

Proyección de extremos climáticos futuros en Cuba bajo escenarios de geoingeniería

Projection of future climatic extremes in Cuba under geoengineering scenarios



CU-ID: 2377/v28n2e01

 Marilee Martínez-Alvarez^{1*},  Arnoldo Bezanilla-Morlot²,  Abel Centella-Artola²,  Alejandro Vichot-Llano²

¹ Centro del Clima, Insmet. La Habana, Cuba

² Centro de Física de la Atmósfera, Insmet. La Habana, Cuba

RESUMEN: Ante la evidencia que confirma el calentamiento del sistema climático y la preocupación por las insuficientes medidas de respuesta, el Manejo de la Radiación Solar (SRM) ha sido considerado como una acción adicional para limitar el aumento de la temperatura global. A pesar de que el SRM es muy controvertido, una evaluación de los efectos potenciales en los extremos climáticos podría proporcionar elementos adicionales sobre sus implicaciones. En el presente trabajo se realiza un análisis de los posibles efectos que tendría el SRM comparando las proyecciones sobre el clima futuro de Cuba bajo escenarios SRM, con respecto a un escenario de emisiones de gases de efecto invernadero. Se utilizaron los datos diarios de precipitación y temperaturas máximas y mínimas correspondientes a las salidas del modelo HadGEM2-ES para el escenario RCP4.5 y los dos esquemas SRM G3 y G4. Con esta información se calcularon y contrastaron 10 indicadores de extremos climáticos en el futuro 2020-2070 con respecto al período de referencia 1970-2000. Los resultados muestran que la posible implementación de SRM con aerosoles estratosféricos podría mejorar levemente el escenario futuro proyectado bajo RCP4.5 en relación a las temperaturas, al atenuar el aumento o disminución de extremos relacionados con el régimen térmico. Sin embargo, en el caso de precipitaciones extremas, los cambios estimados para los escenarios G3 y G4 no son significativamente diferentes de los proyectados bajo RCP4.5.

Palabras clave: extremos climáticos, Manejo de la Radiación Solar, precipitación, temperatura.

ABSTRACT: Faced with the evidence that confirms the warming of the climate system and the concerns about insufficient response measures to limit the increase in temperature global, Solar Radiation Management (SRM) has been considered as an additional action to mitigation and adaptation. Despite SRM being very controversial, an assessment of potential effects on the climate extremes could provide additional elements about its implications. In the present work, an analysis of the possible effects that the SRM would have is carried out by comparing the projections on the future climate of Cuba under SRM scenarios, with respect to a scenario of greenhouse gas emissions. The daily data of precipitation and maximum and minimum temperatures corresponding to the outputs of the HadGEM2-ES model for the RCP4.5 scenario and the two SRM G3 and G4 schemes were used. With this information, 10 indicators of climatic extremes in the future 2020-2070 were calculated and contrasted with respect to the reference period 1970-2000. The results show that the possible implementation of SRM with stratospheric aerosols could slightly improve the future scenario projected under RCP4.5 in relation to temperatures, by attenuating the increase or decrease of extremes related to the thermal regime. However, in the case of precipitation extremes, the estimated changes for the G3 and G4 scenarios are not significantly different from those projected under RCP4.5.

Keywords: climatic extremes, Solar Radiation Management, precipitation, temperature.

*Autor para correspondencia: Marilee Martínez- Alvarez. E-mail: marilee.martinez@insmet.cu

Recibido: 20/11/2021

Aceptado: 11/05/2022

1. INTRODUCCIÓN

El calentamiento del sistema climático es una realidad demostrada científicamente. Los notables impactos del cambio climático (CC) antrópico impulsan la toma de decisiones para lograr disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), considerada como la vía más efectiva para combatir el CC.

El Caribe ha sido identificado como una de las regiones más sensibles. Esta región está plagada de pequeños estados insulares, cuyas economías presentan recursos limitados y presentan una elevada dependencia de la zona costera y las condiciones climáticas (Campbell et al., 2011; Mycoo, 2018; Nurse et al., 2014; Robinson, 2018; Taylor et al., 2018).

Estas señales de cambio no solo se presentan en los patrones climáticos medios, sino también en los eventos climáticos extremos, los cuales pueden llegar a ser incluso más importantes. Estudios dedicados a las variaciones del clima hasta el presente y las proyecciones del clima futuro, partiendo de los cambios en los eventos climáticos extremos, indican un significativo incremento de los días y las noches cálidas, así como una significativa disminución de los días y las noches frías en la región del Caribe (Alexander et al., 2006; Centella & Bezanilla, 2019; McLean et al., 2015; Neelin et al., 2006; Peterson et al., 2002; Serrano et al., 2017, 2017) y en Cuba en particular (Burgos & González, 2012; Gil et al., 2020; González García et al., 2017; I. González, 2004; I. T. González et al., 2019). Mientras, los indicadores extremos relacionados con la precipitación no muestran tendencias significativas; aunque estudios recientes coinciden en que prevalecen las tendencias al aumento de los días secos consecutivos y la disminución de los días húmedos consecutivos para Cuba (I. T. González et al., 2019) y la región del Caribe (Stephenson et al., 2014).

El aumento de la temperatura media global, como resultado del continuo incremento de las emisiones y concentraciones de los gases de efecto invernadero, ha llevado a explorar vías de respuesta complementarias a la mitigación para aliviar o al menos retrasar, las consecuencias del CC.

Una de esas vías alternativas es la denominada geoingeniería o ingeniería climática y el Manejo de la Radiación Solar (SRM, por sus siglas en inglés) es una de las variantes que engloba. Su objetivo es contrarrestar el calentamiento asociado con el incremento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero mediante la reducción de la cantidad de luz solar absorbida por el sistema climático (Boucher et al., 2013). Uno de los métodos de SRM es aumentar la cantidad de aerosoles estratosféricos para producir un efecto de enfriamiento similar al observado en las grandes erupciones volcánicas (Boucher et al., 2013).

Las inyecciones de sulfatos a la estratósfera fueron propuestas en primera instancia por Budyko (1977) y Crutzen (2006) quienes desataron una gran polémica

en torno al tema. Posteriormente, para evaluar los efectos de la geoingeniería estratosférica con aerosoles de sulfatos, Kravitz et al., (2011) proponen escenarios de forzamiento estándares para ser aplicados a múltiples modelos climáticos. Surge así el Proyecto de Intercomparación de Modelos de Geoingeniería (GeoMIP).

Hasta hoy existen muy pocos estudios (Aswathy et al., 2014; Curry et al., 2014; Ji et al., 2018) orientados a evaluar el impacto del SRM en el clima futuro bajo un escenario de inyecciones de sulfatos, en comparación con otros donde no se aplique esa variante. Así mismo, mientras que en la región del Caribe, sólo consta un estudio sobre el tema enfocado en el clima medio de la región (Clarke et al., 2021), no se conocen antecedentes relacionados con la evaluación de los extremos climáticos.

De este modo el objetivo general de este trabajo es comparar las proyecciones en el clima futuro de Cuba bajo escenarios de SRM, con respecto a un escenario de emisiones de GEI. A partir de este objetivo, se abordan las siguientes preguntas de investigación:

- i.¿ Cuáles serían las proyecciones de los indicadores de extremos climáticos futuros en Cuba, bajo un escenario de emisiones de GEI?
- ii.¿Cuánto podría variar el comportamiento de los extremos climáticos bajo escenarios de SRM?
- iii.¿Tendría el SRM algún beneficio comparado con otros escenarios si el mismo llegara a aplicarse?

