

Señal de Cambio Climático para Índices de Precipitación en la Zonificación Agroecológica de Colombia

David Montero Loaiza
Eduardo Ruíz Ruíz

Mayo 15, 2020

1. Introducción

La agricultura se ve ampliamente afectada por el cambio climático, siendo la variable de precipitación una de las que más afecta al sector agrícola, pues la disponibilidad de agua para irrigación puede verse afectada. Pocos estudios muestran qué tanto cambian los índices de cambio climático con respecto a su afectación al sector agrícola en países del trópico [1].

Colombia es un país cuya economía depende en gran porcentaje del desarrollo rural [2], y con ello, de la producción agrícola de su territorio, la cual se espera mejorar según su Plan Nacional de Desarrollo [3], [4]. La precipitación es una variable de gran aporte para la producción agrícola y su alta variabilidad, sobretodo en países cercanos al ecuador en América del Sur, como Colombia, que afecta a la producción agrícola según déficit o exceso de lluvias [5].

Esta variabilidad de precipitación es afectada en gran parte por el fenómeno del ENOS (El Niño - Oscilación del Sur), y puede entorpecer la producción agrícola del país tanto en zonas comercialmente agrícolas como en zonas potencialmente aprovechables para producción agrícola. En este estudio, se evalúan 4 índices climáticos extremos ETCCDI de precipitación (R10mm, R20mm, CDD y CWD) directamente sobre 5 zonas agroecológicas de Colombia [6], analizando la afectación para cada una de ellas según su potencial de producción agrícola, mostrando la Señal de Cambio Climático en un período futuro (2021-2050), con respecto a un período base (1981-2010), y el comportamiento de los índices durante los 30 años del período futuro.

2. Materiales y Métodos

2.1. Zona de Estudio

Colombia es un país de América del Sur, ubicado en el extremo noroccidental de esta parte del continente, encontrándose por lo tanto en la zona intertropi-

cal del planeta. Tiene una extensión de aproximadamente 2,130,000 km² y se encuentra zonificado en 6 principales Zonas Agroecológicas [6]:

- **Caribe.** Ubicada en el norte del país, colinda con el mar Caribe. Tiene un régimen monomodal de lluvias, llegando a alcanzar los 500 mm al año durante la época de lluvias en las zonas más áridas (norte) y hasta 3000 mm en las zonas ubicadas al sur. Presenta zonas desérticas en el norte y zonas un poco más fértiles en el sur, en donde varios tipos de cultivos son sembrados. Esta zona se encuentra comprendida entre las longitudes $[-76.9, -70.9]$ y las latitudes $[7.9, 12.8]$.
- **Pacífico.** Ubicada en el occidente del país, colinda con el océano Pacífico. Es la región más húmeda del país, llegando a alcanzar precipitaciones de hasta 7000 mm al año. Debido a su alta humedad, la producción agrícola en esta zona es escasa y no representa un aporte esencial para la economía del país. Esta zona se encuentra comprendida entre las longitudes $[-78.9, -77]$ y las latitudes $[1.4, 8.7]$.
- **Andina e Interandina.** Las regiones andinas e interandinas (llamadas de ahora en adelante como Zona Andina), ubicadas en el centro del país, contienen las cadenas montañosas de tres cordilleras que atraviesan el país de sur a norte, incluyendo también los valles entre estas. Los suelos de esta zona son los más fértiles y la gran mayoría de la industria agrícola se encuentra aquí. Esta zona se encuentra comprendida entre las longitudes $[-76.7, -72]$ y las latitudes $[1.7, 7.6]$.
- **Llanos Orientales.** Se encuentra ubicada en el oriente del país. Es una sabana tropical que puede alcanzar los 4500 mm anuales de precipitación. La agricultura no representa un mayor aporte a la economía del país, no obstante, es la zona ganadera con mayor aporte a la economía de este. Esta zona se encuentra comprendida entre las longitudes $[-71.6, -66.5]$ y las latitudes $[0.9, 7.2]$.
- **Amazonas.** Se encuentra ubicada en el sur del país, dando paso a la cuenca del río Amazonas. La precipitación en esta zona alcanza los 5000 mm anuales. Es una zona de suelos frágiles y poco aptos para la agricultura o la ganadería. Esta zona se encuentra comprendida entre las longitudes $[-76.2, -68.6]$ y las latitudes $[-4.5, 0.7]$.

2.2. Períodos de Estudio

Se tuvieron en cuenta dos períodos de estudio cercanos a las fechas actuales y ver su cambio próximo.

- **Período Base Histórico.** El período base consistió en un período de 30 años, comprendiendo los años 1981-2010.
- **Período Futuro.** El período futuro consistió en un período de 30 años, comprendiendo los años 2021-2050.

Para los escenarios del período futuro se tuvieron en cuenta tanto el RCP 4.5 (Escenario estable), como el RCP 8.5 (Escenario de altas emisiones de efecto invernadero).

