

Cambios futuros de precipitación y temperatura sobre América Central y el Caribe utilizando proyecciones climáticas de reducción de escala estadística

Rodrigo Castillo, Rosangélica Montero, Jorge Amador y Ana María Durán

Escuela de Física y Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica, 11501 San José, Costa Rica. (rodrigo.castillorodriguez@ucr.ac.cr)

(Recibido: 02-Nov-2017. Publicado: 22-Ene-2018)

Resumen

En la presente investigación se muestra mediante el uso del conjunto de proyecciones climáticas de reducción de escala estadística pertenecientes al NEX-GDDP, los cambios a largo plazo en precipitación y temperatura que ocurrirían en América Central y el Caribe a finales del siglo XXI, esto a través del cálculo de las diferencias de los ensambles de los multi-modelos de los dos escenarios correspondientes a las rutas de concentración representativas (RCP 4.5 y RCP 8.5) con un período de 2070-2099 menos el escenario histórico que abarca de 1970-1999. Vislumbrando como un acelerado aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero debido a la dependencia del uso excesivo de combustibles fósiles, traería consigo cambios en esta región, tales como condiciones más secas en países como Guatemala, Belice, Honduras, El Salvador, Nicaragua y Costa Rica, y de manera contraria condiciones más húmedas en la costa Pacífica de países como Colombia, Ecuador y Perú.

Palabras clave: América Central, Cambio Climático, RCP 4.5, RCP 8.5, NEX-GDDP.

Abstract

The long-term changes in precipitation and temperature that will occur in Central America and the Caribbean at the end of the 21st century are shown using the NEX-GDDP statistical downscaled projections. We used this high resolution dataset to compute the differences between the multi-model ensembles of the two prospective scenarios corresponding to the representative concentration pathways (RCP 4.5 and RCP 8.5) with a period of 2070-2099 and the retrospective baseline scenario covering 1970-1999. Looking at how accelerated and unprecedented increases in concentrations of greenhouse gases will bring about changes in this region, such as drier conditions in countries like Guatemala, Belize, Honduras, El Salvador, Nicaragua and Costa Rica, and in the other hand wetter conditions in the Pacific coast of countries like Colombia, Ecuador and Peru.

Key words: Central America, Climate Change, RCP 4.5, RCP 8.5, NEX-GDDP.

1. Introducción

El estudio de los posibles cambios a futuro en el clima es un tema de relevancia en la actualidad, ya que muchos de estos proyectan que la ocurrencia de eventos extremos podrían aumentar, los cuales se reflejarían como fuertes lluvias, o por el contrario sequías intensas, temperaturas extremas, cambios en la frecuencia y ocurrencia de tormentas y huracanes, todo esto en escalas de tiempo relativamente cortas (Parry *et al.*, 2007). Es por esta razón que su investigación es de suma importancia, pues genera una visión más clara de lo que podría ocurrir en el futuro si se mantienen o empeoran las condiciones de emisiones ya establecidas en nuestra atmósfera.

Entre los principales actores generadores del calentamiento global y el potencial cambio climático asociado se encuentra el impacto antropogénico, producido en primer lugar por el uso de combustibles fósiles, debido a que el 80% de la energía a nivel global se produce mediante estos combustibles (IEA,

2016), ocasionando un aumento en la concentración de CO₂ en la atmósfera. En segundo lugar se encuentra la deforestación (Hassol, 2004). De hecho en América Latina tropical la deforestación es uno de los mayores problemas de la región, siendo América Latina la responsable del 4.3% del total de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global, donde un 48.3% de este porcentaje resulta de la deforestación y uso de la tierra (Parry *et al.*, 2007).

América Central y el Caribe están ubicados en la región tropical y subtropical, es decir, aproximadamente entre los 23.45°N y 23.45°S (Galvin, 2015). América Central, identificada como punto caliente del cambio climático por Giorgi (2006), está comprendida por Belice, Costa Rica, Honduras, Guatemala, Nicaragua, Panamá y El Salvador, y se encuentra rodeada por los océanos Pacífico y Atlántico (Mar Caribe).

El clima de esta región es controlado por distintas características sinópticas, como por ejemplo, el sistema de alta presión del Atlántico Norte, que es un impulsor de los vientos alisios y un modulador del chorro de bajo nivel del caribe, el cual fue descrito por Amador (1998). Estas características son de suma importancia para la generación de precipitación sobre América Central y para el clima en general sobre esta región. Asimismo, la topografía juega un papel importante, ya que al ser muy irregular produce variaciones climáticas locales que influyen en el comportamiento bimodal de la distribución de precipitación anual sobre el Pacífico del istmo centroamericano, fenómeno conocido como la “sequía” de verano y descrito por Magaña *et al.* (1999). Además esta región posee dos estaciones marcadas bien definidas, una seca y otra lluviosa (Magaña *et al.*, 1999; Amador, 2008).

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de los posibles cambios en precipitación y temperatura que ocurrirían sobre América Central y el Caribe a finales del siglo XXI, mediante el uso de proyecciones climáticas de reducción de escala estadística, logrando mostrar cómo estos cambios traerían condiciones más secas en regiones como Guatemala, Belice, Honduras, El Salvador, Nicaragua y Costa Rica, y de manera contraria se proyectan condiciones más húmedas en la costa Pacífica de países como Colombia, Ecuador y Perú.

2. Metodología

Para realizar el presente análisis se utilizó la región 2 (figura 1) de CORDEX (Coordinated Regional climate Downscaling Experiment), tomando las cuatro esquinas del sistema coordinado no rotado en longitud y latitud (Lon, Lat), el TLC (Top Left Corner) con coordenadas (235.74, 28.79), el TRC (Top Right Hand Corner) ubicado a (337.78, 31.40), el BLC (Bottom Left Corner) a (246.10, -19.46) y el BRC (Bottom Right Hand Corner) en (329.46, -17.23) (WCRP-CORDEX, 2015).

