación de hidroelectricidad. Serie técnica 2012* (LC/MEX/L.1070), México, D. F., Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)/Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa de El Salvador (CEL)/Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador (MARN)/Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo-Sistema de la Integración Centroamericana (CCAD-SICA)/Departamento del Gobierno Británico de Desarrollo Internacional (UKAID)/Agencia de Cooperación para el Desarrollo de Dinamarca (DANIDA).

_____ (2012d), *La economía del cambio climático en Centroamérica: evidencia de las enfermedades sensibles al clima. Serie técnica 2012* (LC/MEX/L.1069), México, D. F., Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)/Consejo de Ministros de Hacienda o Finanzas de Centroamérica, Panamá y República Dominicana (COSEFIN)/Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo-Sistema de la Integración Centroamericana (CCDA-SICA)/Consejo de Ministros de Salud de Centroamérica y República Dominicana (COMISCA)/Departamento del Gobierno Británico de Desarrollo Internacional (UKAID)/Agencia de Cooperación para el Desarrollo de Dinamarca (DANIDA).

- ____ (2011), *La economía del cambio climático en Centroamérica. Reporte técnico 2011* (LC/MEX/L.1016), México, D.F., Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)/Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo-Sistema de la Integración Centroamericana (CCDA-SICA)/Departamento del Gobierno Británico de Desarrollo Internacional (UKAID)/Agencia de Cooperación para el Desarrollo de Dinamarca (DANIDA).
- CEPREDENAC (Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central) (2017), *Política Centroamericana de Gestión Integral de Riesgo de Desastres PCGIR, Armonizada con el marco de Sendai para la reducción de riesgos de Desastres 2015-2030*, Guatemala.
- Cheng, L. y otros (2020), "Record-setting ocean warmth continued in 2019", *Advances in Atmospheric Sciences*, vol. 37.
- ____ (2019), "How fast are the oceans warming?", *Science*, vol. 363, issue 6423, Sciencemag.org.
- ____ (2017), "Improved estimates of ocean heat content from 1960 to 2015", *Science Advances*, 3.
- Christensen, J. H. y otros (2013), "Climate phenomena and their relevance for future regional climate change", capítulo 14, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, contribución del Grupo de Trabajo I para el Quinto Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), T. F. Stocker y otros (eds.), Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos, Cambridge University Press.
- CIP (Centro Internacional de la papa) (1995), Programa colaborativo, Biodiversidad de raíces y tubérculos andinos, apoyo Cooperación Técnica Suiza (COTESU).
- Clarke, L. y otros (2014), "Assessing transformation pathways", *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Contribución del grupo de trabajo I para el quinto reporte de evaluación del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), O. Edenhofer y otros (eds.), Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Estados Unidos, Cambridge University Press.
- CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) (2015), Paris Agreements: Durban Platform for Enhanced Action (decision 1/CP.17), Adoption of a protocol, another legal instrument, or an agreed outcome with legal force under the Convention applicable to all Parties (FCCC/CP/2015/L.9), París.
- Collins, M. y otros (2019), "Extremes, abrupt changes and managing risks", *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Summary for Policymakers*.
- Coumou, D. y S. Rahmstorf (2012), "A decade of weather extremes", *Nature Climate Change*.
- Coumou, D. y A. Robinson (2013), "Historic and future increase in the global land area affected by monthly heat extremes", *Environmental Research Letters*, 8(3), 034018 [en línea] doi:10.1088/1748-9326/8/3/034018.
- CRU (University of East Anglia Climatic Research Unit) (2019), "High-resolution gridded datasets (and derived products)" [en línea] <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/> [fecha de consulta: 2019].
- Cruz, A. (2007), "Caracterización y diagnóstico del acuífero de La Paz, B.C.S. mediante estudios geofísicos y geohidrológicos", tesis profesional, La Paz, Baja California Sur, México, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional (IPN).
- Cruz, A. y otros (2011), "Precipitación y recarga en la cuenca de La Paz, BCS, México", *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo*, 27 (3).
- CSIRO/BOM (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization/Bureau of Meteorology) (2015), *Climate Change in Australia Information for Australia's Natural Resource Management Regions: Technical Report*, Australia.