La respuesta a estas preguntas científicas podría servir de base en los actuales y futuros debates sobre la posible implementación del SRM con aerosoles estratosféricos, como herramienta complementaria para la mitigación del CC. El artículo está organizado de la siguiente manera. La sección 2 presenta el área de estudio, los datos y los métodos utilizados en este trabajo. En la sección 3, se describen los resultados, mientras que la sección 4 proporciona las conclusiones del estudio.

2. METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio

El área de estudio abarca la isla de Cuba. Además, para llevar a cabo algunos análisis de forma más detallada, se utilizó una división que comprende tres regiones: Occidente, Centro y Oriente.

2.2 Datos

Se emplearon datos diarios de precipitación y temperaturas máximas y mínimas correspondientes a la salida del Modelo Climático Global HadGEM2_ES (Collins et al., 2011), el cual ha sido extensamente validado para la región del Caribe (Ryu & Hayhoe, 2014; Taylor et al., 2018).

Esas salidas se corresponden con el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero RCP4.5 (Trayectorias de Concentración Representativas con un forzamiento radiativo de 4.5 W/m² para 2100) y con los escenarios del SRM G3 y G4 del GeoMIP (Figura 1).

2.3 Metodología

Se realizó la selección de un total de 10 indicadores de extremos climáticos de los 27 formulados por el Grupo de Expertos en Detección e Indicadores de Cambio Climático (Klein Tank, A et al., 2009).

Los indicadores seleccionados fueron: noches frías (TN10p), noches cálidas (TN90p), días fríos (TX10p), días cálidos (TX90p), rango diurno de la temperatura (DTR) y el indicador duración de períodos cálidos (WSDI), en relación con la temperatura. En el caso de la precipitación se seleccionaron los indicadores: días secos consecutivos (CDD), días húmedos consecutivos (CWD), número de días con precipitación intensa (R10) y número de días con precipitación muy intensa (R20). Estos indicadores se definen en Manual de Usuarios de RCLimDex (Zhang et al., 2004).

En primer lugar, se calcularon los índices para los tres escenarios mencionados anteriormente para el futuro 2020-2070, que coincide con el período de emisiones de aerosoles de sulfatos a la estratosfera descrito por los escenarios G3 y G4. De este modo es posible realizar las comparaciones en un mismo período futuro, pero para escenarios con y sin SRM. Se seleccionó como período de referencia 1970-2000.

El enfoque metodológico fue estructurado para dar respuesta a las preguntas de investigación anteriormente planteadas. Para ello se realizaron las siguientes tareas.

Tarea 1. Estimación de las proyecciones futuras de los indicadores de extremos climáticos seleccionados bajo el escenario RCP4.5 en relación al período de referencia 1970- 2000.

Para cada uno de los indicadores de extremos climáticos se calcularon las diferencias entre las proyecciones futuras y los valores correspondientes al período de referencia. Se determinaron los casos en las que estas diferencias resultaron estadísticamente significativas, para un nivel de confianza del 95 %. Utilizando esas diferencias o valores de cambio, se calcularon los promedios espaciales para Cuba y las regiones occidental, central y oriental. Posteriormente se elaboraron mapas para el análisis espacial de los cambios de los indicadores en el futuro seleccionado con respecto al período de referencia 1970- 2000.

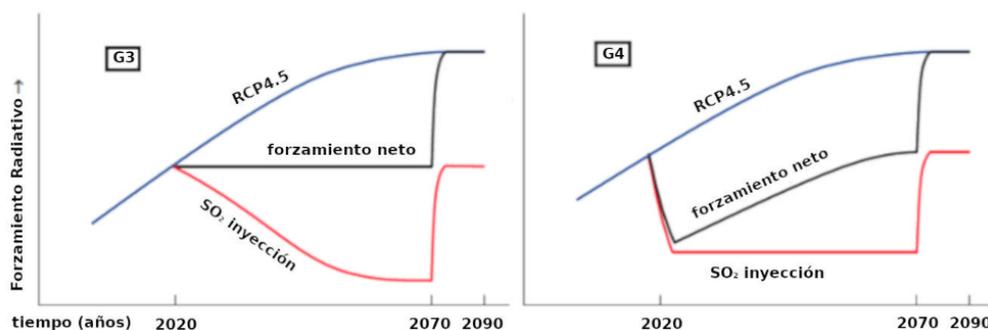
Tarea 2. Estimación de los efectos de la posible implementación del SRM en las proyecciones futuras de los indicadores de extremos climáticos

Haciendo uso de la misma metodología se llevó a cabo el cálculo de los valores de cambio para cada indicador, esta vez, bajo los escenarios G3 y G4. También de igual forma se elaboraron los mapas para el análisis espacial de los cambios en los indicadores.

Tarea 3. Determinación de las diferencias entre las proyecciones de extremos climáticos futuros en Cuba bajo escenarios de SRM en relación al RCP4.5

Con el objetivo de visualizar las diferencias entre las series temporales de cada indicador en el período 2020-2070 bajo escenarios diferentes, se elaboraron gráficos de las series temporales de cada indicador con medias móviles de 5 años.

Finalmente se calcularon las diferencias entre los escenarios G3 y G4 en relación al RCP4.5 para cada indicador analizado empleando la misma metodología que para el cálculo de los valores de cambio.



Tomada de Kravitz et al., (2011).

(Ambos se fundamentan en la idea de balancear el forzamiento radiativo bajo el escenario RCP4.5 combinando diferentes estrategias de inyecciones de sulfatos a la estratosfera (G3 de forma gradual y G4 comenzando de forma abrupta para luego mantener tasas constantes de inyección) con el objetivo de mantener constante el forzamiento radiativo entre 2020-2070)

Figura 1. Escenarios de Manejo de la Radiación Solar.

3. RESULTADOS

3.1 Comportamiento futuro de los indicadores de extremos climáticos relacionados con la temperatura sin SRM (bajo RCP4.5).

El análisis espacial de los indicadores TX10p y TN10p (Figura 2-fila 1-columna 1 y 2, respectivamente) bajo el escenario RCP4.5 indica una disminución estadísticamente significativa de aproximadamente 9.06 % y 8.97 %, respectivamente sobre Cuba, con respecto al período de referencia, superior en la región oriental del país (Tabla 1). Por el contrario, el análisis espacial de los indicadores TX90p y TN90p (Figura 2-fila 2- columna 1 y 2, respectivamente) indica un incremento significativo de aproximadamente

68.06 % y 70.22 % respectivamente sobre Cuba, también superior en la región oriental del país (Tabla 1).

Por su parte el análisis espacial del indicador WSDI (Figura 2-fila 3-columna 1) indica un incremento significativo con relación al período de referencia 1970-2000, de aproximadamente 243 días/año como promedio para Cuba, registrando también los mayores valores de cambio en la región oriental del país (Tabla 1).

El análisis espacial del indicador DTR (Figura 2-fila 3-columna 2), indica un incremento de aproximadamente 0.16 °C en la región occidental del país y una disminución en el resto del territorio, pero en este caso los valores de cambio no son estadísticamente significativos (Tabla 1).