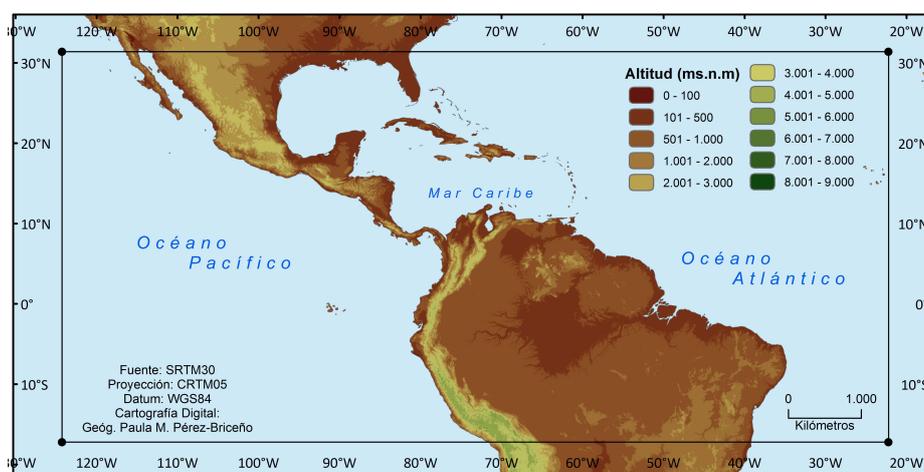


Fig. 1: Dominio de América Central y el Caribe utilizado en el presente trabajo, el cual está basado en la región 2 de CORDEX.

La importancia de utilizar este tipo de esquemas de regionalización en este trabajo de investigación se debe a que CORDEX es un programa patrocinado por el WCRP (World Climate Research Programme) para organizar un marco internacional coordinado que produzca una generación mejorada de proyecciones regionales sobre el cambio climático en todo el mundo, el cual podrá contribuir a los estudios de impacto y adaptación dentro de la línea de tiempo del quinto informe de evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático y más allá (Giorgi *et al.*, 2009; Diro *et al.*, 2012).

El conjunto de datos utilizado en este trabajo es “The NASA (National Aeronautics and Space Administration) Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections” (NEX-GDDP), que se deriva de los ensayos de 21 Modelos de Circulación General conducidos bajo el Proyecto de Intercomparación del Modelo Acoplado Fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés) (Taylor *et al.*, 2009 y 2012), que se muestran en la tabla 1.

Para la generación de este conjunto de datos de escala reducida y con corrección de sesgo se utilizó el método “Bias-Correction Spatial Disaggregation” (BCSD), el cual es un algoritmo de reducción de escala estadístico desarrollado específicamente para abordar las limitaciones actuales de los resultados de los Modelos de Circulación General (Wood *et al.*, 2002 y 2004; Maurer y Hidalgo, 2008; Thrasher *et al.*, 2012). Estas limitaciones en primera instancia tienen que ver con grillas de resolución relativamente gruesa, que restringen su capacidad de capturar los detalles espaciales en patrones climáticos que a menudo se requieren o se desean en análisis regionales o locales; y en segunda instancia se asocian a que pueden producir proyecciones que son globalmente precisas pero localmente sesgadas en sus características estadísticas en comparación con las observaciones (Thrasher y Nemani, 2015).

Tabla 1: Modelos de Circulación General del CMIP5 utilizados para generar la base de datos NEX-GDDP.

ACCESS1-0	CSIRO-MK3-6-0	MIROC-ESM
BCC-CSM1-1	GFDL-CM3	MIROC-ESM-CHEM
BNU-ESM	GFDL-ESM2G	MIROC5
CanESM2	GFDL-ESM2M	MPI-ESM-LR
CCSM4	INMCM4	MPI-ESM-MR
CESM1-BGC	IPSL-CM5A-LR	MRI-CGCM3
CNRM-CM5	IPSL-CM5A-MR	NorESM1-M

El algoritmo BCSD comparó los resultados de los Modelos de Circulación General con las observaciones climáticas del conjunto de datos de forzamiento meteorológico global para el modelado de la superficie terrestre (GMFD, por sus siglas en inglés) (Sheffield *et al.*, 2006; Thrasher y Nemani, 2015), correspondientes durante un período común. Luego se utilizó la información derivada de la comparación para ajustar las proyecciones climáticas futuras, de forma tal que fueran progresivamente más consistentes con los registros climáticos históricos y, presumiblemente, más realistas para el dominio espacial de interés. Además el algoritmo utilizó los detalles espaciales proporcionados por el conjunto de datos derivado de las observaciones para interpolar las salidas de los Modelos de Circulación General a grillas de mayor resolución (Thrasher y Nemani, 2015).

Por lo tanto, el juego de datos NEX-GDDP posee una grilla global que proporciona un conjunto de proyecciones que se pueden utilizar para analizar el impacto del cambio climático a nivel regional y local, el cual tiene una alta resolución espacial ($0.25^\circ \times 0.25^\circ \sim 25 \times 25$ km lat lon, respectivamente) y temporal (diaria). Además abarca un período de 1950 al 2100, el cual se divide en dos subperíodos, uno de 1950 al 2005 (ejecución retrospectiva) y del 2006 al 2100 (ejecución prospectiva), esto para las variables de precipitación, temperatura máxima y mínima (Thrasher y Nemani, 2015). Asimismo dentro de este conjunto de datos hay dos simulaciones de proyección futura forzadas con concentraciones específicas, denominadas “Representative Concentration Pathways” (RCPs) (Moss *et al.*, 2010; Van Vuuren *et al.*,

2011); estas son RCP 4.5 y RCP 8.5, las cuales fueron utilizadas en los 21 modelos para los que se produjeron los escenarios diarios y fueron distribuidos bajo CMIP5.