- Davis, S. J., K. Caldeira y H. D. Matthews (2010), "Future CO2 emissions and climate change from existing energy infrastructure", *Science*, 329(5997).
- De Martonne, E. (1925), *Traité de Géographie Physique*: 3 tomes, Paris.
- Déqué, M. y otros (2017), "A multi-model climate response over tropical Africa at +2°C", *Climate Services*, 7 [en línea] doi:10.1016/j.cliser.2016.06.002.
- Díaz, G. y otros (2011), "Mapeo del índice de aridez y su distribución poblacional en México", *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, vol. XVII, edición especial.
- Domingues, C. M. y otros (2008), "Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise", *Nature*, vol. 453.
- Duffy, P. B., E. Malone y J. Sheffield (2014), "Global climate model simulations of North America", *Climate Change in North America*, George Ohring (ed.), Springer International Publishing Switzerland.
- Dulcela, L. A. y otros (2003), *Caracterización física y organoléptica de cafés arábigos en los principales agroecosistemas del Ecuador*, Consejo Cafetalero Nacional (COFENAC), Programa de Modernización de los Servicios Agropecuarios (PROMSA).
- Easterling, D. R. y otros (2000), "Climate extremes: observations, modeling, and impacts", *Science*, 289(5487).
- Eckstein, D., M. Hutfils y M. Winges (2018), *Global Climate Risk Index 2019. Who Suffers Most from Extreme Weather Events? Weather-Related Loss Events in 2017 and 1998 to 2017*, Germanwatch.
- Eckstein, D., V. Künzel y L. Schäfer (2017), *Global Climate Risk Index 2018. Who Suffers Most from Extreme Weather Events? Weather-related Loss Events in 2016 and 1997 to 2016*, Germanwatch.
- Eckstein, D. y otros (2019), *Global Climate Risk Index 2020. Who Suffers Most from Extreme Weather Events? Weather-Related Loss Events in 2018 and 1999 to 2018*, Germanwatch.
- Edenhofer, O. y otros (2018), "Reports of coal's terminal decline may be exaggerated", *Environmental Research Letters*, 13:024019.
- EM-DAT (Emergency Events Database) (2020), The OFDA/CRED International Disaster Database, Bruselas, Bélgica, UCLouvain [base de datos en línea] www.emdat.be.
- Elsner, J. B., J. P. Kossin, y T. H. Jagger (2008), "The increasing intensity of the strongest tropical cyclones", *Nature*, 455.
- Escoto, J. A. V. (1953), *Geografía de México*, Fondo de cultura económica.
- Escoto Castillo, A., L. Sánchez Peña y S. Gachuz Delgado (2017), "Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social", *Estudios demográficos y urbanos*, 32(3).
- ESRI (Environmental Systems Research Institute) (2020), "¿Qué son los datos ráster?" [en línea] <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>.
- Eyring, V. y otros (2016), "Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization", *Geoscientific Model Development*, vol. 9.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (2020), FAOSTAT, "Datos sobre alimentación y agricultura", División de Estadísticas [base de datos en línea] <http://faostat.fao.org/>.
- _____ (2012a), *Estudio de caracterización del corredor seco centroamericano*, Roma, Italia

- _____(2012b), Marco Estratégico Regional para la Gestión de Riesgos Climáticos en el Sector Agrícola del Corredor Seco Centroamericano, Roma, Italia.
- Fasullo, J. T., B. L. Otto-Bliesner y S. Stevenson (2018), “**ENSO's Changing Influence on Temperature, Precipitation, and Wildfire In a Warming Climate**”, *Geophysical Research Letters*, vol. 45.
- Fischer, E. M. y R. Knutti (2015), “Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes”, *Nature Climate Change*, 5(6).
- Flato, G., y otros (2013), “Evaluation of Climate Models”, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, capítulo 9, Contribución del Grupo de Trabajo I para el Quinto Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.), Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos, Cambridge University Press.
- Forster, P. M. y otros (2020), “Current and future global climate impacts resulting from COVID-19”, *Nature Climate Change*, N° 10
- Gausson, H. (1956), “Le XVIII Congres International de Geographie”, *Annales De Geographie*, 353, Rio de Janeiro, Aout.
- GeoEnciclopedia (2020), *Propiedades del océano* [en línea] <https://www.geoenciclopedia.com/propiedades-del-oceano/>.
- GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) (2020), *Climate Model Downscaling*, Princeton University Forrestal Campus [en línea] <https://www.gfdl.noaa.gov/climate-model-downscaling/>.
- Gómez, J. D. y A. I. Monterroso (2012), “Caracterización del índice de aridez en México usando dos alternativas de estimación de la evapotranspiración potencial y escenarios de cambio climático”, ponencias presentadas al VIII Congreso Internacional de la Asociación Española de Climatología [en línea] http://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/02/0009_PU-SA-VIII-2012-JD_GOMEZDIAZ.pdf.
- Gudmundsson, L. y S. I. Seneviratne (2016), “Anthropogenic climate change affects meteorological drought risk in Europe”, *Environmental Research Letters*, 11(4).
- Gudmundsson, L., S. I. Seneviratne y X. Zhang (2017), “Anthropogenic climate change detected in European renewable freshwater resources”, *Nature Climate Change*, 7(11),
- Greene, A. M., L. Goddard y U. Lall (2006), “Probabilistic multimodel regional temperature change projections”, *Journal of Climate*, vol. 19.
- Harmeling, S. (2012), *Global Climate Risk Index 2013. Who Suffers Most from Extreme Weather Events? Weather-Related Loss Events in 2011 and 1992 to 2011*, Germanwatch.
- _____(2011), *Global Climate Risk Index 2012. Who Suffers Most from Extreme Weather Events? Weather-Related Loss Events in 2010 and 1991 to 2010*, Germanwatch.
- _____(2010), *Global Climate Risk Index 2011. Who Suffers Most from Extreme Weather Events? Weather-Related Loss Events in 2009 and 1990 to 2009*, Germanwatch.
- _____(2009), *Global Climate Risk Index 2010. Who is Most Vulnerable? Weather-Related Loss Events Since 1990 and How Copenhagen Needs to Respond*, Germanwatch.
- _____(2008), *Global Climate Risk Index 2009. Weather-related Loss Events and their Impacts on Countries in 2007 and in a Long-term Comparison*, Germanwatch.