Tabla 1. Valores de cambio promedio por indicadores para el período 2020-2070 con respecto al 1970-2000, para Cuba, Occidente, Centro y Oriente bajo el escenario RCP4.5 (valores significativos en negrita)

| INDICADORES | TX90p (%) | TX10p (%) | TN90p (%) | TN10p (%) | WSDI (días/año) | DTR (° C) |
|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------|
| Cuba | 68.06 | -9.06 | 70.22 | -8.97 | 242.94 | -0.07 |
| Occidente | 61.01 | -8.29 | 67.38 | -8.42 | 211.36 | 0.16 |
| Centro | 54.42 | -8.59 | 67.54 | -8.74 | 182.32 | -0.01 |
| Oriente | 64.89 | -9.27 | 75.85 | -9.56 | 227.87 | -0.07 |

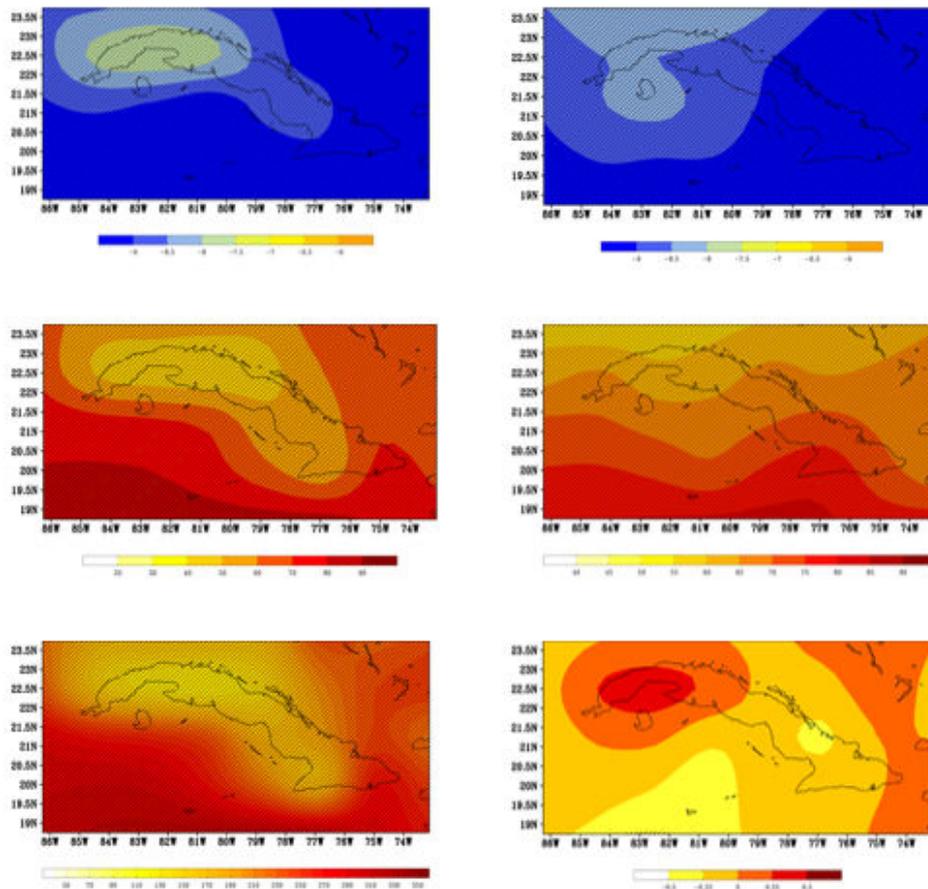


Figura 2. Comportamiento de los indicadores de extremos climáticos TX10p (fila1-columna1), TN10p (fila1-columna2), TX90p (fila2-columna1), TN90p (fila2-columna2), WSDI (fila3-columna1) y DTR (fila3-columna2) en el período 2020- 2070 con respecto al período de referencia 1970- 2000 bajo el escenario RCP4.5

A partir del análisis de los indicadores anteriores se puede concluir de manera parcial, que se proyecta para Cuba bajo el escenario RCP4.5 un incremento significativo de las temperaturas tanto máximas como mínimas, ligeramente superior en el caso de las mínimas en el futuro. Este comportamiento está asociado a la disminución significativa de los días y las noches frías y al incremento significativo de los días y las noches cálidas así como del indicador duración de los períodos cálidos. Este incremento se hace mayor en la región oriental del país.

3.2 Comportamiento futuro de los indicadores de extremos climáticos relacionados con la precipitación sin SRM (bajo RCP4.5).

El análisis espacial de los indicadores CDD y CWD (Figura 3 fila 1-columna 1 y 2, respectivamente) bajo el escenario RCP4.5 indica un incremento de aproximadamente 1.07 días/año y una disminución de aproximadamente 0.50 días/año respectivamente como promedio para Cuba con respecto al período de referencia 1970- 2000, aunque estos valores de cambio no presentan significación estadística (Tabla 2).

Por su parte el análisis espacial de los indicadores R10 y R20 (Figura 3 fila 2-columna 1 y 2, respectivamente) indica una disminución de aproximadamente 0.70 días/año y 0.28 días/año respectivamente como

promedio para Cuba, aunque ambos indicadores presentan ligeras tendencias al incremento en la región Occidental del país. Sin embargo, ninguno de estos valores de cambio presenta significación estadística (Tabla 2).

A partir del análisis de los indicadores anteriores, se puede concluir de manera parcial, que bajo el escenario RCP4.5 se proyecta para Cuba un futuro más seco, asociado al incremento de los días secos consecutivos y la disminución de los días húmedos consecutivos; así como del número de días con precipitación intensa y muy intensa, aunque estas tendencias no presentan significación estadística.

3.3 Efectos de la posible implementación del SRM en las proyecciones futuras de los indicadores de extremos climáticos relacionados con la temperatura.

Para los escenarios de SRM, las estructuras espaciales de los cambios de los indicadores días y noches frías (Figura 4-fila 1 y 2 respectivamente) indican una atenuación de las reducciones de ambos indicadores, principalmente bajo el escenario G4, a pesar de que bajo ambos escenarios, tanto los días como las noches frías, se mantienen disminuyendo con relación al período de referencia (Tabla 3). El análisis espacial de los cambios de los indicadores días y noches cálidas

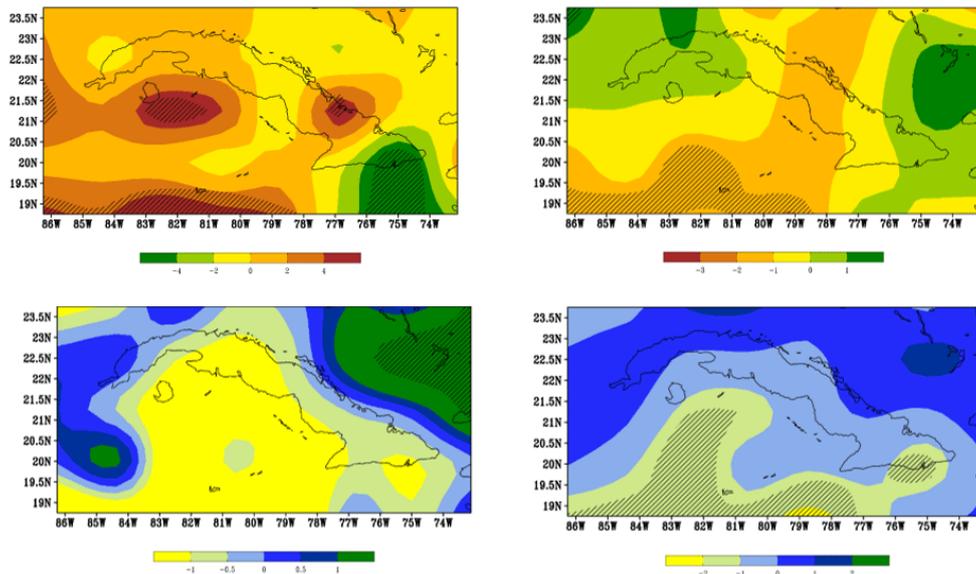


Figura 3. Comportamiento de los indicadores de extremos climáticos CDD (fila1-columna1), CWD (fila1-columna2), R10 (fila2-columna1) y R20 (fila2-columna2) en el período 2020- 2070 con respecto al período de referencia 1970- 2000 bajo el escenario RCP4.5

