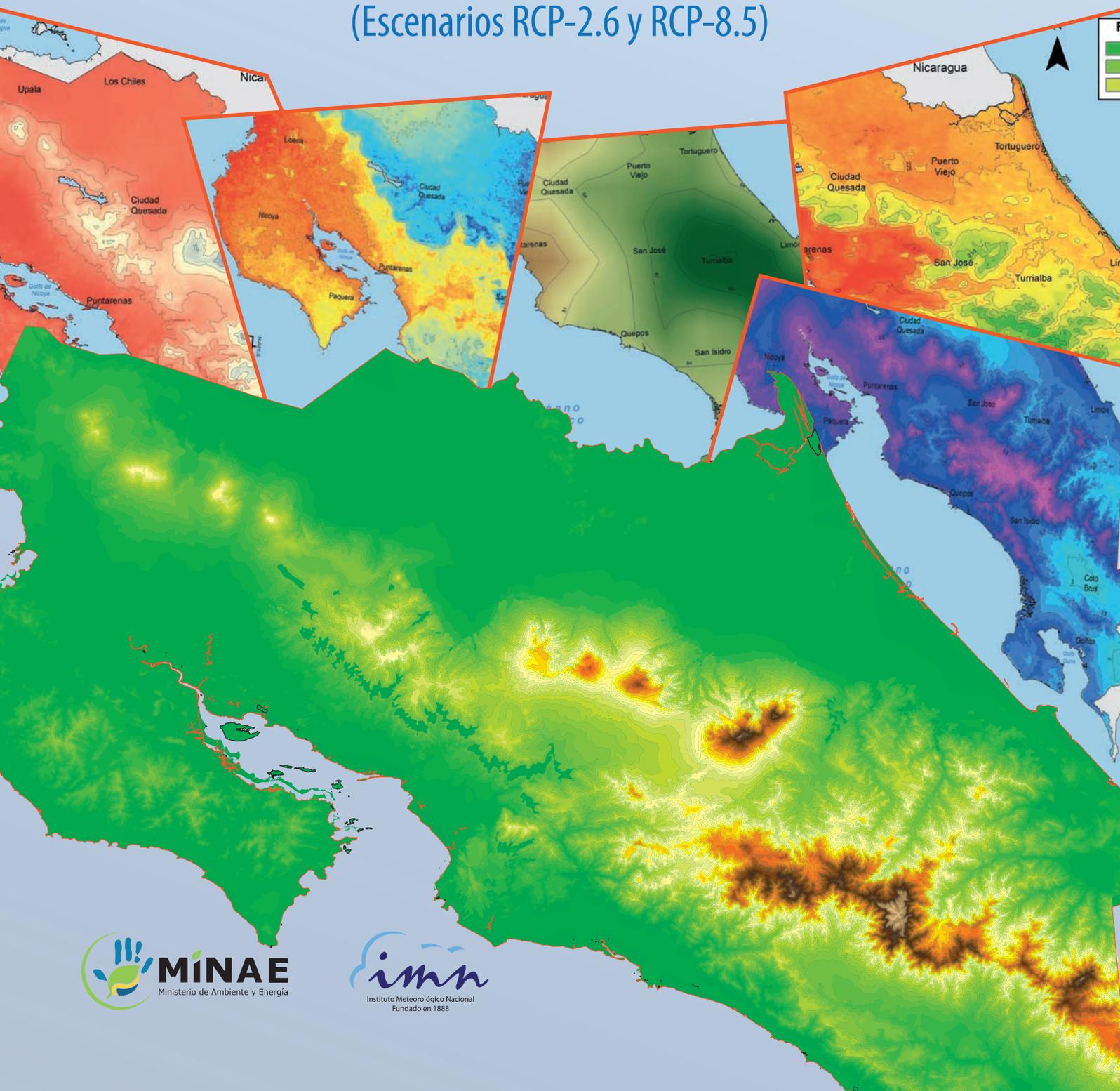


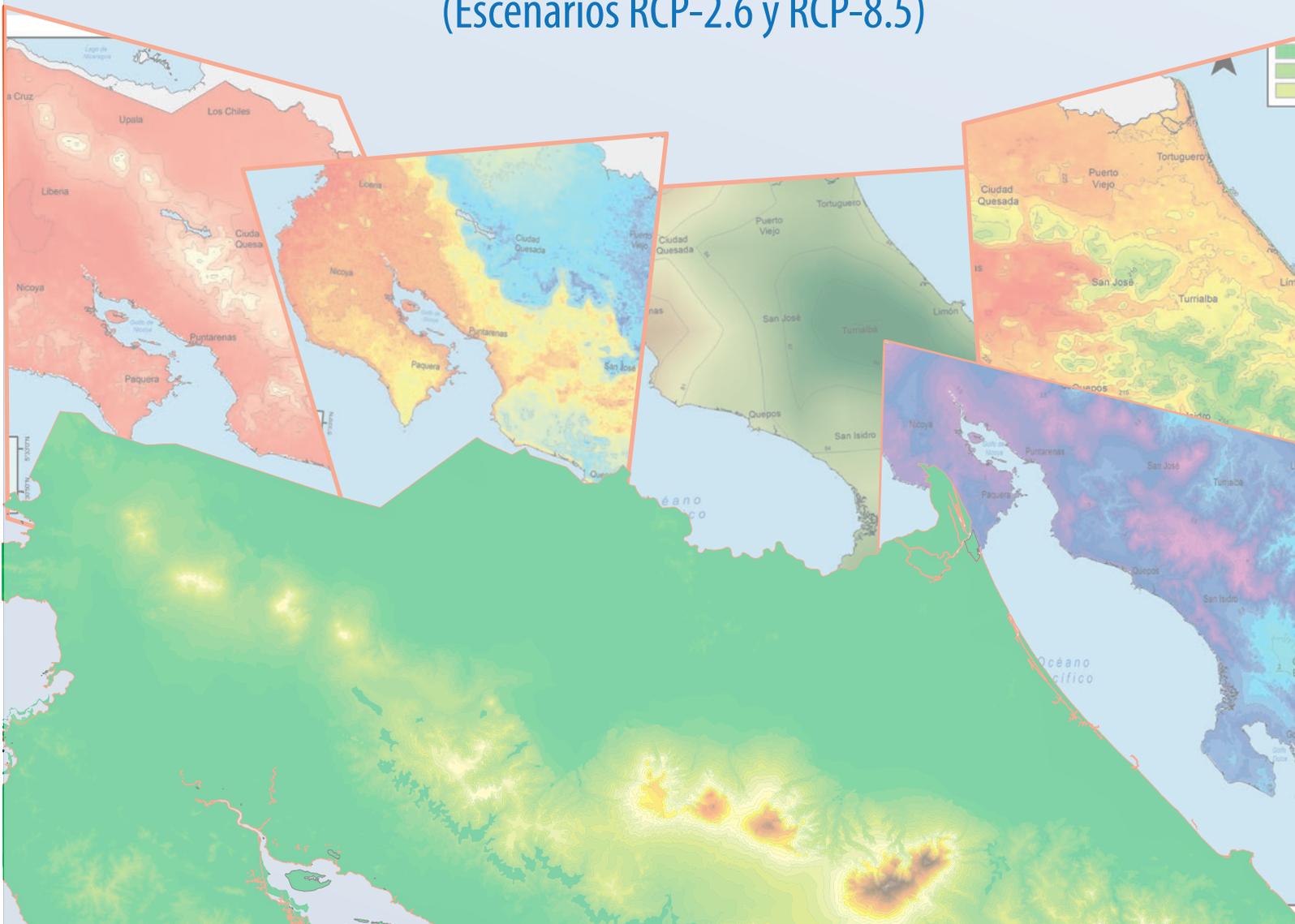
Proyecciones de Cambio Climático regionalizadas para Costa Rica

(Escenarios RCP-2.6 y RCP-8.5)



Proyecciones de Cambio Climático regionalizadas para Costa Rica

(Escenarios RCP-2.6 y RCP-8.5)



551.609.7286

C8375p Costa Rica. Ministerio de Ambiente y Energía. Dirección de Geología y Minas.

Proyecciones de cambio climático regionalizadas para Costa Rica [texto]: (escenarios RC0050-2.6 y RCP-8.5 / MINAE; Instituto Meteorológico Nacional; Luis Fernando Alvarado Gamboa. -- San José, Costa Rica: MINAE, DGM, 2021.

76 páginas: ilustraciones a color. : 28 cm.

ISBN: 978-9977-50-156-7

1. Cambio climático. 2. Escenarios climáticos. 3. Costa Rica.
I. Alvarado Gamboa, Luis Fernando.

**Proyecciones de Cambio Climático regionalizadas para Costa Rica
(Escenarios RCP-2.6 y RCP-8.5)**

© MINISTERIO DE AMBIENTE Y ENERGÍA
© INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL
Departamento de Desarrollo

San José, Costa Rica, 2021.

Coordinación general:
Ing. Ana Rita Chacón Araya

Autor:
Luis Fernando Alvarado Gamboa

Diseño y diagramación:
Rodrigo Granados Jiménez

De conformidad con la Ley Número 6683 de Derechos de Autor y Derechos Conexos, es prohibida la reproducción de este libro en cualquier forma o medio, electrónico o mecánico incluyendo el fotocopiado, grabadoras sonoras y otros. Distribución gratuita.

Citar como:
Alvarado Gamboa, Luis Fernando. (2021). *Proyecciones de Cambio Climático regionalizadas para Costa Rica (Escenarios RCP-2.6 y RCP-8.5)*. San José, Costa Rica: IMN-PNUD.

CONTENIDO

Resumen	5
1. Introducción	7
2. Métodos y datos	11
3. Clima actual: observado y modelado	17
3.1. Temperatura media	19
3.2. Lluvia	20
3.3. Humedad relativa	23
3.4. Radiación solar	24
3.5. Velocidad del viento	27
4. Escenarios climáticos futuros RCP2.6	29
4.1. Temperatura	29
4.2. Lluvia	31
4.3. Humedad relativa	36
4.4. Radiación solar	39
4.5. Velocidad del viento	41
5. Escenarios climáticos futuros RCP8.5	45
5.1. Temperatura	45
5.2. Lluvia	50
5.3. Humedad relativa	56
5.4. Radiación solar	61
5.5. Velocidad del viento	66
6. Referencias	71

RESUMEN

Cada vez es menor el margen de duda con respecto a que las acciones humanas han sido la causa dominante del calentamiento del aire observado a partir de la segunda mitad del siglo XX en todas las regiones continentales. Existe una creciente concientización por parte de la sociedad civil y de las agencias gubernamentales sobre la amenaza que representa el cambio climático para los sistemas humanos y naturales, en particular de América Latina y el Caribe. Una de las principales prácticas para enfrentar y reducir los efectos negativos del cambio climático es el de implementar estrategias de adaptación ante los impactos observados y proyectados. El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) ha sostenido que los análisis de riesgo futuro deben de ser el pilar que soporte esas estrategias de adaptación. Si se considera el riesgo como una función de la vulnerabilidad y la amenaza, significa que el riesgo existe solo si la vulnerabilidad y la amenaza coinciden en tiempo y en espacio. Entonces el riesgo es una probabilidad de pérdida, daño o impacto en un sistema siempre y cuando la amenaza se concrete. Para el análisis del riesgo futuro son fundamentales los siguientes aspectos en relación con el componente de amenaza representado por el cambio climático: (1) la elaboración de los escenarios de cambio climático regionales para analizar las condiciones actuales y de cambio de las variables climáticas básicas (como precipitación, temperatura, viento, radiación, etc) y (2) la evaluación de la variabilidad climática, particularmente el análisis de los eventos climáticos extremos.

En el contexto de este trabajo es importante entender que un escenario de cambio climático es una medida de cuánto se diferencia el clima del futuro con respecto al clima actual. El escenario de clima futuro es una descripción coherente, internamente consistente y admisible de un posible estado futuro del clima, que dependen del forzamiento de diferentes condiciones radiativas, cada una representada por su correspondiente escenario de emisiones de gases de efecto invernadero. No debe ser considerado como un pronóstico, por el contrario, cada escenario es una posible solución de cómo puede desarrollarse el clima futuro. A menudo un conjunto de escenarios es adoptado para reflejar lo mejor posible, el rango de incertidumbre en las proyecciones.

En este informe el IMN presenta la actualización de los escenarios de cambio climático, en cuyas proyecciones se han considerado dos de los cuatro escenarios del forzamiento radiativo recomendados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), específicamente los escenarios RCP2.6 y RCP8.5, que representan al de más bajas y altas emisiones de gases de efecto invernadero, respectivamente. El objetivo general es precisamente brindar el insumo necesario para los estudios de riesgo, de forma que puedan contribuir a definir mejor las políticas de adaptación desde el corto hasta el largo plazo. Si bien esta actualización sigue la metodología del estudio anterior, presenta como mejora la incorporación de dos escenarios de emisiones, más variables climáticas y datos en formatos digitales (NetCDF y raster) para ser utilizados en aplicaciones científicas, incluyendo los sistemas de información geográfica (SIG).

En la generación de estas nuevas proyecciones climáticas y con el fin de mantener la continuidad y coherencia con estudios previos, se utilizaron los modelos dinámicos desarrollados por el Centro Hadley de Inglaterra: uno de circulación global (HADGEM2-ES) y el otro de circulación regional (PRECIS). Para esta ocasión, los autores de estos modelos realizaron mejoras en ambos casos, no solo en la física del modelo global sino también en la escala espacial. Aun cuando la escala espacial del modelo regional mejoró en un 50% (disminuyó de 50 km a 25 km), la misma no es la suficiente para los estudios de impacto y vulnerabilidad, que requieren dimensiones menores o iguales a 1 km, razón por la cual se aplicó una metodología -conocida como deltas- para aumentar aún más el detalle o resolución espacial, de modo que la resolución se presenta tanto a 25 km como a 1 km.

El estudio realiza la descripción de los escenarios en función de las regiones climáticas del país: Valle Central, Pacífico (Norte, Central y Sur), Caribe (Norte y Sur) y Zona Norte. No obstante, con la resolución más fina (1 km) y la utilización de los SIG se pueden abordar otras regionalizaciones de menores dimensiones, como por ejemplo las cuencas hidrográficas, incluso divisiones político-administrativas como los cantones y distritos, siempre y cuando los límites de éstos no se traspasen de una región climática a la otra. Las variables meteorológicas consideradas fueron la precipitación, la temperatura media, la humedad relativa, la radiación solar (irradiancia) y la velocidad del viento. Los horizontes de tiempo de las proyecciones fueron los siguientes: 2010-2039, 2040-2069, 2070-2099.

1

INTRODUCCIÓN

En el presente, las proyecciones del cambio climático continúan precisando información sobre las futuras emisiones o concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI), aerosoles y otros impulsores del cambio climático. Esa información generalmente se expresa como un escenario de emisiones antropogénicas, que por lo general no incluyen cambios en impulsores naturales, como el forzamiento solar o volcánico o las emisiones naturales de los GEI (como el CH₄ y N₂O). Para el Quinto Informe de Evaluación (RA5) del IPCC (IPCC, 2014), la comunidad científica definió un conjunto de cuatro escenarios nuevos (Cuadro 1), denominados trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés), que se caracterizan por el cálculo aproximado que hacen del forzamiento radiativo total en el año 2100 en relación con el del periodo pre-industrial (1750), esto es, 2.6 W/m² en el caso del escenario RCP2.6; 4.5 W/m² en el caso del escenario RCP4.5; 6.0 W/m² en el caso del escenario RCP6.0, y 8.5 W/m² en el caso del escenario RCP8.5 (Moss et al., 2008; van Vuuren et al., 2011). Los escenarios de emisión utilizados en el Cuarto Informe de Evaluación (SRES-RA4, Nakicenovic, 2000) no contemplaban los efectos de las posibles políticas o acuerdos internacionales tendientes a mitigar las emisiones, representando posibles evoluciones socio-económicas sin restricciones en las emisiones. Por el contrario, algunos de los nuevos escenarios RCP contemplan los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XXI, es decir cada RCP puede ser resultado de diferentes combinaciones de futuros económicos, tecnológicos, demográficos, políticos e institucionales, por ejemplo el RCP2.6 es un escenario con una agresiva mitigación, con-

Cuadro 1. Escenarios de Trayectorias de Concentración Representativas (RCP).

Escenario GEI	Forzamiento radiativo (FR) en W/m ²	Tendencia del FR al 2100	CO ₂ al 2100 en ppm
RCP 2.6	2,6	decreciente	421
RCP 4.5	4,5	constante	538
RCP 6.0	6,0	creciente	670
RCP 8.5	8,5	creciente	936

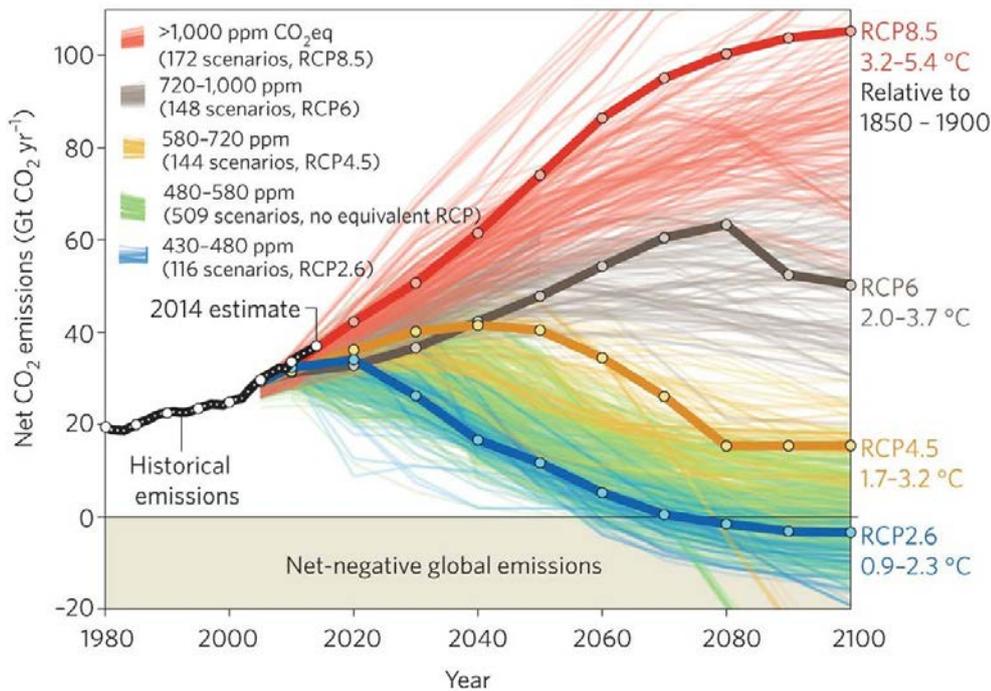


Figura 1. Emisiones históricas y proyecciones de las emisiones totales, concentraciones y cambios de temperatura de los escenarios RCP de GEI

ducente a un nivel de forzamiento muy bajo, ilustra un planeta con emisiones netas negativas después del 2070, además es el escenario más consistente con el límite de 2°C de calentamiento global acordado en París en diciembre del 2015 por la Convención Marco sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas (CMNUCC). El RCP8.5, considerado como el escenario “business-as-usual” (asume que las tendencias futuras de desarrollo siguen las del pasado y no se producirán cambios en las políticas de emisiones de GEI), por el contrario, es un escenario sin ningún control de mitigación, que se caracteriza por el considerable aumento de las emisiones durante el siglo XXI (más del doble que el RCP2.6), las cuales empiezan a disminuir hasta mediados del siglo XXII.

Este estudio pretende actualizar las proyecciones climáticas futuras de estudios previos en función de estos nuevos escenarios de GEI, que tienen la virtud de incluir las políticas de mitigación que no se contemplaron anteriormente. Debido a restricciones computacionales y disponibilidad de tiempo, estas nuevas y actualizadas proyecciones se fundamentaron en dos escenarios RCP, el de más bajas y el de más altas emisiones: RCP 2.6 y RCP8.5, respectivamente. Aunque fue posible correr totalmente el modelo PRECIS con el escenario RCP4.5, no se contó con el tiempo necesario para incluirlo en este informe. Por continuidad, conveniencia y disponibilidad inmediata, se siguió utilizando los modelos climáticos del Centro Hadley de Inglaterra: el de circulación general (HadGEM2-ES) y el regional (PRECIS versión 2.0).

El HadGEM-ES (Collins et al. 2011; Martin et al. 2011) es el acrónimo en inglés de la versión de segunda generación del modelo Climático Global del Sistema Tierra

del Centro Hadley, el cual incorpora un esquema de vegetación y ciclo del carbono dinámicos, biología del océano y química troposférica, sin embargo presenta una sensibilidad climática de aproximadamente 4.6°C, la cual se considera muy alta tomando en cuenta el rango de 2.1 – 4.7 de los modelos de la fase 5 del Proyecto de Intercomparación de modelos acoplados (CMIP5, por sus siglas en inglés). La resolución del componente atmosférico es descrita como N96L38, que significa que el pixel mide 1.875° long × 1.25° lat (208 km x 139 km), con 38 niveles verticales, mientras que en el océano su resolución horizontal es de 1/3° (en el ecuador) con 40 niveles de profundidad, utiliza un calendario de 360 días (30 días por mes). Las simulaciones comprenden un periodo histórico de 1860-2005, el cual además de los GEI, incluye los aerosoles y el forzamiento natural solar y volcánico (Jones et al., 2011). Este modelo global es el que proporciona las condiciones de frontera al modelo regional (RCM) PRECIS.

PRECIS es el acrónimo de “Providing REgional Climates for Impacts Studie” (“Proporcionando Climas Regionales para los Estudios de Impacto”, Wilson et al. 2016). Este modelo nació gracias a que el Centro Hadley de la Oficina de Meteorología del Reino Unido (UKMO) adaptó y rediseñó su modelo regional HadRM3P para ser ejecutado en una computadora personal (PC) con ambiente Linux, por lo que no requiere una extensa infraestructura de tecnología de información. PRECIS es un RCM hidrostático (es decir no considera de manera explícita los procesos convectivos que generan nubes y por lo tanto no determina de manera directa la precipitación), con una interfaz del usuario muy sencilla, desarrollado específicamente con la intención de permitir a los usuarios de los países en desarrollo producir fácilmente proyecciones detalladas del clima para su propia región de interés. Estas proyecciones se pueden utilizar en estudios de impacto, vulnerabilidad y adaptación, así como para ayudar en la preparación de las Comunicaciones Nacionales, como se requiere en los artículos 4.1 y 4.8 de la CMNUCC, de hecho, este modelo fue desarrollado con financiamiento de varias instituciones, entre ellas el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

PRECIS puede ser rodado en cualquier parte del planeta, tiene 19 niveles verticales atmosféricos (desde la superficie hasta los 30 km en la estratosfera), 4 niveles bajo el suelo, y dos resoluciones horizontales (50 km y 25 km). Detalles más específicos y técnicos de este modelo se pueden consultar en Rao et al. (2014), Van Khiem et al. (2014) y Redmond et al. (2015). Una primera simulación fue ejecutada para el periodo histórico de 1959-2005, sin embargo, como línea base o norma climatológica modelada se seleccionó el periodo 1961-1990, que aquí se denomina periodo de control. Posteriormente se realizaron tres corridas del clima futuro, correspondiente a los escenarios RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5, todos con el periodo 2006-2099. Por falta de tiempo, este estudio solo analizó los dos escenarios extremos (RCP2.6 y RCP8.5).

En cuanto a las variables climáticas estudiadas, adicional a las usuales de temperatura media y lluvia, se tomaron en cuenta las siguientes: radiación o irradiancia solar (W/m^2), humedad relativa (%) y velocidad del viento (m/s). Si bien se contaba



Figura 2. Regionalización climática de Costa Rica. Fuente: IMN.

con los datos de frontera del modelo global y se generaron resultados para un dominio muy amplio (figura 2), este estudio se concentró en el territorio nacional, sin embargo, cualquier país dentro del dominio ampliado puede utilizarlos para sus propios análisis. La descripción de los mapas y gráficos se presenta en términos de las siete regiones climáticas del país (Valle Central, Zona Norte, Pacífico Norte/Centro/Sur, Caribe Norte/Sur), no obstante, para una mayor comprensión del lector, en algunas ocasiones se hará referencia a las provincias o a puntos geográficos específicos. Pese a esto, es posible, por medio de aplicaciones especializadas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), representar los resultados con zonificaciones o divisiones más pequeñas, como por ejemplo las cuencas hidrográficas o incluso los cantones y distritos, sin embargo, se advierte que las clasificaciones político-socioeconómicas pueden resultar incompatibles con las climáticas, por ejemplo cuando las fronteras de un cantón o distrito se superponen a las de dos o más regiones climáticas.

2

MÉTODOS Y DATOS

En la figura 3 se muestra el dominio ampliado en el modelo PRECIS, que abarca la península de Yucatán, América Central, Colombia, el Mar Caribe, las Antillas mayores y una parte del océano Pacífico, incluyendo a la isla del Coco. En general, el dominio fue seleccionado de modo que permitiera el pleno desarrollo de las circulaciones de mesoescala y que incluyera los forzamientos regionales pertinentes (fenómenos sinóp-

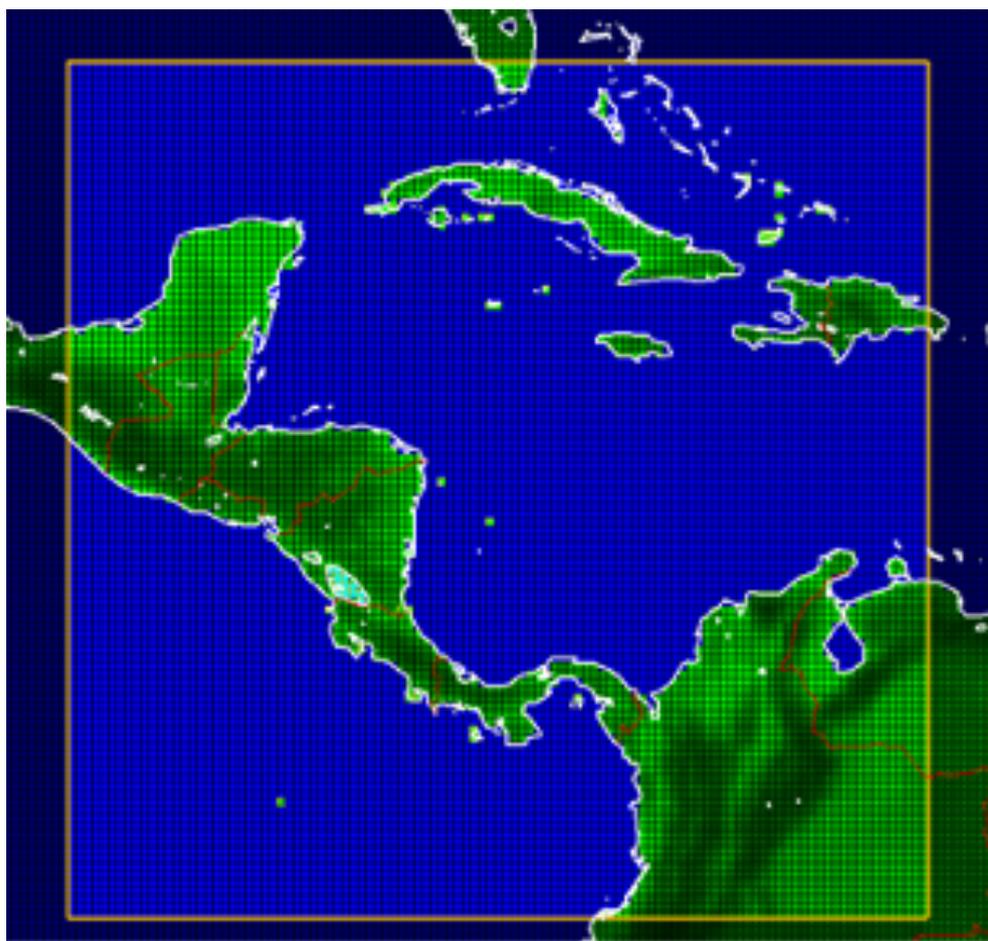


Figura 3. Dominio y resolución espacial del modelo PRECIS.

ticos como los frentes fríos, las ondas y ciclones tropicales, la Zona de Convergencia Intertropical, la corriente en chorro de bajo nivel del Caribe, oscilación Madden-Julian, etc).

Como fue citado antes, para la configuración del modelo PRECIS se seleccionó como forzante al modelo global HadGEM2-ES, a partir del cual se obtuvieron los datos de frontera de una simulación inicial de 54 años del clima pasado (1951-2005), y posteriormente otras dos para las proyecciones del clima futuro, usando los escenarios de emisiones RCP2.6 y RCP8.5 en el periodo 2006-2099. Las principales variables que comprenden las condiciones de frontera son la presión atmosférica en la superficie, las componentes del viento, temperatura y humedad a través de la profundidad de la atmósfera. También, para proyectar el cambio climático, el PRECIS incluye una representación del ciclo del azufre, así como las especies químicas pertinentes. Se seleccionó 25 km como resolución espacial y como escala temporal la diaria, a partir de la cual se formaron la mensual, estacional, anual, decadal y climatológica (30 años). PRECIS y el HadGEM2-ES no utilizan un calendario gregoriano, sino un calendario comercial de 360 días, por lo tanto, cada mes está compuesto de 30 días (incluyendo febrero).

Otro parámetro que se configura en el modelo PRECIS es el esquema de intercambio de calor y humedad entre el suelo y la capa límite planetaria, conocido como MOSES (UKMO Surface Exchanges Scheme), para el cual había dos opciones: MOSES I (Cox et al., 1999) y MOSES II.2 (Essery et al., 2001). Se seleccionó MOSES II.2 (Wilson et al. 2015), debido a que es un esquema más nuevo y avanzado que MOSES I.

Los datos de los resultados del modelo PRECIS son generados en un formato binario denominado “PP” (Wilson et al. 2015, pag. 89, 121) que proviene del inglés “Post Processing” que es un formato de archivo patentado para datos meteorológicos y desarrollado por UKMO (el Servicio Meteorológico Nacional del Reino Unido). La razón principal para usar dicho formato es aumentar la velocidad a la que se pueden escribir los datos del modelo en el disco, una consideración importante cuando se ejecuta una simulación que debe ser oportuna y eficiente.

Los datos del PRECIS fueron sujetos a un pre-procesamiento que incluía (1) eliminar un anillo de 8 píxeles (figura 3) de las fronteras del área de estudio; este anillo es una zona de amortiguamiento que no debe ser considerada en el análisis debido a que es la región en la que el modelo global se acopla con el modelo regional, (2) ignorar el primer año de datos de cada corrida (en inglés “spin up”) ya que es el tiempo necesario para asegurar que todos los componentes del modelo climático regional (RCM) alcancen un equilibrio físico, debido a las inconsistencias entre la física del RCM y las impuestas por las condiciones iniciales del GCM, y finalmente (3) hacer un regrillado de los datos para corregir la rotación de los ejes polares. Las razones de la aplicación de estos filtros se pueden consultar en el Manual de Usuario del modelo PRECIS (Wilson et al., 2015). Posteriormente fue necesario convertir estos datos al formato NetCDF,

ya que PRECIS no tiene un software para una adecuada manipulación de este tipo de formato. El formato NetCDF es más conocido por ser un estándar en aplicaciones científicas y con el cual se pueden producir los mapas y gráficos necesarios.