También utilizando las variables ya mencionadas de este conjunto de datos, se derivaron dos nuevas variables, el rango diurno de temperatura (ecuación 1) y la temperatura promedio (ecuación 2).

$$RDT = T_{max} - T_{min} \quad (1)$$

$$\langle T \rangle = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (2)$$

El análisis se realizó mediante el cálculo de la diferencia de la media de los ensambles de los 21 modelos, para las dos ejecuciones prospectivas (es decir, los escenarios RCPs) menos la retrospectiva (ejecución histórica) de las cinco variables disponibles (temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación, rango diurno de temperatura y temperatura promedio); esto para los dos períodos climáticos de final de siglo (1970-1999 y 2070-2099).

Los escenarios RCPs brindan información sobre las posibles trayectorias de desarrollo de los principales agentes forzadores del cambio climático, como lo son los gases de efecto invernadero (Van Vuuren *et al.*, 2011). El RCP 4.5 se refiere a la estabilización del forzamiento radiativo a 4.5 Watts por metro cuadrado, es decir, aproximadamente 650 ppm de CO₂ en el año 2100. Este escenario corresponde a emisiones mundiales a largo plazo de gases de efecto invernadero, especies de corta vida y uso de la tierra (Smith y Wigley, 2006; Clarke *et al.*, 2007; Wise *et al.*, 2009; Thomson *et al.*, 2011; Edenhofer *et al.*, 2014).

El RCP 8.5 corresponde a concentraciones de 1370 ppm de CO₂, lo cual lo convierte en la ruta con las mayores emisiones de gases de efecto invernadero, ya que combina los supuestos de la alta población y el crecimiento muy lento de los ingresos con pocas tasas de cambio tecnológico y mejoras en el consumo energético, proyectando a largo plazo una alta demanda de energía con una ausencia de políticas climáticas para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Riahi *et al.*, 2007 y 2011; Edenhofer *et al.*, 2014).

También se realizó una detección de valores atípicos sobre las cinco variables mediante el enfoque probabilístico descrito por Wilcox (2010), en donde se declara un valor como atípico si el valor absoluto de la diferencia de éste y el promedio sobrepasa dos desviaciones estándar como lo muestra la ecuación 3.

$$|X - \langle X \rangle| > 2\sigma \quad (3)$$

Por último se calculó el error estándar de la diferencia de las medias de los ensambles para las cinco variables de estudio. Este provee una medida de cuánta diferencia existe o es esperada entre los promedios de una muestra y otra, es decir, si el error estándar es pequeño, entonces los promedios de las muestras están muy juntos y por tanto son similares; si por el contrario el error es grande, entonces hay gran dispersión en las muestras y hay grandes diferencias entre una muestra y otra (Gravetter y Wallnau, 2009).

Según Welch (1938) se puede calcular el error estándar de una diferencia de promedios como:

$$\sigma_{\langle x_1 \rangle - \langle x_2 \rangle} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}} \quad (4)$$

en donde σ_1 se tomó como la desviación estándar de los miembros del ensamble de los valores históricos y σ_2 como la desviación estándar de los miembros del ensamble de los RCPs. Además los valores n_1 y n_2 corresponden a los 21 modelos.

3. Resultados y discusión

En las figuras de la 2 a la 11 se observan las diferencias entre las ejecuciones prospectivas (RCP 4.5 y RCP 8.5) y la ejecución retrospectiva (histórica) para las cinco variables, esto para los periodos climáticos anual, verano e invierno boreal de finales de siglo, así como el error estándar asociado a cada una de estas diferencias.

En la figura 2 se puede observar que sobre Centro América habría una disminución en la precipitación, especialmente en verano, en Costa Rica, Nicaragua, Honduras, El Salvador, Guatemala y Belice, así como en las Antillas Mayores y Menores, donde para el escenario RCP 8.5 la afectación sería mayor. Esta disminución en la precipitación se puede deber según Fuentes-Franco et al. (2015) a un calentamiento diferencial en los océanos Pacífico y Atlántico, el cual se podrá observar más adelante. Además, se tiene que sobre la costa Pacífica de Colombia, Ecuador y Perú por el contrario hay un aumento en la precipitación especialmente en invierno y con diferencias muy marcadas para el RCP 8.5. Estos resultados se relacionan bastante bien con lo mencionado por Parry *et al.* (2007), donde se destaca la disminución de precipitación en Centroamérica y el aumento en las regiones de la costa Pacífica del norte de Sudamérica debido a la potencial intensificación de los eventos del ENOS, el aumento del nivel del mar y su temperatura superficial. Asimismo, Parry *et al.* (2007) mencionan que la disminución en la precipitación podría traer consigo un severo estrés hídrico, por ejemplo, en las laderas del Pacífico de Guatemala, Valle Central y la región Pacífico de Costa Rica y la península de Azuero en Panamá, lo cual afectaría el suministro de agua y la producción hidroeléctrica. También, Hidalgo *et al.* (2013) proyectan medianas reducciones significativas en la precipitación de al menos un 5-10% para el periodo 2050-2099 en el norte de América Central. Además se esperaría que estos cambios en la precipitación afecten el “mid-summer drought” (MSD, por sus siglas en inglés), lo cual se observa en ambos escenarios RCPs, ya que según Maurer *et al.* (2017) se proyecta una extensión del MSD, la cual se podría ver reflejada en una caída del 9.6% de la precipitación media anual.

El error estándar (figura 3) muestra que hay valores que rondan los 0.2-0.5 mm/día, donde se puede observar que en las regiones que proyectan un aumento o disminución de la precipitación este error estándar tiende al límite superior, tanto en el escenario RCP 4.5 como en el RCP 8.5, sin embargo para el segundo es un poco mayor, lo cual significa que existe una mayor dispersión entre los modelos y por lo tanto más variabilidad (Gravetter y Wallnau, 2009). A pesar de que las proyecciones obtenidas en la figura 2 concuerdan bastante bien con lo expuesto anteriormente por Parry *et al.* (2007), Hidalgo *et al.* (2013) y Maurer *et al.* (2017), se hace hincapié que estos productos se deben tomar con reserva para la toma de decisiones debido a la alta dispersión encontrada en ellos.