2.3. CMIP5

El Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados en su fase 5, o CMIP5, el cual tiene un dominio espacial global, fue usado para este estudio. Los datasets para los períodos base histórico y futuros (RCP 4.5 y RCP 8.5) fueron descargados y cargados utilizando la función `loadGridData()` del paquete de R `loader`. Se utilizó la variable *pr*, la cual indica la precipitación de cada pixel en $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$. La variable *pr* fue transformada a unidades de mm día^{-1} multiplicando cada valor de la grilla por 86400; esta transformación fue obtenida en la función `loadGridData()` al usar un diccionario especificando el valor 86400 en el parámetro de escala.

2.4. Índices ETCCDI

Ya que, al ser Colombia un país en donde la agricultura juega un papel importante en la economía, se estudiaron índices extremos de precipitación ETCCDI para cada una de las zonas agroecológicas del país. Los cuatro índices usados se presentan a continuación:

- **R10mm.** Es el conteo anual de días de precipitación en que la precipitación P fue mayor que 10 mm: $P > 10$.
- **R20mm.** Es el conteo anual de días de precipitación en que la precipitación P fue mayor que 20 mm: $P > 20$.
- **CDD.** Es el mayor número de días seguidos en que la precipitación P fue menor que 1 mm: $P < 1$.
- **CWD.** Es el mayor número de días seguidos en que la precipitación P fue mayor que 1 mm: $P > 1$.

Estos índices fueron calculados para los períodos de interés utilizando la función `climdexGrid()` del paquete `climate4r.climdex` [7]. Para cada uno de los índices generados, y para cada una de las regiones de estudio se extrajo el valor medio del índice en cuestión utilizando las funciones `subsetGrid` y `aggregateGrid` del paquete `transformer` para extraer la sección de las áreas de estudio de cada dataset y promediarlas por cada una.

Los gráficos espaciales se realizaron utilizando la función `makeMultiGrid()` del paquete `transformer` y `spatialPlot()` del paquete `visualizeR`. La climatología fue graficada para cada índice en los períodos de estudio (y para cada RCP), por lo cual se utilizó la función `climatology()` del paquete `transformer`.

2.5. Señal de Cambio Climático (CCS)

La Señal de Cambio Climático (CCS) se calculó para cada uno de los escenarios futuros RCP como la diferencia entre la climatología del escenario futuro y la climatología del período base histórico utilizando la función `gridArithmetics()` del paquete `transformer`.

3. Resultados y discusiones

Los índices extremos de precipitación fueron calculados, sus valores fueron promediados por cada una de las regiones para los períodos de estudio y la CCS fue calculada para cada escenario RCP.

Para el caso del índice R10mm, como se puede observar en la figura 1, no se presentan grandes cambios que puedan ser apreciables a simple vista de manera espacial en los escenarios RCP 4.5 o RCP 8.5, sucediendo lo mismo con los índices R20mm (figura 2), CDD (figura 5) y CWD (figura 6).

La zona con mayor número de días con precipitación mayor a 10 mm es la zona pacífica (caso que se repite para el número de días con precipitación mayor a 20 mm), la más húmeda del país, mientras que las zonas Caribe y Andina presentan algunos de los valores más bajos del índice (en el resto de las zonas, el índice R20mm es tiene una tendencia a ser nulo).

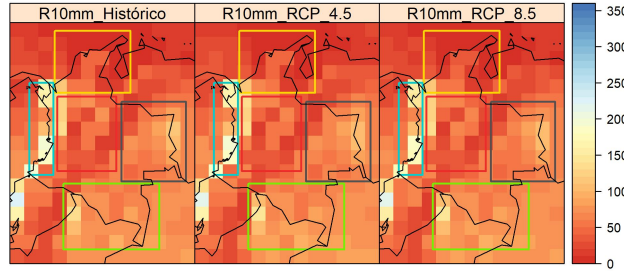


Figura 1: Índice R10mm para las cinco zonas agroecológicas de Colombia. Los recuadros de colores representan las zonas: Amarillo (Caribe), Azul (Pacífico), Rojo (Andina), Gris (Llanos) y Verde (Amazonas).

En la figura 3 puede observarse que los cambios entre el período base y el período futuro no fueron muy grandes para ninguno de los escenarios RCP, no obstante, se nota una mayor disminución del índice en el RCP 8.5. En la figura 4 los cambios fueron casi nulos para ambos escenarios en el caso del índice R20mm.