Con el fin de investigar el estado del clima regional, se utilizaron horizontes de tiempo de por lo menos de 10 años para dar una idea razonable del cambio climático, aunque es preferible 30 años para determinar cambios en las estadísticas de orden superior. Esto es particularmente importante para el análisis de aspectos de la variabilidad climática, como las distribuciones de precipitaciones diarias o extremos climáticos. Los datos de los escenarios futuros inician el 1/12/2005 y finalizan el 1/12/2099. Las décadas comienzan a partir del 2020-2029 y terminan en 2090-2099. Los tres periodos climáticos (de 30 años) son: 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099. PRECIS expresa la lluvia en términos de intensidad, en unidades de $\text{kg/m}^2\text{s}$, la cual fue necesario convertir a mm/día . De igual forma la unidad de la temperatura fue convertida de K (grados Kelvin) a $^{\circ}\text{C}$ (grados Celsius).

Las variables atmosféricas que se consideraron en este estudio fueron: precipitación total (convectiva + estratificada) en mm/día , la temperatura media en $^{\circ}\text{C}$ a 1.5 m del suelo, la radiación (irradiancia) solar en superficie en W/m^2 , velocidad media del viento (m/s) a 10 metros del suelo y la humedad relativa (%) a 1.5 m del suelo.

Para cuantificar la radiación solar se utilizan generalmente dos magnitudes que corresponden a la potencia y a la energía de la radiación que llegan a una unidad de superficie, se denominan irradiancia e irradiancia, respectivamente, ambas son medidas usando piranómetros y pirheliómetros. La **irradiancia** es definida como la potencia de la radiación instantánea incidente por unidad de superficie. Indica la intensidad de la radiación solar, es decir, la velocidad con que se produce o se consume la energía (Julios, J). Se mide en vatios ($\text{W} \rightarrow \text{J/s}$) por metro cuadrado (W/m^2). Se acostumbra a utilizar los términos **insolación** y radiación solar como sinónimos de la irradiancia. La **irradiancia** es la integración o suma de la irradiancia en un periodo de tiempo determinado. Es la cantidad de energía solar recibida durante un periodo de tiempo. Se mide en julios por metro cuadrado (J/m^2). En la práctica, dada la relación con la generación de energía eléctrica, se utiliza como unidad el $\text{W}\cdot\text{h/m}^2$ y sus múltiplos más habituales $\text{kW}\cdot\text{h/m}^2$ y $\text{MW}\cdot\text{h/m}^2$. En este estudio se utiliza el concepto de irradiancia solar total (directa + difusa) debido a que así es como la calcula el modelo PRECIS.

Como fue citado antes, los resultados originales del modelo PRECIS se presentan con una resolución espacial de 25 km, sin embargo, para efectos de las proyecciones futuras fue necesario aplicar una reducción de escala adicional para disminuir aún más la resolución. Para este fin se aplicó un método estadístico conocido como “delta” o factor de cambio (Ramírez & Jarvis, 2010), con el que se pueden alcanzar resoluciones muchos más finas que las de los modelos globales y regionales. El método, básicamente, produce una matriz interpolada de los cambios en los climas (deltas o anomalías)

y después se aplica esta superficie interpolada a una climatología de referencia de alta resolución espacial, teniendo en cuenta el posible sesgo debido a la diferencia en las líneas de base. Es necesario aclarar que el método asume que los sesgos desaparecen al considerar estas diferencias (o “deltas”), es decir, son lineales. Esta hipótesis es aproximada, ya que los sesgos de los modelos habitualmente están afectados por procesos e interacciones no lineales. Sin embargo, supone una alternativa práctica a la validación/calibración de los RCMs cuando no se dispone de series de observaciones diarias. El método asume las siguientes suposiciones: (1) los cambios en el clima solo varían en largas distancias (i. e. tan largos como el tamaño de celda de los modelos; (2) las relaciones entre las variables en la línea base (“clima presente”) es probable que se mantengan hacia el futuro. Las “anomalías o cambios” son remuestreadas (regrid) a una resolución más fina, utilizando para ello un método de interpolación covariado denominado “interpolación segmentaria o por splines cúbicos”. La idea central es que, en vez de usar un solo polinomio para interpolar todos los datos, se pueden usar segmentos de polinomios entre pares coordenados de datos y unir cada uno de ellos adecuadamente para ajustar los datos. Vale la pena resaltar que, entre todas las formas de ajustar datos, los splines cúbicos han resultado ser los más adecuados para aplicaciones climáticas (Tabor & Williams, 2010).

El proceso del método “delta” consiste en los siguientes pasos:

1. Se recopilan datos observacionales del clima actual o de línea base de alta resolución en formato reticulado.
2. Se recopilan las simulaciones históricas y futuras del modelo climático PRE-CIS, a la resolución nativa de 25 km². Se calcula la climatología mensual y anual de la línea base del modelo (1961-1990) y las de las proyecciones futuras con los promedios decenales y el de 30 años (2010-2039, 2040-2069, 2070-2099).
3. Se calculan las anomalías como la diferencia absoluta entre los valores futuros y el histórico en cada una de las variables a interpolar.
4. Se realiza la desagregación espacial de las anomalías de alta resolución (25 km) con el fin de que la matriz de datos tenga la misma resolución que la matriz de la línea base. Este procedimiento se realiza con el método de los splines cúbicos”, utilizando los centroides de los píxeles del modelo climático como puntos de interpolación.
5. Se suman las superficies interpoladas de las anomalías al clima actual de alta resolución, usando la suma absoluta para todas las variables, excepto la lluvia donde la adición fue relativa al porcentaje de cambio.

Con el fin de obtener una climatología confiable y de alta resolución, se utilizó la del WorldClimv2 (Fick & Hijmans, 2017), que es una base de datos climáticas a escala mundial y mensual, interpoladas espacialmente a una resolución espacial de 30 segundos de arco ($\sim 1 \text{ km}^2$ en el ecuador). Los parámetros climáticos considerados son: temperatura mensual (mínimo, máximo y promedio), precipitación, radiación solar (insolación), presión de vapor y velocidad del viento. Esta base de datos se desarrolló a partir de los promedios mensuales compilados del clima (1970-2000), medidos en las estaciones meteorológicas de un gran número de fuentes mundiales, regionales, nacionales y locales, en su mayoría del período 1970-2000. Se aplicó el algoritmo de interpolación segmentaria cúbica (“thin plate splines”) para producir y suavizar las superficies climáticas de todas las variables.

Las interpolaciones tipo “thin plate splines” se han utilizado ampliamente en climatología (Hutchinson, 1995; Hijmans et al., 2005; Diaz et al., 2008). El procedimiento garantiza una superficie lisa (continua y diferenciable) junto con superficies continuas de primera derivación. Pueden producirse cambios rápidos en el gradiente o pendiente (la primera derivada) en la proximidad de los puntos de datos.

3

CLIMA ACTUAL: OBSERVADO Y MODELADO

En esta sección se presentan dos tipos de clima actual: el representado por los datos observados y el que simula el modelo climático. En datos observados se utilizaron los correspondientes a las estaciones meteorológicas del IMN y los de la base reticulada WorldClim.v2 (abreviada de aquí en adelante como WCv2), con las cuales no solo se caracterizó con mayor detalle el clima actual, sino también para obtener los escenarios futuros a una baja resolución espacial (~1 km) mediante la aplicación del método delta. El periodo de referencia de esta climatología es 1970-2000. El WCv2 puede no ser perfecto y/o preciso en todas partes del mundo, sin embargo, sí parece representar en gran medida los climas actuales, según lo informado por los registros instrumentales (Fick & Hijmans, 2017). Los autores confirman que, con la metodología usada en las interpolaciones, las variables de temperatura y radiación tienen un nivel de error bajo (coeficiente de correlación entre 0.99 y 0.95), contrario al nivel relativamente alto de la lluvia y el viento (correlaciones entre 0.76 y 0.86). Esta base de datos ha sido utilizada y citada (al menos unas 6000 veces en publicaciones revisadas por pares) más que cualquier otra base de datos climáticos de alta resolución. Por estas razones es que este estudio eligió utilizarla como clima actual. Sin embargo, no se puede descartar que a un nivel más regional o local la incertidumbre sea mayor, especialmente en regiones con muy baja densidad de estaciones. Si bien para Costa Rica se utilizó un número significativo de estaciones termopluviométricas (346 = 46 de temperatura + 300 de lluvia, equivalente a 1 estación de lluvia por 170 km² y 1 estación de temperatura por 1.110 km²), la distribución espacial es relativamente homogénea, salvo en las siguientes tres regiones: llanuras del Norte (Guatuso, San Carlos y Tortuguero), Talamanca Caribe y la península de Osa. Debido a la baja densidad en estas regiones es que hay que tener un mayor cuidado en la interpretación de los resultados, no solo del WCv2, sino también de los escenarios futuros.

El clima actual que reproduce el modelo es denominado como “clima de control”, que es el que se utiliza para calcular el cambio climático, es decir, la diferencia entre un escenario futuro y el clima actual, ambos generados por el mismo modelo climático. El clima de control fue obtenido directamente de la simulación del modelo PRECIS

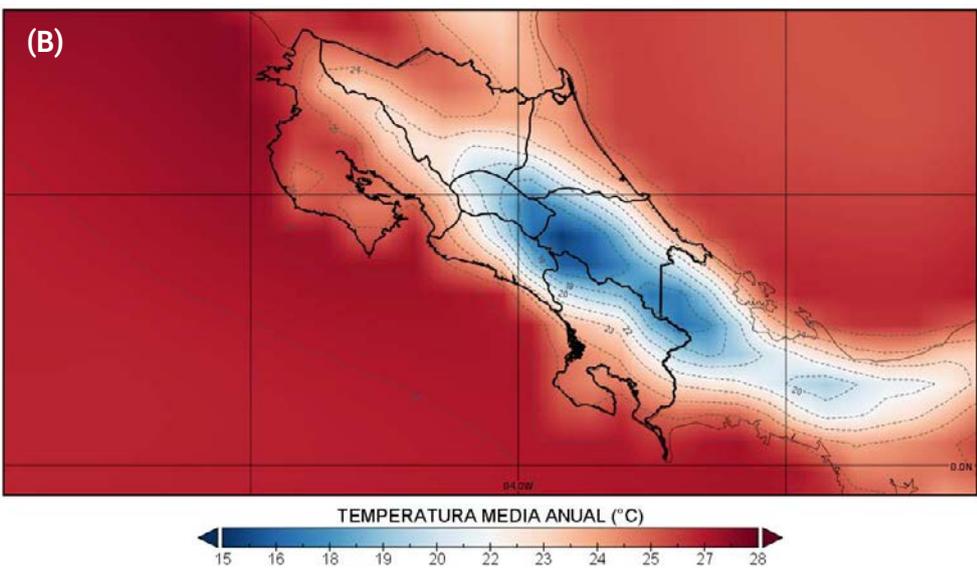
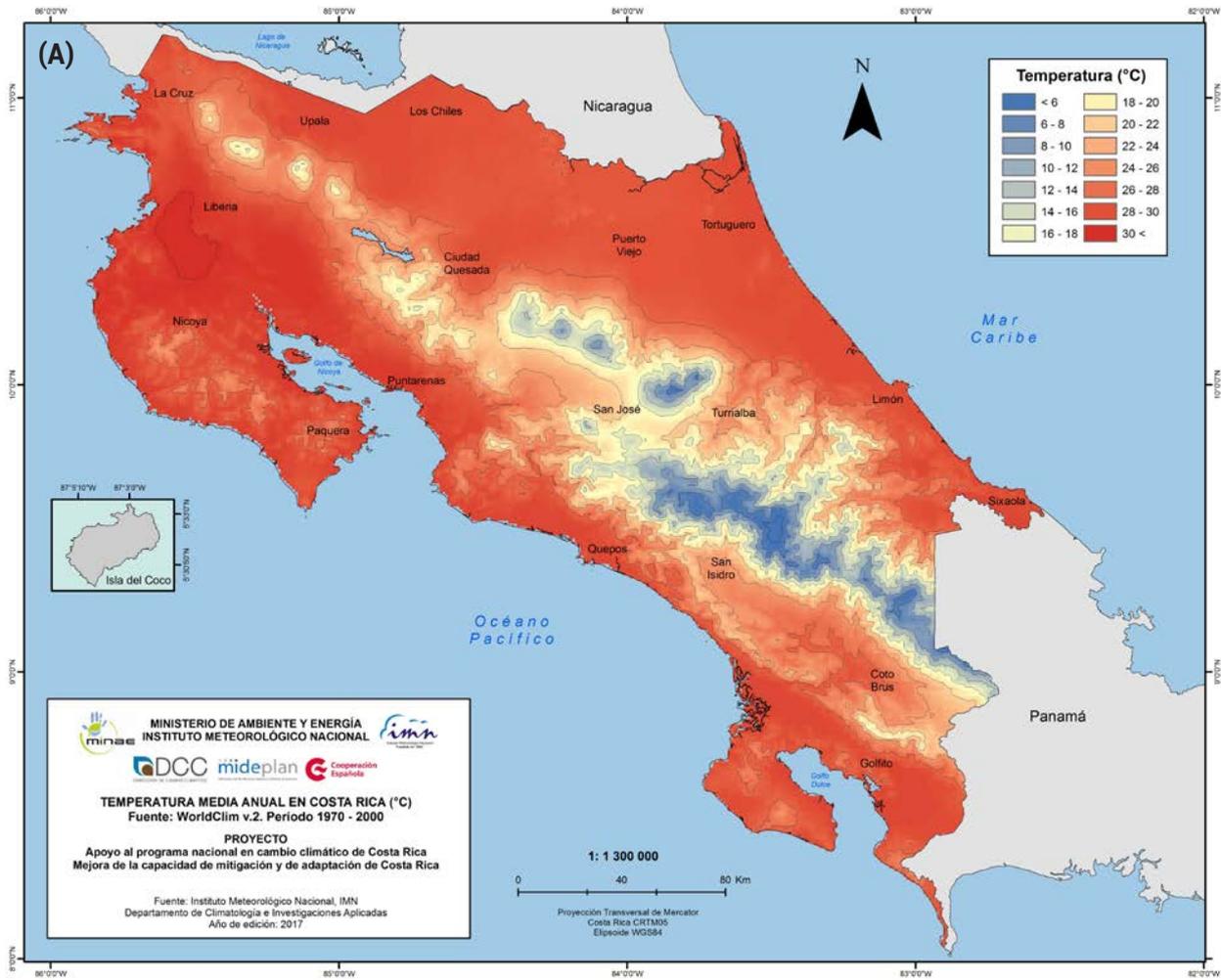


Figura 4. Climatologías de la temperatura media anual ($^{\circ}\text{C}$), (A) observada del WCv2 (1970-2000) y (B) simulación de control del clima actual (1961-1990) del modelo PRECISv2.0.

para el periodo 1961-1990 y con una resolución espacial de 25 km. Este modelo fue forzado con las condiciones iniciales y de frontera del modelo global HadGEM2_ES del Centro Hadley de Inglaterra. El detalle espacial de las imágenes del WCv2 es más fino que el del modelo debido a que la resolución espacial del primero es 25 mayor que la del segundo (PRECIS=25 km vs WCv2=1 km).

Las figuras 4A, 6A, 8A, 9A y 10A muestran el mapeo de los valores medios anuales de las variables meteorológicas según el WCv2. La única variable que no se pudo mapear fue la humedad relativa debido a que no formaba parte del conjunto de datos del WCv2. Las figuras 4B, 6B, 8B, 9B y 10B corresponden al clima de control del modelo PRECIS (1961-1990), el cual se muestra con un suavizado de su resolución nativa (25 km²).

3.1. Temperatura media

Las climatologías de la temperatura media anual, tanto del WCv2 como la simulada por el modelo (figuras 4A, B) son aceptables debido a que representan razonablemente bien las magnitudes y las variaciones horizontales conocidas para este parámetro, por

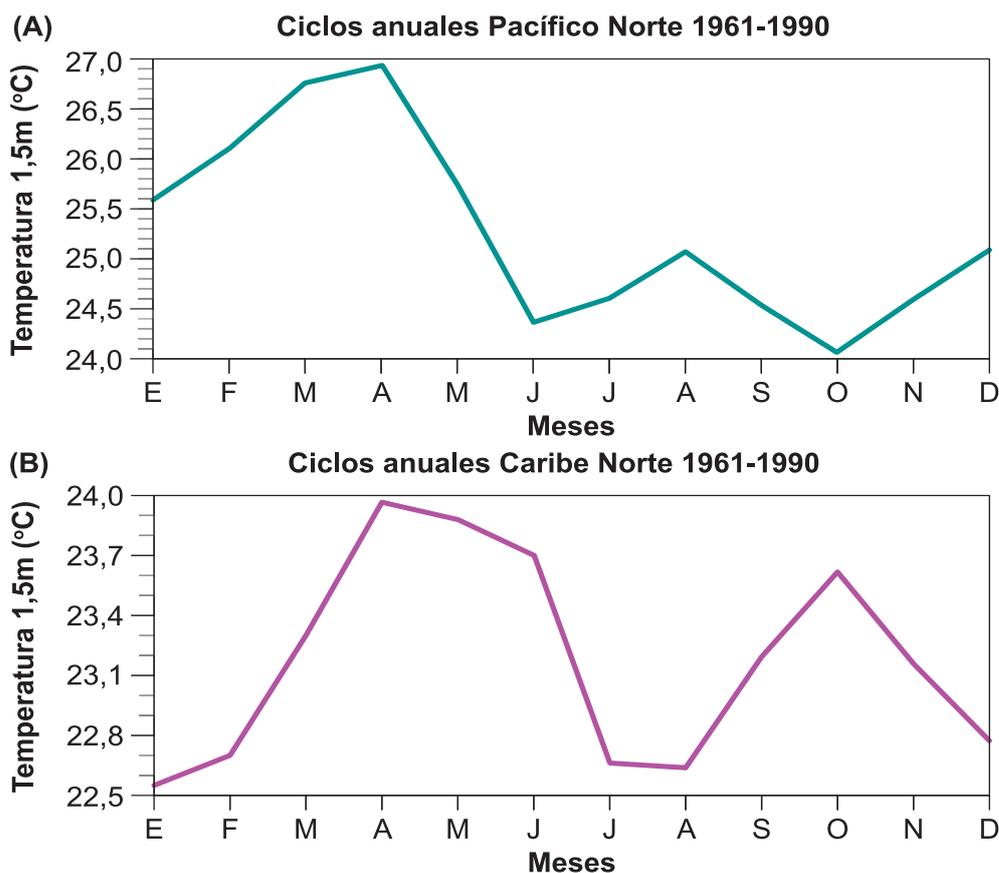


Figura 5. Ciclo anual de la temperatura media (°C) de la climatología de control (1961-1990) simulada por el modelo PRECIS para (A) el Pacífico Norte y (B) Caribe Norte.

ejemplo, nótese la variación con la altitud, los valores más altos en Guanacaste y los más bajos en la cordillera de Talamanca. Adicional, el modelo logra reproducir muy bien el ciclo anual de la temperatura en dos regiones distintas del país (figura 5). Ambas coinciden con que las temperaturas más altas del año se presentan entre marzo y abril. Las temperaturas más bajas en el Pacífico Norte (Caribe Norte) suceden en octubre (enero). En el Pacífico Norte (Caribe Norte) agosto presenta un máximo (mínimo) secundario.

3.2. Lluvia

Respecto a la lluvia media anual, la climatología del WCv2 (figura 6A) muestra magnitudes y patrones espaciales muy coherentes con el comportamiento real de esta variable, donde se destaca el mínimo que se presenta en la región del Pacífico Norte con montos menores a los 2000 mm anuales. Se nota también los valores relativamente bajos que se registran en el Valle Central y en general sobre las cordilleras del país. Se evidencia también una acentuada variación latitudinal, que es diferente en ambas vertientes, por ejemplo, en la del Pacífico las lluvias disminuyen de sur a norte, contrario al Caribe donde más bien aumentan de sur a norte. Quedan bien identificados los máximos (más de 6000 mm) que se presentan a media montaña a barlovento de la cordillera de Talamanca (por ejemplo, el de parte alta de la cuenca del río Reventazón) y la cordillera Central, igualmente los de la llanura de Tortuguero (Caribe Norte) y el Valle de Coto Colorado (Pacífico Sur). Otros máximos fueron subestimados o descartados por el WCv2, como por ejemplo el ubicado en Naranjito de Quepos (Pacífico Central) y el del lago Arenal (Zona Norte), ambos de 5000 mm - 6000 mm anuales. La simulación de la lluvia anual por parte del modelo PRECIS (figura 6B) logra reproducir bastante bien los montos y patrones en el Pacífico Norte, por ejemplo, los montos de 2000 mm o menos en el centro y norte de la región, así como los 3000 mm en la parte sur (península de Nicoya). No obstante, presenta errores de subestimación o sobrestimación en el resto del país: se observa una significativa subestimación en la Zona Norte, Caribe Norte y el Pacífico Sur, donde no logra capturar el patrón de disminución de la lluvia con la altitud. Por el contrario, en el Caribe Sur y Pacífico Central, si bien el modelo muestra en general un sesgo hacia montos más altos que lo real, logró capturar los máximos de esas regiones, aunque desplazados o cubriendo una mayor área.

Las simulaciones de control (del clima actual) de modelos regionales muestran generalmente desviaciones sistemáticas de las observaciones, las cuales son debidas a factores como la resolución espacial, simplificaciones de los procesos físicos y termodinámicos, esquemas numéricos, errores en las condiciones iniciales y de contorno, complejidad de los procesos climáticos, etc. De acuerdo con la figura 7 (que compara la variación mensual de las lluvias entre el modelo PRECIS y las estaciones

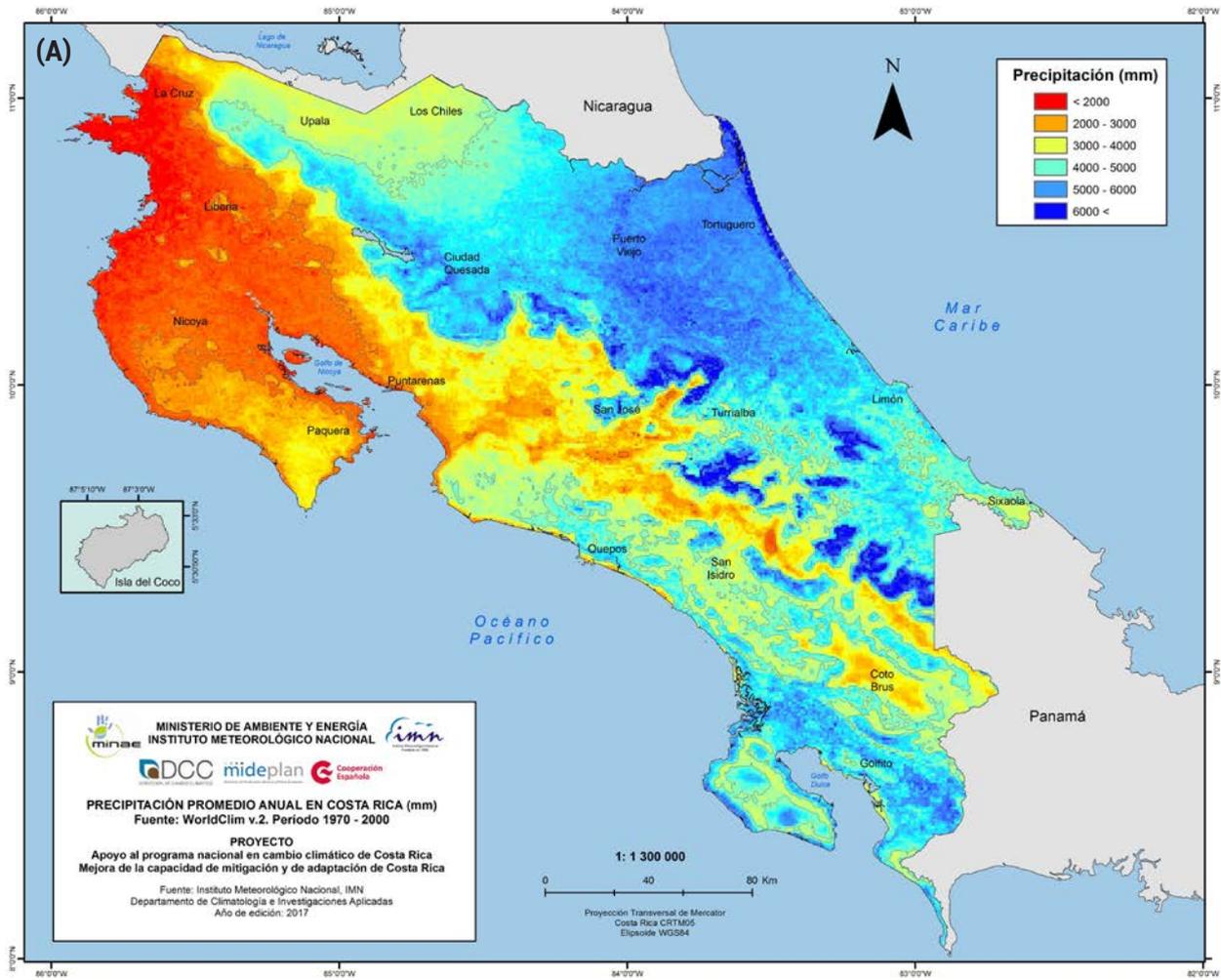
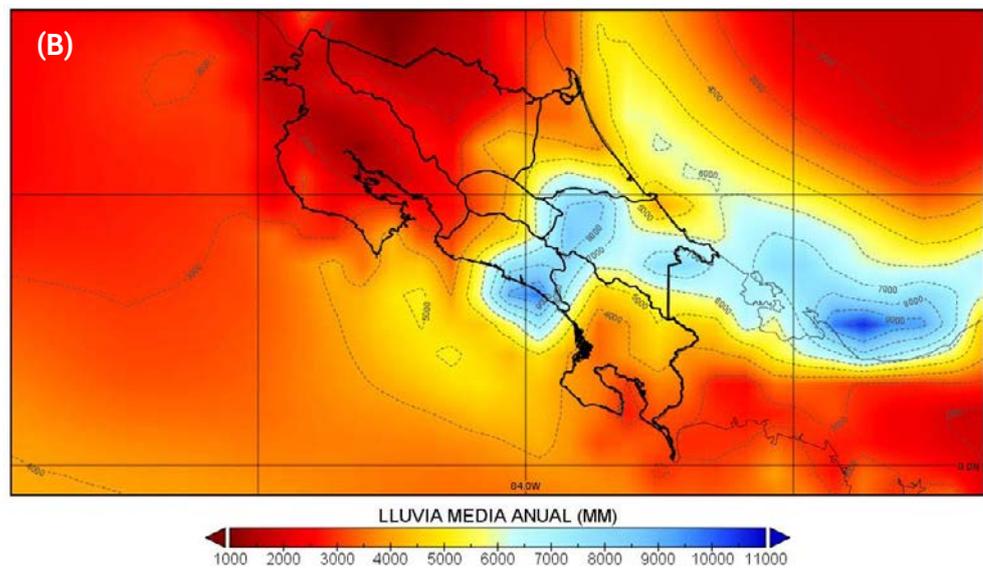


Figura 6. Climatologías de la lluvia media anual (mm), (A) observada del WCv2 (1970-2000) y (B) simulación de control del clima actual (1961-1990) del modelo PRECISv2.0.



meteorológicas) el modelo PRECIS solo logró reproducir razonablemente bien el ciclo anual del Pacífico Norte, en especial el comportamiento durante la temporada seca, así como los máximos de junio y octubre, y el mínimo de julio asociado al veranillo. No obstante, el modelo sobrestima la lluvia de la primera parte de la temporada de lluvias, en particular el máximo de junio, mientras que, tiende a subestimar los montos -aunque en menor magnitud- de la segunda parte. En las demás regiones

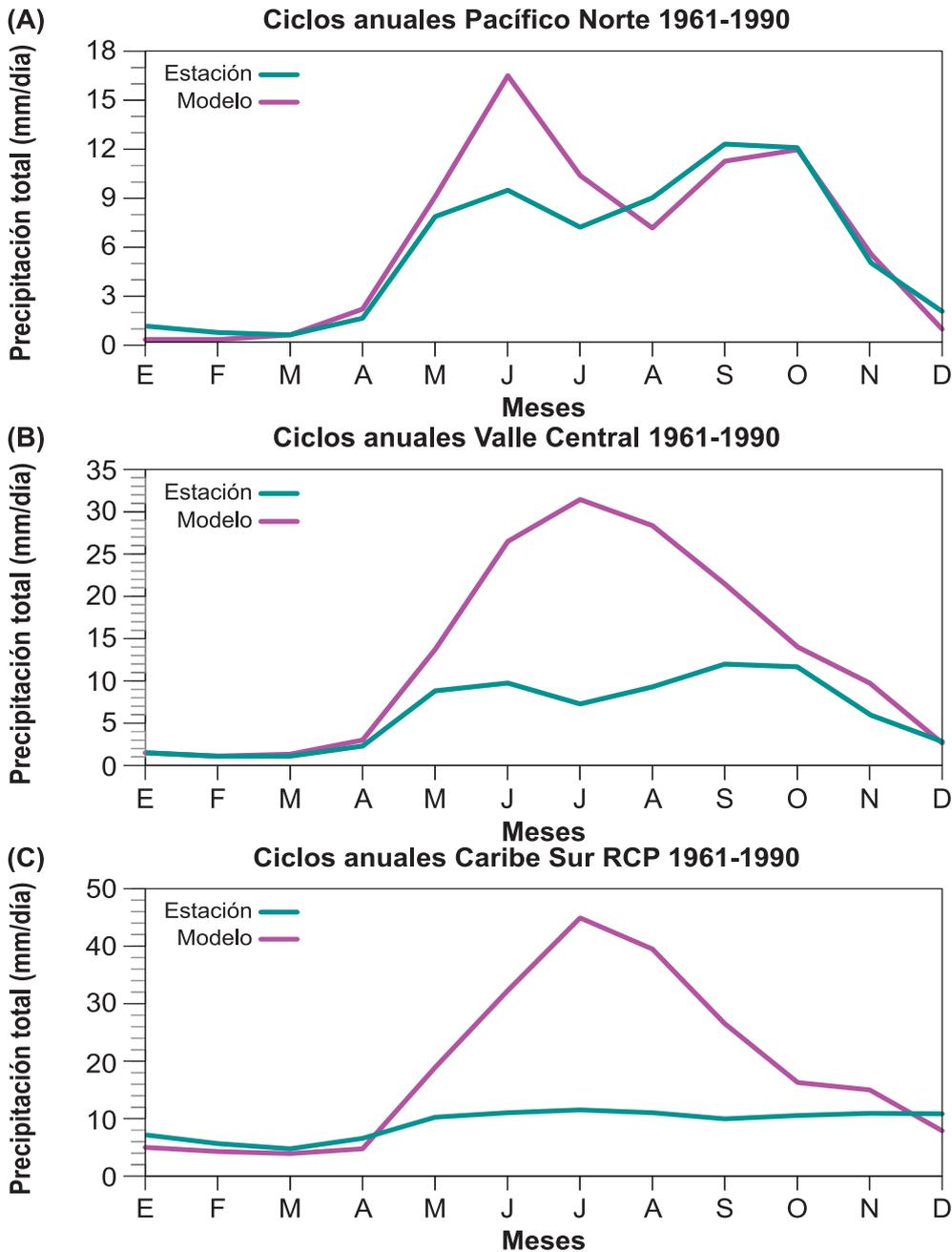


Figura 7. Ciclo anual observado (de estaciones meteorológicas) y simulado por el modelo (PRECIS) del periodo 1961-1990 para las regiones del (A) Pacífico Norte, (B) Valle Central y (C) Caribe Sur.

el modelo simula un ciclo anual muy distinto al real u observado, particularmente entre mayo y octubre, que en general presenta un fuerte sesgo positivo, con un máximo prominente en julio, el cual es razonable para el régimen Caribe, pero no para el Valle Central. Nótese que las estimaciones entre diciembre y abril son mejores, sin embargo, no muestra el aumento de lluvias típico de diciembre en el régimen Caribe. En un estudio de validación de modelos globales y regionales del proyecto CORDEX para Centroamérica (<https://cordex.org/>) Mendez et al (2020) demostraron que, para el caso particular de Costa Rica, la mayoría de los modelos analizados mostraron un sesgo negativo (subestimación) entre diciembre y mayo en casi todo el país, pero por el contrario se observó una sobrestimación (sesgo positivo) durante la temporada de lluvias, especialmente entre setiembre y noviembre. Estos sesgos de la lluvia del modelo PRECIS (y del cualquier otro modelo regional) son consecuencia de la naturaleza altamente no-lineal y convectiva de la misma y a su gran variabilidad espacial, particularmente en regiones geográfica y orográficamente complejas como la de Costa Rica.