En cuanto a la temperatura máxima (figura 4) es posible observar que para las diferencias en el escenario RCP 4.5 se proyecta un aumento entre 1.5°C y 2.5°C en la temperatura. Mientras que en el RCP 8.5 el aumento es mayor, pues se tienen incrementos de hasta 5°C en verano, en prácticamente toda la región de estudio. Sobre Costa Rica, así como en Nicaragua, Honduras y Panamá se tendría un aumento en la temperatura máxima para este último escenario de entre 3°C y 4°C, en invierno.

En la temperatura mínima (figura 5) se da un patrón similar al de la temperatura máxima, pues para el RCP 4.5 hay un aumento en la temperatura entre 1.5°C y 2.5°C, sin embargo para el RCP 8.5 el aumento es en al menos 2°C mayor en América Central comparado con el otro escenario, pero en regiones como Colombia es de hasta 3°C; de igual forma se reporta un aumento de entre 4°C y 5°C para el verano principalmente.

Estas tendencias al alza de las temperaturas máximas y mínimas en la región centroamericana y el norte de Sudamérica ya habían sido estudiadas por Aguilar *et al.* (2005) y Skansi *et al.* (2013) respectivamente, el primero a través de una serie de índices de cambio climático para el período 1961-2003, revelando una tendencia general de calentamiento en la región centroamericana, debido a un aumento en la presencia de temperaturas máximas y mínimas cálidas extremas y una disminución en los eventos de temperatura extremadamente fríos. Y la segunda evaluando los cambios en los índices extremos climáticos prome-

diados de estaciones sobre América del Sur para los periodos 1950-2010 y 1969-2009, evidenciando un calentamiento y mayor humedad en toda la región de América del Sur desde mediados del siglo XX en adelante.

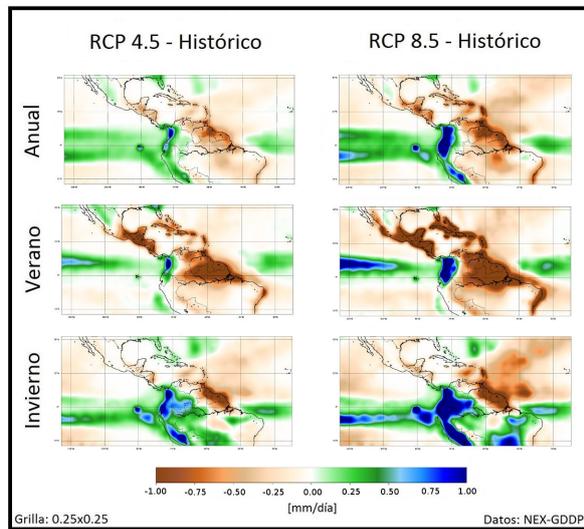


Fig. 2: Cambios en el promedio de la precipitación diaria (mm/día) del ensamble de multimodelos del CMIP5 para el período de los años 2070-2099 con respecto al período de referencia de los años 1970-1999. Las gráficas de la izquierda son para el escenario RCP 4.5 y las de la derecha para el escenario RCP 8.5. Las gráficas superiores son para valores anuales, las intermedias para verano y las inferiores para invierno.

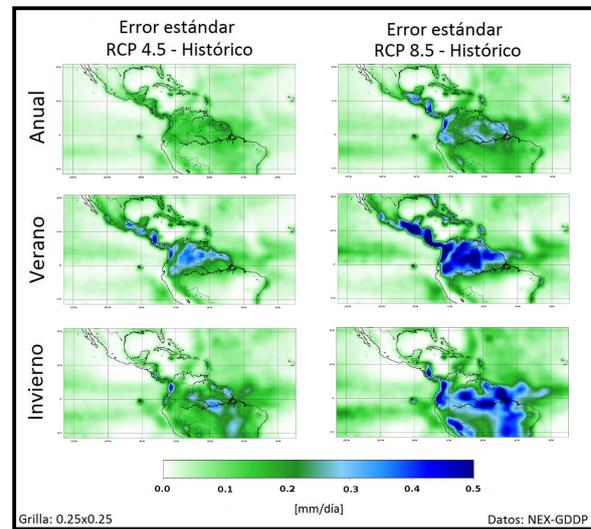


Fig. 3: Error estándar de los cambios en el promedio de la precipitación diaria (mm/día) del ensamble de multimodelos del CMIP5 para el período de los años 2070-2099 con respecto al período de referencia de los años 1970-1999. Las gráficas de la izquierda son para el escenario RCP 4.5 y las de la derecha para el escenario RCP 8.5. Las gráficas superiores son para valores anuales, las intermedias para verano y las inferiores para invierno.

En las figuras 6 y 7 se observa el error estándar asociado a la temperatura máxima (figura 4) y mínima (figura 5) respectivamente. Nótese que para estos casos el error no es tan alto como para la precipitación. De hecho para el RCP 4.5 el error es bajo, lo cual indica que los modelos están más cercanos entre sí, es decir, los miembros del ensamble están más de acuerdo unos con otros. Para el RCP 8.5 sí se observa un error mayor, por tanto para este escenario se encontró una mayor dispersión entre los modelos en comparación con el otro escenario.

En la figura 8 se tiene el rango diurno de temperatura, en este caso hay tanto diferencias positivas como negativas, las negativas se observan principalmente en invierno sobre Colombia y Ecuador, es decir, la brecha entre la temperatura mínima y máxima disminuye comparado con el pasado en los modelos. Por el contrario, las diferencias positivas que se observan sobre Centroamérica indican que los valores máximos y mínimos de temperatura se alejan en comparación con el pasado. Estas diferencias son más marcadas en el escenario RCP 8.5, que es donde se observaron los mayores cambios en las temperaturas máxima y mínima.