Tabla 2. Valores de cambio promedio por indicadores para el período 2020-2070 con respecto al 1970-2000, para Cuba, Occidente, Centro y Oriente bajo el escenario RCP4.5, (valores significativos en negrita)

| INDICADORES | CDD (días/año) | CWD (días/año) | R10 (días/año) | R20 (días/año) | |
|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|
| RCP4.5 | Cuba | 1.07 | -0.50 | -0.70 | -0.28 |
| | Occidente | 2.64 | 0.06 | 0.18 | 0.53 |
| | Centro | 1.17 | -1.11 | -0.93 | -0.15 |
| | Oriente | -3.48 | -0.49 | -0.84 | -0.63 |

(Figura 4-fila 3 y 4 respectivamente) indica una atenuación del incremento de ambos indicadores bajo los escenarios de SRM, principalmente bajo el G4, a pesar de que ambos mantienen un incremento estadísticamente significativo con relación al período de referencia (Tabla 3).

También el análisis de las estructuras espaciales de los cambios del indicador WSDI (Figura 4-fila 5) indica una atenuación del incremento de este indicador, superior en el caso del G4, aunque bajo ambos escenarios se mantiene incrementándose significativamente con respecto al período de referencia (Tabla 3).

En el caso del indicador DTR (Figura 4-fila 6), para los escenarios de SRM (G3 y G4), las estructuras espaciales de los cambios indican un ligero incremento en la región central de 0.16 °C y 0.05 °C respectivamente y se mantiene el mismo comportamiento en las otras regiones del país (Tabla 3). Como promedio para Cuba, los valores de cambio indican un muy ligero incremento del rango diurno de la temperatura de aproximadamente 0.004 °C y una ligera disminución de 0.05 °C bajo los escenarios G3 y G4 respectivamente (Tabla 3). Estos valores de cambio no presentan significación estadística en ninguno de los casos.

A partir del análisis de los indicadores anteriores se puede concluir de manera parcial que la posible implementación del Manejo de la Radiación Solar mediante la inyección de aerosoles de sulfatos a la estratosfera, sobre todo bajo el escenario G4, podría atenuar la disminución de los días y las noches frías y el incremento de los días y las noches cálidas y reducir considerablemente el incremento del indicador duración de los períodos cálidos. Sin embargo, no provocaría cambios significativos en el comportamiento del rango diurno de la temperatura.

3.4 Efectos de la posible implementación del SRM en las proyecciones futuras de los indicadores de extremos climáticos relacionados con la precipitación.

Para los escenarios de SRM (G3 y G4), las estructuras espaciales de los cambios del indicador CDD (Figura 5-fila 1) indican una disminución de los días secos consecutivos de aproximadamente 0.34 días/año y un incremento aproximado de 0.70 días/año respectivamente, aunque estos valores de cambio no presentan significación estadística. Mientras el análisis espacial de los cambios del indicador CWD (Figura 5-fila 2) indica una disminución de los días húmedos consecutivos de aproximadamente 0.69 días/año y 0.60 días/año respectivamente, que se hace significativa en algunas regiones como promedio, principalmente bajo el escenario G3 (Tabla 4).

Por su parte, el análisis espacial de los cambios de los indicadores R10 y R20 (Figura 5-fila 3 y 4 respectivamente) indican una disminución aproxima-

da del número de días con precipitación intensa de 0.39 días/año y 0.50 días/año respectivamente y del número de días con precipitación muy intensa de 0.09 días/año y 0.06 días/año respectivamente, aunque estos valores de cambio no presentan significación estadística (Tabla 4).

El análisis de los indicadores anteriores permitió concluir de manera parcial que la posible implementación del SRM mediante la inyección de aerosoles de sulfatos a la estratosfera, podría provocar una ligera disminución de los días secos consecutivos, pero acompañada de una mayor disminución de los días húmedos consecutivos y una disminución aunque atenuada del número de días con precipitación intensa y muy intensa. Sin embargo, estos posibles comportamientos carecen de significación estadística considerable para Cuba.

3.5 Diferencias entre las proyecciones de extremos climáticos futuros relacionados con la temperatura en Cuba bajo escenarios con y sin SRM.

Las series temporales de los indicadores de extremos climáticos seleccionados en relación a la temperatura, durante el período 2020- 2070, muestran una disminución de los días y las noches frías (Figura 6 fila 1-columna 1 y 2, respectivamente), así como un incremento de los días y las noches cálidas (Figura 6 fila 2-columna 1 y 2, respectivamente), y la duración de los períodos cálidos (Figura 6 fila 3-columna 1), bajo los tres escenarios analizados. Sin embargo, se presentan diferencias entre las representaciones de los tres escenarios asociadas a la atenuación de la disminución de los días y noches frías y el incremento de los días y las noches cálidas y el indicador duración de los períodos cálidos bajo los escenarios de SRM y principalmente bajo el G4, en relación al RCP4.5. Por su parte, el indicador rango diurno de la temperatura (Figura 6 fila 3-columna 2) no presenta un comportamiento definido al aumento o la disminución.

El cálculo de estas diferencias entre los escenarios de SRM con respecto al RCP4.5 indicó en el caso de los indicadores TX10p y TN10p valores de aproximadamente 1 % en el G4 e inferiores en el G3 (Tabla 5). Mientras para los indicadores TX90p y TN90p los valores de las diferencias ascienden a aproximadamente 24 % bajo el G4 y 10 % bajo el G3 (Tabla 5).

Por su parte, el indicador WSDI presenta marcadas diferencias entre los escenarios SRM (G3 y G4) en relación al RCP4.5, con valores aproximados de 47 días/año y 109 días/año respectivamente (Tabla 5). Por el contrario para el indicador DTR las diferencias entre los escenarios G3 y G4 en relación al RCP4.5 son despreciables, con valores de incremento de aproximadamente 0.08 °C y 0.02 °C respectivamente (Tabla 5).