- _____ (2007), *Global Climate Risk Index 2008: Weather-related Loss Events and their Impacts on Countries in 2006 and in a Long-term Comparison*, Germanwatch.
- Harmeling, S. y C. Bals (2007), *Global Climate Risk Index 2007: Weather Related Loss Events and Their Impacts on Countries in 2005 and in a Long-term Comparison*, Germanwatch
- Harris, I. (2019), "Release notes for CRU TS v4.03", Climate Research Unit, School of Environmental Sciences, University of East Anglia, Norwich, Reino Unido [en línea] http://dap.ceda.ac.uk/thredds/fileServer/badc/cru/data/cru_ts/cru_ts_4.03/Release_Notes_CRU_TS4.03.txt.
- Harris, I. C., P. D. Jones y T. Osborn (2020), "CRU CY 4.03: Climatic Research Unit year-by-year variation of selected climate variables by country version 4.03 (Jan. 1901 - Dec. 2018)", Centre for Environmental Data Analysis, CRU(University of East Anglia Climatic Research Unit) [en línea] <https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/d6768285fdc8408bbb9b02bb0f317774>.
- Harris, I. y otros(2020), "Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset", *Scientific Data*.
- _____ (2014), "Updated high-resolution grids of monthly climatic observations- the CRU TS 3.10 Dataset", *International Journal of Climatology*, vol.34.
- Harvey, C. (2020), "How the Coronavirus Pandemic is affecting CO2 emissions, E&E news environment", *Scientific American* [en línea] <https://www.scientificamerican.com/article/how-the-coronavirus-pandemic-is-affecting-co2-emissions/>.
- Hassan, H. y H. E. Dregne (1997), "Natural habitats and ecosystems management in Drylands: an overview", *Natural Habitats and Ecosystems Management Series*, Environment Department Papers, Washington, D.C.,The World Bank.
- Hegerl, G., y F. Zwiers (2011), "Use of models in detection and attribution of climate change", *WIREs Clim. Change*, 2 [en línea] doi: 10.1002/wcc.121.
- Hegerl, G.C. y otros (2010), "Good Practice Guidance Paper on Detection and Attribution Related to Anthropogenic Climate Change", Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Detection and Attribution of Anthropogenic Climate Change, T. F. Stocker, C. B. Field, D. Qin, V. Barros, G.-K. Plattner, M. Tignor, P. M. Midgley y K. L. Ebi (eds.), Bern, Suiza, IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern.
- _____ (2007), "Understanding and attributing climate change. In: 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, United Kingdom and New York, NY, Estados Unidos, Cambridge University Press.
- Held, I. M. y B. J. Soden (2006), "Robust responses of the hydrological cycle to global warming", *Journal Climate*, 19.
- Hidalgo, H. G. y E. J. Alfaro (2015), "Skill of CMIP5 climate models in reproducing 20th century basic climate features in Central America", *International Journal of Climatology*, 35(12).
- Hidalgo, H. G., E. J. Alfaro y B. Quesada-Montano (2017), "Observed (1970–1999) climate variability in Central America using a high-resolution meteorological dataset with implication to climate change studies", *Climatic Change*, 141(1).