Como consecuencia de lo anterior, se hace necesario y hasta obligatorio la aplicación de métodos de corrección de sesgos (BC) con el fin de obtener unas proyecciones de cambio climático más precisas y realistas. Debido a la baja habilidad del modelo PRECIS en resolver las características estacionales mencionadas (en especial durante el verano boreal), salvo en el Pacífico Norte, en lo que resta de este análisis se mostrarán resultados a escalas no estacionales. Si bien en este estudio no fue posible realizar la corrección de sesgos, en el estudio de Mendez *et al.* (2020) se realizaron las correspondientes correcciones estacionales a las proyecciones de la precipitación (únicamente).

3.3. Humedad relativa

En cuanto a la humedad relativa, se citó anteriormente que el WCv2 no disponía de los datos correspondientes. La figura 8 corresponde al mapeo de la humedad relativa según la simulación del modelo PRECIS. Este modelo indica que las humedades más altas (mayores al 90%) se localizan en el sector montañoso del Caribe Sur, seguido de la península de Osa (Pacífico Sur), mientras que las más bajas están ubicadas en el centro y norte del Pacífico Norte (menores al 75%). Estas características son muy consistentes con el modelo conceptual que se tiene del comportamiento real de la humedad, donde los valores más bajos se registran en el Pacífico Norte y los más altos en la región Caribe y Pacífico Sur. Sin embargo, al igual que con el viento y la radiación, no es posible comprobar y validar cuantitativamente las magnitudes de esta variable debido a la carencia de un mapa climatológico de humedad relativa.

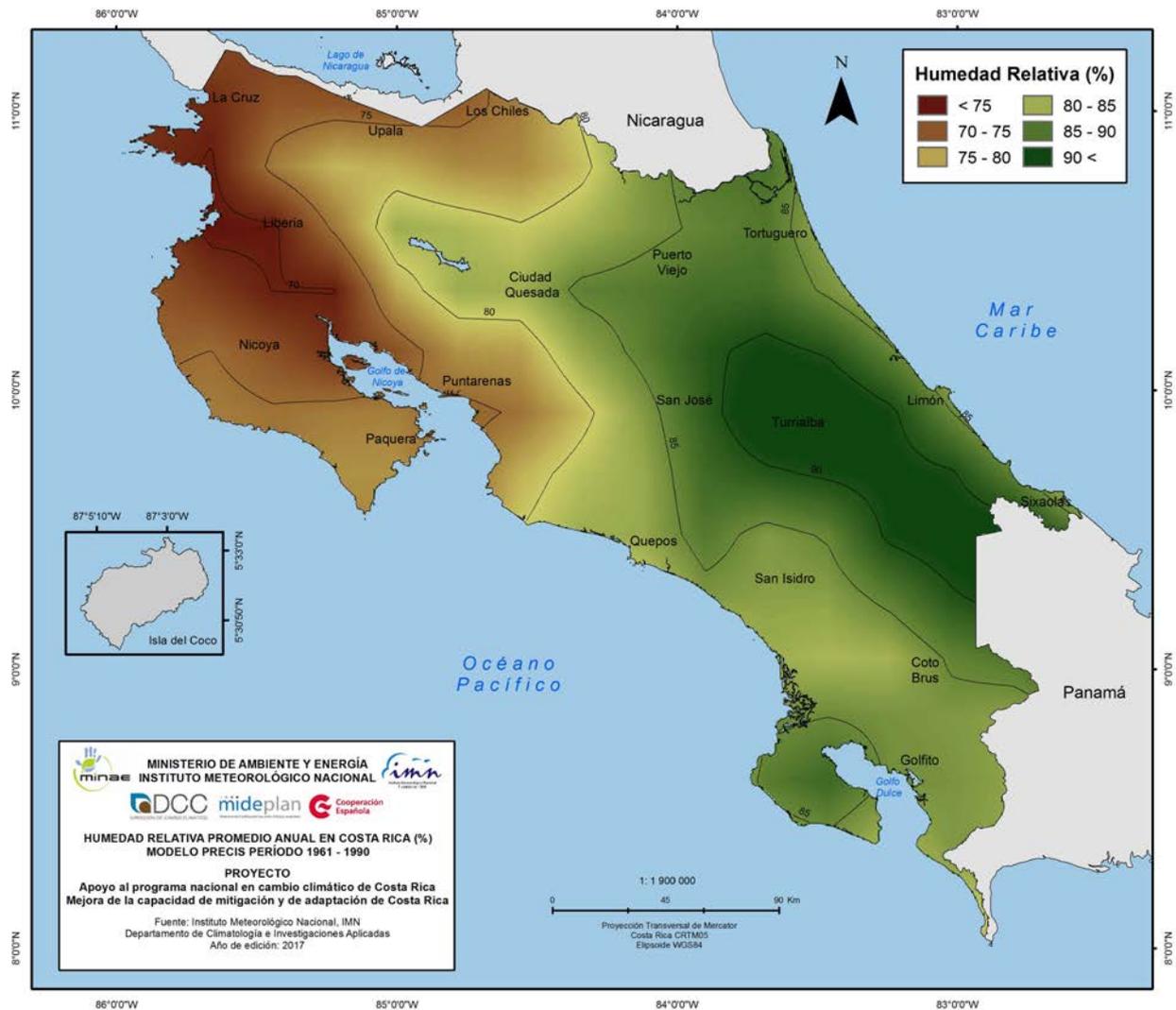


Figura 8. Climatología de control (1961-1990) de la humedad relativa media anual (°C) simulada por el modelo PRECISv2.0.

3.4. Radiación solar

La radiación solar media anual (W/m^2) es una de las tres nuevas variables que se incluyen en este estudio, su importancia radica en el auge del uso de energías renovables que Costa Rica está impulsando como parte de los compromisos de mitigación de los efectos del calentamiento global. Por el momento su participación en la matriz eléctrica nacional es la más baja (menos del 0.1%).

La figura 9A muestra la distribución horizontal de la radiación según el WCv2, donde se aprecian cifras altas (mayores a $230 W/m^2$) en el Pacífico Norte, Valle Central, Pacífico Central y algunos sectores del Pacífico Sur (Valle del General, Valle de Coto

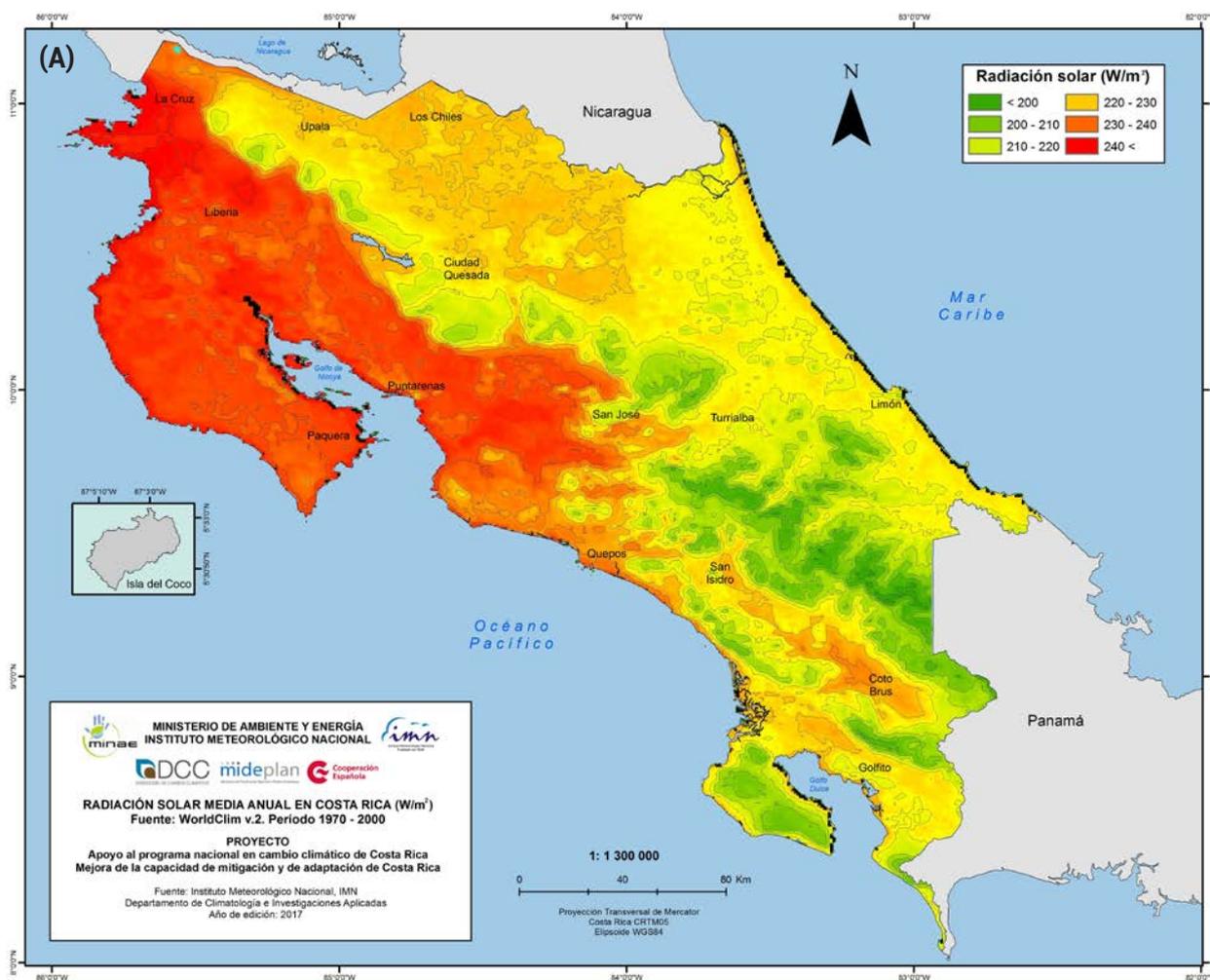
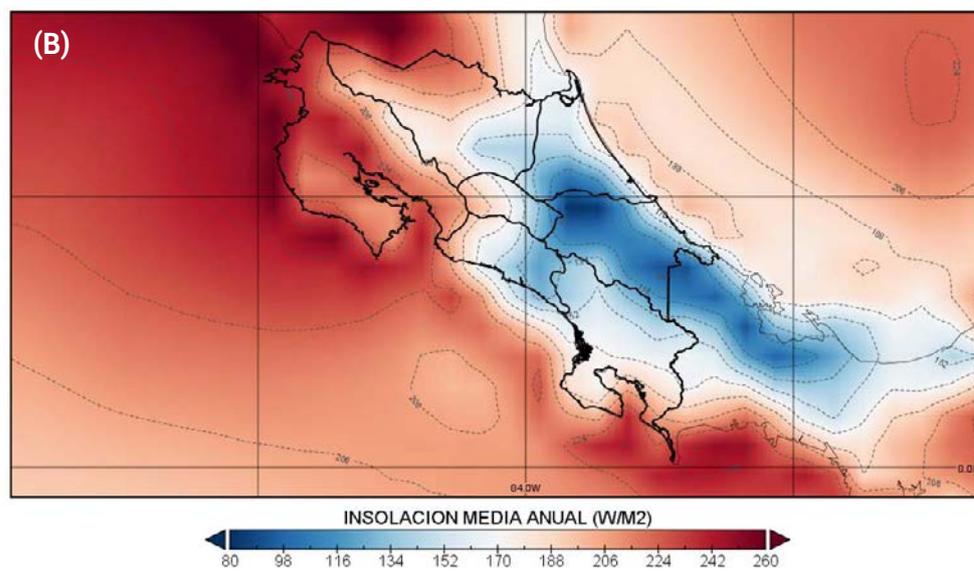


Figura 9. Climatología de la radiación solar media anual (W/m^2) del (A) WCV2 (1970-2000) y (B) de la simulación de control de clima actual (1961-1990) del modelo PRECISv2.0.



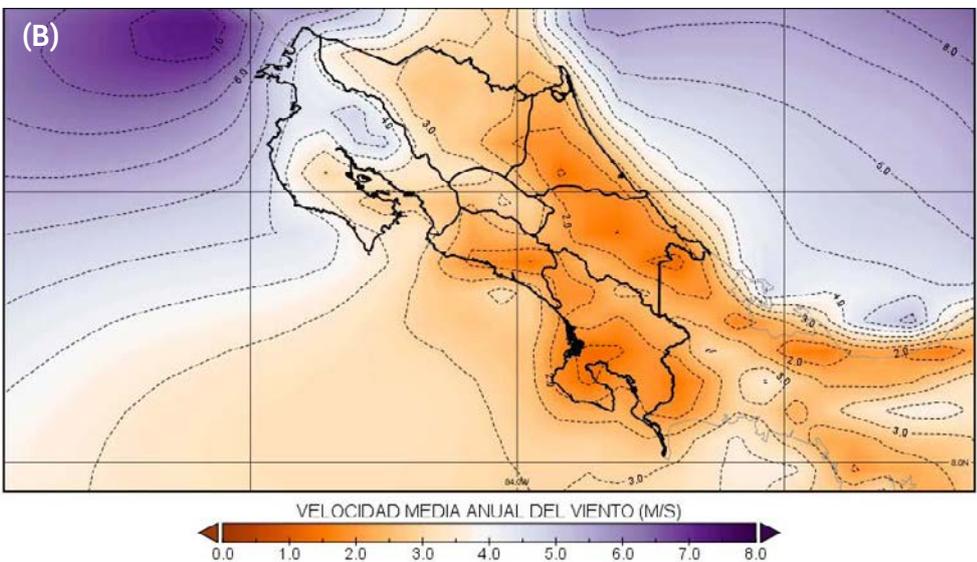
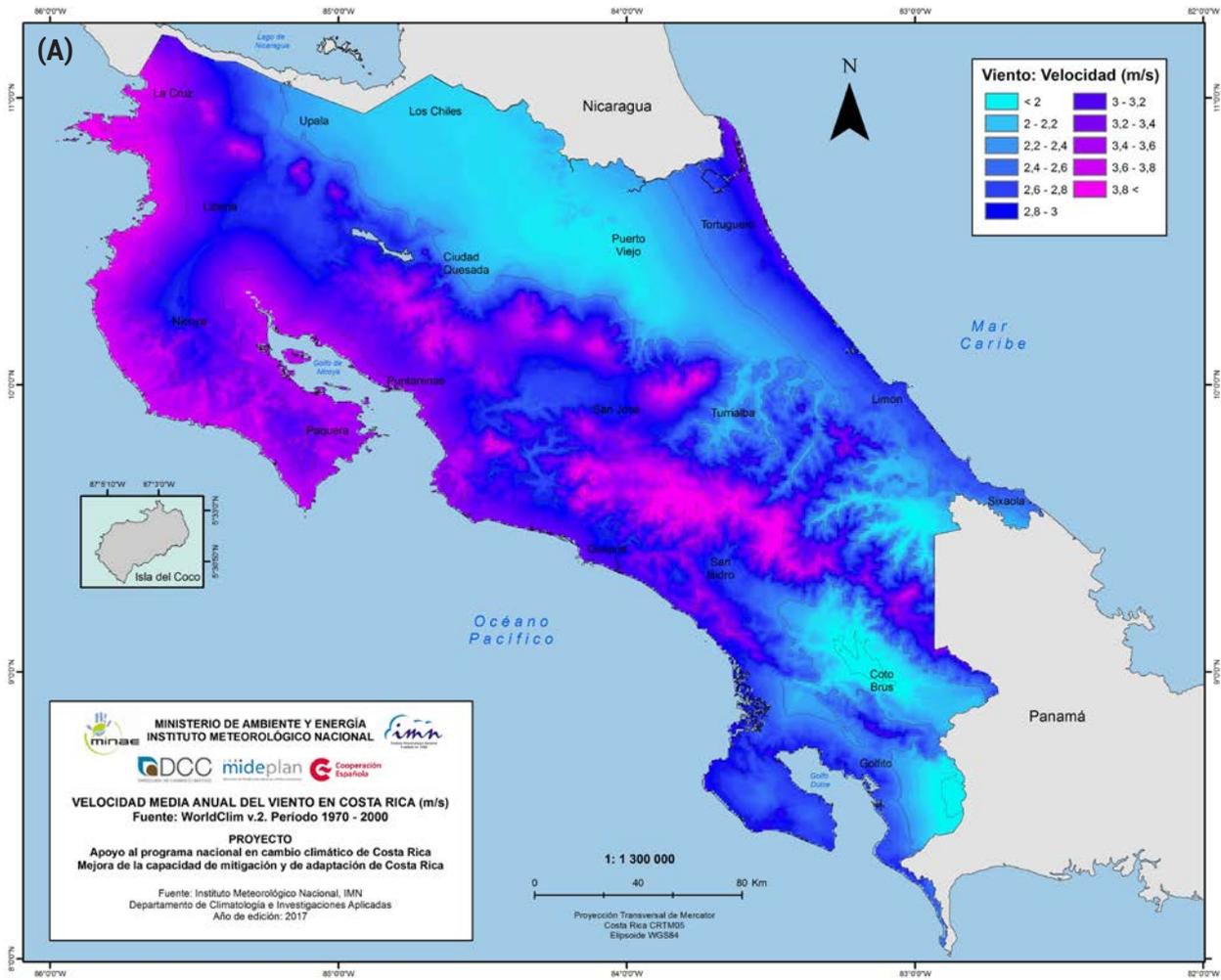


Figura 10. Climatología de la velocidad media anual del viento (m/s) obtenida del (A) WCV2 (1970-2000) y de (2) la simulación del modelo PRECISv2.0 del clima actual (1961-1990).

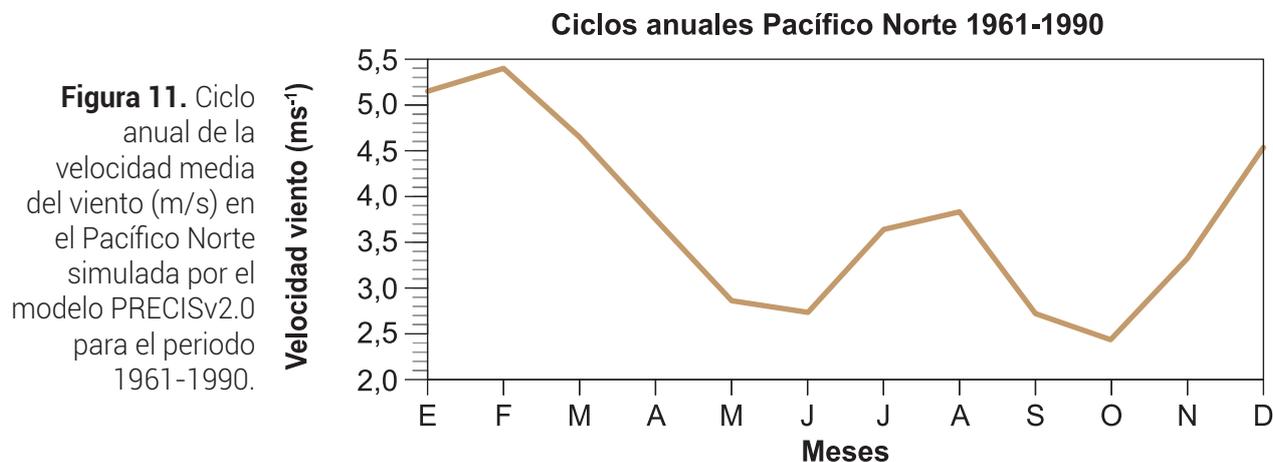
Brus). Valores intermedios ($220\text{-}230\text{ W/m}^2$) se observan en la Zona Norte, mientras que las más bajas radiaciones (menores a 220 W/m^2) se presentan en la Vertiente del Caribe y faldas orientales de la cordillera de Guanacaste. El modelo PRECIS simula un patrón espacial muy parecido al WCv2: los montos más altos en el Pacífico Norte y los más bajos en el Caribe Sur, sin embargo, las magnitudes son más bajas en general, por ejemplo, de 100 W/m^2 o menor en el Caribe Sur y de $220\text{-}240\text{ W/m}^2$ en el Pacífico Norte.

Es importante aclarar que en este estudio no fue posible validar los datos espaciales y temporales de la radiación solar del modelo PRECIS ni del WCv2 con datos observacionales de estaciones meteorológicas, ya que no se cuenta actualmente con una base de datos robusta (densidad espacial y longitud de las series de tiempo) que coincida con el periodo de análisis del PRECIS (1961-1990) ni del WCv2 (1970-2000).

3.5. Velocidad del viento

La velocidad media del viento (m/s) también es un elemento importante de considerar como una alternativa para producir energía limpia, que el país ha venido explotando desde mediados de la década de los noventa. En el 2016 la fuente eólica fue la tercera en participación en la matriz eléctrica nacional (10.6%), después de la hidráulica (74.4%) y la geotérmica (12.4%).

La figura 10A muestra el mapeo del viento según el WCv2, donde las velocidades más altas (3.6 m/s o más) se presentan en el Pacífico Norte, así como a todo lo largo del sistema de cordilleras del país. Los vientos más débiles (2.2 m/s o menor) están concentrados en las llanuras de la Zona Norte, los valles de Coto Brus, Coto Colorado (ambos en el Pacífico Sur) y de Talamanca (Caribe Sur). El modelo PRECIS (figura 10B) presenta las velocidades más altas (4.0 m/s o más) en el centro y norte de Gua-



nacaste, mientras que las más bajas (2.0 m/s o menos) en toda la provincia de Limón (con un mínimo en el Valle de Talamanca), y en el Pacífico Sur, específicamente en el cantón de Osa. Nótese que el PRECIS también tiene la habilidad de reproducir el área de vientos máximos al noreste del país asociados al llamado “jet o chorro de Papagayo”.

El análisis regional con varias estaciones muestra que el modelo simula muy bien el ciclo anual de la velocidad media del viento en el Pacífico Norte (figura 11), el cual es coherente con lo observado en términos de las magnitudes y las variaciones estacionales: un máximo absoluto entre enero y febrero, un máximo secundario entre julio y agosto (correspondiente al veranillo de mediados de año), y dos mínimos: el primero en junio y el segundo en octubre.

4

ESCENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS RCP2.6

Las proyecciones climáticas futuras serán presentadas de acuerdo con los dos escenarios de emisiones (RCP2.6 y RCP8.5), los tres periodos climáticos (2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099) y las siete regiones climáticas del país (Pacífico Norte, Pacífico Central, Pacífico Sur, Valle Central, Zona Norte, Caribe Norte y Caribe Sur).

Es importante tener presente que el escenario RCP2.6 es uno de bajas emisiones de gases de efecto invernadero y que seguramente mostrará variaciones similares o poco significativas con respecto al clima actual.

4.1. Temperatura

Las figuras 12 (A, B, C), muestran el mapeo de las temperaturas medias para los tres periodos climáticos: el de corto plazo (2010-2039), mediano plazo (2040-2069) y largo plazo (2070-2099). Las diferencias parecen ser muy sutiles entre uno y otro mapa, sin embargo, las temperaturas en el horizonte de tiempo de mediano plazo parecieran ser menos cálidas que las de los otros dos horizontes. No obstante, el horizonte de tiempo de largo plazo resulta ser más cálido que los otros dos por aproximadamente $+0.3^{\circ}\text{C}$ a 0.5°C , lo que indica que el escenario de bajas emisiones RCP2.6 genera incrementos proporcionales a la magnitud de las emisiones de GEI.

El análisis de los cambios de temperatura (escenario futuro menos el clima de control o actual) de los tres horizontes de tiempo (figuras 13 A, B, C) manifiestan en todos los casos un aumento de la temperatura del orden de 1°C a 2°C con respecto al clima de control. La escala de colores permite ver que las proyecciones de corto plazo son las de menor aumento (1.1°C a 1.3°C), y que las de mediano y largo plazo son mayores pero muy similares entre sí en cuanto a los cambios (1.5°C a 1.8°C). Otro aspecto importante de resaltar es que, para los tres horizontes de tiempo, los aumentos de temperatura en la Vertiente del Caribe y la Zona Norte son ligeramente mayores que los de la Vertiente del Pacífico.

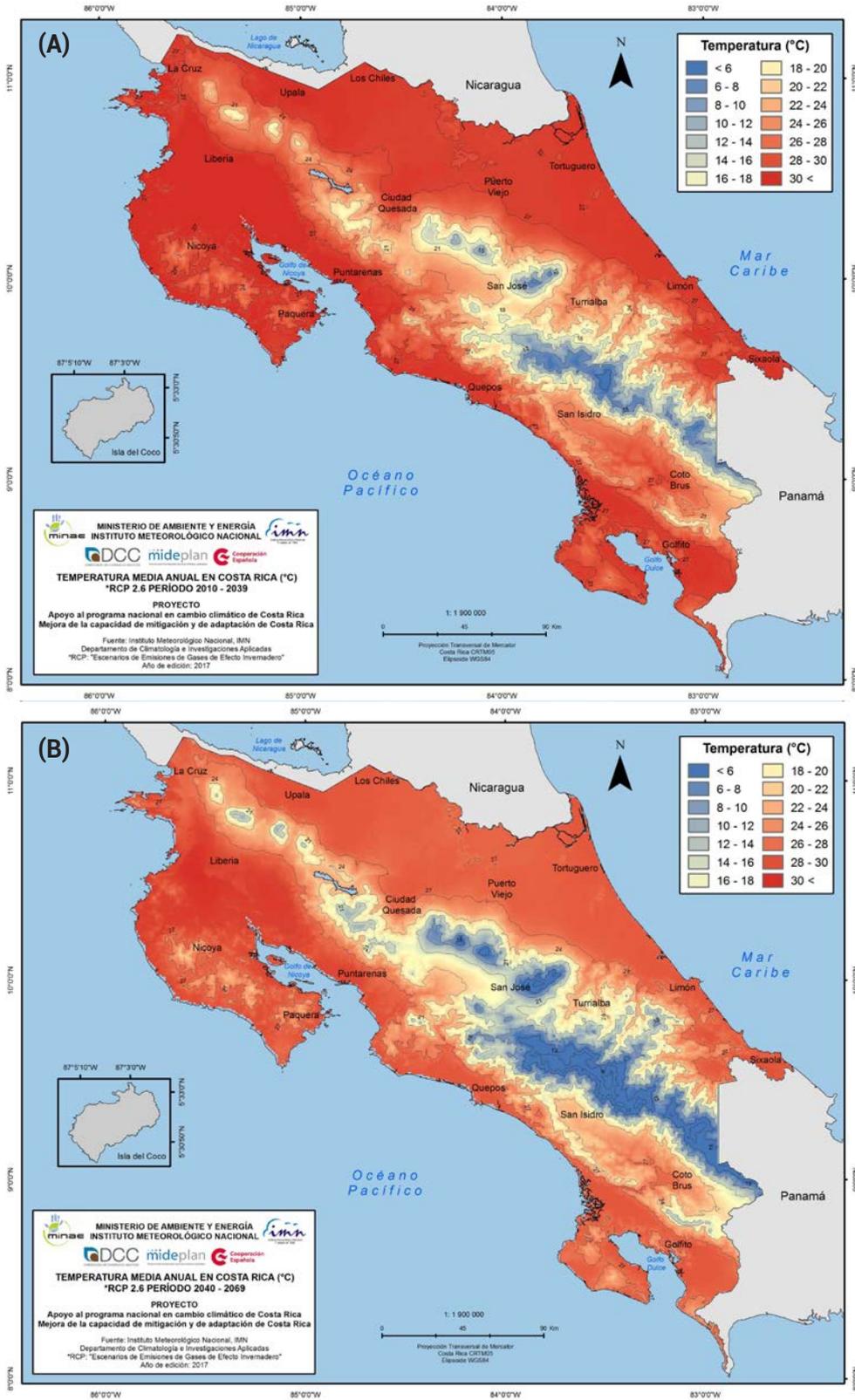
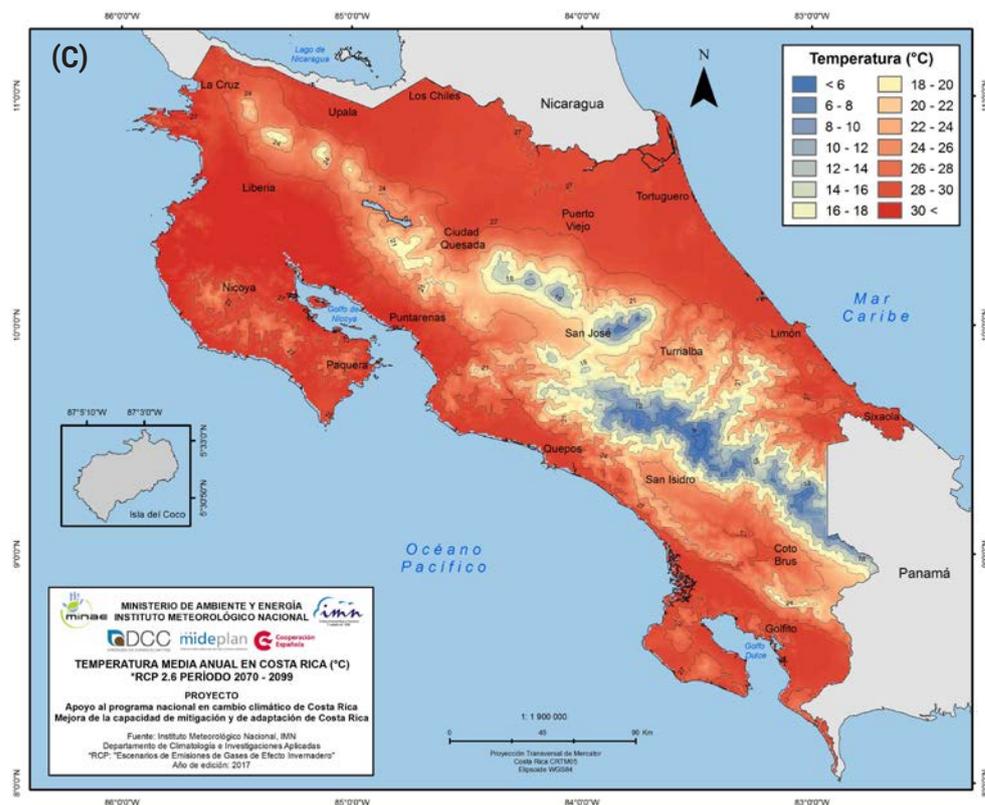


Figura 12. Proyección de (A) corto plazo (2010-2039), (B) mediano plazo (2040-2069) y (C) largo plazo (2070-2099) de la temperatura (°C) media anual usando el escenario de emisiones RCP2.6. Fuente: modelo PRECISv2.0

Figura 12.
Continuación.



Para el caso particular del Caribe Norte (y que se puede generalizar para todo el país) el aumento de la temperatura con respecto al clima actual es ligeramente menor (figura 14) en el horizonte de tiempo más próximo (1020-2039) que con respecto a los dos siguientes, quienes muestran comportamientos y magnitudes casi iguales.

4.2. Lluvia

Las figuras 15 (A, B, C) muestran el mapeo de la lluvia media anual de los tres periodos u horizontes de tiempo: el de corto plazo (2010-2039), mediano plazo (2040-2069) y largo plazo (2070-2099).