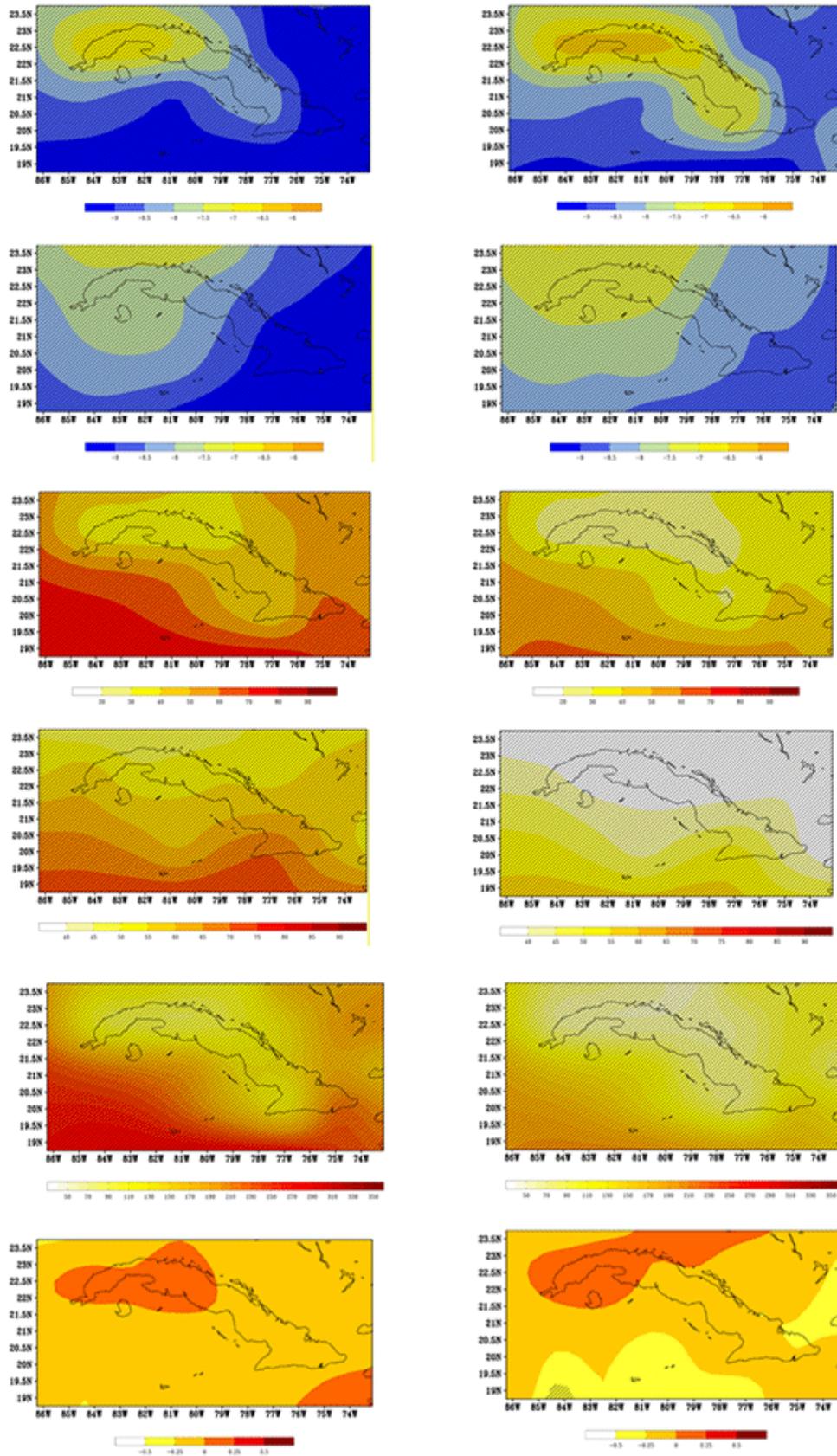


Figura 4. Comportamiento de los indicadores TX10p (fila 1), TN10p (fila 2), TX90p (fila 3), TN90p (fila 4), WSDI (fila 5), DTR (fila 6) en el período 2020- 2070 con respecto al período de referencia 1970- 2000 bajo los escenarios G3 (columna 1) y G4 (columna 2)

Tabla 3. Valores de cambio promedio por indicadores para el período 2020-2070 con respecto al 1970-2000, para Cuba, Occidente, Centro y Oriente bajo los escenarios G3 y G4 (valores significativos en negrita)

| INDICADORES | TX90p (%) | TX10p (%) | TN90p (%) | TN10p (%) | WSDI (días/año) | DTR (° C) | |
|-------------|------------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|---------------|-------|
| G3 | Cuba | 58.28 | -8.56 | 60.40 | -8.36 | 195.66 | 0.004 |
| | Occidente | 50.08 | -7.38 | 57.38 | -7.59 | 159.99 | 0.23 |
| | Centro | 44.12 | -7.83 | 55.83 | -7.96 | 134.97 | 0.16 |
| | Oriente | 54.95 | -8.88 | 66.31 | -9.24 | 178.07 | -0.08 |
| G4 | Cuba | 43.87 | -8.11 | 45.74 | -7.96 | 133.51 | -0.05 |
| | Occidente | 37.95 | -7.21 | 43.45 | -7.35 | 110.62 | 0.04 |
| | Centro | 32.45 | -7.17 | 40.40 | -7.59 | 89.05 | 0.05 |
| | Oriente | 41.50 | -8.03 | 49.98 | -8.59 | 120.47 | -0.08 |

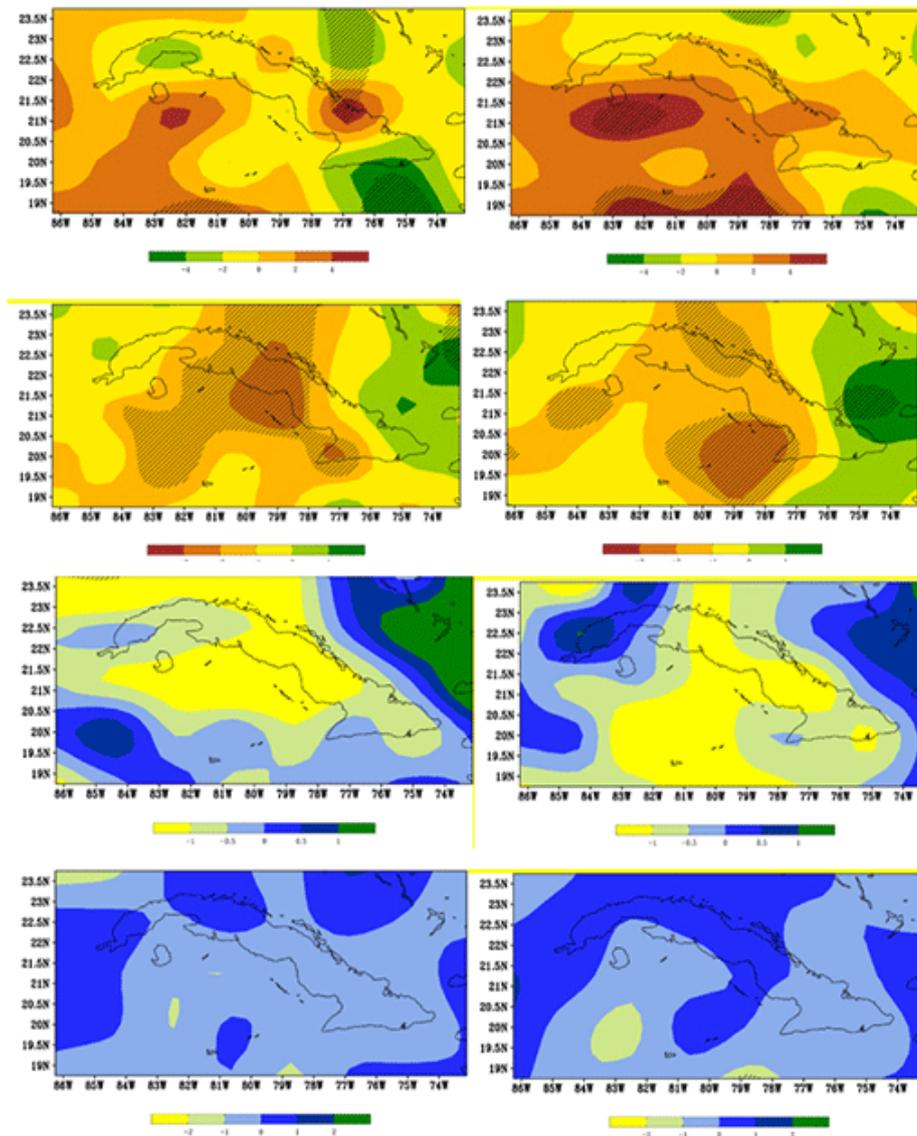


Figura 5. Comportamiento de los indicadores CDD (fila 1), CWD (fila 2), R10 (fila 3), R20 (fila 4) en el período 2020- 2070 con respecto al período de referencia 1970- 2000 bajo el escenario G3 (columna 1) y G4 (columna 2)