- Hidalgo, H. G. y otros (2015), "Urban waters in Costa Rica", *Urban Water Challenges in the Americas. A Perspective from the Academies of Sciences*, Interamerican Network of Academies of Sciences, en prensa.
- _____ (2013), "Hydrological climate change projections for Central America", *J of Hydrol*, 495 [en línea] doi:10.1016/j.jhydrol.2013.05.004.
- Hijmans, R. J. y otros (2005), "Very high resolutions interpolated climate surfaces for global land areas", *International Journal of Climatology*, vol. 25.
- Hoegh-Guldberg, O. y otros (2018), "Impacts of 1.5 °C Global Warming on Natural and Human Systems", *Global Warming of 1.5°C, An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, V. Masson-Delmotte y otros (eds.), Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos, Cambridge University Press.
- IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático) (2019), *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Summary for Policymakers*, H. O. Pörtner y otros (eds.).
- _____ (2018a), *Special report: Global Warming of 1,5 °C. Summary for Policymakers*, V. Masson-Delmotte y otros (eds.).
- _____ (2018b), *Global Warming of 1.5°C, An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*, V. Masson-Delmotte y otros (eds.).
- _____ (2014a), *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.), Ginebra, Suiza.
- _____ (2014b), "Anexo II: glosario", *Cambio climático 2014: Informe de síntesis*, K. J. Mach, S. Planton y C. von Stechow (eds.), 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.), Ginebra, Suiza.
- _____ (2013a), *Cambio climático 2013, bases físicas: resumen para responsables de políticas*, contribución del grupo de trabajo I al Quinto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, T. F. Stocker y otros (eds.), Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos, Cambridge University Press [en línea] http://www.ipcc.h/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_brochure_es.pdf.
- _____ (2013b), "Glosario", S. Planton (ed.), *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, T. F. Stocker y otros (eds.), Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos, Cambridge University Press.
- _____ (2012), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, C. B. Field y otros (eds.), Cambridge, UK, and New York, NY, Estados Unidos, Cambridge University Press.

- _____ (2007), *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.
- _____ (2002), *Cambio climático y biodiversidad*, documento técnico V del IPCC, H. Gitay y otros (eds.), Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos, Cambridge University Press.
- _____ (2001), *Cambio climático 2001: informe de síntesis*, Cambridge University Press.
- IPCC/OMM/PNUMA (Intergovernmental Panel on Climate Change/Organización Meteorológica Mundial/Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) (2000), *Informe especial del IPCC. Escenario de emisiones*, informe especial del grupo de trabajo III del IPCC.
- Ishii, M. y otros (2017), "Accuracy of global upper ocean heat content estimation expected from present observational data sets", *SOLA (Scientific Online Letters on the Atmosphere)*, vol. 13.
- Jacob, D. y otros (2018), *Climate Impacts in Europe Under +1.5°C Global Warming. Earth's Future*, 6(2) [en línea] doi:10.1002/2017ef000710.
- Jones, P. y otros (2016), "Long-term trends in precipitation and temperature across the Caribbean", *International Journal of Climatology*, vol. 36.
- Kitzberger, T. (2007), "El calentamiento de los océanos aumenta la posibilidad de incendios forestales", entrevista en Fundación Nuestro Mar, 16 de enero de 2007 [en línea] <https://www.nuestromar.org/antiguas/el-calentamiento-de-los-oceanos-aumenta-la-posibilidad-de-incendios-forestales/>.
- Kitzberger, T. y otros (2007), "Contingent Pacific-Atlantic Ocean influence on multicentury wildfire synchrony over western North America", *PNAS*, vol. 104, N° 2.
- Kjellstrom, E. y otros (2018), "European climate change at global mean temperature increases of 1.5 and 2°C above pre-industrial conditions as simulated by the EURO-CORDEX regional climate models", *Earth System Dynamics*, 9(2) [en línea] doi:10.5194/esd-9-459-2018.
- Knutson, T. R. y otros (2015), "Global projections of intense tropical cyclone activity for the late twenty-first century from dynamical downscaling of CMIP5/RCP4.5 Scenarios", *Journal of Climate*, 28(18).
- _____ (2010), "Tropical cyclones and climate change", *Nature Geosci.*, N° 3.
- Knutti, R. y J. Sedláček (2012), "Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections", *Nature Climate Change*, 3.
- Kreft, S. y D. Eckstein (2013), *Global Climate Risk Index 2014. Who Suffers Most from Extreme Weather Events? Weather-Related Loss Events in 2012 and 1993 to 2012*, Germanwatch.
- Kreft, S., D. Eckstein e I. Melchior (2016), *Global Climate Risk Index 2017. Who Suffers Most from Extreme Weather Events? Weather-Related Loss Events in 2015 and 1996 to 2015*, Germanwatch.
- Kreft, S. y otros (2015), *Global Climate Risk Index 2016. Who Suffers Most from Extreme Weather Events? Weather-Related Loss Events in 2014 and 1995 to 2014*, Germanwatch.
- _____ (2014), *Global Climate Risk Index 2015. Who Suffers Most from Extreme Weather Events? Weather-Related Loss Events in 2013 and 1994 to 2013*, Germanwatch.
- Kriegler, E. y otros (2012), "The need for and use of socio-economic scenarios for climate change analysis: a new approach based on shared socioeconomic pathways", *Global Environmental Change*, 22.
- Laffoley, D. y J. M. Baxter (eds.) (2019), *Ocean Deoxygenation: Everyone's Problem - Causes, Impacts, Consequences and Solutions*, Gland, Switzerland, IUCN Publications.