En comparación con el clima actual (figura 6A), se observa un incremento de las lluvias en el Caribe Norte y la Zona Norte en el escenario de corto plazo (figura 15A y 16A), el mismo comportamiento, aunque de menor magnitud se presenta en la península de Nicoya, partes bajas del Pacífico Central y el sector más sur del Pacífico Sur (cantones de Osa, Golfito y Corredores). En el resto de las regiones (Caribe Sur, Valle Central, partes altas del Pacífico Central y Valles del General y Coto Brus) por el contrario se observa una disminución de las precipitaciones. En la figura 12a se nota

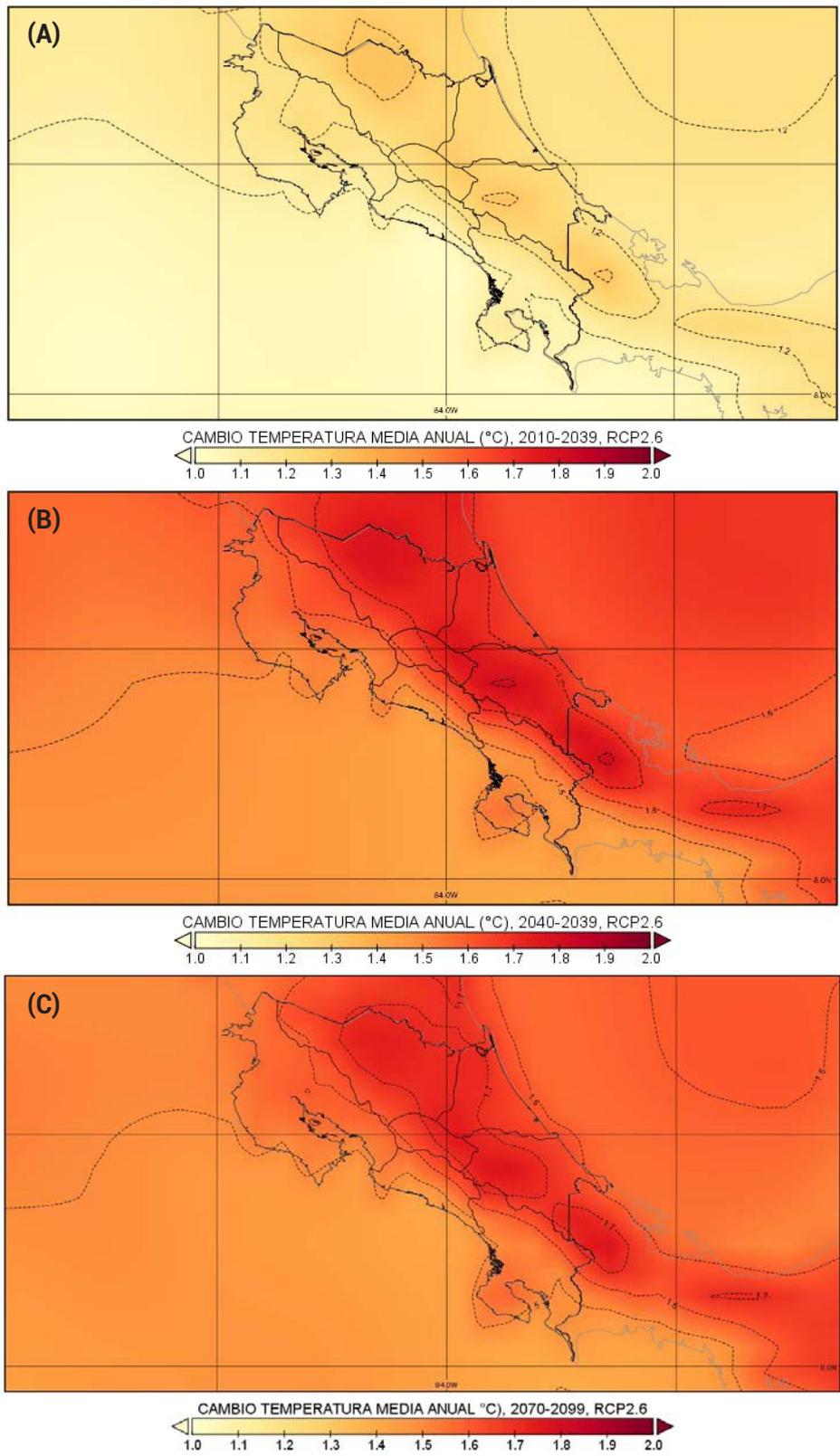
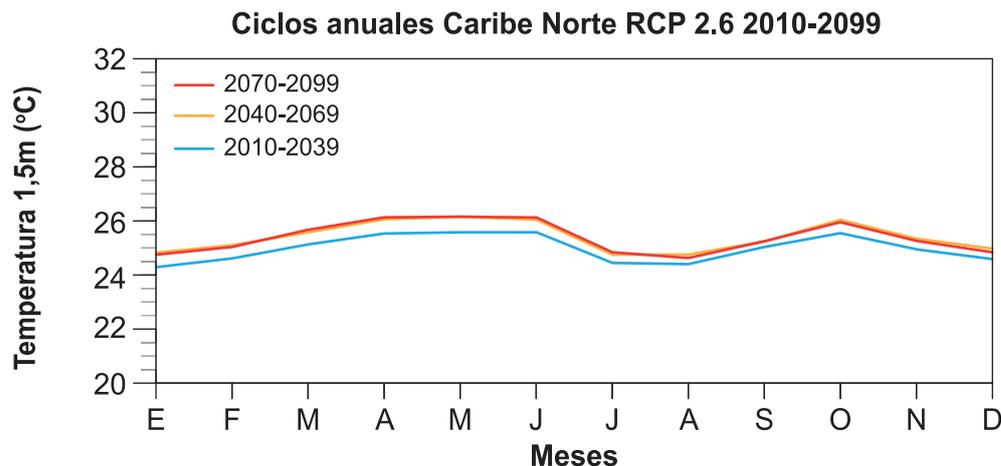


Figura 13. Cambio de la temperatura media anual (°C) en los horizontes de tiempo de (A) corto plazo (2010-2039), (B) mediano plazo (2040-2069) y (C) largo plazo (2070-2099) usando el escenario de emisiones RCP2.6. Fuente: modelo PRECISv2.0

Figura 14. Ciclo anual de la temperatura media (°C) para la región Caribe Norte proyectado por el modelo PRECISv2 del escenario RCP2.6 para tres horizontes del tiempo que comprenden el periodo de 2010 al 2099.



que los mayores aumentos (de hasta 700 mm) se presentarían en las laderas orientales de la cordillera de Guanacaste, específicamente de los volcanes Orosi y Rincón de la Vieja, mientras que las zonas con disminución tendrían hasta 400 mm menos de lluvia (figura 16A).

En el escenario de mediano plazo (2040-2070, figura 15B) se nota una disminución generalizada de las precipitaciones con respecto al periodo anterior.

Nótese que, con respecto al horizonte de mediano plazo, el de largo plazo (2070-2099) manifiesta un comportamiento dependiente de la región: con un aparente aumento en las regiones del Pacífico y una disminución en las del Caribe y Zona Norte. Sin embargo, al compararlo con el clima actual (el de control simulado por el PRECIS), también se observa un aumento en el Pacífico Norte, lo cual se refleja en la contracción de la isoyeta de 2000 mm (figura 15C), es decir, disminuye el área con precipitaciones menores a los 2000 mm anuales y se desarrollan regiones con lluvias hasta los 2500 mm, incluso a los 3000 mm en la parte sur de la península de Nicoya (distritos de Paquera y Cóbano). En general la Zona Norte y el Caribe Norte presentan montos más altos que el clima actual, entre 200 y 800 mm más (figura 16), particularmente las estribaciones orientales de los volcanes Orosi y Rincón de la Vieja. Las zonas bajas del Pacífico Central y Sur también presentan aumentos del orden de 200 a 500 mm, caso contrario al Valle Central, zonas altas del Pacífico Central/Sur y el Caribe Sur, donde las cifras disminuirían entre 100 y 400 mm menos.

De acuerdo con la figura 12 de las proyecciones estacionales de Mendez et al. (2020), quienes aplicaron corrección de sesgos a un ensamble de modelos globales y regionales (incluido el modelo PRECIS), la temporada de junio a noviembre (en todos los horizontes de tiempo) no exhibió cambios significativos o tendencia definida con respecto a una climatología de datos de estaciones meteorológicas del IMN (1961-1990), salvo en las regiones del Caribe y Zona Norte donde se presentaba un

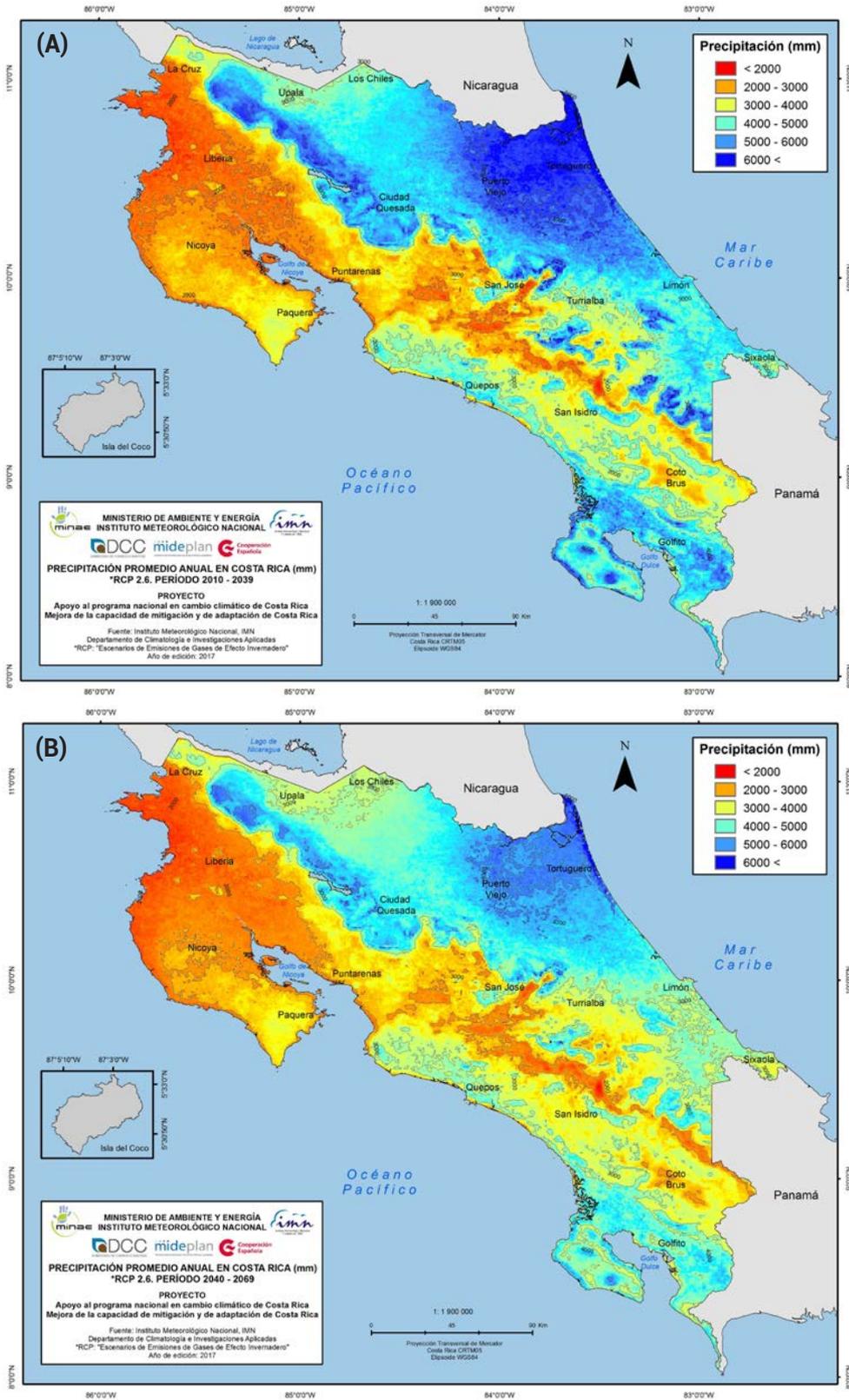


Figura 15. Proyección de la lluvia (mm) media anual usando el escenario de emisiones RCP2.6 para tres horizontes de tiempo: (A) corto plazo (2010-2039), (B) mediano plazo (2040-2069) y (C) de largo plazo (2070-2099). Fuente: modelo PRECISv2.0

Figura 15.
Continuación.

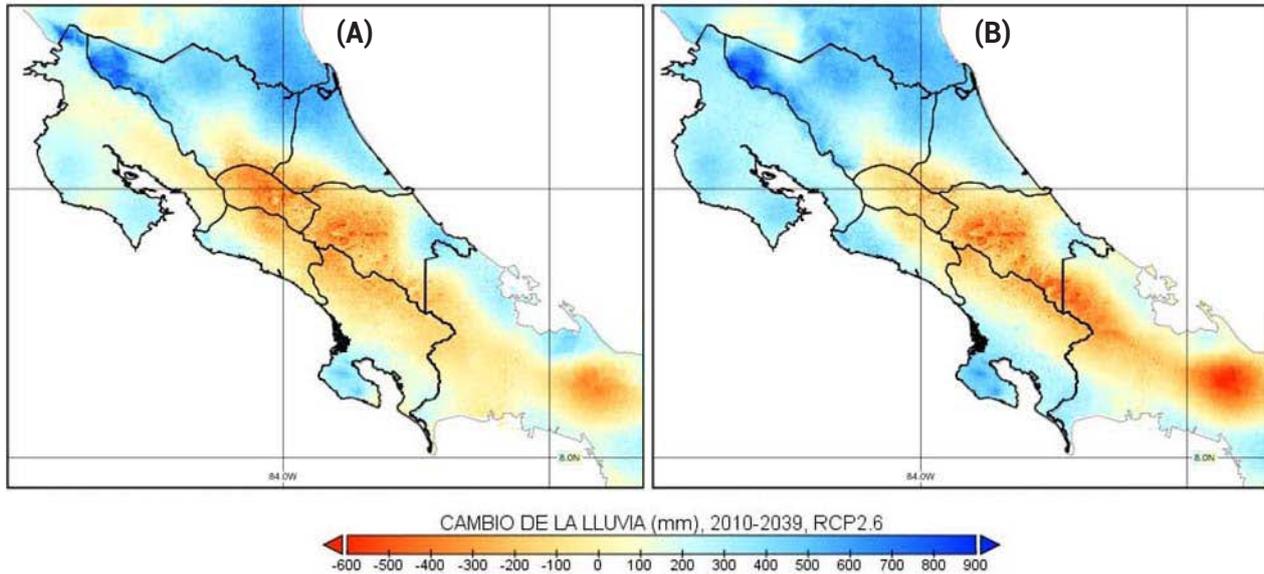
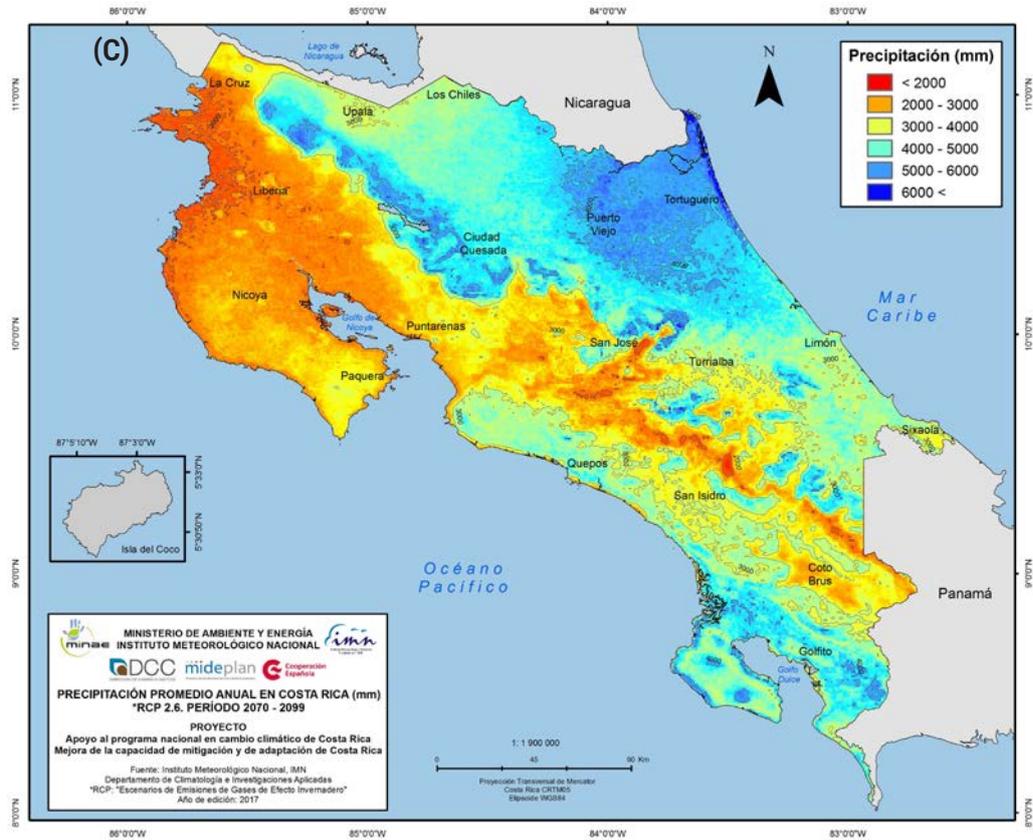


Figura 16. Cambio de la lluvia (mm) media anual en el (A) corto plazo (2010-2039) y (B) largo plazo (2070-2099) usando el escenario de emisiones RCP2.6, respecto al clima de control (1961-1990). Fuente: modelo PRECISv2.0

leve aumento que no superaba el 12% y 10%, respectivamente; caso contrario para la temporada de diciembre-febrero donde predomina en todas las regiones un patrón de cambios positivos (más lluvia que el clima actual) menores al 10% entre el 2011 y el 2070, pero negativos (menor al 10%) entre el 2071 y 2100.

4.3. Humedad relativa

De acuerdo con las figuras 17 (A, B, C), no se aprecia entre los diferentes horizontes de tiempo un cambio sustancial o tendencia definida de la humedad relativa, condición que se puede verificar mejor en la figura 18, donde efectivamente no se presentan cambios significativos con el tiempo de la humedad relativa en el Pacífico Norte.

Según la figura 19 (A y B), las regiones del Pacífico (Caribe y Zona Norte) registrarían en el corto y largo plazo condiciones más (menos) húmedas con respecto al clima actual, sin embargo, el cambio no parece ser significativo ya que las diferencias porcentuales son menores en términos absolutos al 2%.

Por lo anterior, en el futuro la humedad relativa no se verá afectada significativamente por las condiciones de emisiones del escenario RCP2.6.

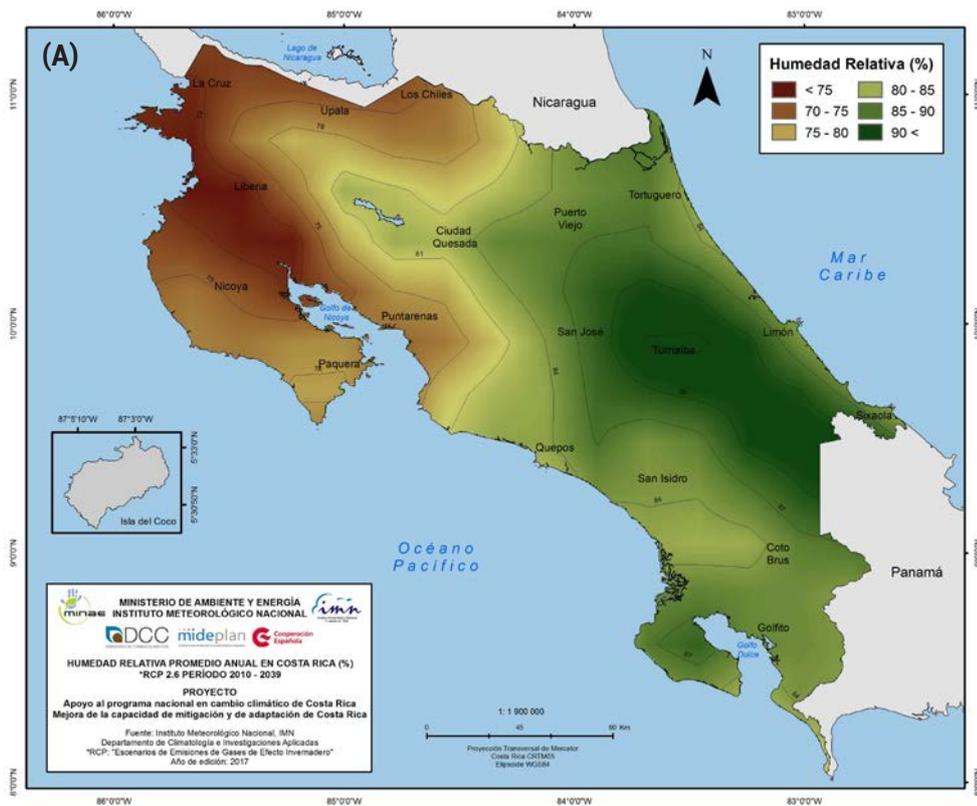
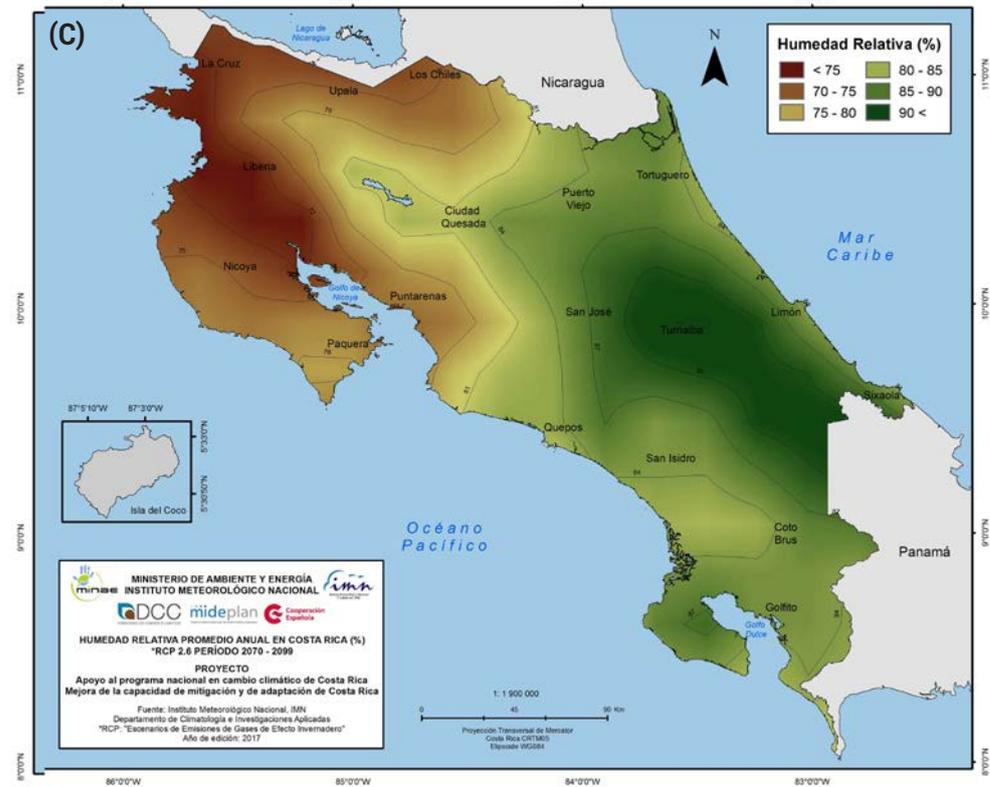
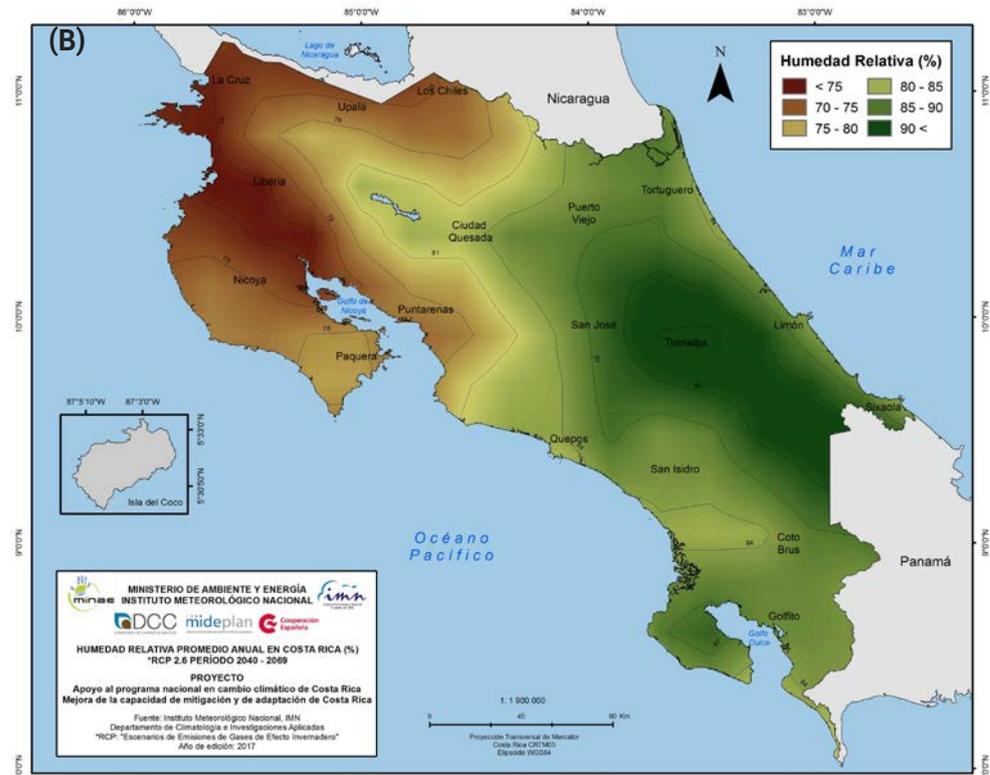


Figura 17. Proyecciones de la humedad relativa (%) media anual lluvia con el escenario de emisiones RCP2.6 para los horizontes: (A) 2010-2039, (B) 2040-2069 y (C) 2070-2099 Fuente: modelo PRECISv2.0

Figura 17.
Continuación.



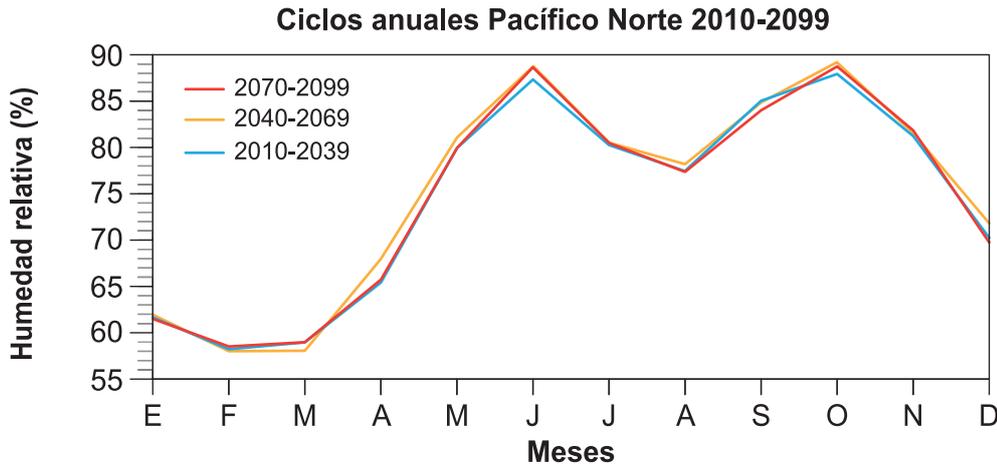


Figura 18. Ciclo anual de la humedad relativa del Pacífico Norte proyectado para tres horizontes de tiempo con el escenario de emisiones RCP2.6. Fuente: modelo PRECISv2.0

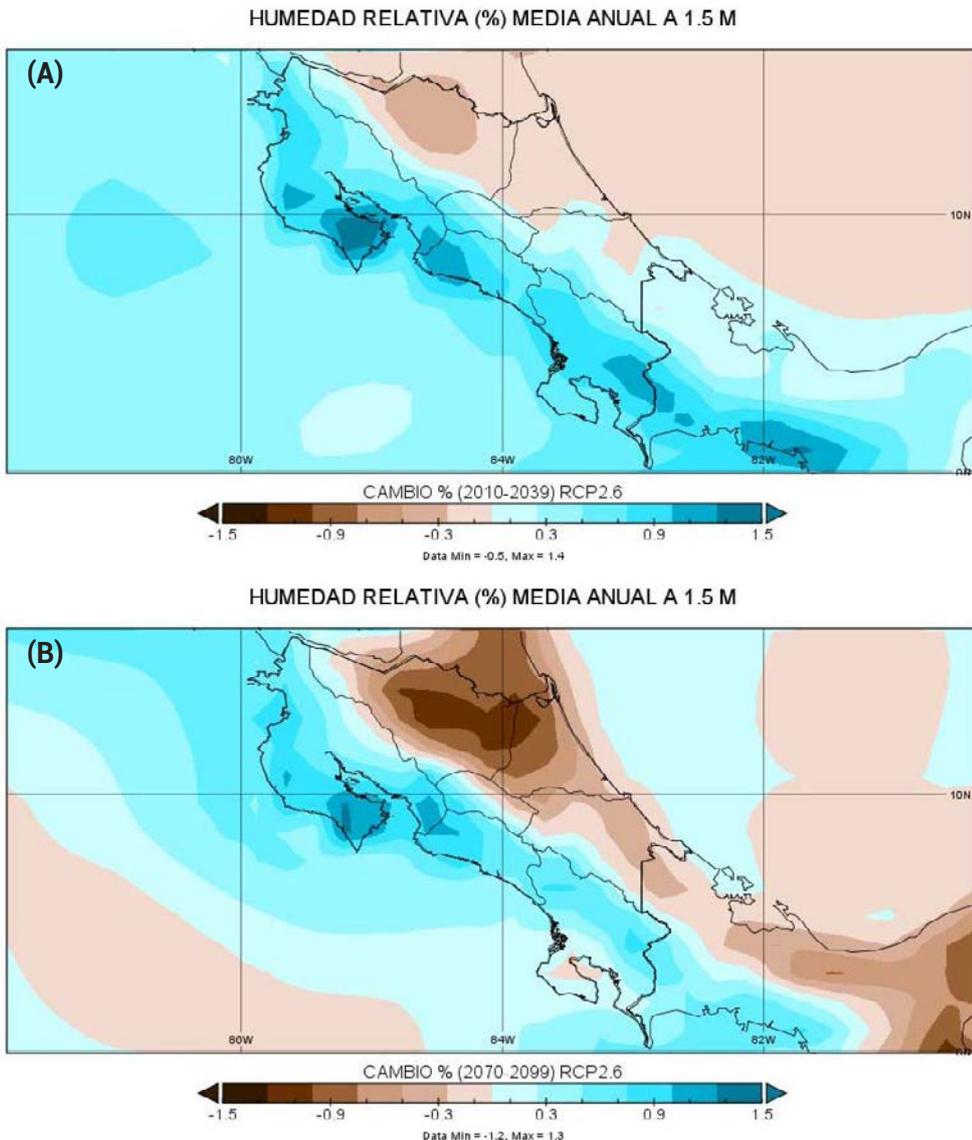
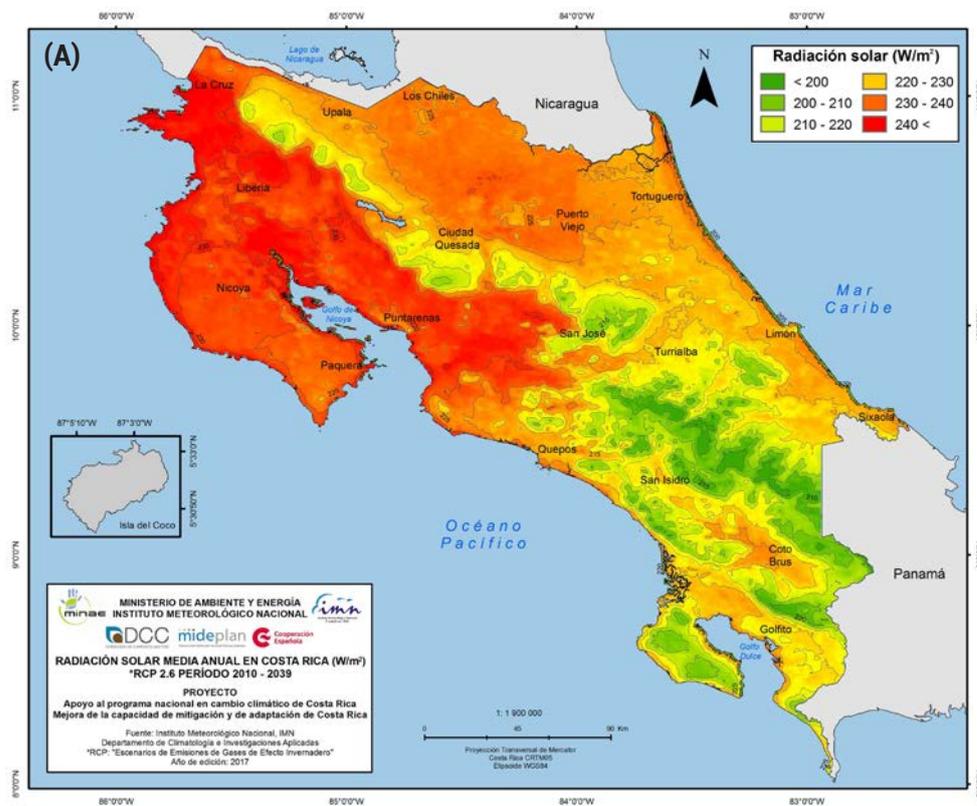


Figura 19. Mapeo de los cambios de la humedad relativa de los horizontes de tiempo de (A) corto plazo y (B) largo plazo con respecto al clima actual (1961-1990) del escenario RCP2.6. Fuente: modelo PRECISv2.0

4.4. Radiación solar

Las figuras 20 (A, B, C) muestran la proyección de la radiación solar para los tres horizontes de tiempo que abarcan el periodo 2010-2099. En todos los horizontes de tiempo se mantiene el mismo patrón horizontal del clima actual, es decir, los montos más altos (mayores a 230 W/m²) se ubican en el Pacífico Norte y el Valle Central, y los más bajos en las cordilleras y la península de Osa. En general se aprecia un incremento de la radiación con el horizonte de tiempo, no obstante, en comparación con el clima actual, hay una fuerte dependencia regional: se logra apreciar un leve incremento de la radiación en la Vertiente del Caribe, Zona Norte y alrededores del Golfo Dulce, pero, por el contrario, una disminución en las regiones del Pacífico y el Valle Central. Sin embargo, nótese que los cambios (positivos o negativos) no parecen ser muy significativos ya que en magnitud varían entre 0 y 8 W/m²(figura 21 A, B).