Tabla 4. Valores de cambio promedio por indicadores para el período 2020-2070 con respecto al 1970-2000, para Cuba, Occidente, Centro y Oriente bajo los escenarios G3 y G4 (valores significativos en negrita)

| INDICADORES | CDD (días/año) | CWD (días/año) | R10 (días/año) | R20 (días/año) |
|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| G3 | | | | |
| Cuba | -0.34 | -0.69 | -0.39 | -0.09 |
| Occidente | -0.29 | -0.59 | -0.31 | 0.56 |
| Centro | -0.38 | -2.09 | -0.99 | 0.02 |
| Oriente | -5.04 | -1.16 | -0.23 | -0.38 |
| G4 | | | | |
| Cuba | 0.70 | -0.60 | -0.50 | -0.06 |
| Occidente | 2.10 | -0.94 | 0.95 | 0.42 |
| Centro | 1.96 | -1.55 | -1.05 | 0.34 |
| Oriente | -1.23 | -0.68 | -0.61 | -0.48 |

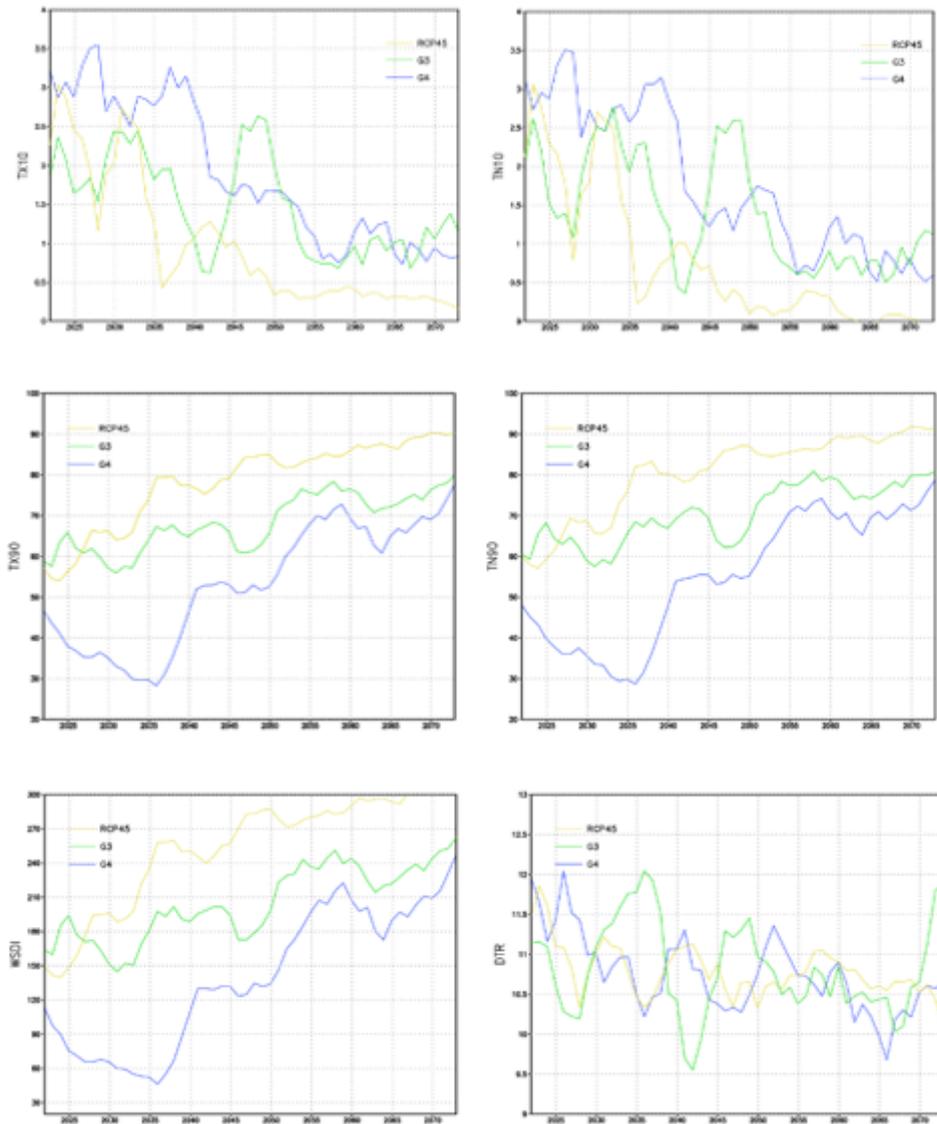


Figura 6. Series temporales de los indicadores de extremos climáticos TX10p (fila1-columna1), TN10p (fila1-columna2), TX90p (fila2-columna1), TN90p (fila2-columna2), WSDI (fila3-columna1), DTR (fila3-columna2) en el período 2020- 2070

El análisis de las diferencias entre escenarios con y sin SRM para los indicadores relacionados con la temperatura indica que la posible implementación del SRM mediante la inyección de aerosoles de sulfatos a la estratosfera podría variar favorablemente el futuro proyectado para Cuba bajo el escenario RCP4.5, al

atenuar la disminución de los días y las noches frías y el incremento de los días y las noches cálidas y reducir considerablemente el incremento del indicador duración de los períodos cálidos. Sin embargo, no provocaría cambios significativos en el comportamiento del rango diurno de la temperatura en Cuba.

3.6 Diferencias entre las proyecciones de extremos climáticos futuros relacionados con la precipitación en Cuba bajo escenarios con y sin SRM.

Las series temporales de los indicadores de extremos climáticos seleccionados en relación a la precipitación, no muestran un comportamiento definido al incremento o la disminución, durante el período 2020-2070 bajo ninguno de los tres escenarios analizados (Figura 7).

El análisis de las diferencias entre los escenarios de SRM en relación al RCP4.5 indica una disminución de los CDD de aproximadamente 1.41 días/año bajo el escenario G3 y 0.37 días/año bajo el G4, a pesar de que bajo este último, se mantienen aumentando con respecto al período de referencia. Además,

indican una disminución de los CWD de aproximadamente 0.20 días/año y 0.11 días/año respectivamente (Tabla 6).

En el caso de los indicadores R10 y R20, las comparaciones entre los escenarios G3 y G4 en relación al RCP4.5 permiten señalar un incremento del número de días con precipitación intensa de 0.60 días/año y 0.30 días/año respectivamente y del número de días con precipitación muy intensa de 0.44 días/año y 0.43 días/año respectivamente (Tabla 6).

El análisis de las diferencias entre escenarios con y sin SRM para los indicadores relacionados con la precipitación indica que la posible implementación del SRM mediante la inyección de aerosoles de sulfatos a la estratosfera no tendría un impacto considerable en los patrones de cambio proyectados por el RCP4.5.