- Landa, R., V. Magaña y C. Neri (2008), *Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales/Centro de Ciencias de la Atmósfera/Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Le Quéré, C. y otros (2019), "Drivers of declining CO₂ emissions in 18 developed economies", *Nature Climate Change*, 9.
- Le Treut, H. y otros (2007), "Historical Overview of Climate Change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis", contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, S. Solomon y otros (eds.), Cambridge, Reino Unido, y Nueva York, NY, Estados Unidos, Cambridge University Press.
- Linden, O. (2019), "Evidence for ocean deoxygenation and its patterns: Atlantic Ocean", *Ocean Deoxygenation: Everyone's Problem - Causes, Impacts, Consequences and Solutions*, D. Laffoley y J. M. Baxter (eds.), Gland, Switzerland.
- Lindsey, R. (2017), "Atribución de evento extremo: el juego de culpa entre el tiempo y clima", Science Ann Information for a Climate-smart Nation, NOAA [en línea] <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/atribuci%C3%B3n-de-evento-extremo-el-juego-de-culpa-entre-el-tiempo-y>.
- Liu, M. y otros (2019), "Causes of large projected increases in hurricane precipitation rates with global warming", *Climate and Atmospheric Science*, 2, 38.
- Magaña, V. y L. Galván (2010), "Detección y atribución de cambio climático a escala regional", *Realidad, datos y espacio revista internacional de estadística y geografía*, vol. 1, N° 1.
- Magaña, V., J. A. Amador y S. Medina (1999), "The midsummer drought over Mexico and Central America", *Journal of Climate*, 12(6).
- Mahlstein, I. y otros (2011), "Early onset of significant local warming in low latitude countries", *Environmental Research Letters*, 6(3), 034009 [en línea] doi:10.1088/1748-9326/6/3/034009.
- Malunda, K. B., K.R. Marembo y A.J.E. du Plessis (2018), "Optimising the de Martonne aridity index using adjustment values", Conference Proceedings of Adaptation Futures.
- Marín, V. (2010), "Evaluación de la relación entre la evapotranspiración potencial teórica y la evaporación registrada en los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca", tesis profesional, Bogotá, Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería.
- Martínez, E. (2019), "¿Qué es el dipolo del océano Índico o 'El Niño indio'?", *La vanguardia* [en línea] <https://www.lavanguardia.com/natural/20191211/472170370021/que-es-dipolo-oceano-indico-nino-indio.html>.
- Martínez-López, B. y otros (2018), "Nonlinear trends and nonstationary oscillations as extracted from annual accumulated precipitation at Mexico City", *Earth and Space Science*, 5 [en línea] <https://doi.org/10.1029/2018EA000395>.
- May, W. y otros (2016), "Projected change-atmosphere", *North Sea Region Climate Change Assessment*, M. Quante y F. Colijn (eds.), cap.5, Regional Climate Studies.
- Meehl, G. A., J. M. Arblaster y C. Tebaldi (2007), "Contributions of natural and anthropogenic forcing to changes in temperature extremes over the United States", *Geophys Res Lett* [en línea] doi:10.1029/2007GL030948.
- Meigs, P. (1953), "World distribution of arid and semi-arid homoclimates", review of Research on Arid Zone Hydrology. Arid Zone Research I, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