Figura 20. Proyecciones de (A) corto plazo (2020-2039), (B) mediano plazo (2040-2069) y (C) largo plazo (2070-2099) de la radiación solar (irradiancia, W/m²) media anual usando el escenario de emisiones RCP2.6. Fuente: modelo PRECISv2.0



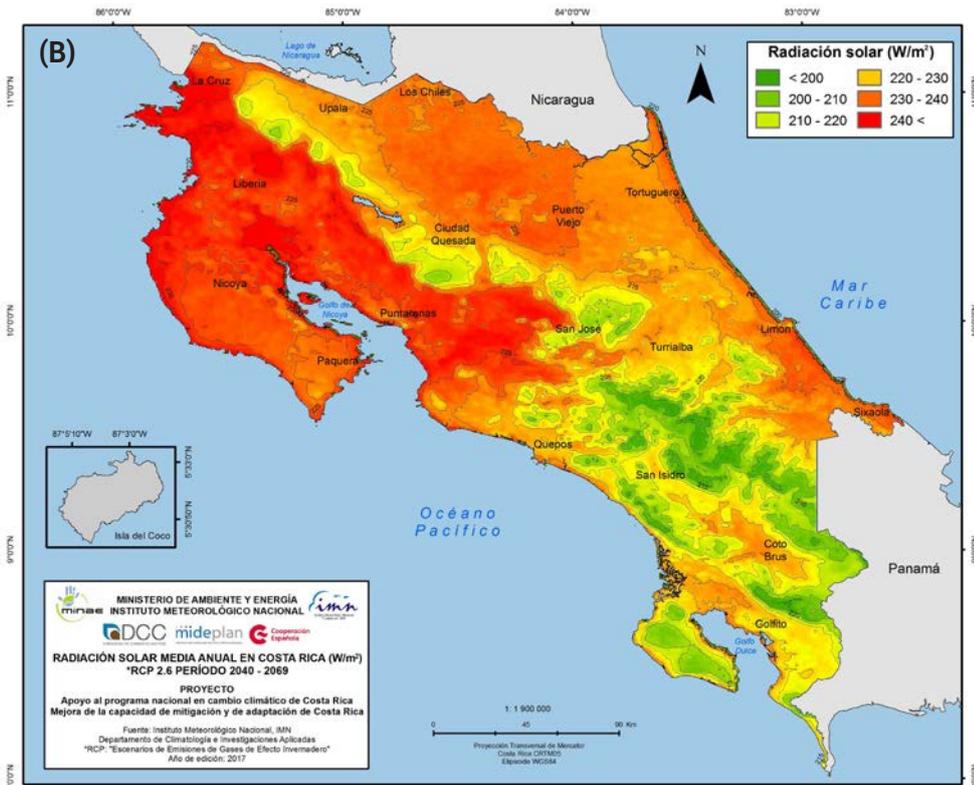


Figura 20.
Continuación.

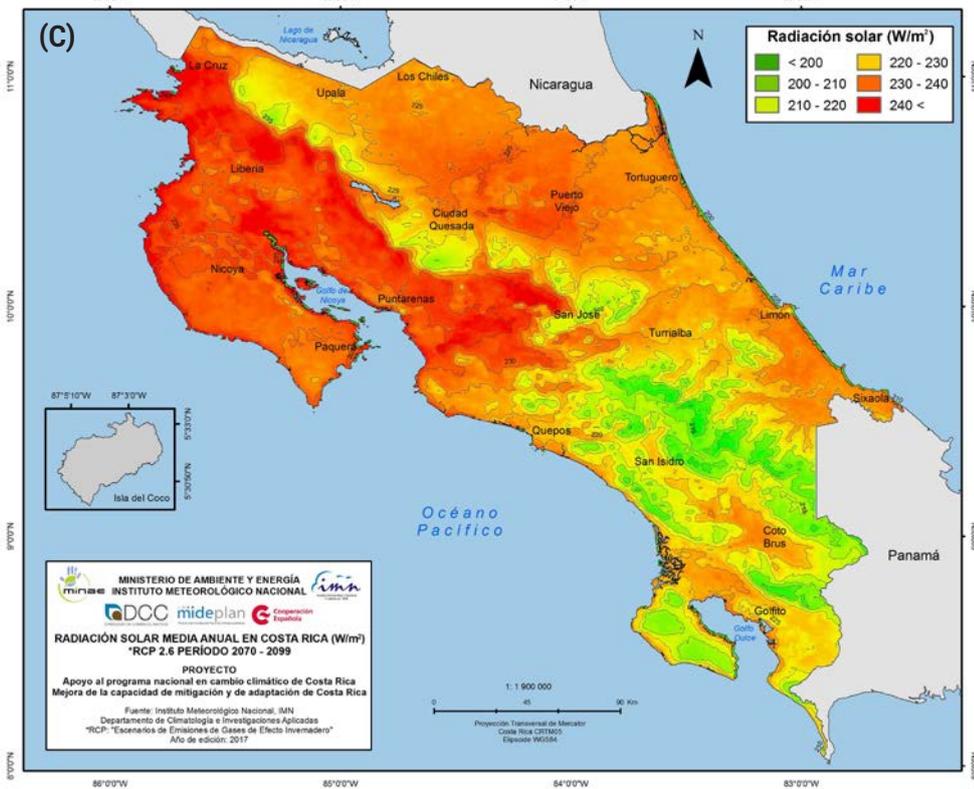
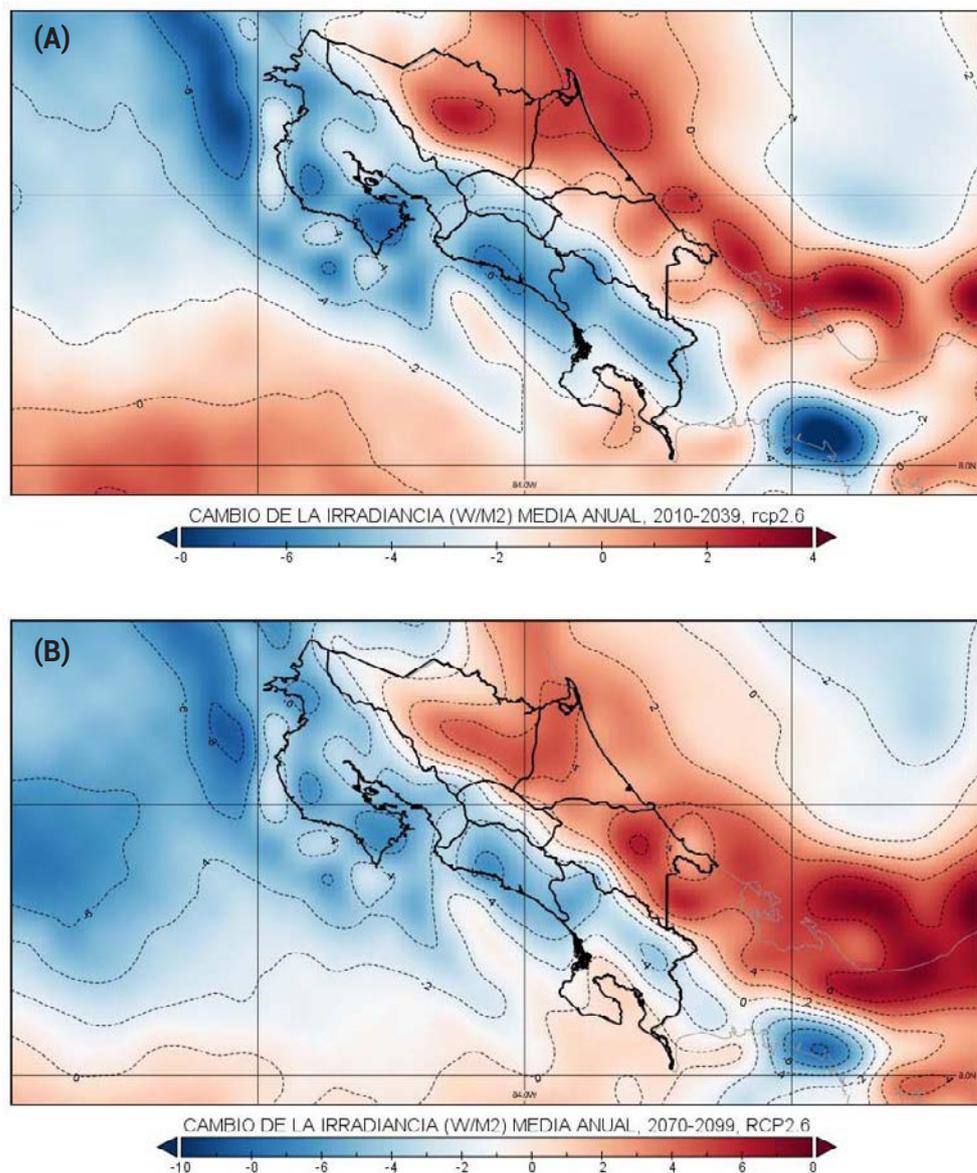


Figura 21. Cambio de la radiación solar (irradiancia, W/m^2) media anual en (A) el corto plazo (2010-2039) y el (B) largo plazo (2070-2099), usando el escenario de emisiones RCP2.6. Fuente: modelo PRECISv2.0



4.5. Velocidad del viento

Las figuras 22 (A, B, C) muestran la proyección de la velocidad del viento para los tres horizontes de tiempo que abarcan el periodo 2010-2099. Las velocidades más altas se registran en las regiones del Pacífico (Norte y Central), el Valle Central y las cordilleras, las más bajas en las llanuras de la Zona Norte, el Caribe Sur y el Pacífico Sur. Se observa un aumento generalizado del viento en todo el país entre el 2010 y el 2070, pero con una tendencia a disminuir las velocidades del 2070 al 2100.

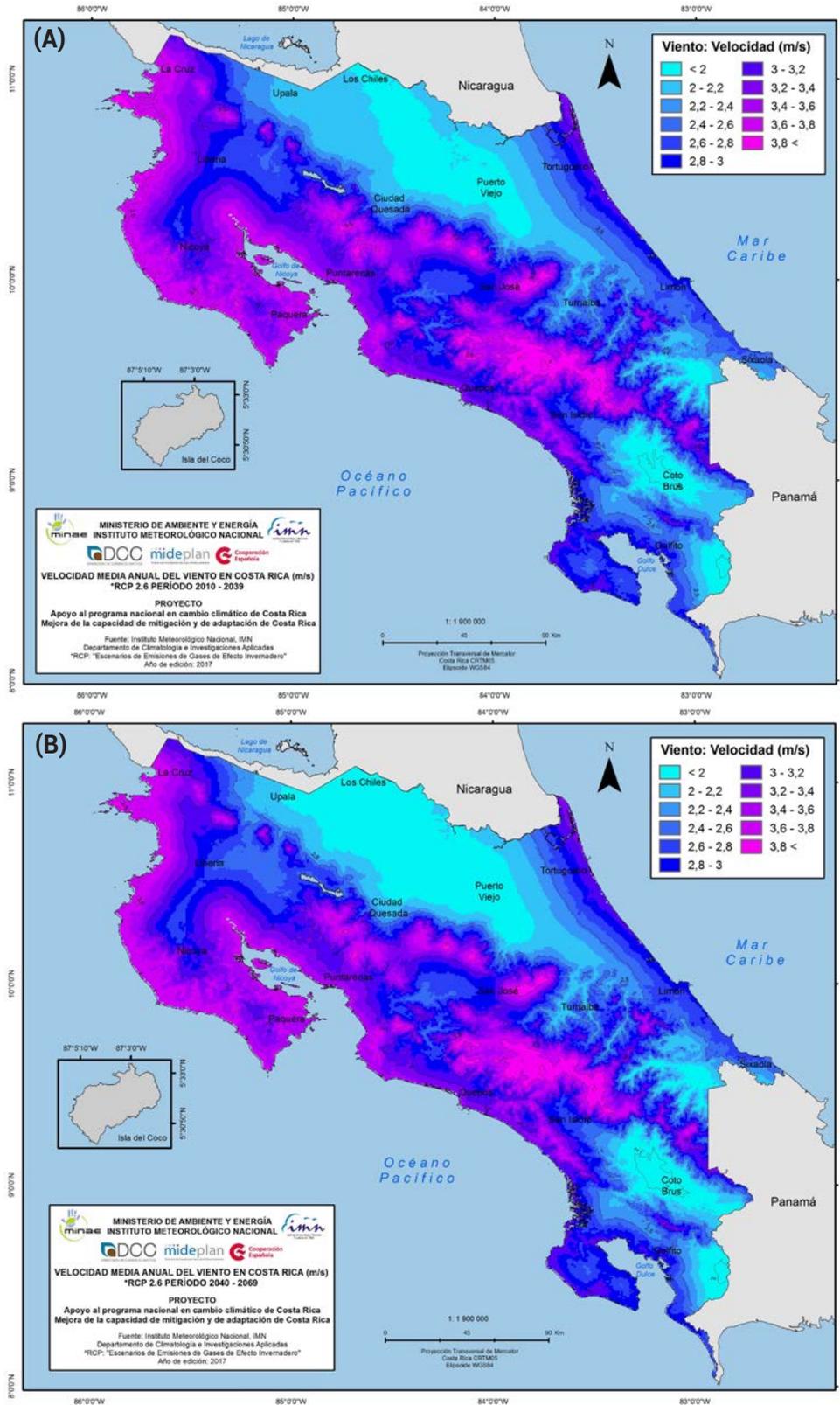
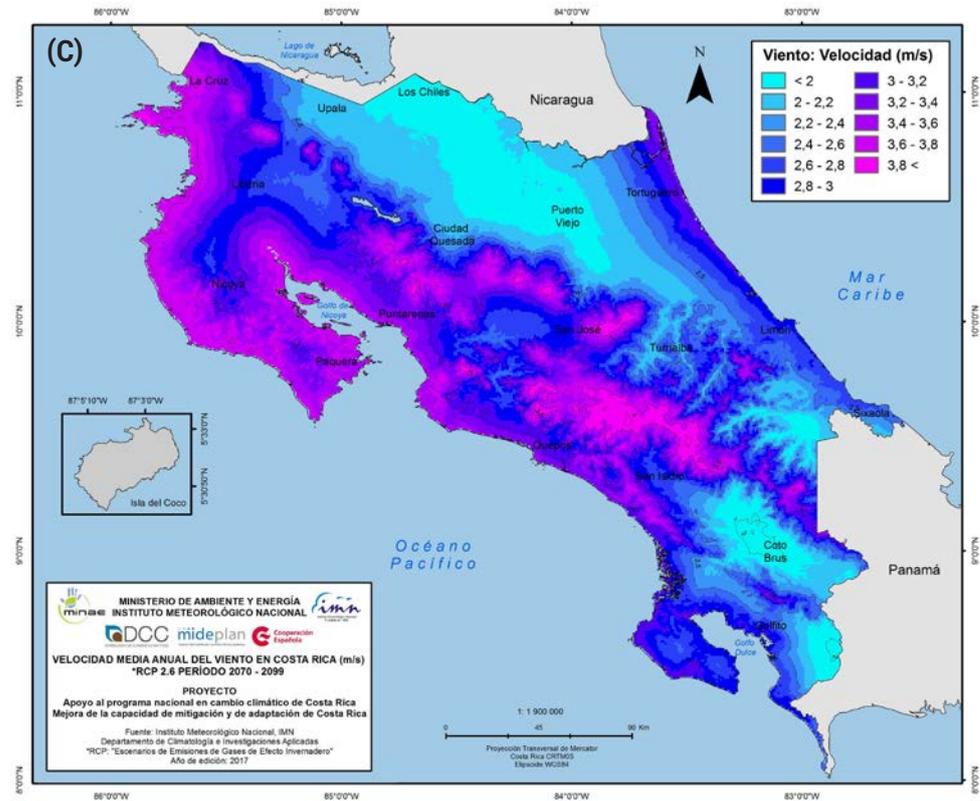


Figura 22. Proyecciones de (A) corto plazo (2020-2039), (B) mediano plazo (2040-2069) y (C) largo plazo (2070-2099) de la velocidad media anual del viento (m/s) usando el escenario de emisiones RCP2.6. Fuente: modelo PRECISv2.0

Figura 22.
Continuación



Las siguientes figuras son los ciclos anuales del viento en dos regiones representativas del país. En el Pacífico Norte (figura 23A) el comportamiento es idéntico en cuanto a la estacionalidad al de la climatología (figura 11), donde no hay variaciones significativas de un periodo climatológico al otro, lo que indica que el viento no experimenta cambios significativos bajo los supuestos del escenario RCP2.6. Tampoco parece haber cambios con respecto al promedio histórico.

5

ESCENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS RCP8.5

Es importante tener en contexto que el escenario de emisiones RCP8.5 es el de más altas emisiones de gases de efecto invernadero y que, seguramente, mostrará variaciones significativamente distintas con respecto al escenario RCP2.6, particularmente con horizontes de tiempo a mediano y largo plazo.

5.1. Temperatura

Las figuras 23 (A, B, C) muestran el mapeo de las proyecciones de la temperatura media anual para cada uno de los horizontes de tiempo. Las variaciones de un periodo al otro parecen muy pequeñas debido a los intervalos que se han utilizado, sin embar-

Figura 23. Proyección de (A) corto plazo (2010-2039), (B) mediano plazo (2040-2069) y (C) largo plazo (2070-2099) de la temperatura (°C) media anual usando el escenario de emisiones RCP8.5. Fuente: modelo PRECISv2.0

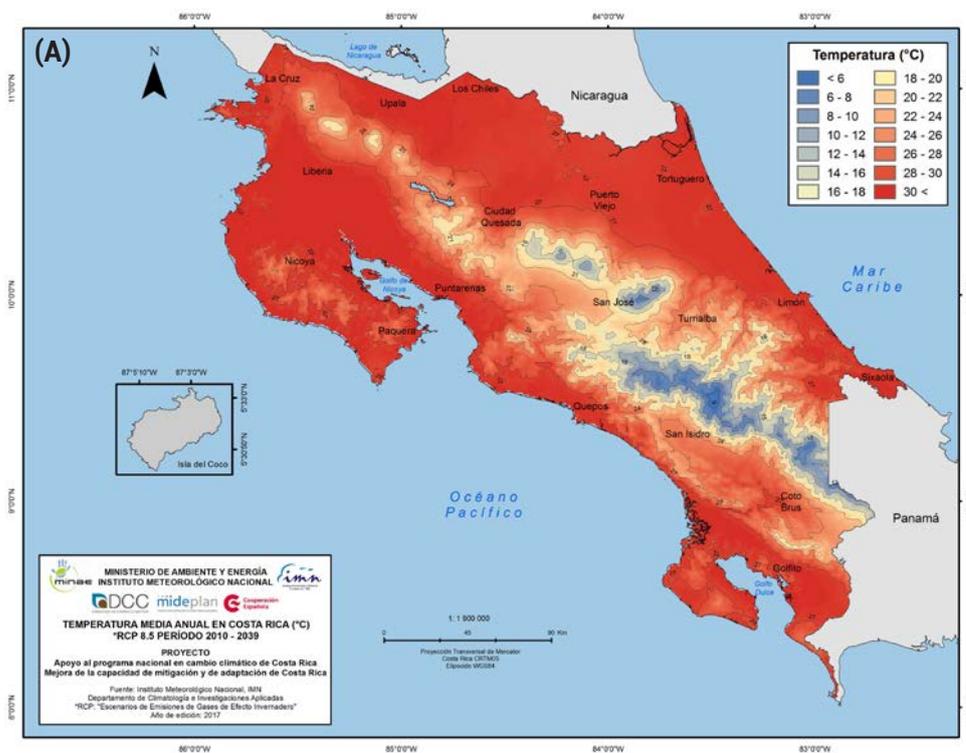


Figura 23.
Continuación.

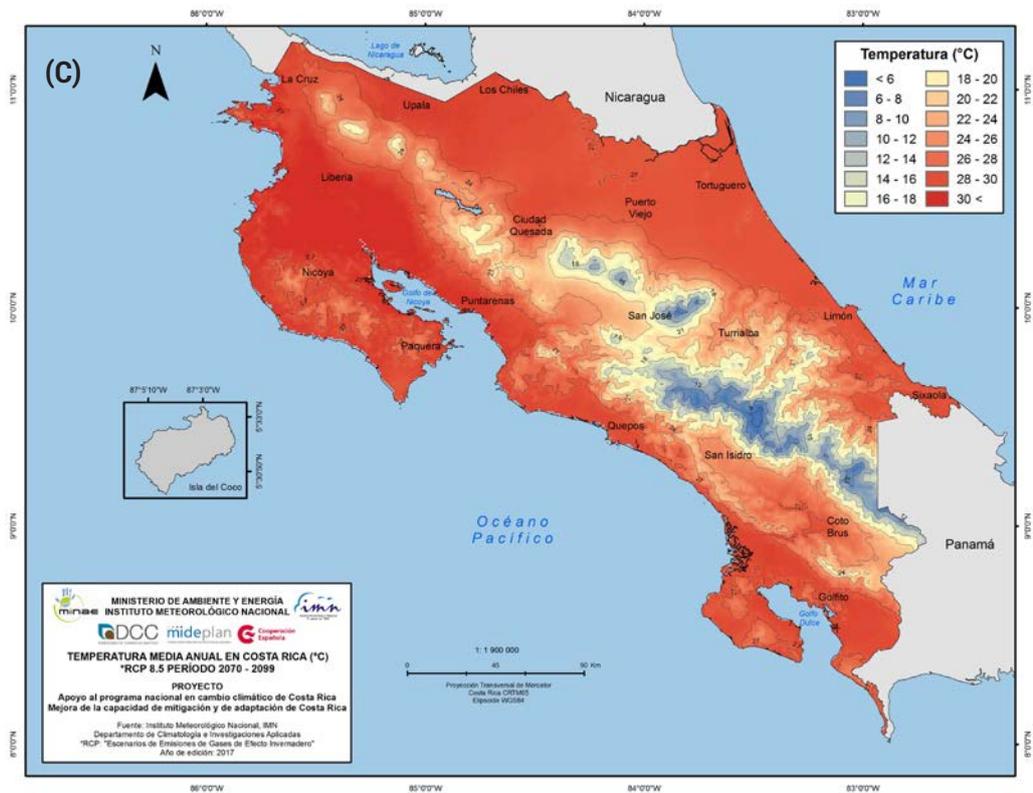
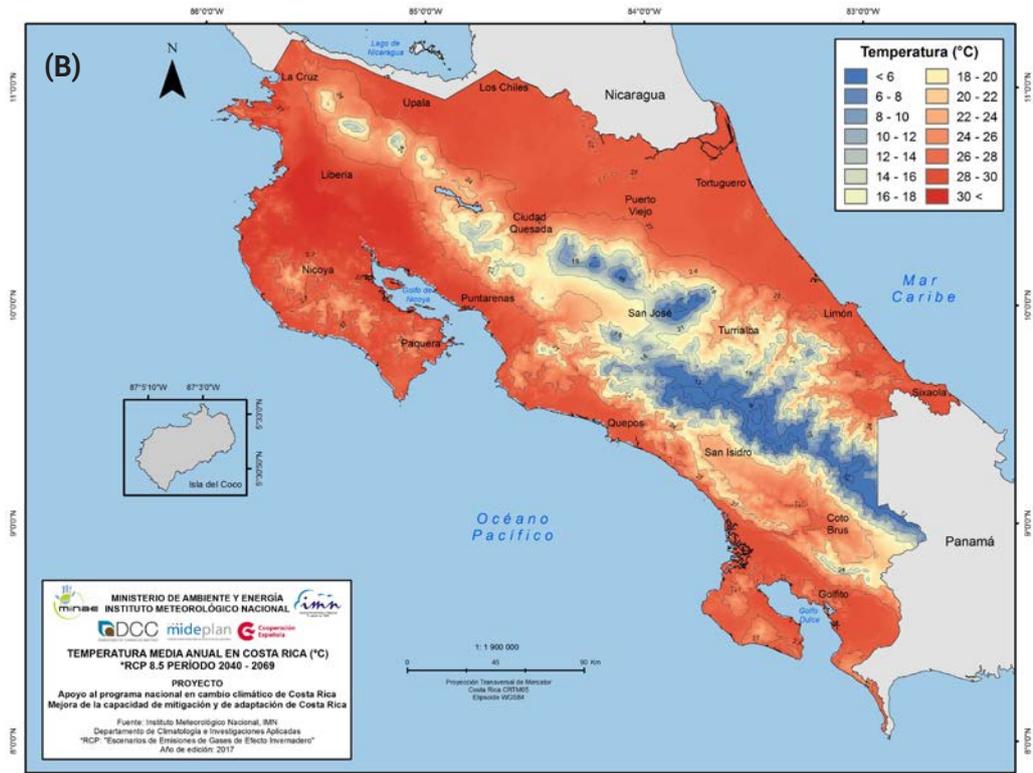
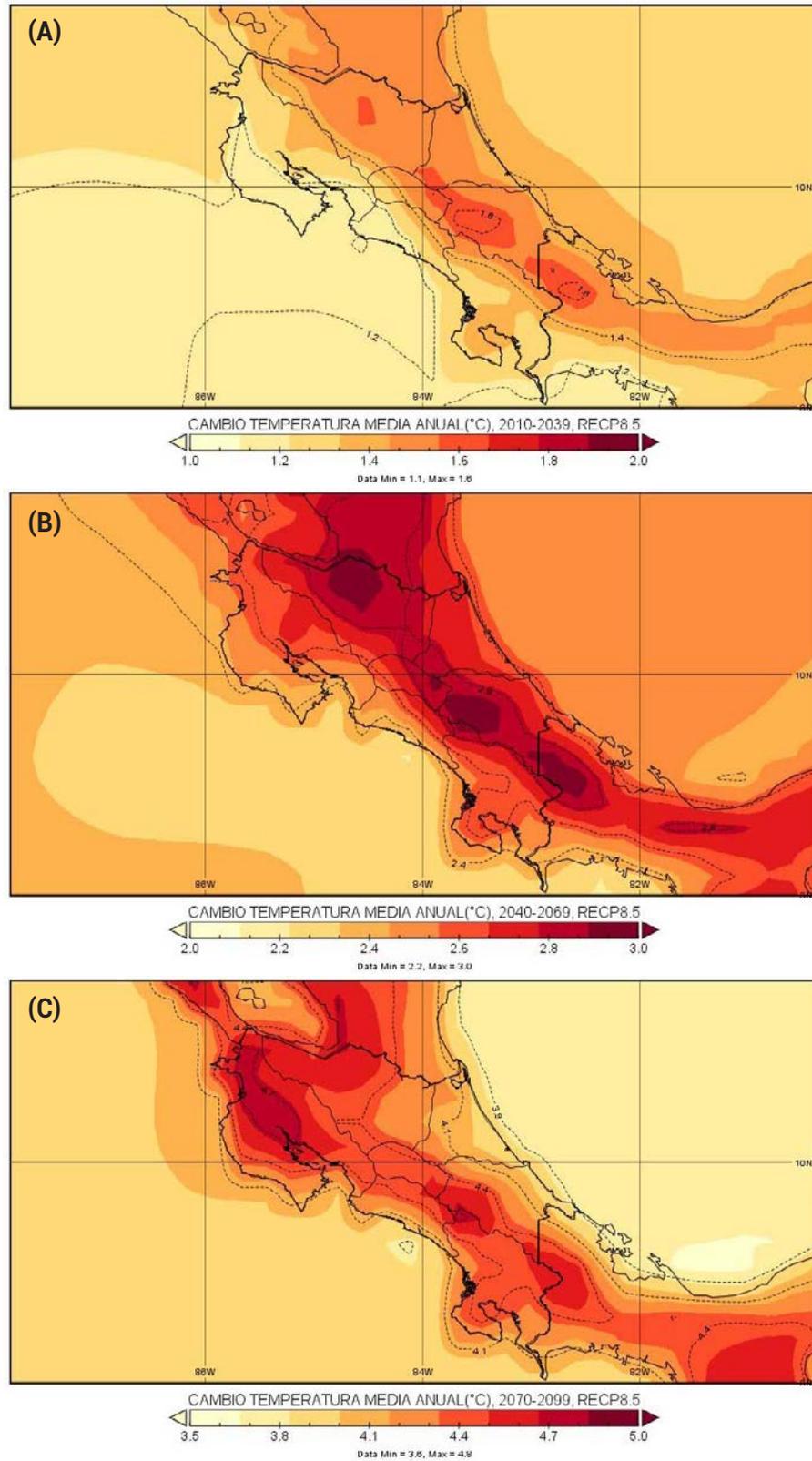


Figura 24. Cambio de la temperatura media anual (°C) en los horizontes de tiempo de (A) corto plazo (2010-2039), (B) mediano plazo (2040-2069) y (C) largo plazo (2070-2099) usando el escenario de emisiones RCP8.5. Fuente: modelo PRECISv2.0



go, es posible comprobar visualmente la tendencia al calentamiento en las cordilleras, donde el cambio de 2040-2069 al 2070-2099 es más evidente y pronunciado, indicando que seguramente esas regiones experimentarían cambios más rápidos en comparación con zonas bajas.