Tabla 5. Diferencias entre los escenarios G3 y G4 con respecto al RCP4.5 por indicadores para Cuba, Occidente, Centro y Oriente

| INDICADORES | | TX90 (%) | TX10 (%) | TN90 (%) | TN10 (%) | WSDI (días/año) | DTR (° C) |
|-------------|-----------|----------|----------|----------|----------|-----------------|-----------|
| G3-RCP4.5 | Cuba | -9.78 | 0.50 | -9.82 | 0.62 | -47.27 | 0.08 |
| | Occidente | -10.92 | 0.92 | -10.00 | 0.83 | -51.37 | 0.07 |
| | Centro | -10.30 | 0.75 | -11.71 | 0.78 | -47.35 | 0.17 |
| | Oriente | -9.94 | 0.39 | -9.54 | 0.32 | -49.80 | -0.02 |
| G4-RCP4.5 | Cuba | -24.19 | 0.95 | -24.48 | 1.01 | -109.43 | 0.02 |
| | Occidente | -23.06 | 1.08 | -23.93 | 1.08 | -100.74 | -0.12 |
| | Centro | -21.98 | 1.42 | -27.14 | 1.15 | -93.27 | 0.06 |
| | Oriente | -23.39 | 1.24 | -25.87 | 0.97 | -107.40 | -0.01 |

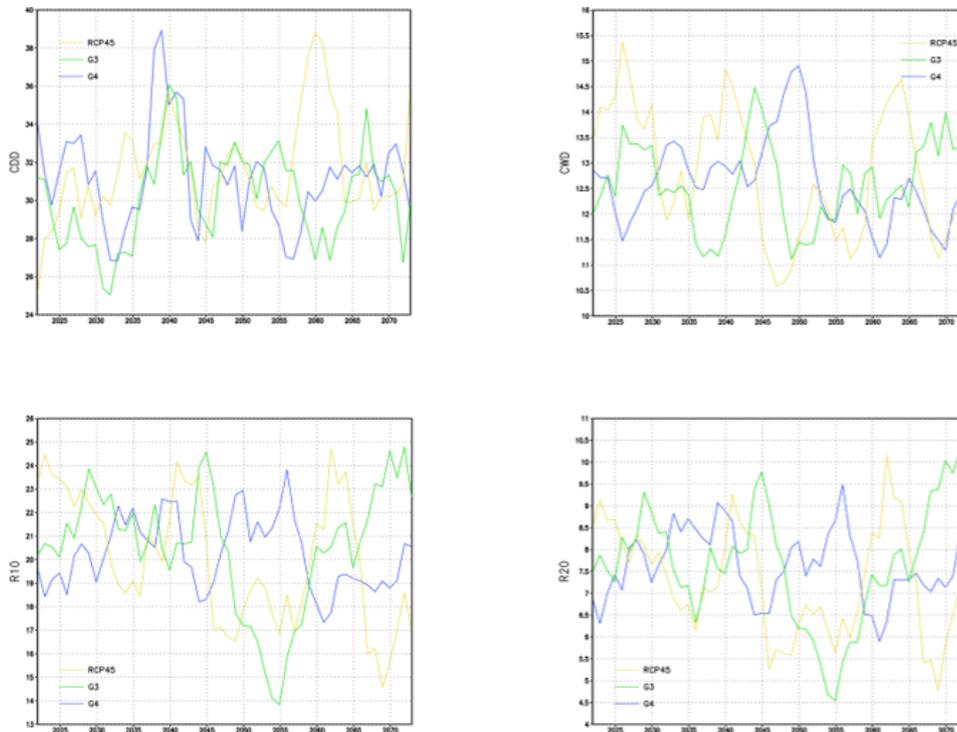


Figura 7. Series temporales de los indicadores de extremos climáticos CDD (fila1-columna1), CWD (fila1-columna2), R10 (fila2-columna1), R20 (fila2-columna2) en el período 2020- 2070

Tabla 6. Diferencias entre los escenarios G3 y G4 con respecto al RCP4.5 por indicadores para Cuba, Occidente, Centro y Oriente

| INDICADORES | CDD (días/año) | CWD (días/año) | R10 (días/año) | R20 (días/año) | |
|------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------|
| G3-RCP4.5 | Cuba | -1.41 | -0.20 | 0.60 | 0.44 |
| | Occidente | -2.94 | -0.65 | 0.58 | 0.38 |
| | Centro | -1.56 | -0.97 | -0.13 | 0.21 |
| | Oriente | -1.56 | -0.67 | 0.96 | 0.51 |
| G4-RCP4.5 | Cuba | -0.37 | -0.11 | 0.30 | 0.43 |
| | Occidente | -0.54 | -1.00 | 0.90 | 0.37 |
| | Centro | 0.79 | -0.43 | 0.06 | 0.58 |
| | Oriente | 2.25 | -0.20 | 0.68 | 0.24 |

4. CONCLUSIONES

El continuo incremento de las emisiones y concentraciones de los gases de efecto invernadero derivó en la búsqueda de soluciones alternativas para mitigar los inminentes impactos del cambio climático. La comparación entre las proyecciones futuras de los indicadores de extremos climáticos en Cuba bajo dos escenarios de Manejo de la Radiación Solar, con respecto a un escenario de emisiones de gases de efecto invernadero, constituye un primer acercamiento a la posible consideración de la geoingeniería solar como vía alternativa para mitigar o al menos retrasar los impactos del cambio climático. Los principales resultados de este trabajo se resumen a continuación:

- Con respecto a las proyecciones futuras de los indicadores de extremos climáticos bajo el escenario RCP4.5 en relación al período de referencia 1970-2000 se concluyó que:
 - Se proyecta para el futuro 2020- 2070 en Cuba, un incremento de las temperaturas tanto máximas como mínimas, asociadas a la disminución significativa de los días y las noches frías y al incremento significativo de los días y las noches cálidas, así como de la duración de los períodos cálidos.
 - Los resultados también sugieren que bajo este escenario se producirá un incremento de los días secos consecutivos y una disminución de los días húmedos consecutivos y del número de días con precipitación intensa y muy intensa.
- Con respecto a cuánto podría variar el comportamiento de los extremos climáticos bajo escenarios de SRM se concluyó que:
 - Para los dos escenarios de Manejo de la Radiación Solar considerados, la reducción de los días y noches frías, así como el incremento de los días y las noches cálidas y la duración de los períodos calientes, serán inferiores que en el RCP4.5. Sin embargo, esos cambios (reducciones o incrementos) continuarán siendo estadísticamente significativos respecto al período de referencia 1970-2000.
 - Se proyecta además una ligera disminución de los días secos consecutivos, una mayor reducción de los días húmedos consecutivos y una menor disminución del número de días con precipitación intensa y muy intensa en relación al RCP4.5, pero esos cambios no tendrán una significación considerable para Cuba.
- Con respecto a los beneficios del SRM comparado con otros escenarios si el mismo llegara a aplicarse se concluyó que:
 - La posible implementación del Manejo de la Radiación Solar con aerosoles estratosféricos podría mejorar ligeramente el escenario futuro proyectado por el RCP4.5 en relación a las temperaturas, al atenuar el incremento o disminución de los extremos relacionados con el régimen térmico. Sin embargo, no variaría significativamente los patrones de cambio proyectados por el RCP4.5, en relación a los extremos vinculados con el régimen de precipitación

5. REFERENCIAS

Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., & Rahimzadeh, F. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D5).

Aswathy, N., Boucher, O., Quaas, M., Niemeier, U., Muri, H. Ø., & Quaas, J. (2014). Climate extremes in multi-model simulations of stratospheric aerosol and marine cloud brightening climate engineering. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 14, 32393-32425.