- Meinshausen, M., S. C. B. Raper y T. M. L. Wigley (2011a), "Emulating coupled atmosphere-ocean and carbon cycle models with a simpler model, MAGICC6 – Part 1: Model description and calibration", *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 11.
- _____ (2011b), "Emulating atmosphere-ocean and carbon cycle models with a simpler model, MAGICC6 – Part 2: Applications", *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 11.
- Meinshausen, M. y otros (2011c), "The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300", *Climatic Change*, vol. 109.
- Min, S. K. y A. Hense (2006), "A Bayesian approach to climate model evaluation and multi-model averaging with an application to global mean surface temperatures from IPCC AR4 coupled climate models", *Geophysical Research Letters*, vol. 33.
- Moran, D., A. Hasanbeigi y C. Springer (2018), "The carbon loophole in climate policy", *Quantifying the Embodied Carbon in Traded Products*, KGM & Associates, Global Efficiency Intelligence, Climate Work Foundations.
- Moss, R. y otros (2010), "The next generation of scenarios for climate change research and assessment", *Nature*, 463.
- _____ (2008), *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies*, Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), Geneva.
- Murray-Tortarolo, G., y otros (2016), "The dry season intensity as a key driver of NPP trends", *Geophysical Research Letters*, 43
- Myllyvirta, L. (2020), Analysis: Coronavirus temporarily reduced China's CO2 emissions by a quarter, *Carbon Brief Clear on Climate* [en línea] <https://www.carbonbrief.org/analysis-coronavirus-has-temporarily-reduced-chinas-co2-emissions-by-a-quarter>.
- Nakićenović, N. y otros (2000), Emissions Scenarios. Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), editores N. Nakićenović y R. Swart, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- NAS (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine) (2016), *Attribution of Extreme Weather Events in the Context of Climate Change*, Washington, D.C., The National Academies Press [en línea] doi: 10.17226/21852.
- Navarro-Racines, C. y otros (2020), "High-resolution and bias-corrected CMIP5 projections for climate change impact assessments", *Scientific Data*, 7.
- Neira, F. H. (2006), *Assessment of Climate Indices in Drylands of Colombia*, Bélgica, Universiteit Gent.
- New, M., M. Hulme y P. Jones (1999), "Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I: development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology", *Journal of Climate*, vol. 12.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (2020a), Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2), Physical Sciences Laboratory [en línea] <https://psl.noaa.gov/enso/mei/>.
- _____ (2020b), National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center [en línea] <https://www.nhc.noaa.gov>.
- _____ (2020c), Hurricane Research Division (HURDAT) [en línea] <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/>.
- Null, J. (2020), El Niño and La Niña Years and Intensities, Golden Gate Weather Services [en línea] <https://ggweather.com/enso/oni.htm>.

- Olivier, J. G. J. y J. A. H. W. Peters (2018), *Trends in Global CO₂ and Total Greenhouse Gas Emissions: 2018 Report*, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial) (2020a), "Economic slowdown as a result of COVID is no substitute for climate action" [en línea] <https://public.wmo.int/en/media/news/economic-slowdown-result-of-covid-no-substitute-climate-action>.
- _____ (2020b), "New climate predictions assess global temperatures in coming five years" [en línea] <https://public.wmo.int/en/media/press-release/new-climate-predictions-assess-global-temperatures-coming-five-years>.
- _____ (2020c), "WMO confirms 2019 as second hottest year on record" en línea <https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-confirms-2019-second-hottest-year-record>.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial)/Asociación Mundial para el Agua (2016), *Manual de indicadores e índices de sequía*, M. Svoboda y B.A. Fuchs (eds.), Programa de Gestión Integrada de Sequías, Serie 2 de herramientas y directrices para la gestión integrada de sequías. Ginebra.
- O'Gorman, P. A. (2010), "Understanding the varied response of the extratropical storm tracks to climate change", *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 107.
- O'Gorman, P. A. y T. Schneider (2008), "Energy of midlatitude transient eddies in idealized simulations of changed climates", *J. Clim.*, 21.
- O'Neill, B. C. y otros (2016), "The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6", *Geoscientific Model Development*, vol. 9.
- _____ (2014), "A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways", *Climatic Change*, 122(3).
- Oppenheimer, M. y otros (2019), "Sea level rise and implications for low lying islands, coasts and communities", *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Summary for Policymakers*.
- Orlowsky, B. and S. I. Seneviratne (2013), "Elusive drought: uncertainty in observed trends and short- and long-term CMIP5 projections", *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(5) [en línea] doi:10.5194/hess-17-1765-2013.
- Papadakis, J. (1980)., *El clima. Con especial referencia a los climas de América Latina, Península Ibérica, ex Colonias Ibéricas y sus potencialidades agropecuarias*, Buenos Aires, Argentina, Editorial Albatros.
- Penman, H. L. (1956), "Estimating evaporation" *Transactions of the American Geophysical Union*, 37.
- _____ (1948), "Natural evaporation from open water, bare soil, and grass", *Proceedings, Royal Society of London, Series A*, 193.
- Pérez, J. G., C. J. Esparza y J. A. Ojeda (2017), "Relación entre humedad y amplitud térmica: su importancia en la arquitectura bioclimática", Séptimo Congreso Nacional de Investigación en Cambio Climático, México.
- Perrier, A. (1984), "Updated evapotranspiration and crop water requirement definitions", *Crop Water Requirements*, Perrier, A. y C. Riou (eds.), ICID Int. Conf., París, septiembre, *Institut national de la recherche agronomique (INRA)*.
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) (2019), *Informe sobre la disparidad en las emisiones de 2019*, Nairobi.