Las figuras 24 (A, B y C) mapean los cambios de la temperatura entre los tres periodos futuros y el clima de control del modelo PRECIS (1961-1990). En el escenario de corto plazo (2010-2039, figura 24A) el aumento de la temperatura varía entre 1.1°C y 1.6°C, con los mayores aumentos en las regiones orientales del país (Caribe y Zona Norte) y los menores en la Vertiente del Pacífico. A mediano plazo (2040-2069, figura 24B) el aumento es mayor al del periodo anterior y oscila entre 2.4°C y 2.8°C, con un comportamiento espacial parecido al de corto plazo, notándose un corredor de máximo incremento a lo largo de la cordillera de Talamanca, Volcánica Central y la Zona Norte; el menor aumento se presenta en el Pacífico Norte y el Pacífico Central. Para finales de siglo (figura 24C) el aumento de temperatura es el mayor de los tres perio-

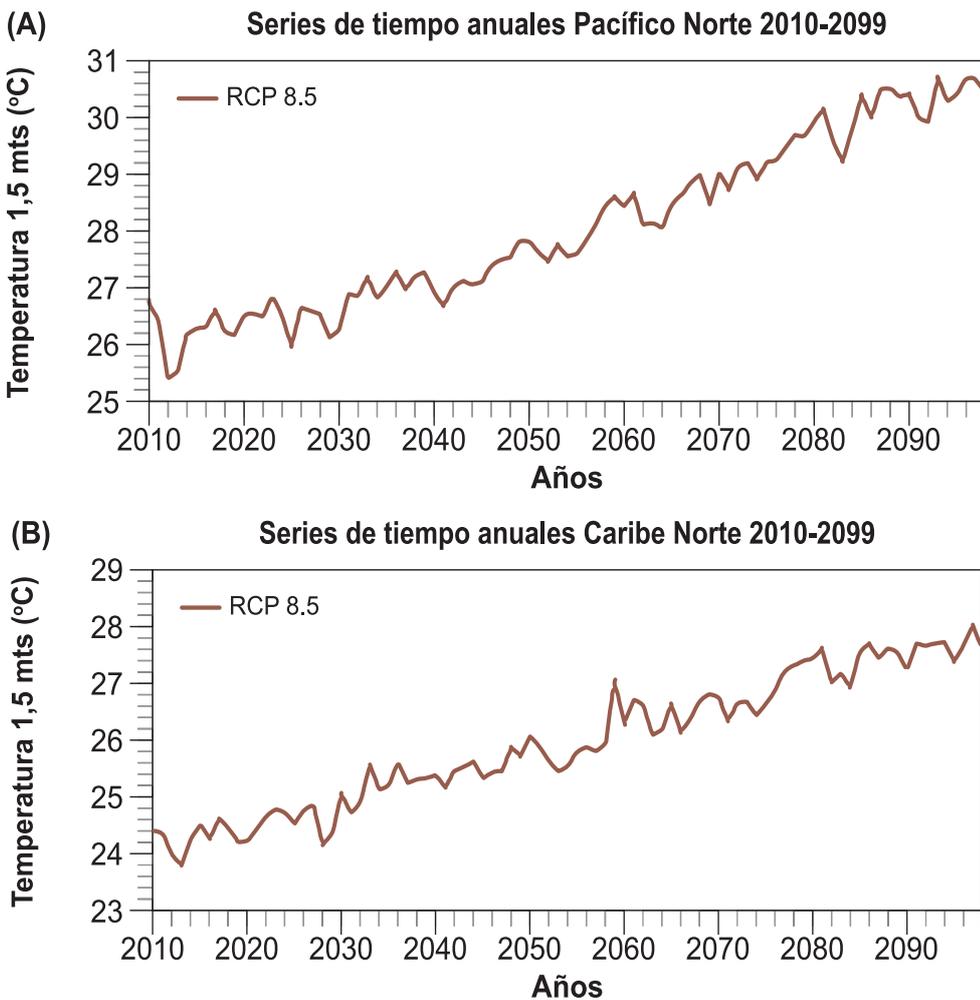


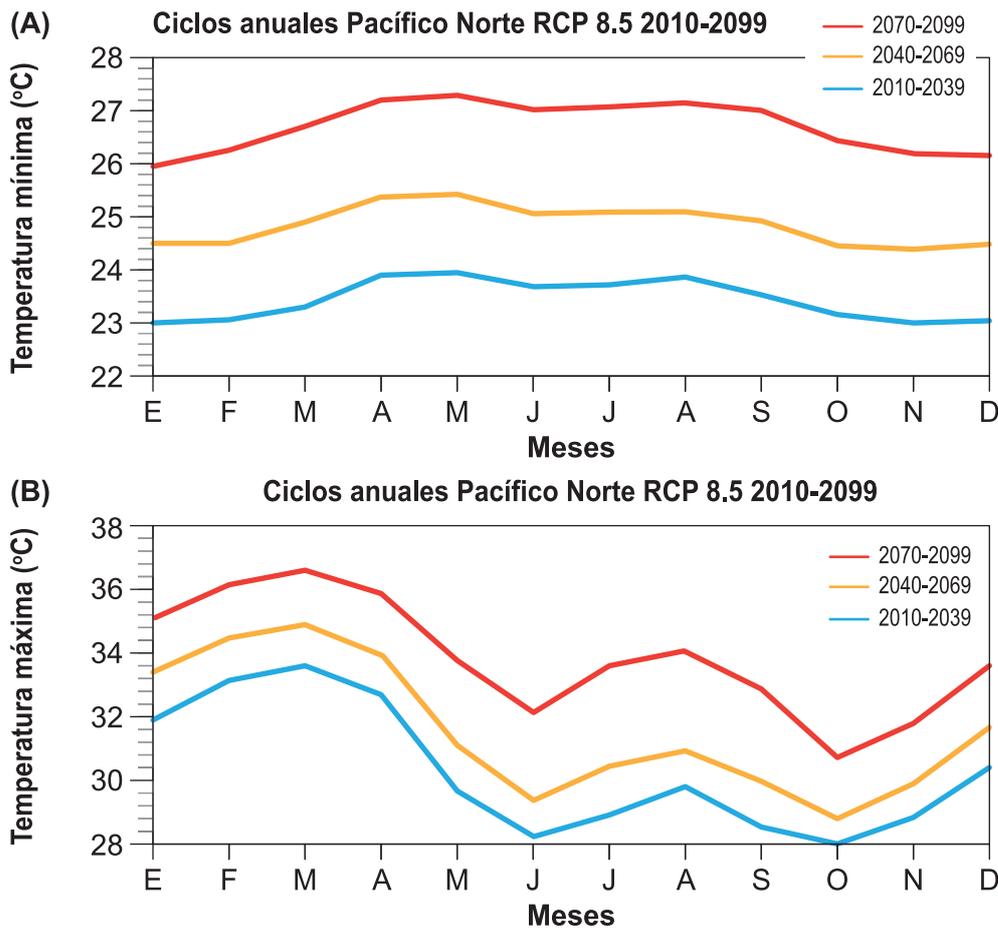
Figura 25. Proyección de la variación temporal (2010-2100) de la temperatura media anual estimada por el modelo PRECIS con el escenario RCP8.5 para el (A) Pacífico Norte y el (B) Caribe Norte.

dos, con una variación espacial de 3.8°C a 4.8°C; el corredor de máximo incremento se extiende desde la cordillera de Talamanca, pasando por el Valle Central y finalizando en el Pacífico Norte, donde se registra el mayor calentamiento en todo el país, que coincide aproximadamente con la cuenca del río Tempisque.

Las siguientes figuras muestran más claramente la tendencia de aumento de la temperatura media anual para dos regiones con climas muy diferentes. En el Pacífico Norte (figura 25A) el aumento estimado para finales de siglo es de 30.4°C y de 27.6°C en el Caribe Norte.

El ciclo anual de la temperatura máxima y mínima permite apreciar (figura 26 A y B), para el caso particular del Pacífico Norte, el incremento gradual de un horizonte de tiempo al siguiente. Nótese que el incremento del mediano al largo plazo es mayor que del corto al mediano plazo, especialmente entre junio y setiembre, indicando un posible aceleramiento del calentamiento en las últimas décadas del presente siglo. La temperatura mínima (figura 26A) de enero se incrementará de unos 23.0°C en el horizonte 2010-2039 hasta los 26.0°C a finales de siglo, mientras que la máxima (Figura 26B) tiene

Figura 26. Ciclos anuales de la temperatura (A) mínima y (B) máxima proyectada por el modelo PRECIS con el escenario de emisiones RCP8.5 para todo el siglo XXI.



un comportamiento estacionalmente más variable que la mínima, con una variación en marzo de 33.5°C (2010-2039) hasta los 36.5°C (2070-2099). En todo el siglo se observa bien marcado el incremento de la temperatura máxima (figura 26B) que se presenta en el mes de agosto, lo cual se asocia con el veranillo o canícula de dicho mes.

5.2. Lluvia

Las figuras 27 (A, B, C) muestran el mapeo de las proyecciones de la lluvia (mm) media anual para tres horizontes de tiempo del siglo XXI. Las variaciones de un periodo al otro parecen pequeñas debido a los intervalos que se han utilizado, sin embargo, es posible comprobar visualmente -mediante el área de algunas isoyetas- la disminución de las lluvias en todo el país del primer horizonte al segundo, por ejemplo, muy notorio en el sur del país (cantones de Osa, Golfito Corredores), donde los montos de 6000-7000 mm en el 2020-2039 disminuyen a 4000-5000 mm en el 2040-2069. La zona muy lluviosa sobre la cordillera de Guanacaste y laderas orientales parecen más bien presentar un aumento. En el horizonte 2070-2099 las lluvias se incrementan en varias regiones con respecto al periodo anterior, por ejemplo: la cordillera central, la de

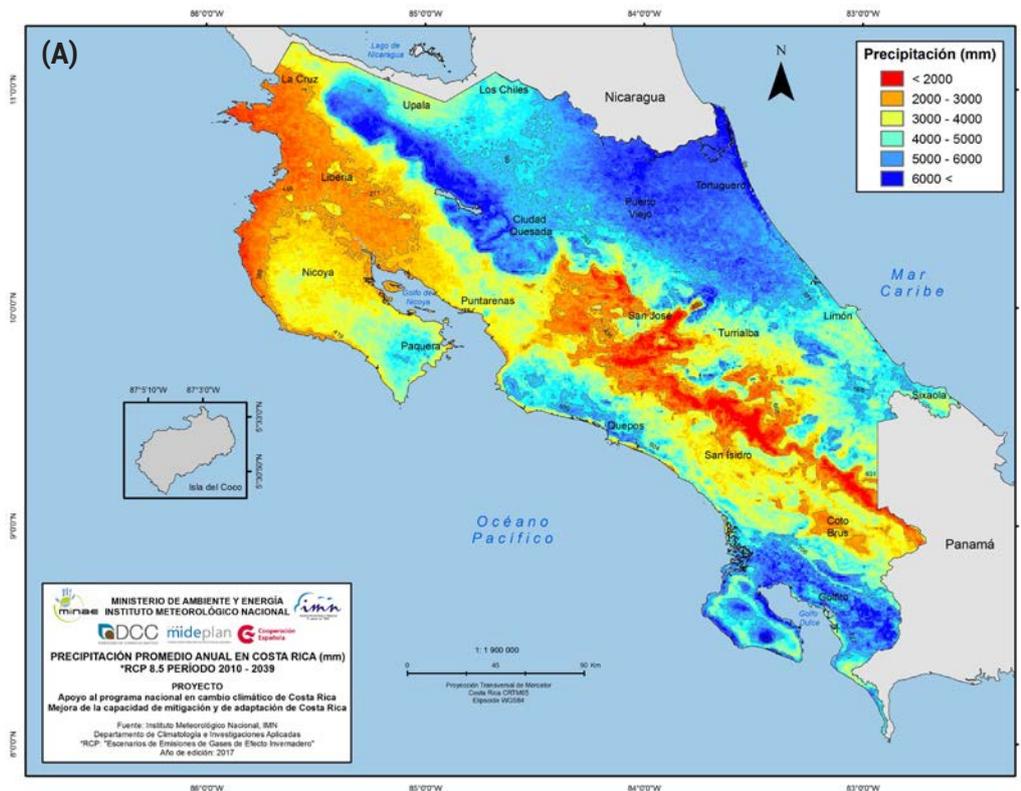
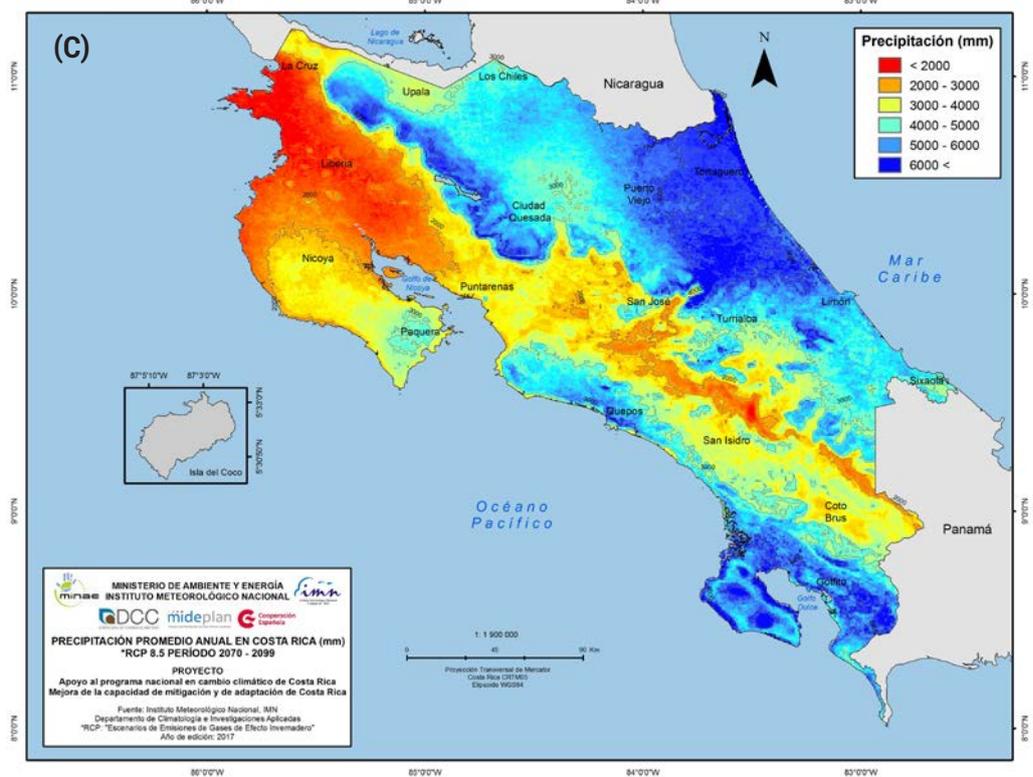
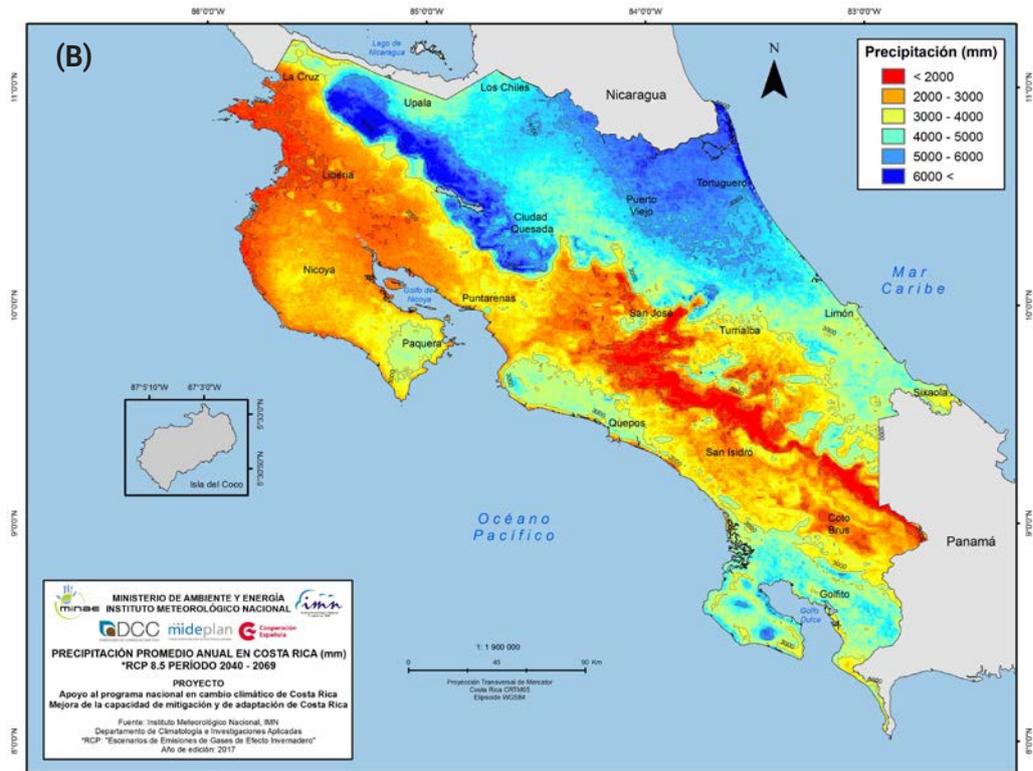


Figura 27. Proyección de (A) corto plazo (2010-2039), (B) mediano plazo (2040-2069) y (C) largo plazo (2070-2099) de la lluvia (mm) media anual con el escenario de emisiones RCP8.5. Fuente: modelo PRECISv2.0

Figura 27.
Continuación



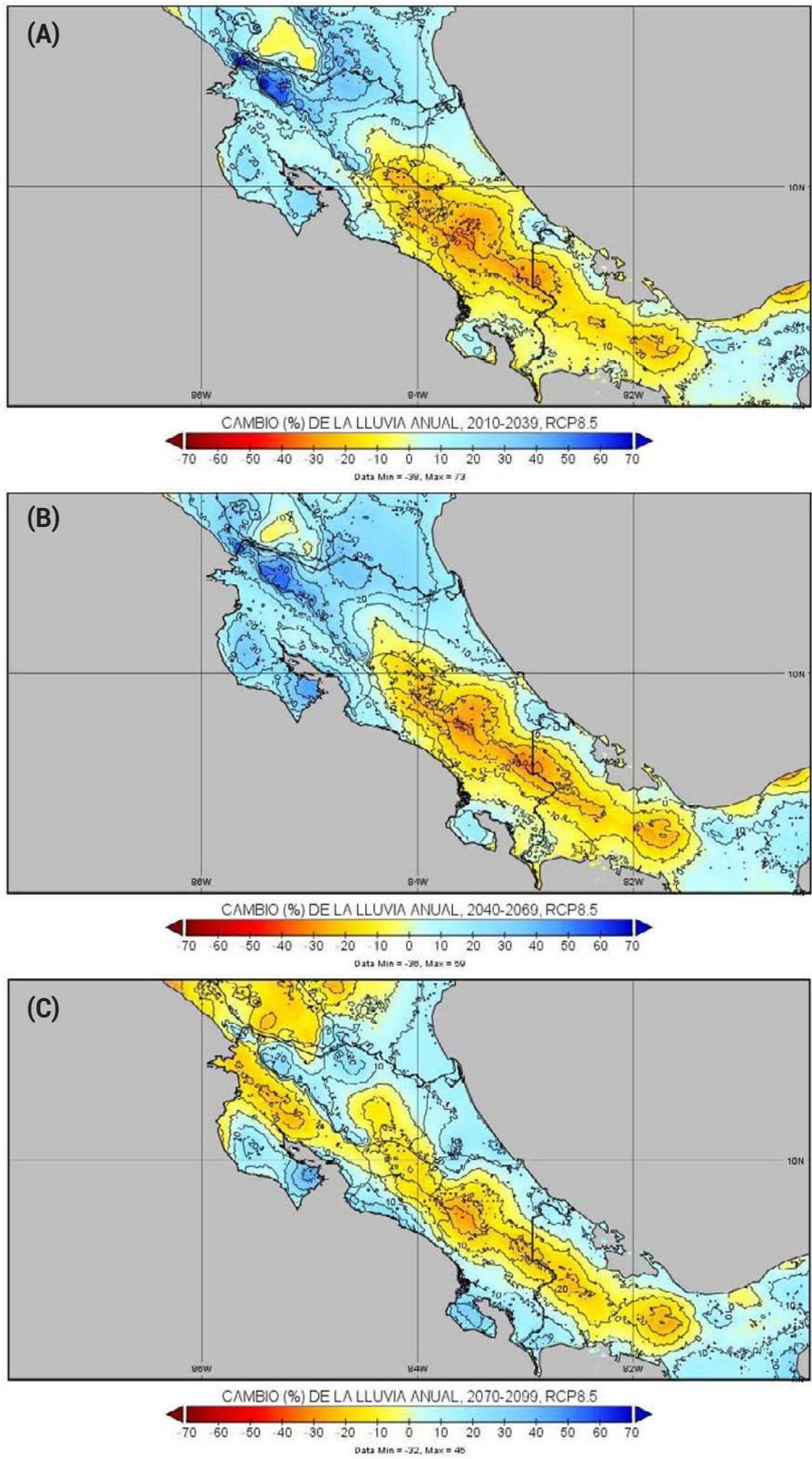


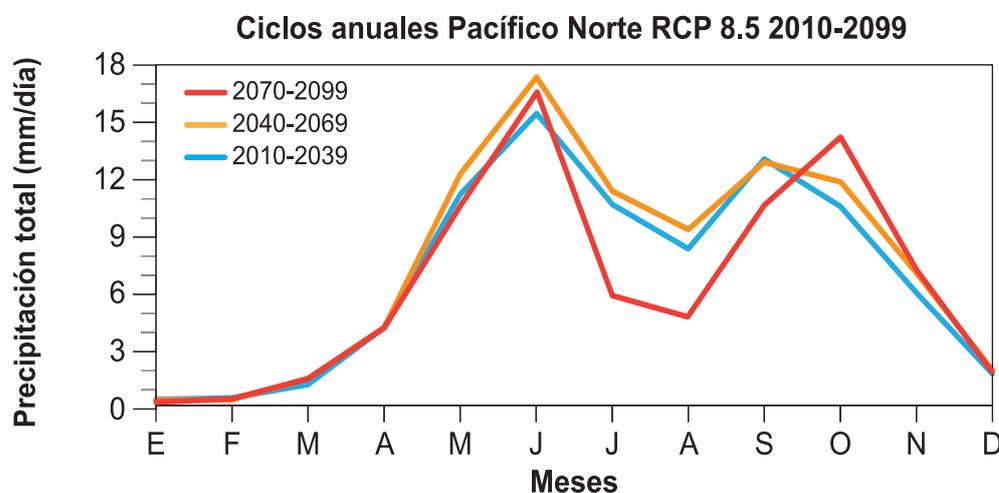
Figura 28. Proyección de (A) corto plazo (2010-2039), (B) mediano plazo (2040-2069) y (C) largo plazo (2070-2099) del cambio de la lluvia media anual con respecto a la climatología (1970-2000) del WCv2.

Talamanca, el Caribe, la península de Nicoya, el Pacífico Central y Sur. Otras regiones más bien muestran condiciones menos lluviosas, tal es el caso de la ladera oriental de la cordillera de Guanacaste, el centro y norte del Pacífico Norte.

La comparación o cambio con respecto al clima actual (1970-2000) del WCv2 muestra para el corto plazo (figura 28A) aumentos (en color azul) del orden de 10% al 50% en las regiones del Pacífico Norte, Zona Norte (con un máximo en las estribaciones orientales de los volcanes Orosi y Rincón de la Vieja), península de Osa, Cahuita/Sixaola; mientras que habría una disminución (10% al 30%) en: el Valle Central, la cordillera Central, Fila de Matama y Talamanca. Para el mediano plazo (Figura 28B) la distribución espacial y las magnitudes de los cambios son muy similares a las de corto plazo, pero con un mayor aumento en la península de Nicoya (de hasta 40%), manteniéndose el déficit a lo largo de la cordillera central, Talamanca, Matama. Para el largo plazo, el modelo PRECIS proyecta cambios porcentuales positivos en: la península de Nicoya (de hasta 40%), en la Zona Norte (de hasta un 20%), las zonas de baja altitud de la región Caribe (de hasta 15%), en el Pacífico Central (hasta de 20%) y El Pacífico Sur (de hasta un 30%), por el contrario, condiciones deficitarias en el centro/norte de Guanacaste (hasta de un 20% menos), en el Valle Central y su cordillera (de hasta un 15%) y la cordillera de Talamanca (de hasta un 25%).

En la validación del ciclo anual del clima actual, se determinó que solo en el Pacífico Norte el modelo PRECIS tenía una mayor habilidad en la estimación de la lluvia estacional, por esta razón se muestra en la figura 29 el comportamiento futuro del ciclo anual en esta región. Resaltan las condiciones más deficitarias de la canícula (julio-agosto) para finales de siglo, adicional a la extensión de dicho déficit al mes de setiembre, que normalmente es uno de los meses más lluviosos del año. Mientras que octubre y noviembre serían meses más húmedos en comparación con los periodos 2011-2040 y

Figura 29. Ciclo anual de la lluvia media anual (en mm/día) por proyectado por el modelo PRECIS bajo el escenario de emisiones RCP8.5 en el Pacífico Norte.



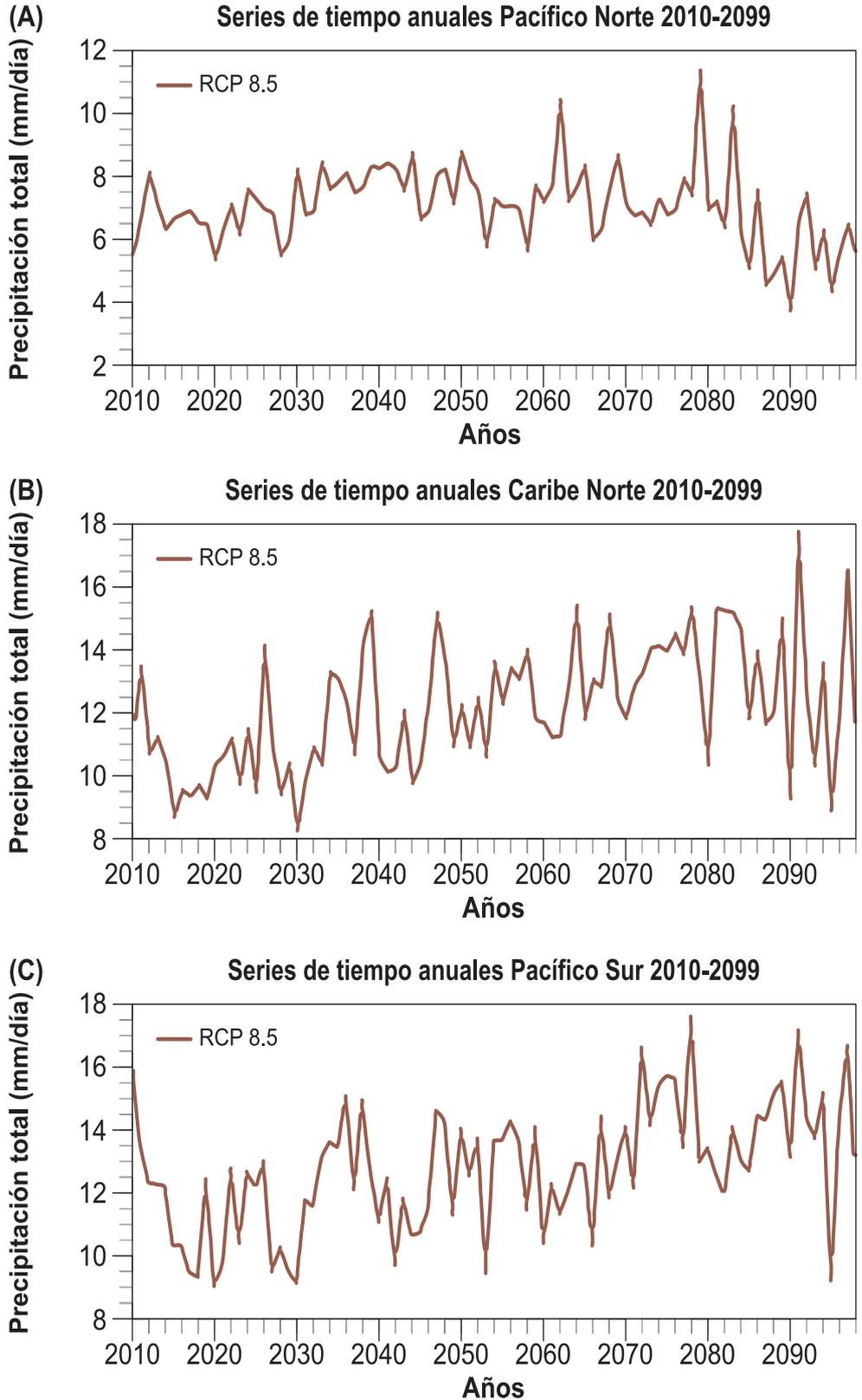
2041-2070. La temporada seca y la primera parte de la temporada de lluvias presentan montos parecidos de lluvia independientemente del horizonte de tiempo.

Las series de tiempo de la lluvia media anual (en mm/día) manifiestan comportamientos distintos entre las regiones y entre los horizontes de tiempo. En el caso del Pacífico Norte (figura 30A) no se observa una tendencia definida y significativa en los primeros horizontes de tiempo (2010-2070), a diferencia del último periodo donde hay una clara tendencia negativa, registrándose los años menos lluviosos de todo el registro; nótese también el aumento de la variabilidad interanual después del 2060. En el Caribe Norte (figura 30B) se observa una tendencia de aumento de las lluvias y su variabilidad, de hecho, hacia finales del siglo se presentan los años más lluviosos, pero también algunos años relativamente secos. En el Pacífico Sur (figura 30C) hay una leve tendencia positiva con una gran variabilidad en todo el siglo.