Asimismo se tiene la temperatura promedio (figura 9), en donde al igual que en las anteriores se proyecta un aumento en la temperatura en ambos escenarios, donde el RCP 8.5 tiene aumentos de hasta 5°C en verano en toda la región y en América Central entre 3.5°C y 4°C en invierno.

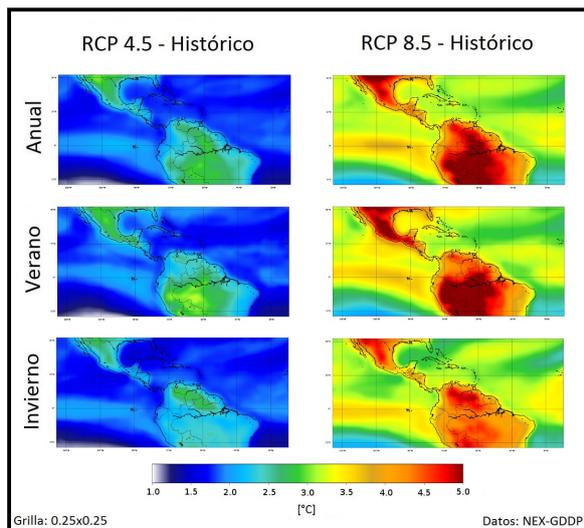


Fig. 4: Cambios en el promedio de la temperatura máxima diaria (°C) del ensamble de multimodelos del CMIP5 para el período de los años 2070-2099 con respecto al período de referencia de los años 1970-1999. Las gráficas de la izquierda son para el escenario RCP 4.5 y las de la derecha para el escenario RCP 8.5. Las gráficas superiores son para valores anuales, las intermedias para verano y las inferiores para invierno.

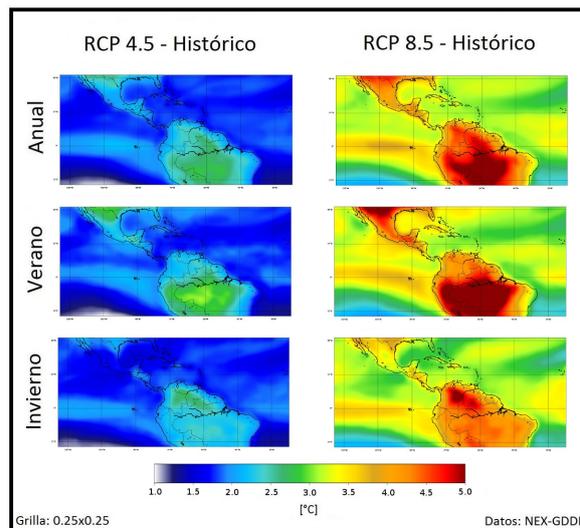


Fig. 5: Cambios en el promedio de la temperatura mínima diaria (°C) del ensamble de multimodelos del CMIP5 para el período de los años 2070-2099 con respecto al período de referencia de los años 1970-1999. Las gráficas de la izquierda son para el escenario RCP 4.5 y las de la derecha para el escenario RCP 8.5. Las gráficas superiores son para valores anuales, las intermedias para verano y las inferiores para invierno.

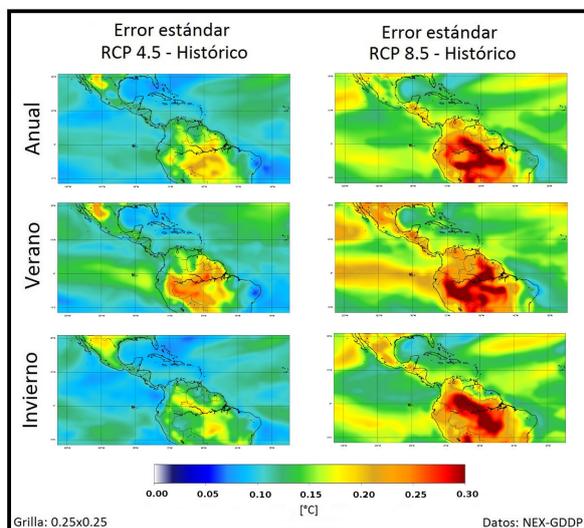


Fig. 6: Error estándar de los cambios en el promedio de la temperatura máxima diaria (°C) del ensamble de multimodelos del CMIP5 para el período de los años 2070-2099 con respecto al período de referencia de los años 1970-1999. Las gráficas de la izquierda son para el escenario RCP 4.5 y las de la derecha para el escenario RCP 8.5. Las gráficas superiores son para valores anuales, las intermedias para verano y las inferiores para invierno.

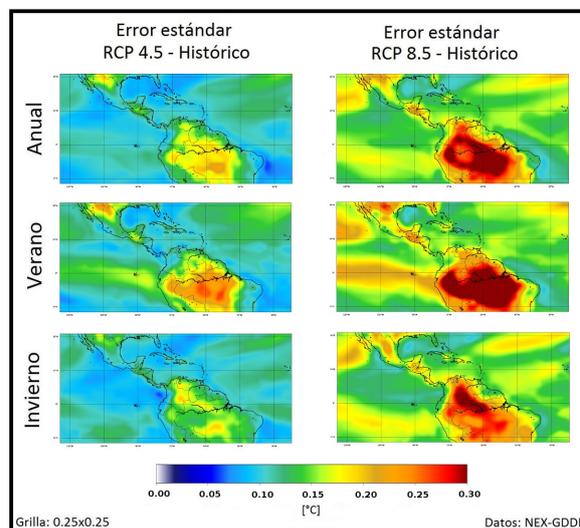


Fig. 7: Error estándar de los cambios en el promedio de la temperatura mínima diaria (°C) del ensamble de multimodelos del CMIP5 para el período de los años 2070-2099 con respecto al período de referencia de los años 1970-1999. Las gráficas de la izquierda son para el escenario RCP 4.5 y las de la derecha para el escenario RCP 8.5. Las gráficas superiores son para valores anuales, las intermedias para verano y las inferiores para invierno.