- _____(2018), *Emissions Gap Report 2018*, Nairobi.
- _____(2017), *Emissions Gap Report 2017*, Nairobi.
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) y otros (2010), Global Risk Data Platform. The Preview [base de datos en línea] <http://preview.grid.unep.ch/index.php>.
- Pons, D. y otros (2018), "Escenarios de aridez para Guatemala para los años 2030, 2050 y 2070 utilizando modelos de cambio climático", *Revista Yu'am*, 2(4).
- Resplandy, L. y otros (2018), "Quantification of ocean heat uptake from changes in atmospheric O₂ and CO₂ composition", *Nature*, vol. 563.
- Restrepo, C. y N. Alvarez (2006), "Landslides and their contribution to land - cover change in the mountains of Mexico and Central America 1", *Biotropica*, 38(4).
- Riahi, K. y otros (2017), "The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview", *Global Environmental Change*, vol 42.
- Rivas, D. (2018), "El clima, caracteres, causas, clasificación, fenómenos y alteraciones climáticas. Aplicación didáctica", tesis profesional, Lima, Perú, Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle.
- Roderick, M., G. Peter y G. D. Farquhar (2015), "On the assessment of aridity with changes in atmospheric CO₂", *Water Resources Research*, 51(7) [en línea] doi:10.1002/2015wr017031.
- Ryu, J. y K. Hayhoe (2014), "Understanding the sources of Caribbean precipitation biases in CMIP3 and CMIP5 simulations", *Climate Dynamics*, vol. 42.
- Sage, R. y D. Kubien (2007), "The temperature response of C3 and C4 photosynthesis", *Plant, Cell and Environment*, 30.
- Salinger, M. (2005), "Climate variability and change: past, present and future – an overview", *Climatic Change*, vol. 70, N° 1.
- Sánchez, S. N. y R. Garduño L. (2008), "Algunas consideraciones acerca de los sistemas de clasificación climática", *ContactoS 68*, México, Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Schleussner, C.-F., P. Pflaederer y E. M. Fischer (2017), "In the observational record half a degree matters", *Nature Climate Change*, 7.
- SEMARNAT/INECC (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales de México/Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático) (2019), *Atlas nacional de vulnerabilidad al cambio climático*, Ciudad de México, México.
- Seneviratne, S. I. y otros (2012), "Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment", *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. A special report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), C. B. Field y otros (eds.), Cambridge University.
- Sheffield, J., E. F. Wood y M. Roderick (2012), *Little Change in Global Drought over the Past 60 Years* *Nature*, 491.
- Solomon, S. y otros (eds.) (2007), "Resumen técnico", *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, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos, Cambridge University Press.
- Solano, O. y otros (2003), "Estudio de la evapotranspiración de referencia en Cuba", *Revista cubana de meteorología*, vol. 10, N° 1, Instituto de Meteorología.