Boucher, O., Randall, D., Artaxo, P., Bretherton, C., Feingold, G., Forster, P., Kerminen, V.-M., Kondo, Y., Liao, H., Lohmann, U., Rasch, P., Satheesh, S.K, Sherwood, S, Stevens, B, & Zhang, X.Y. (2013). Clouds and aerosols. En Stocker, T.F, Qin, D, Plattner, G. K, Tignor, M, Allen, S.K, Boschung, J, Nauels, A, Xia, Y, Bex, V, & Midgley, P.M (Eds.), *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel*

- on *Climate Change* (Cambridge University Press, Cambridge, pp. 571-657). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.016>,
- Budyko, M. I. (1977). On present-day climatic changes. *Tellus*, 29(3), 193-204.
- Burgos, Y., & González, I. T. (2012). Análisis de indicadores de extremos climáticos en la isla de Cuba. *Revista de Climatología*, 12, 81-91.
- Campbell, J. D., Taylor, M. A., Stephenson, T. S., Watson, R. A., & Whyte, F. S. (2011). Future climate of the Caribbean from a regional climate model. *International Journal of Climatology*, 31(12), 1866-1878.
- Centella, A., & Bezanilla, A. (2019). *High spatial resolution climate change scenarios for Belize* (p. 37) [Informe inédito de consultoría en apoyo a la Cuarta Comunicación Nacional de Belice sobre el cambio climático]. Instituto de Meteorología de Cuba.
- Clarke, L. A., Taylor, M. A., Centella-Artola, A., Williams, M. S. M., Campbell, J. D., Bezanilla-Morlot, A., & Stephenson, T. S. (2021). The Caribbean and 1.5° C: Is SRM an Option? *Atmosphere*, 12(3), 367.
- Collins, W., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C., Joshi, M., & Liddicoat, S. (2011). Development and evaluation of an Earth-System model-HadGEM2. *Geoscientific Model Development*, 4(4), 1051-1075. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-1051-2011>.
- Crutzen, P. J. (2006). Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic change*, 77(3-4), 211.
- Curry, C. L., Sillmann, J., Bronaugh, D., Alterskjaer, K., Cole, J. N., Ji, D., Kravitz, B., Kristjansson, J. E., Moore, J. C., & Muri, H. (2014). A multimodel examination of climate extremes in an idealized geoengineering experiment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(7), 3900-3923.
- Gil, L., González, I., Hernández, D., & Alvarez, M. (2020). Extremos climáticos de temperatura y su relación con patrones atmosféricos de teleconexión durante el invierno. *Revista Cubana de Meteorología*, 26(4).
- González García, I. T., Barcia Sardiñas, S., & Hernández González, D. (2017). Comportamiento de Indicadores de extremos climáticos en la Isla de la Juventud. *Revista Cubana de Meteorología*, 23(2), 217-225.
- González, I. (2004). *Evaluación de índices climáticos extremos derivados de datos diarios* [Tesis de Maestría, Instituto Superior de Tecnología y Ciencias Aplicadas]. <https://repositorio.geotech.cu/jspui/bitstream/1234/1644>
- González, I. T., Barcia, S., Hernández, D., Paz, L. R., Gil, L., & Sánchez, F. (2019). *Indicadores Climáticos Extremos en Cuba* (p. 35) [Informe inédito para Proyecto Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático en Cub]. Instituto de Meteorología de Cuba.
- Ji, D., Fang, S., Curry, C. L., Kashimura, H., Watanabe, S., Cole, J. N., Lenton, A., Muri, H., Kravitz, B., & Moore, J. C. (2018). Extreme temperature and precipitation response to solar dimming and stratospheric aerosol geoengineering. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(14), 10133-10156.
- Klein Tank, A., Zwiers, F., & Zhang, X. (2009). *Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation* (Guía WCDMP No.72-WMO/TD-No. 1500). WMO.
- Kravitz, B., Robock, A., Boucher, O., Schmidt, H., Taylor, K. E., Stenchikov, G., & Schulz, M. (2011). The geoengineering model intercomparison project (GeoMIP). *Atmospheric Science Letters*, 12(2), 162-167.
- McLean, N. M., Stephenson, T. S., Taylor, M. A., & Campbell, J. D. (2015). Characterization of future Caribbean rainfall and temperature extremes across rainfall zones. *Advances in Meteorology*, 2015.
- Mycos, M. A. (2018). Beyond 1.5 C: vulnerabilities and adaptation strategies for Caribbean Small Island developing states. *Regional environmental change*, 18(8), 2341-2353.
- Neelin, J. D., Münnich, M., Su, H., Meyerson, J. E., & Holloway, C. E. (2006). Tropical drying trends in global warming models and observations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(16), 6110-6115.
- Nurse, L. A., McLean, R. F., Agard, J., Briguglio, L. P., Duvat-Magnan, V., Pelesikoti, N., Tompkins, E., & Webb, A. (2014). Small islands. En Barros, V.R., Field, C.B., Dokken, D.J., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C, Kissel, E.S, Levy, A.N, MacCracken, S, Mastrandrea, P.R, & White, L.L (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects* (pp. 1613-1654). Cambridge University Press.
- Peterson, T. C., Taylor, M. A., Demeritte, R., Duncombe, D. L., Burton, S., Thompson, F., Porter, A., Mercedes, M., Villegas, E., & Semexant Fils, R. (2002). Recent changes in climate extremes in the Caribbean region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D21), ACL-16.
- Robinson, S. (2018). Adapting to climate change at the national level in Caribbean small island developing states. *Island Studies Journal*, 13(1).
- Ryu, J.-H., & Hayhoe, K. (2014). Understanding the sources of Caribbean precipitation biases in CMIP3 and CMIP5 simulations. *Climate dynamics*, 42(11), 3233-3252.

- Serrano, S., Ruiz, J. C., & Bersosa, F. (2017). Heavy rainfall and temperature projections in a climate change scenario over Quito, Ecuador. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 25(1), 16-32.
- Stephenson, T. S., Vincent, L. A., Allen, T., Van Meerbeek, C. J., McLean, N., Peterson, T. C., Taylor, M. A., Aaron-Morrison, A. P., Auguste, T., & Bernard, D. (2014). Changes in extreme temperature and precipitation in the Caribbean region, 1961-2010. *International Journal of Climatology*, 34(9), 2957-2971.
- Taylor, M. A., Clarke, L. A., Centella, A., Bezanilla, A., Stephenson, T. S., Jones, J. J., Campbell, J. D., Vichot, A., & Charlery, J. (2018). Future Caribbean climates in a world of rising temperatures: The 1.5 vs 2.0 dilemma. *Journal of Climate*, 31(7), 2907-2926.
- Zhang, X., Yang, F., & Santos, J. L. (2004). RCLimDex (1.0). Manual del usuario. *Climate Research Branch Environment Canada. Versión en español: Santos, JL CIIFEN.*

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Contribución de autoría: Concepción de la idea: Abel Centella, Arnoldo Bezanilla y Marilee Martínez. **Conservación de datos:** Arnoldo Bezanilla y Alejandro Vichot. **Redacción- primera redacción:** Marilee Martínez. **Redacción- revisión y edición:** Marilee Martínez, Abel Centella, Arnoldo Bezanilla y Alejandro Vichot. **Investigación:** Marilee Martínez. **Metodología:** Alejandro Vichot, Arnoldo Bezanilla, Abel Centella y Marilee Martínez.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)