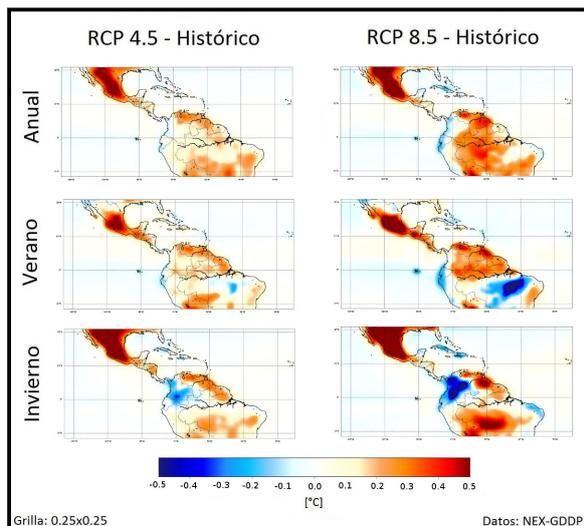


Fig. 8: Cambios en el promedio del rango diario de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) del ensamble de multimodelos del CMIP5 para el período de los años 2070-2099 con respecto al período de referencia de los años 1970-1999. Las gráficas de la izquierda son para el escenario RCP 4.5 y las de la derecha para el escenario RCP 8.5. Las gráficas superiores son para valores anuales, las intermedias para verano y las inferiores para invierno.

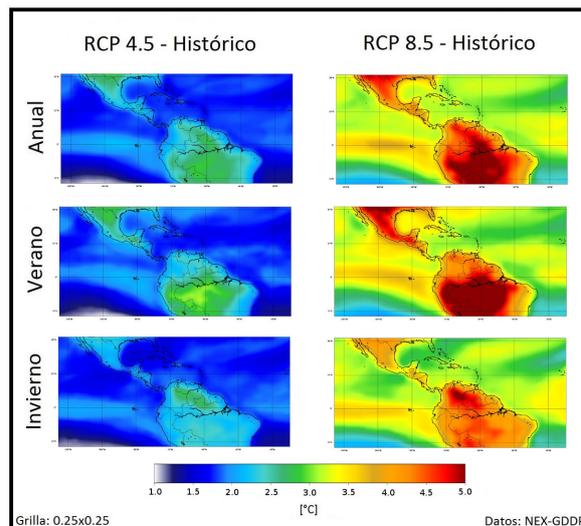


Fig. 9: Cambios en el promedio de la temperatura media diaria ($^{\circ}\text{C}$) del ensamble de multimodelos del CMIP5 para el período de los años 2070-2099 con respecto al período de referencia de los años 1970-1999. Las gráficas de la izquierda son para el escenario RCP 4.5 y las de la derecha para el escenario RCP 8.5. Las gráficas superiores son para valores anuales, las intermedias para verano y las inferiores para invierno.

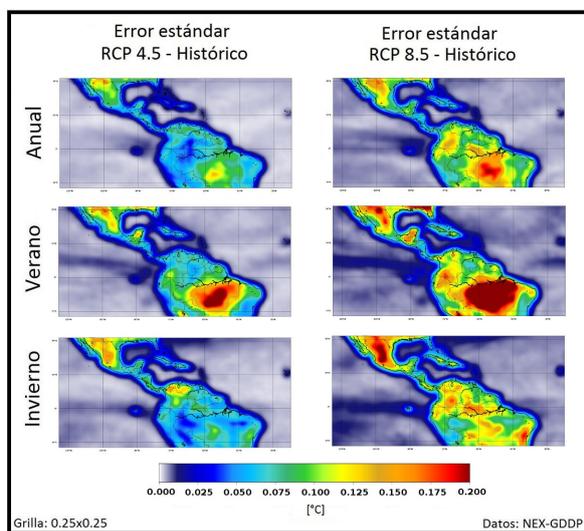


Fig. 10: Error estándar de los cambios en el promedio del rango diario de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) del ensamble de multimodelos del CMIP5 para el período de los años 2070-2099 con respecto al período de referencia de los años 1970-1999. Las gráficas de la izquierda son para el escenario RCP 4.5 y las de la derecha para el escenario RCP 8.5. Las gráficas superiores son para valores anuales, las intermedias para verano y las inferiores para invierno.

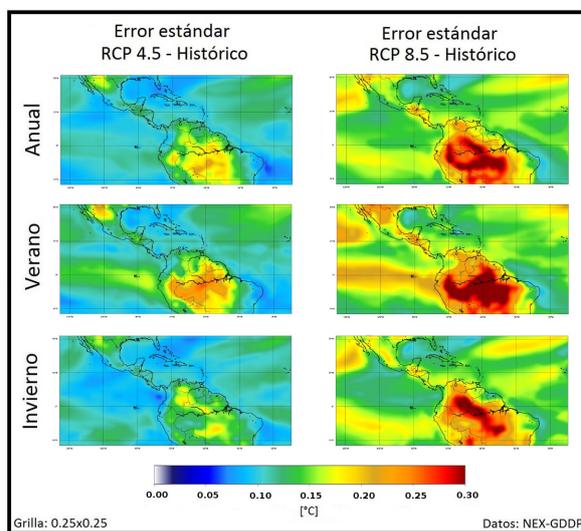


Fig. 11: Error estándar de los cambios en el promedio de la temperatura media diaria ($^{\circ}\text{C}$) del ensamble de multimodelos del CMIP5 para el período de los años 2070-2099 con respecto al período de referencia de los años 1970-1999. Las gráficas de la izquierda son para el escenario RCP 4.5 y las de la derecha para el escenario RCP 8.5. Las gráficas superiores son para valores anuales, las intermedias para verano y las inferiores para invierno.