Como se reiteró anteriormente, estos resultados no pudieron ser sujetos a un análisis de corrección de sesgos, procedimiento que se hace necesario en vista de la baja habilidad predictiva que en general muestran los modelos climáticos con la simulación de la precipitación del periodo histórico de referencia (1961-1990). Por esta razón es importante valorar en este punto los alcances y resultados de la investigación de Mendez et al. (2020), cuyo objetivo fue demostrar con datos directos de estaciones meteorológicas (de la red del IMN) la necesidad de aplicar metodologías para corregir los sesgos de los modelos dinámicos (globales, regionales y reanálisis) y de paso aplicar dichas correcciones a las proyecciones futuras de los modelos individuales y del promedio de ensamble de modelos. Con este enfoque se obtuvieron resultados razonables para tres escenarios de emisiones RCP (2.6, 4.5 y 8.5), para las 4 temporadas del año (invierno, primavera, verano y otoño boreal) y para seis regionales climáticas del país. Los investigadores obtuvieron los siguientes resultados para los escenarios RPC4.5 y 8.5:

- a. Pacífico Norte: tendencias negativas de la lluvia en casi todas las temporadas, con déficit porcentuales máximos de 5% para marzo-mayo de 2011-2040, 15% para marzo-mayo del 2041-2070 y de 15-30% en junio-agosto de 2071-2100, es decir, una canícula que cada vez se vuelve menos lluviosa con respecto al clima de 1961-1990. Solo la temporada setiembre-noviembre no mostró desviaciones significativas, es decir, los montos estimados son similares a los del clima actual.
- b. Pacífico Central: muestra casi el mismo patrón de tendencia que el Pacífico Norte. El déficit aumenta gradualmente con el tiempo, pasando de un 5%-10% en marzo-mayo de 2041-2070 hasta el 10%-20% en junio-agosto del 2071-2100, que del mismo modo implica una canícula más acentuada para finales de siglo. El periodo setiembre-noviembre tampoco exhibió cambios

Figura 30. Series de tiempo (2010-2099) de la lluvia media anual (mm/día) proyectadas por el modelo PRECIS con el escenario RCP8.5 para diferentes regiones del país: (A) Pacífico Norte, (B) Caribe Norte y (C) Pacífico Sur.



- significativos con respecto a la norma climática (1961-1990), lo que significa que se mantendrá como el periodo más lluvioso del año.
- c. Pacífico Sur: también manifiesta un patrón de tendencia parecido al del resto del Pacífico. Presenta déficit muy homogéneo del 10%-15% desde diciembre hasta agosto, aunque el déficit aumenta un poco más en el periodo de la canícula (de hasta un 20% menos). No se observan cambios en el periodo normalmente lluvioso de setiembre-noviembre.
 - d. Valle Central: también manifiesta un patrón de tendencia parecido al de las regiones del Pacífico. Es de las pocas regiones donde el escenario RCP4.5 genera niveles de lluvia más bajos que los del RCP8.5, particularmente en el 2041-2100. En diciembre-febrero se registran los porcentajes más bajos (de hasta un 20% menos). El periodo de la canícula muestra una disminución menos acentuada que las otras regiones (del 10% al 15%). Tampoco se presentan cambios importantes en el periodo normalmente lluvioso de setiembre-noviembre.
 - e. Zona Norte: en esta región también el escenario RCP4.5 genera en el 2041-2070 cambios negativos más bajos que el RCP8.5 para cualquiera de las temporadas. En general se observan cambios poco significativos, salvo entre junio-agosto, que presentan una disminución posterior al 2041 de un 10% al 15% entre setiembre y febrero, independientemente del escenario de emisiones y el horizonte de tiempo.
 - f. Región Caribe: es la región de mayor variabilidad ya que presenta cambios positivos y negativos en función de la temporada, el escenario de emisiones y el horizonte de tiempo. Las temporadas con comportamientos totalmente opuestos son las de diciembre-febrero y setiembre-noviembre. En la primera se observa una tendencia negativa que se acentúa en el 2071-2100 con un déficit del 10% (para ambos escenarios RCP8.5 y 4.5), mientras que en setiembre-noviembre todos los escenarios indican cambios positivos con una definida y significativa tendencia positiva que alcanza los niveles más altos en el 2071-2100 para el escenario RCP8.5.

5.3. Humedad relativa

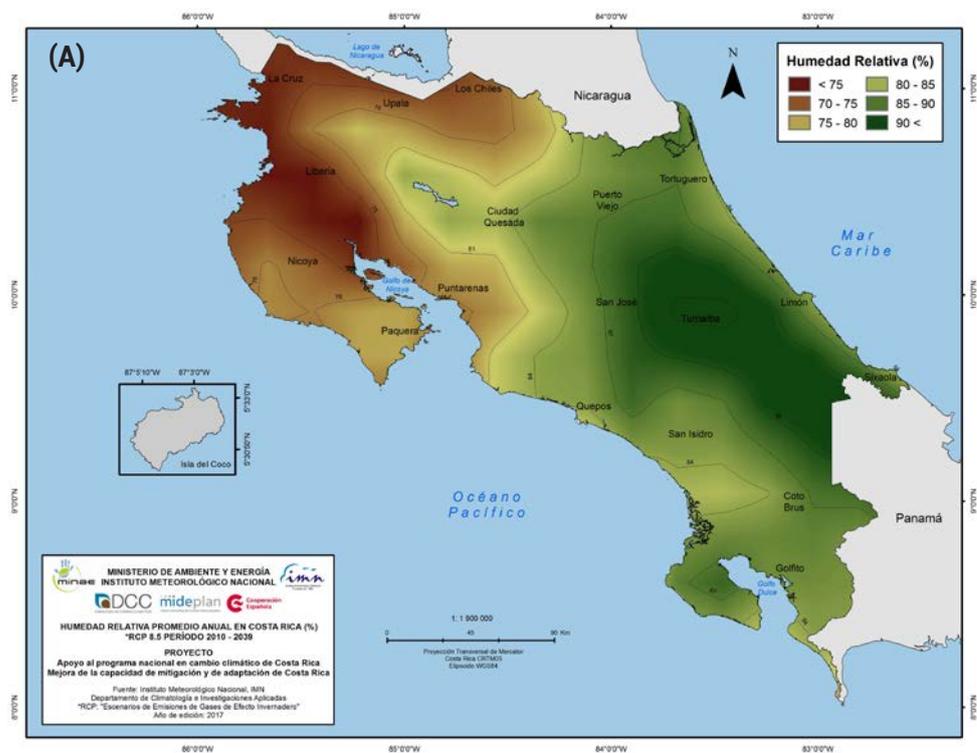
La humedad y las siguientes dos variables climáticas (radiación y viento) están entre las nuevas variables climáticas que los modelos son capaces de hacer proyecciones futuras y que la comunidad científica está empezando a liberar públicamente, sin embargo, de momento se desconoce el nivel de confianza o incertidumbre de estos nuevos productos, debido a que a nivel nacional se carece de los recursos su-

ficientes para poder validar las simulaciones de control y la habilidad de predicción de estos modelos. Por lo tanto, los resultados siguientes deben de ser tomados con mucha precaución y no tomar decisiones importantes con ellos, ya que son una primera aproximación o experimento que es necesario estar evaluando constantemente conforme se disponga de datos observacionales y modelos actualizados con el mejor conocimiento.

En las figuras 31 (A, B, C) se muestran las proyecciones de la humedad relativa media anual para los tres horizontes de tiempo del siglo XXI, el color café denota húmedas bajas y el verde humedades altas. En los tres mapas se observa una configuración espacial similar en distribución y magnitud a las del clima actual (1961-1990, figura 8), donde las condiciones más húmedas ($HR > 90\%$) se registran en altitudes intermedias de la región Caribe Sur, así como en la península de Osa, mientras las menos húmedas se ubican ($HR < 80\%$) en el Pacífico Norte y la zona que comprende los cantones de Upala y Los Chiles. Las variaciones de un periodo al otro son relativamente pequeñas, no obstante, se aprecia un leve aumento de la humedad entre el corto y el mediano plazo, caso contrario entre el mediano y largo plazo donde tiende a disminuir.

Los cambios con respecto al clima actual (1961-1990) se observan mejor en las figuras 32 (A, B y C). En todas ella resalta que el modelo no pronostica cambios negativos, es decir, la humedad relativa aumentará en todo el país, lo cual parece

Figura 31. Proyección de (A) corto plazo (2010-2039), (B) mediano plazo (2040-2069) y (C) largo plazo (2070-2099) de la humedad relativa (%) media anual con el escenario de emisiones RCP8.5. Fuente: modelo PRECISv2.0



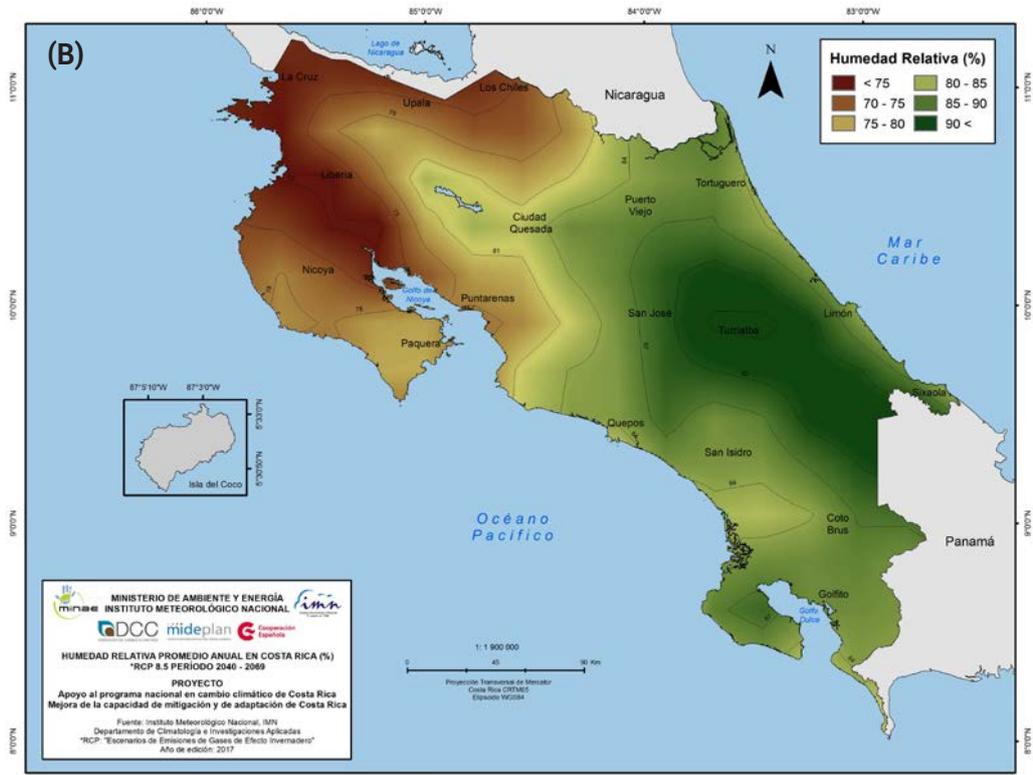


Figura 31.
Continuación.

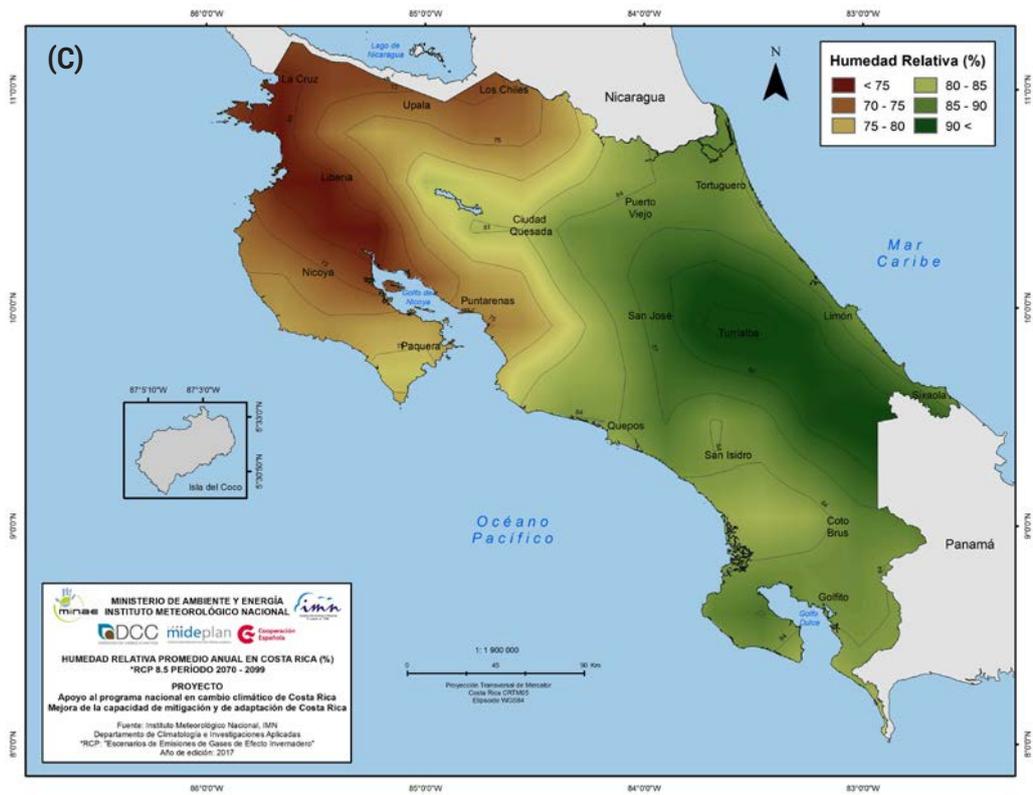
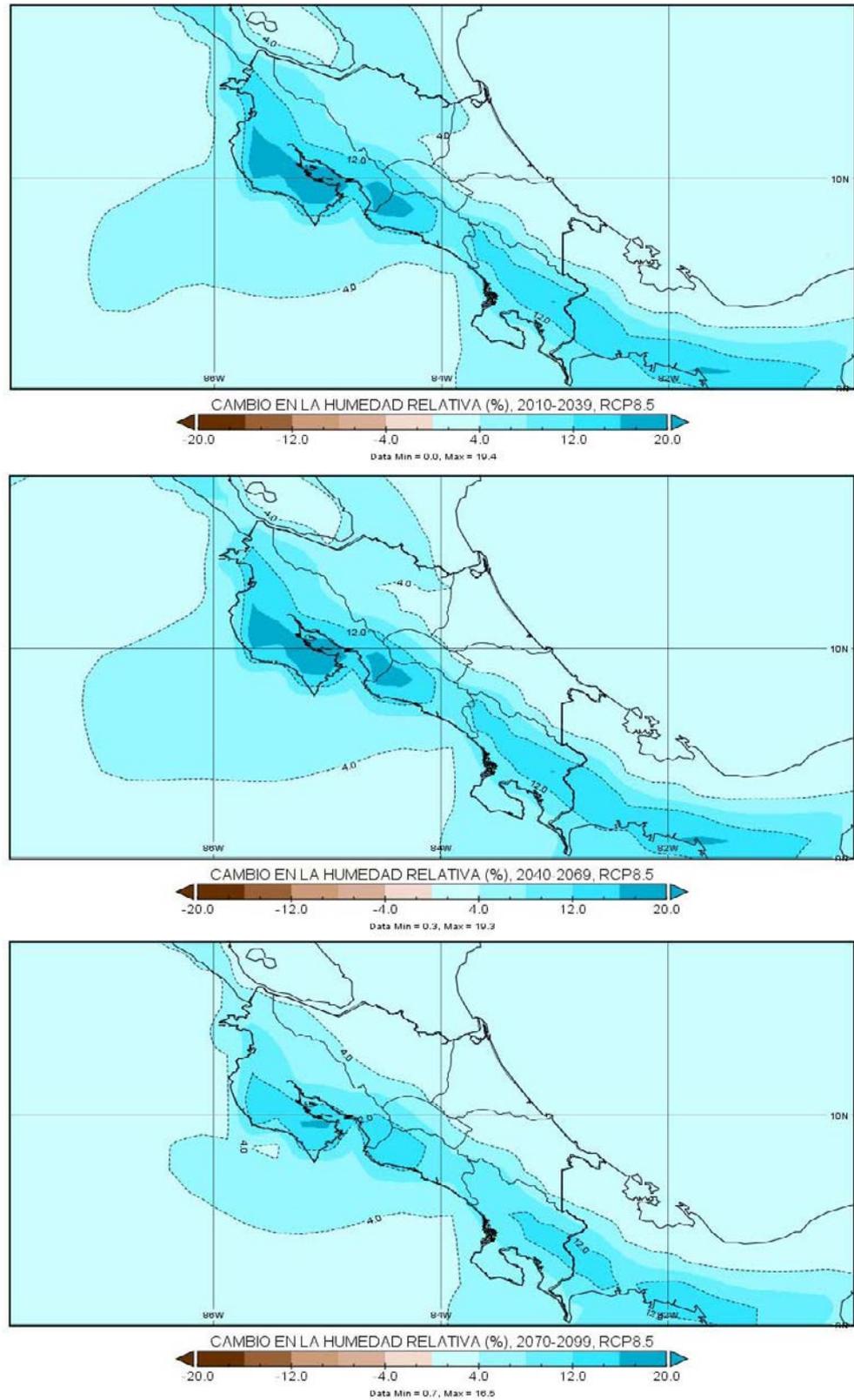


Figura 32. Proyecciones de (A) corto plazo (2010-2039), (B) mediano plazo (2040-2069) y (C) largo plazo (2070-2099) del cambio de la humedad relativa (1 1.5 m del suelo) con respecto a la climatología del modelo PRECIS (1961-1990).



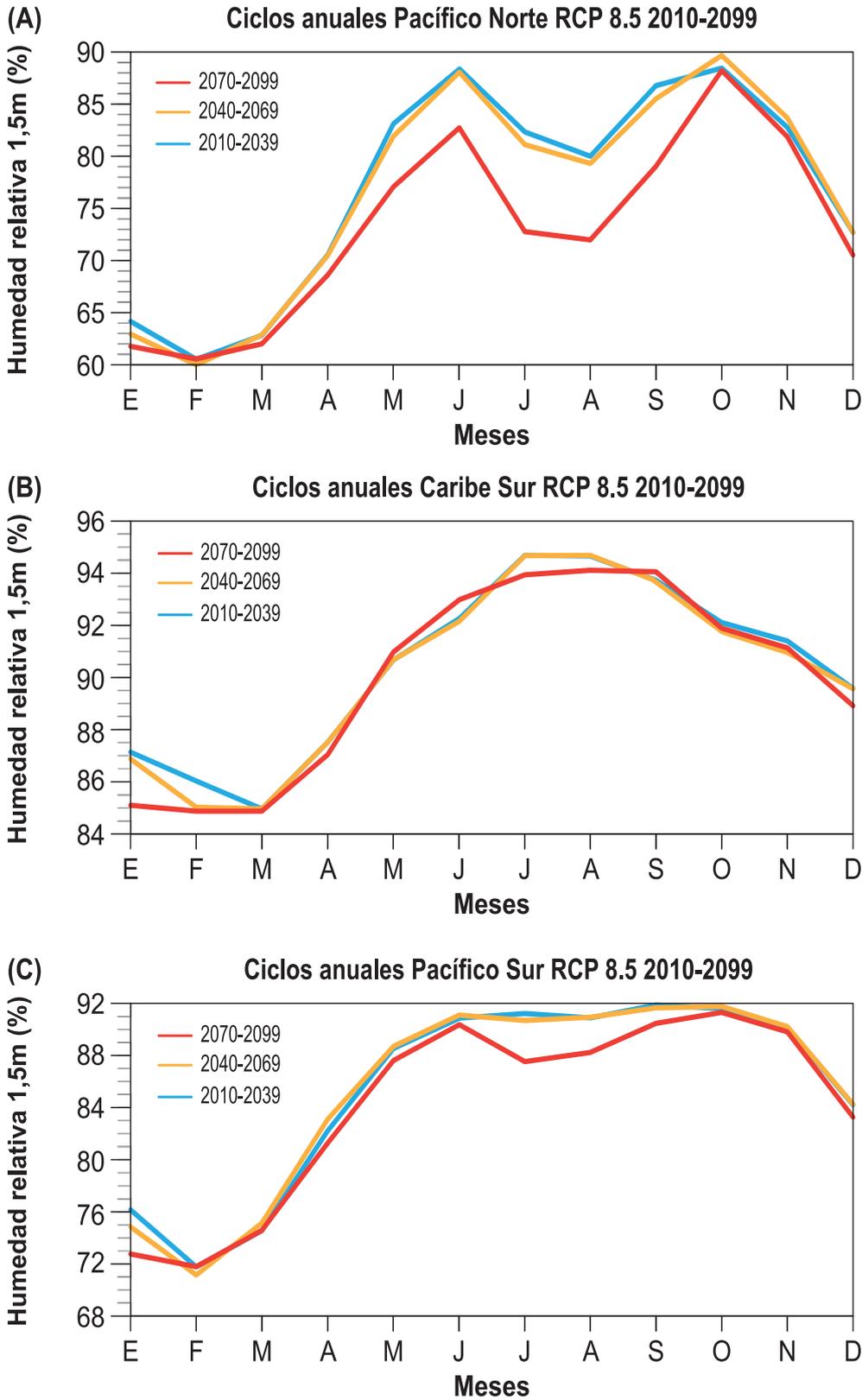


Figura 33. Proyecciones del modelo PRECIS del ciclo anual de la humedad relativa (%) para tres regiones y los tres horizontes de tiempo: (A) Pacífico Norte, (B) Caribe Sur y (C) Pacífico Sur.

razonable y acorde con las evidencias del calentamiento global asociado al aumento de la temperatura media del aire, lo cual también se ha podido comprobar en series de tiempo del país (Abarca, 2018). De acuerdo con las figuras 32, los aumentos de la humedad relativa serán mayores en las regiones del Pacífico, particularmente en la península de Nicoya y el Pacífico Central, en donde el incremento será entre 16% y 20% para los primeros dos periodos (2010-2039 y 2040-2069, figura 32 A y B); para finales de siglo (figura 32C) el aumento será de menor magnitud (entre 12% y 16%). En la Zona Norte y la región Caribe los aumentos de la humedad serán menores al 10% independientemente del horizonte de tiempo.

El ciclo anual de la humedad relativa en el Pacífico Norte (figura 33A) permite concluir que el horizonte de tiempo de largo plazo (2070-2099) será menos húmedo que los anteriores, principalmente durante los meses de la canícula (julio y agosto). En el Caribe Sur (figura 33B) no hay grandes variaciones con el tiempo, salvo una pequeña disminución en enero, julio y agosto en el horizonte de tiempo de largo plazo. Para el Pacífico Sur (figura 33C) la humedad de finales de siglo será un poco menor a la de los periodos anteriores, especialmente durante los meses de la canícula y setiembre.

5.4. Radiación solar

En las figuras 34 (A, B, C) se muestran las proyecciones de la radiación solar media anual para los tres horizontes de tiempo del siglo XXI, el color anaranjado y rojo indican niveles más altos de radiación (mayores a 220 W/m²) y los verdes niveles más bajos (menores a 210 W/m²). Según estos mapas, la radiación solar es más alta en: ambas costas, el Pacífico Norte, la Zona Norte, el Valle Central y las zonas bajas del Pacífico Sur. Sobre el Pacífico Central y las cordilleras se presentan los niveles más bajos de la radiación. Las variaciones entre los horizontes de tiempo denotan un aumento importante del periodo de corto plazo (2010-2039) al siguiente, por ejemplo, nótese el cambio a color amarillo en la península de Nicoya y de Osa, así como el desarrollo de rojos en la Zona Norte, sin embargo, disminuye la radiación en las zonas de montaña. El cambio es más obvio entre el segundo y tercer periodo (2070-2099), ya que se observa una disminución en todo el país, pero especialmente en la región Caribe y el Pacífico Sur.

De acuerdo con las figuras 35 (A, B y C), que muestran los cambios (%) de la radiación de los horizontes de tiempo del siglo XXI con respecto al clima actual (1961-1990), la radiación solar para el corto plazo es menor al promedio actual en: el Pacífico Norte, el Valle Central, el Pacífico Central y el lado occidental de la cordillera de Talamanca, por el contrario, es mayor en la costa del Caribe, parte de la Zona Norte y el extremo más sur del país; en todo caso los porcentajes de aumento y disminución son

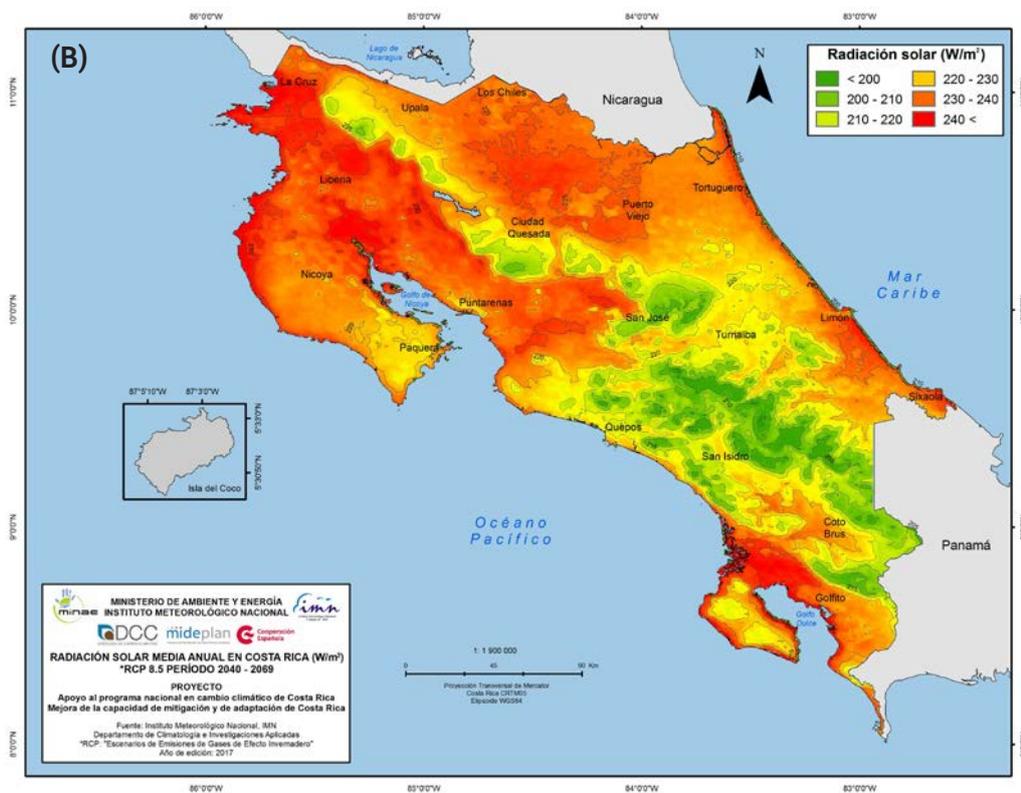
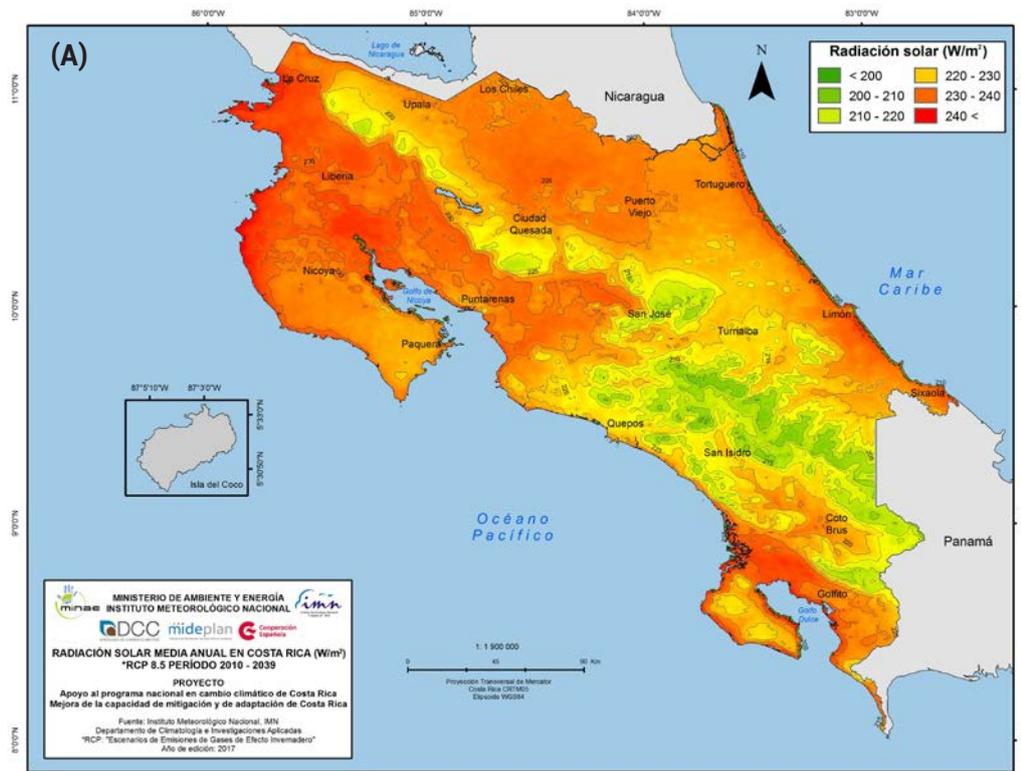
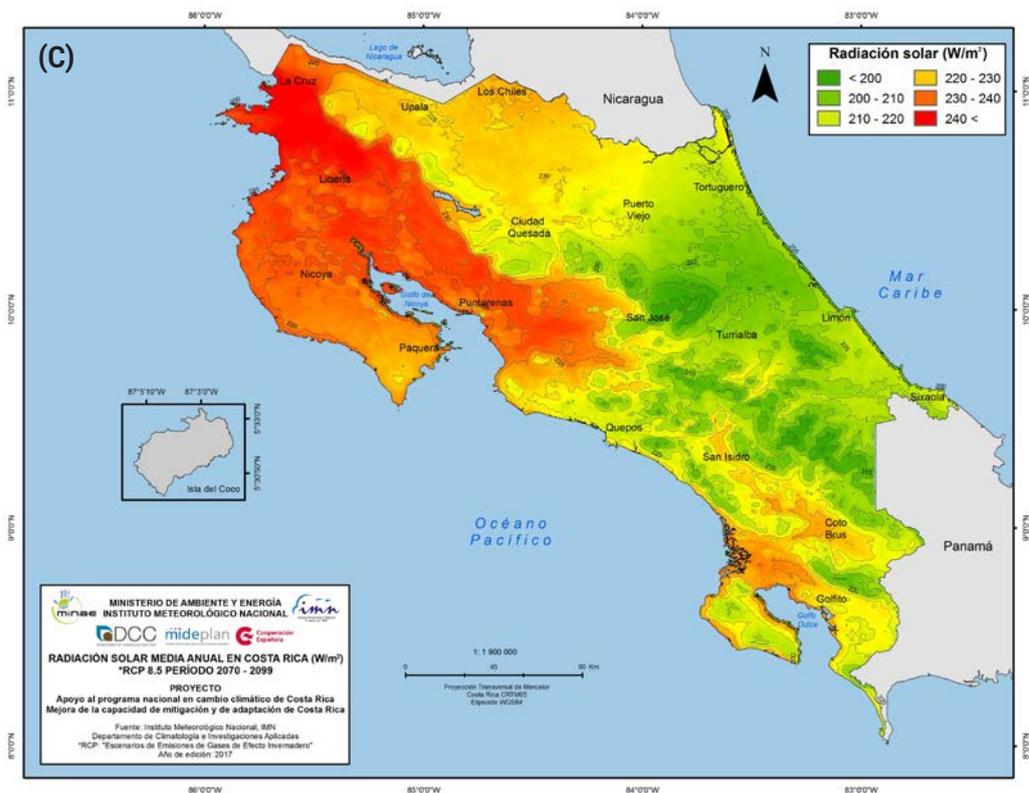


Figura 34. Proyección de (A) corto plazo (2010-2039), (B) mediano plazo (2040-2069) y (C) largo plazo (2070-2099) de la radiación solar (W/m²) media anual con el escenario de emisiones RCP8.5. Fuente: modelo PRECISv2.0

Figura 34.
Continuación



relativamente pequeños: del orden del 5% y 10%, respectivamente. Las condiciones del periodo intermedio (figura 35B) son similares a las del anterior, salvo que el porcentaje en las zonas de aumento es menor al 5%. Para el último periodo (2070-2099) se observan cambios diferentes a los anteriores, por ejemplo, se registra un aumento de radiación sobre la cordillera de Guanacaste, el cerro Chirripó y la península de Osa. Estos cambios positivos no superan el 5%. Cambios negativos (menos radiación que el promedio) se desarrollan en las regiones Caribe y persisten en el Pacífico Central y la parte más sur de la península de Nicoya; la magnitud de los cambios negativos llega hasta de un 12% (en la zona de montaña del Caribe Norte) y los positivos hasta un 5% (península de Osa).