- Stanley, M. (s/f), Monsson, Resource library de National Geographic Education [en línea] <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/monsoon/>
- Stern, N. (2007), "The economics of climate change", *The Stern Review*, Reino Unido, Cambridge University Press.
- Stramma, L. y otros (2010), "Ocean oxygen minima expansions and their biological impacts", *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 57 [en línea] <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2010.01.005>.
- Sugi, M., H. Murakami y K. Yoshida (2017), "Projection of future changes in the frequency of intense tropical cyclones", *Climate Dynamics*, 49(1).
- Sys, C., E. Van Ranst, y J. Debaveye (1991), "Land evaluation. Principles in Land evaluation and crop production calculations", *Agricultural Publications* N° 7, Bruselas, Bélgica, General Administration for Development Cooperation.
- Taylor, M. A. y E. J. Alfaro (2005), "Central America and the Caribbean, climate of", *Encyclopedia of World Climatology*.
- Thomas, D. S. G. (ed.) (2016), *The Dictionary of Physical Geography*, cuarta edición, Wiley Blackwell.
- Thornthwaite, C. W. (1948), "An approach toward a rational classification of climate", *Geogr. Rev.*, 38.
- Thornthwaite, C. W. y J. R. Mather (1957), "Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance", *Climatology*, vol. 10, N° 3, Centerton, New Jersey, C.W. Thornthwaite & Associates.
- Toledo, V. M. (1980), "Las lluvias en México", *Nexos*, 1 de agosto.
- Trenberth, K. E. (2011), "Changes in precipitation with climate change", *Climate Research*, 47.
- Trenberth, K. E. y otros (2003), "The changing character of precipitation", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84.
- Troyo, E. y otros (2014), "Análisis de la sequía y desertificación mediante índices de aridez y estimación de la brecha hídrica en Baja California Sur, noroeste de México", *Investigaciones geográficas, boletín del instituto de geografía*, N° 85, ISSN 0188-4611, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Turc, L. (1963), "Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration, potentielle, formulation simplifié et mise à jour", *Ann. Agron.*, vol. 12.
- _____ (1961), "Evaluation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date", *Ann. Agron.*, 12.
- Ulbrich, U., G. C. Leckebusch y J. G. Pinto (2009), "Extra-tropical cyclones in the present and future climate: A review", *Theor. Appl. Climatol.*, 96.
- UNEP (United Nations Environment Programme) (1997), *World Atlas of Desertification*, N. Middleton y D. Thomas (eds), Second edition.
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) (2006), "Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semi-áridas, y sub-húmedas secas de América Latina y el Caribe", Centro del Agua para Zonas Áridas de América Latina y el Caribe (CAZALAC), *Documentos técnicos del PHI-LAC*, N°3.
- University of East Anglia (2020), "Climate change increases the risk of wildfires confirms new review", *ScienceDaily* [en línea] www.sciencedaily.com/releases/2020/01/200114074046.htm.

- Valdivia Ponce, J. (1977), *Meteorología general*, Lima, Dirección Universitaria de la Biblioteca de la Universidad Nacional Mayor De San Marcos.
- Van der Zee, A. y otros (2012), *Estudio de caracterización del Corredor Seco Centroamericano (Países CA-4)*, tomo I, OCHA [en línea] http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/tomo_i_corredor_seco.pdf.
- Van Vuuren, D. P. y T. R. Carter (2013), "Climate and socio-economic scenarios for climate change research and assessment: reconciling the new with the old", *Climatic Change*, vol. 122(3), Springer.
- Van Vuuren, D. P. y otros (2011), "The representative concentration pathways: an overview", *Climatic Change*, 109.
- Vautard, R. y otros (2014), "The European climate under a 2°C global warming", *Environmental Research Letters*, 9(3), 034006 [en línea] doi:10.1088/1748-9326/9/3/034006.
- Vázquez, R. y otros (2007), "Mapa de aridez de Cuba", *Zonas áridas*, 11(1).
- Villarreal, C. (2017), "Hagámoslo sostenible: soluciones basadas en la naturaleza frente a la degradación ambiental", ISSN: 2602-8107 [blog post en línea] <https://ecocamquijos.blogspot.com/2018/04/comprencion-del-clima-desde-sus.html>.
- Villers, L. y otros (2009), "Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México", *Interciencia*, vol. 34, N° 5.
- Walther, G. y otros (2002), "Ecological responses to recent climate change", *Nature*, vol. 416, N° 6879.
- Yepes, A. y M.S. Buckeridge (2011), "Respuesta de las plantas ante los factores ambientales del cambio climático global", *Colombia forestal*, vol. 14, N° 2.
- Yoshida, K. y otros (2017), "Future changes in tropical cyclone activity in high-resolution large-ensemble simulations", *Geophysical Research Letters*, 44(19).
- Zebiak, S. E. y otros (2014), "Investigating el Niño-southern oscillation and society relationships", *WIREs Clim Change*, 6 [en línea] doi:10.1002/wcc.294.
- Zhai, P., B. Zhou y Y. Chen (2018), "A review of climate change attribution studies", *Journal of meteorological research*, vol. 32.
- Zhao, Z. y otros (2005), "Recent studies on attributions of climate change in China", *Acta meteorológica SINICA-English Edition*, vol. 19, N° 4.

Esta publicación forma parte del programa de trabajo actualmente en implementación entre la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y el Consejo Agropecuario Centroamericano (CAC) de los Ministerios de Agricultura de los países miembros del SICA, en el cual se acordó recabar y divulgar información histórica del clima y un análisis de los escenarios climáticos del Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5).

Dicha actualización de los escenarios climáticos se generó para distintos niveles subnacionales en los países de México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana y brinda información georreferenciada de temperatura, precipitación, aridez, meses secos y eventos extremos que puede contribuir al diseño de instrumentos, programas y proyectos para la implementación de las políticas públicas de cambio climático y así responder a las necesidades de la población para adaptarse.

C E P A L

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)
Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC)
www.cepal.org