Como se mencionó anteriormente una disminución en la precipitación sobre América Central podría estar ligada a un aumento en la temperatura de los océanos Pacífico y Atlántico (Fuentes-Franco *et al.*, 2015). Si se observan las gráficas de temperatura, por ejemplo la figura 9, se tiene que se proyecta un aumento en la temperatura de los océanos de hasta 3.5°C. Sin embargo cabe resaltar que este aumento no será tan grande como en las zonas continentales. Además, según Maurer *et al.* (2017), parte de lo que afectaría el MSD es un aumento en las temperaturas, especialmente en el RCP 8.5, de hasta 2.2°C entre el 2040 y el 2069. De hecho se esperaría que la duración del mismo aumente entre 5 y 15 días para este escenario y en una semana para el RCP 4.5, lo cual influiría en un comienzo anticipado del mismo. Por otro lado, Parry *et al.* (2007) mencionan aumentos de entre 1°C y 3°C en el 2050 y de 1°C y 5°C en el 2080, donde todos estos resultados concuerdan con lo observado en nuestras gráficas.

Por último, en las figuras 10 y 11 se observan los errores asociados al rango diurno de temperatura (figura 8) y a la temperatura promedio (figura 9). En ambos casos el error estándar es bajo en comparación con el encontrado para la variable de precipitación, siendo menor para el rango diurno de temperatura. Además, al igual que con la temperatura máxima y mínima, los errores asociados al RCP 4.5 son menores que con el RCP 8.5. También cabe resaltar que de la misma forma que como ocurre con la precipitación, todos estos resultados de proyecciones en temperatura van de la mano con lo obtenido por otros autores ya mencionados. Sin embargo al tener una baja dispersión asociada, los productos de temperatura dan mayor confianza que los producidos para la precipitación.

4. Conclusiones

Se observaron cambios importantes sobre América Central, en donde se proyecta una disminución de la precipitación sobre países como Costa Rica, Nicaragua, Honduras, El Salvador, Guatemala y Belice, así como en las Antillas Mayores y Menores, también se esperarían aumentos en la precipitación sobre la costa Pacífica de Colombia, Ecuador y Perú, además para las temperaturas se esperarían aumentos, principalmente a nivel continental, donde uno de los países afectados es Costa Rica, estos resultados van muy de la mano con lo expuesto por Parry *et al.* (2007) y Fuentes-Franco *et al.* (2015). Estos impactos serían mayores en verano, especialmente en el escenario RCP 8.5, el cual está relacionado con las mayores emisiones de gases de efecto invernadero.

En general, se esperaría que estos cambios en la precipitación y las temperaturas lleguen a impactar de forma importante las distintas regiones y en especial el norte de América Central debido a las reducciones de precipitación identificadas por Hidalgo *et al.* (2013), ya que una disminución en la precipitación traería consigo un estrés hídrico que podría afectar las fuentes de agua. También se esperaría una extensión del MSD, ya que según Maurer *et al.* (2017), éste sería afectado por estos cambios en temperatura y precipitación.

Además se evaluó el error estándar con el fin de observar qué tan dispersos o cercanos se encuentran los modelos, obteniendo que la mayor dispersión se encuentra en la precipitación y la menor en el rango diurno de temperatura, sin embargo para ésta y las demás temperaturas se detectó una dispersión pequeña, mostrando que los actuales modelos climáticos tienen una mejor representación de la temperatura que de la precipitación. No obstante a pesar de esto las proyecciones observadas para todas las variables concuerdan bastante bien con lo expuesto por otros autores en sus trabajos, tales como Aguilar *et al.* (2005), Parry *et al.* (2007), Hidalgo *et al.* (2013) y Maurer *et al.* (2017).

Finalmente, cabe destacar que esta investigación logró hacer una proyección de los posibles cambios que ocurrirían a finales del siglo XXI en América Central y el Caribe, al cuantificar las diferencias de las simulaciones del presente en relación con las rutas de concentración representativas 4.5 y 8.5, esto con el uso de los datos de alta resolución NEX-GDDP, los cuales han servido para el análisis de diferentes regiones en el globo, como es el caso de China por Yun y Xinyu (2016) y el Sistema Ártico por Castillo y Montero (2017).

5. Agradecimientos

El autor principal desea expresar su reconocimiento al Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica (CIGEFI), por el apoyo recibido en materia computacional para llevar a cabo esta investigación. Además al apoyo de los proyectos VI-B6147 y VI-B7605, de la Universidad de Costa Rica, los cuales permitieron la realización de este trabajo. También muestra su agradecimiento a toda la comunidad e instituciones del CMIP5 involucrados para proporcionar los datos de los GCMs que fueron utilizados en el NEX-GDDP y se emplearon en este trabajo. Finalmente da las gracias a la geógrafa Paula M. Pérez Briceño por realizar el mapa del dominio de América Central utilizado en esta investigación.

6. Bibliografía

Aguilar E, Peterson T, Obando PR, Frutos R, Retana J, Solera M, Soley J, García IG, Araujo R, Santos AR, *et al.* (2005): Changes in precipitation and temperature extremes in central america and northern south america, 1961-2003. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D23), doi:10.1029/2005JD006119.

Amador JA (1998): A climatic feature of the tropical americas: The trade wind easterly jet. *Tópicos meteorológicos y oceanográficos*, 5:91-102.

Amador JA (2008): The intra-americas sea low-level jet. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146:153- 188, doi:10.1196/annals.1446.012.

Castillo R, Montero R (2017): Proyecciones de cambio climático del sistema ártico basado en el análisis de multi- modelos de los escenarios de emisiones de CO₂. *Revista de climatología*, 17:28-39.