Las siguientes figuras son los ciclos anuales de la radiación para algunas regiones del país. En el Pacífico Norte (figura 36A) lo mayores niveles de radiación ($\sim 270 W/m^2$) se presentan en la temporada seca y luego un máximo secundario en la canícula (julio y agosto, $\sim 220 W/m^2$), mientras los más bajos en junio y octubre ($\sim 150 W/m^2$). La cantidad de radiación es muy parecida en la temporada seca para los tres horizontes del tiempo, sin embargo, se observa que -en comparación con los primeros dos periodos- la radiación es mayor para finales de siglo durante la temporada de lluvias, especialmente en los meses de la canícula. En la región Caribe Sur (figura 36B) el mo-

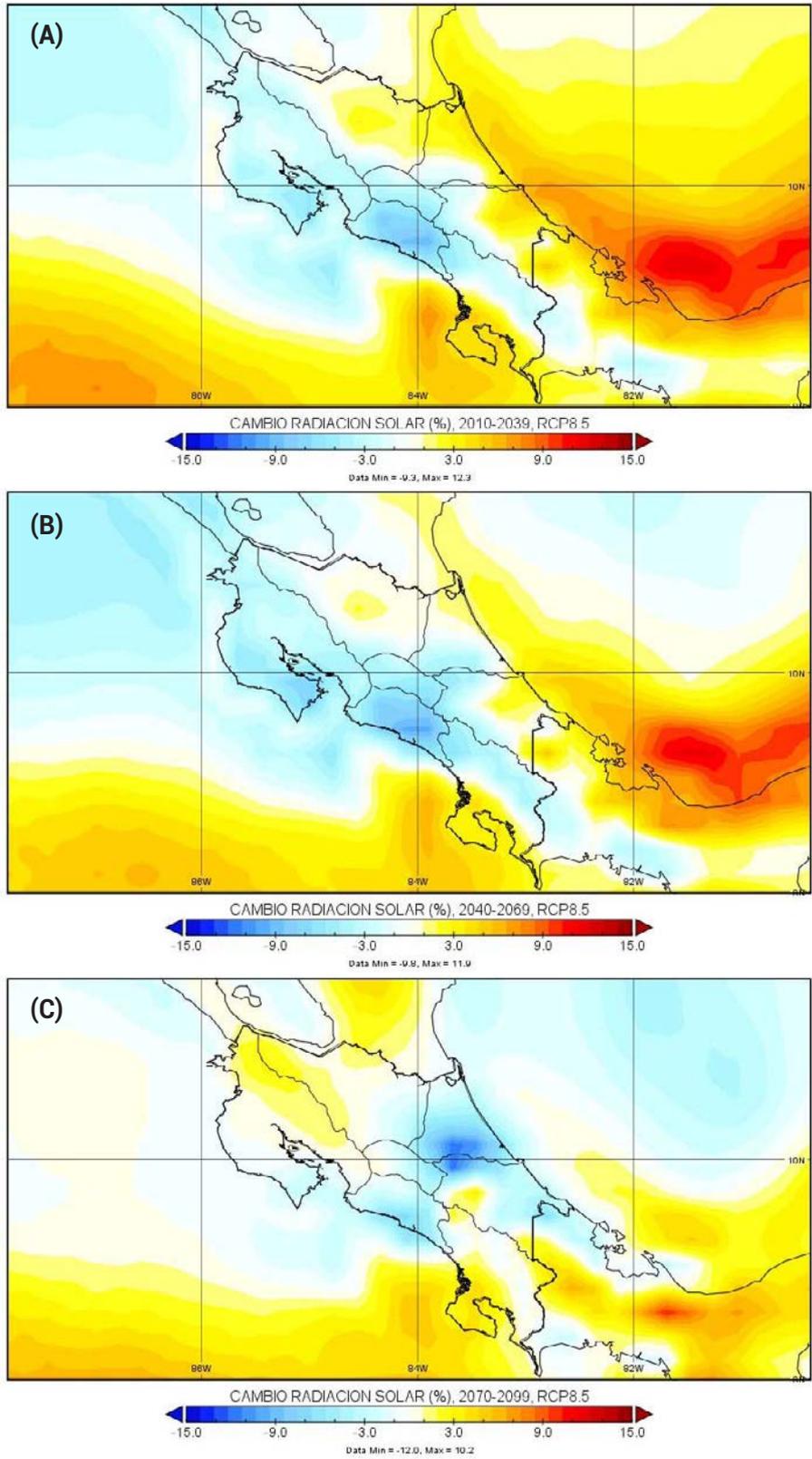
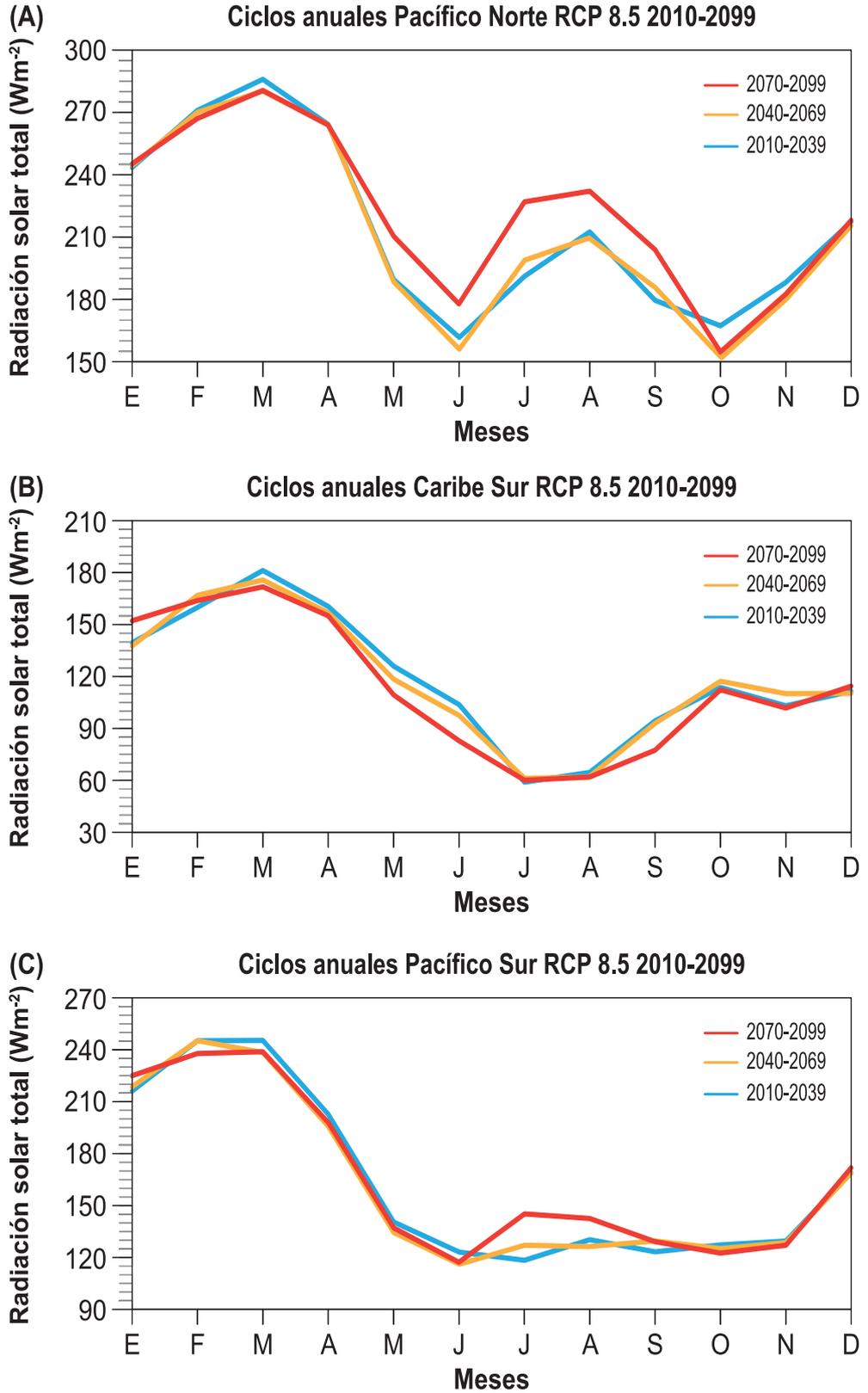


Figura 35. Proyecciones de (A) corto plazo (2010-2039), (B) mediano plazo (2040-2069) y (C) largo plazo (2070-2099) del cambio de la radiación solar (W/m^2) con respecto a la climatología del modelo PRECIS (1961-1990).

Figura 36. Proyecciones del modelo PRECIS del ciclo anual de la radiación solar (W/m^2) para tres regiones y los tres horizontes de tiempo: (A) Pacífico Norte, (B) Caribe Sur y (C) Pacífico Sur.



delo exhibe un máximo (de $\sim 180 \text{ W/m}^2$) en marzo, y el mínimo ($\sim 60 \text{ W/m}^2$) en julio-agosto; en este caso las diferencias entre las curvas de los horizontes de tiempo son mínimas, por lo que el comportamiento futuro no presentará cambios significativos con el clima actual. En el Pacífico Sur (figura 36C) los niveles de radiación presentan un máximo en febrero-marzo ($\sim 240 \text{ W/m}^2$) y un mínimo prolongado entre junio y noviembre ($\sim 130 \text{ W/m}^2$). Al igual que en el Caribe Sur, las variaciones de la radiación son mínimas gran parte del año y en cualquiera de los horizontes de tiempo, salvo durante la canícula donde hay un aumento para el 2070-2099.

5.5. Velocidad del viento

En las figuras 37 (A, B, C) se muestran las proyecciones de la velocidad media anual del viento (m/s, a 10 m de altitud) para los tres horizontes de tiempo del siglo XXI, el color lila/morado indican velocidades más altas y el azul/celeste las más bajas. Según el modelo, las velocidades más altas (3.5 m/s) se registran en las costas del Pacífico Norte y las cordilleras, las más bajas en las llanuras de la Zona Norte, el Valle del General/Coto Brus, el valle de La Estrella y Paso Canoas (todas con 2 m/s). La comparación de las tres figuras muestra un gradual aumento de las velocidades del viento en

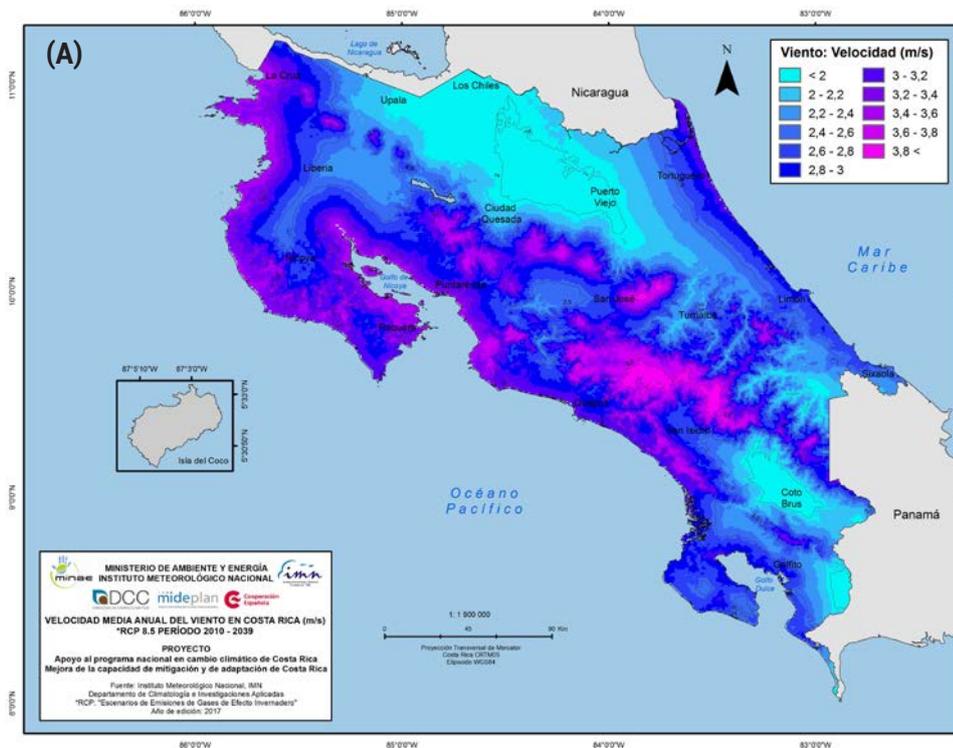
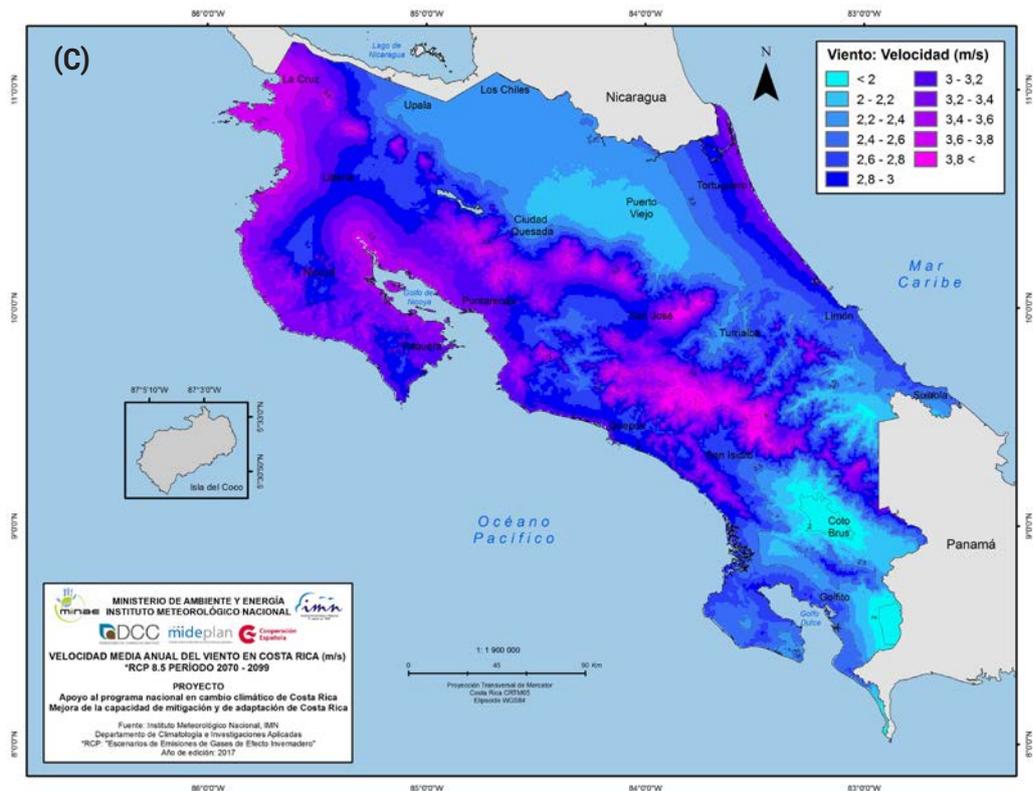
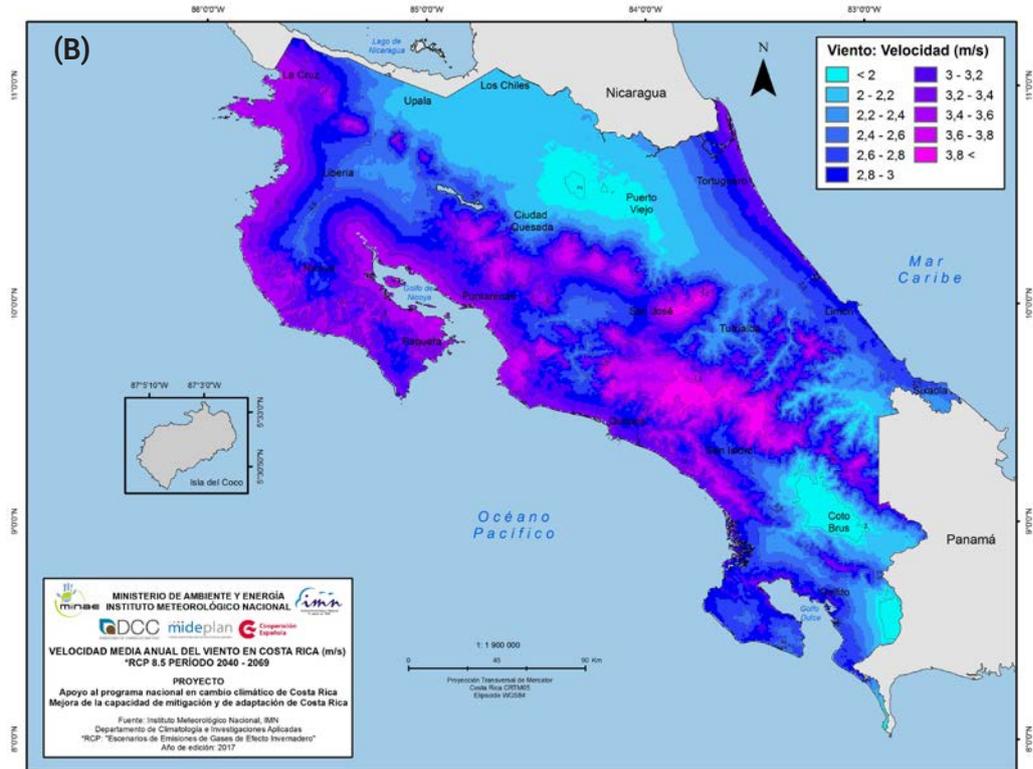


Figura 37. Proyección de (A) corto plazo (2010-2039), (B) mediano plazo (2040-2069) y (C) largo plazo (2070-2099) de la velocidad media anual del viento a 10 m del suelo con el escenario de emisiones RCP8.5. Fuente: modelo PRECISv2.0.

Figura 37.
Continuación



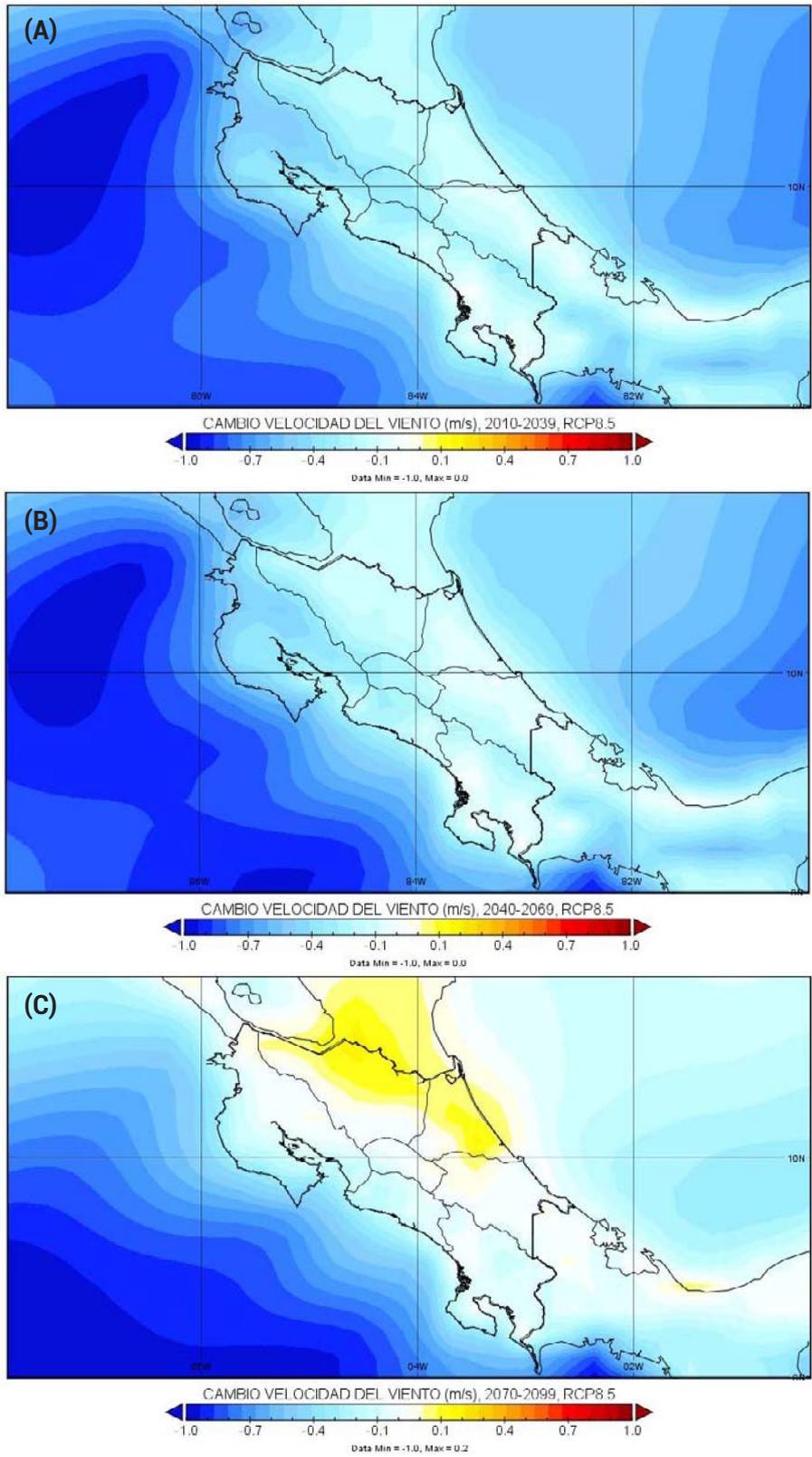


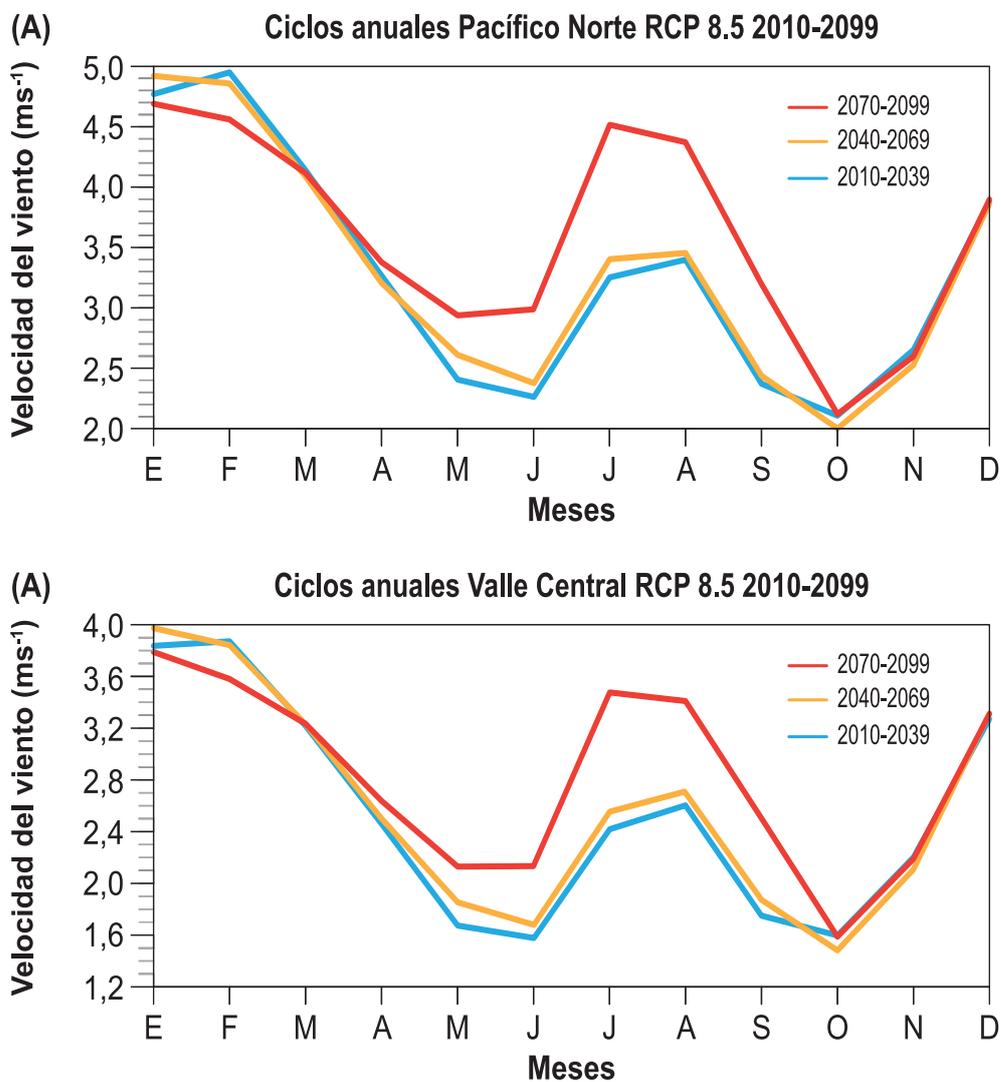
Figura 38. Proyecciones de (A) corto plazo (2010-2039), (B) mediano plazo (2040-2069) y (C) largo plazo (2070-2099) del cambio de la velocidad del viento (m/s) con respecto a la climatología del modelo PRECIS (1961-1990).

todo el país, sin embargo, las conclusiones son distintas al comparar cada una de ellas con la correspondiente climatología.

Las figuras 38 (A, B y C) son el mapeo de los cambios de la velocidad relativos a la climatología del modelo en el periodo (1961-1990). Nótese el predominio de cambios negativos en los dos primeros periodos, es decir, la velocidad es más baja que el promedio histórico, sin embargo, las magnitudes de estos cambios son menores a 1 m/s. Las figuras 38 A y B también denotan un relativo debilitamiento del chorro de Papagayo. Para el horizonte de largo plazo (2070-2099) se presentan cambios positivos (la velocidad es mayor que el promedio) en el Caribe Norte y la Zona Norte, mientras que prevalecen cambios negativos poco significativos en el resto del país.

Las figuras 39 (A y B) son los ciclos anuales proyectados por el modelo para dos regiones del país (Pacífico Norte y Valle Central) en los tres horizontes de tiempo.

Figura 39. Proyecciones del modelo PRECIS del ciclo anual de la velocidad media del viento (m/s) para los tres horizontes del tiempo y dos regiones climáticas: (A) Pacífico Norte y (B) Valle Central.



En los primeros dos periodos la velocidad de viento sigue el mismo comportamiento y presenta magnitudes similares, las condiciones más ventosas ocurren en enero/ febrero (con velocidades de 4.9 m/s) y en julio/agosto (con velocidades de 3.4 m/s); las velocidades más bajas en junio y octubre (2.2 m/s). Para el periodo de largo plazo, la característica más relevante es la mayor velocidad del viento en la canícula con respecto a los periodos anteriores, alcanzado velocidades de 4.5 m/s. Según la figura 11 y 39A, el aumento del viento en julio/agosto del 2070-2099 es también mayor al promedio climático (1961-1990). Para el Valle Central las condiciones son parecidas a las del Pacífico Norte, pero con una menor magnitud del viento.

6

REFERENCIAS

- Abarca Monge, S., 2018. Cambio climático: cuantificación de la variación del clima en Turrialba en el último medio siglo. *Alcances Tecnológicos*, 6(1): 81 - 96. <https://doi.org/10.35486/at.v6i1.68>
- Collins, W.J.; Bellouin, N.; Doutriaux-Boucher, M.; Gedney, N.; Halloran, P.; Hinton, T.; Martin, G., 2011. Development and evaluation of an Earth-System model—HadGEM2. *Geosci. Model Dev. Discuss*, 4: 997–1062.
- Cox, P., Betts, R., Bunton, C. et al., 1999. The impact of new land surface physics on the GCM simulation of climate and climate sensitivity. *Climate Dynamics*. 15: 183–203. <https://doi.org/10.1007/s003820050276>
- Díaz, G., Sánchez, I. & Quiroz, R. et al., 2008. Interpolación espacial de la precipitación pluvial en la zona de barlovento y sotavento del Golfo de México. *Agricultura Técnica en México*, 34(3): 279-287
- Essery, R., Best, M. & Cox, P., 2001. MOSES 2.2 technical documentation. Hadley Center, Met Office, UK, 30 pp.
- Fick, S.E. & R.J. Hijmans, 2017. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37 (12): 4302-4315.
- Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J. et al. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces of global land areas. *International Journal of Climatology*. 25: 1965-1978. [10.1002/joc.1276](https://doi.org/10.1002/joc.1276).
- Hutchinson, M.F., 1995. Interpolating Mean Rainfall Using Thin Plate Smoothing Splines. *International Journal of Geographical Information Systems*. 9. 385-403. [10.1080/02693799508902045](https://doi.org/10.1080/02693799508902045).
- Jones, C. D., Hughes, J. K., Bellouin, N. et al., 2011. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geosci. Model Dev.*, 4: 543–570, <https://doi.org/10.5194/gmd-4-543-2011>
- Kundeti, Koteswararao & Patwardhan, Savita & Kulkarni, Ashwini & Kamala, K. & Sabade, Sudhir & Kumar, K., 2013. Projected changes in mean and extreme precipitation indices over India using PRECIS. *Global and Planetary Change*. 113. [10.1016/j.gloplacha.2013.12.006](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.12.006).
- Martin, G., Bellouin, N., Collins, W. et al., 2011. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. *Geosci. Model Dev.*, 4: 723–757. [doi:10.5194/gmd-4-723-2011](https://doi.org/10.5194/gmd-4-723-2011)

- Mendez, M., Maathuis, B., Hein-Griggs, D. & Alvarado G., L., 2020. Performance Evaluation of Bias Correction Methods for Climate Change Monthly Precipitation Projections over Costa Rica. *Water* 12(2), 482. <https://doi.org/10.3390/w12020482>
- Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S. et al., 2008. Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Technical Summary. IPCC Expert Meeting Report.
- Nakicenovic, N., Alcamo G., Davis B., de Vries J., Fenhann A., et al., 2000. *Emissions scenarios, a special report of working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 599 p.
- Ramirez, J. & Jarvis, A., 2010. Downscaling Global Circulation Model Outputs: The Delta Method Decision and Policy Analysis Working Paper No. 1. International Center for Tropical Agriculture (CIAT). Cali. CO. 18 p.
- Redmond, G., Hodges, K., McSweeney, C., Jones, R. & Hein, D., 2015. Projected changes in tropical cyclones over Vietnam and the South China Sea using a 25 km regional climate model perturbed physics ensemble. *Clim. Dyn.* 45: 1983– 2000. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2450-8>
- Tabor, K. & Williams, J.W., 2010. Globally downscaled climate projections for assessing the conservation impacts of climate change. *Ecological Applications*, 20(2): 554-565.
- Teutschbein, C. & Seibert J., 2012. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: review and evaluation of different methods. *J Hydrol*, 456–457, pp 12-29, <https://doi:10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>
- Van Khiem, M., Redmond, G., Mcsweeney, C., & Tran, T., 2014. Evaluation of dynamically downscaled ensemble climate simulations for Vietnam. *International Journal of Climatology*. 34. 10.1002/joc.3851.
- van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M. et al., 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109 (5). <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Wilson, S., Hassell, D., Hein, D. et al., 2015. *Technical Manual for PRECIS The Met Office Hadley Centre regional climate modelling system Version 2.0.0*. Consultado en línea: https://www.metoffice.gov.uk/binaries/content/assets/metofficegovuk/pdf/research/applied-science/precis/tech_man_v2.pdf