Clarke L, Edmonds J, Jacoby H, Pitcher H, Reilly J, Richels R (2007): Scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations. *US Department of Energy Publications*, page 6.

Diro G, Rauscher S, Giorgi F, Tompkins A (2012): Sensitivity of seasonal climate and diurnal precipitation over central america to land and sea surface schemes in regcm4. *Climate Research*, 52:31-48, doi:10.3354/cr01049.

Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Kadner S, Minx CJ, Brunner S, Agrawala S, Baiocchi G, Bashmakov IA, Blanco G, *et al.* (2014). Technical summary. In *Climate change 2014: Mitigation of Climate Change*, Cambridge University Press.

Fuentes-Franco R, Coppola E, Giorgi F, Pavia EG, Diro GT, Graef F (2015): Inter-annual variability of precipitation over Southern Mexico and Central America and its relationship to sea surface temperature from a set of future projections from cmip5 gcms and regcm4 cordex simulations. *Climate Dynamics*, 45(1-2):425-440, doi:10.1007/s00382-014-2258-6.

Galvin J (2015): *An Introduction to the Meteorology and Climate of the Tropics*. John Wiley & Sons.

Giorgi F (2006): Climate change hot-spots. *Geophysical research letters*, 33, 4 pp., doi:10.1029/2006GL025734.

Giorgi F, Jones C, Asrar GR, *et al.* (2009): Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *World Meteorological Organization (WMO) Bulletin*, 58:175.

Gravetter FJ, Wallnau LB (2009): *Statistics for the behavioral sciences*. Cengage Learning.

Hassol S (2004): *Impacts of a warming Arctic-Arctic climate impact assessment*. Cambridge University Press.

Hidalgo HG, Amador JA, Alfaro EJ, Quesada B (2013): Hydrological climate change projections for central america. *Journal of Hydrology*, 495:94-112, doi:10.1016/j.jhydrol.2013.05.004.

IEA (2016): *Key World Energy Trends. Excerpt from: World Energy Balances*. International Energy Agency.

Magaña V, Amador JA, Medina S (1999): The midsummer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 12(6):1577-1588, doi:10.1175/1520-0442(1999)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2.

Maurer EP, Hidalgo HG (2008): Utility of daily vs. monthly large-scale climate data: an intercomparison of two statistical downscaling methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12:501-563, doi:10.5194/hess-12-551-2008.

Maurer EP, Roby N, Stewart-Frey IT, Bacon CM (2017): Projected twenty-first-century changes in the Central American mid-summer drought using statistically downscaled climate projections. *Regional Environmental Change*, 17:2421-2432, doi:10.1007/s10113-017-1177-6.

Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, Van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, *et al.* (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463:747-756, doi:10.1038/nature08823.

Parry M, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE, *et al.* (2007): *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*, volume 4. Cambridge University Press Cambridge.

Riahi K, Grübler A, Nakicenovic N (2007). Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change*, 74:887-935, doi:10.1016/j.techfore.2006.05.026.

Riahi K, Rao S, Krey V, Cho C, Chirkov V, Fischer G, Kindermann G, Nakicenovic N, Rafaj P (2011): Rcp 8.5-a scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109:33, doi:10.1007/s10584-011-0149-y.

Sheffield J, Goteti G, Wood EF (2006): Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. *Journal of Climate*, 19:3088-3111, doi:10.1175/JCLI3790.1.

Skansi MdIM, Brunet M, Sigró J, Aguilar E, Groening JAA, Bentancur OJ, Geier YRC, Amaya RLC, Jácome H, Ramos AM, *et al.* (2013): Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global and Planetary Change*, 100:295-307, doi:10.1016/j.gloplacha.2012.11.004.

Smith SJ, Wigley T (2006): Multi-gas forcing stabilization with minicam. *The Energy Journal*, 27:373-391, doi:10.5547/ISSN0195-6574-EJ-VolSI2006-NoSI3-19.

Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA (2009): A summary of the cmip5 experiment design. *PCDMI Rep*, 33.

Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA (2012): An overview of cmip5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93:485-498.

Thomson AM, Calvin KV, Smith SJ, Kyle GP, Volke A, Patel P, Delgado-Arias S, Bond-Lamberty B, Wise MA, Clarke LE, *et al.* (2011): Rcp4. 5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change*, 109:77, doi:10.1007/s10584-011-0151-4.

Thrasher B, Maurer EP, McKellar C, Duffy P (2012): Technical note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16:3309-3314, doi:10.5194/hess-16-3309-2012.

Thrasher B, Nemani R (2015): Nasa earth exchange global daily downscaled projections (nex-gddp).

Van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt GC, Kram T, Krey V, Lamarque JF, *et al.* (2011): The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109:5, doi:10.1007/s10584-011-0148-z.

WCRP-CORDEX (2015): *CORDEX domains for model integrations*. World Climate Research Programme – Coordinated Regional climate Downscaling Experiment.

Welch BL (1938): The significance of the difference between two means when the population variances are unequal. *Biometrika*, 29:350-362.

Wilcox RR (2010): *Fundamentals of modern statistical methods: Substantially improving power and accuracy*. Springer Science & Business Media.

Wise M, Calvin K, Thomson A, Clarke L, Bond-Lamberty B, Sands R, Smith SJ, Janetos A, Edmonds J (2009): Implications of limiting co2 concentrations for land use and energy. *Science*, 324:1183-1186, doi:10.1126/science.1168475.

Wood AW, Leung LR, Sridhar V, Lettenmaier D (2004): Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic change*, 62:189-216, doi:10.1023/B:CLIM.0000013685.99609.9e.

Wood AW, Maurer EP, Kumar A, Lettenmaier DP (2002): Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107, doi:10.1029/2001JD000659.

Yun B, Xinyu W (2016): Projection of China's near and long-term climate in a new high-resolution daily downscaled dataset nex-gddp. *Journal of Meteorological Research*, 31:236-249, doi:10.1007/13351-017-6106-6.