Teniendo en cuenta los índices de días continuos de sequía, la zona Caribe obtuvo los valores más altos del índice CDD, seguido por el resto de zonas, que representan valores relativamente bajos de días continuos de sequía. En el caso del índice CWD, la zona Pacífico tiene altos valores del índice, ya que llueve gran

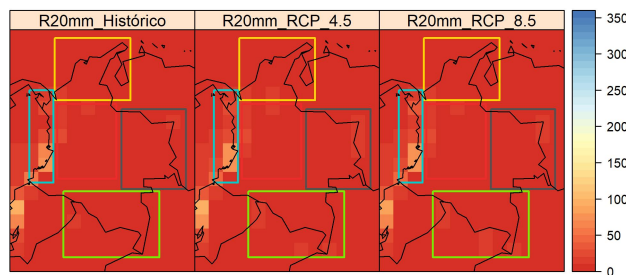


Figura 2: Índice R20mm para las cinco zonas agroecológicas de Colombia. Los recuadros de colores representan las zonas: Amarillo (Caribe), Azul (Pacífico), Rojo (Andina), Gris (Llanos) y Verde (Amazonas).

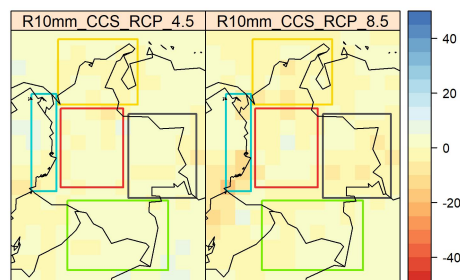


Figura 3: CCS para el índice R10mm. Los recuadros de colores representan las zonas: Amarillo (Caribe), Azul (Pacífico), Rojo (Andina), Gris (Llanos) y Verde (Amazonas).

parte del año, mientras que en el resto de zonas no sucede de la misma manera, siendo la zona de los Llanos y el Amazonas las que también tienen valores altos del índice, y siendo la zona Caribe la que representa los valores más bajos de este índice.

En la figura 7 se observa cómo la CCS muestra un aumento considerable del índice CDD, en especial para las zonas Caribe, Andina y Llanos, siendo la Caribe la más afectada con un aumento de más de 20 días al año. Esta tendencia se ve en ambos escenarios futuros, pero siendo más marcada en el RCP 8.5. En el caso del CWD (figura 8), se presentan en ambos escenarios una reducción de días seguidos de lluvia, aunque no muy marcada, e incluso positivas en pequeñas zonas (norte de la zona Pacífica y sur de la zona del Amazonas), no obstante, tiende a ser negativa la CCS en gran parte del territorio y mucho más marcado en el escenario del RCP 8.5.

En las figuras 9 y 10 puede apreciarse que la zona que alcanza mayores valores de los índices R10mm y R20mm es la Pacífica (con aproximadamente 100

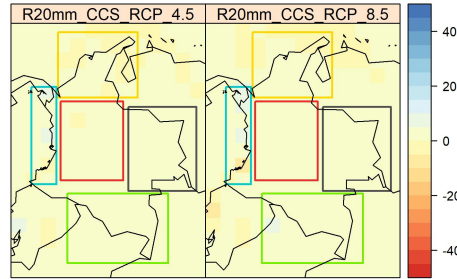


Figura 4: CCS para el índice R20mm. Los recuadros de colores representan las zonas: Amarillo (Caribe), Azul (Pacífico), Rojo (Andina), Gris (Llanos) y Verde (Amazonas).

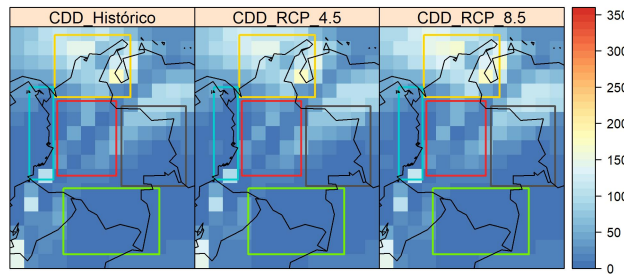


Figura 5: Índice CDD para las cinco zonas agroecológicas de Colombia. Los recuadros de colores representan las zonas: Amarillo (Caribe), Azul (Pacífico), Rojo (Andina), Gris (Llanos) y Verde (Amazonas).

días al año de precipitaciones mayores a 10 mm y 20 de ellos con precipitaciones mayores a 20 mm), abarcando una amplia brecha hasta las zonas Amazonas, Llanos y Andina, que se mueven entre los 45 y los 75 días al año con precipitaciones mayores a 10 mm. La zona Caribe, la más seca del país, apenas supera los 20 días al año con precipitaciones mayores a 10 mm. En el caso de los días con precipitaciones mayores a 20 mm, las zonas Andina, Amazonas y Llanos se encuentran al rededor de los 5 días, mientras que la zona Caribe apenas logra alcanzar 2 días, siendo la más afectada y que puede tener mayores impactos negativos en sus zonas agrícolas debido a la tendencia decreciente.

Para el índice R10mm los escenarios RCP no muestran una gran diferencia, en parte debido al período de estudio (ya que el RCP 4.5 mantiene las emisiones a un nivel casi constante hasta aproximadamente el año 2040), sin embargo, se puede observar una tendencia decreciente en todas las zonas, mientras que en el RCP 8.5 el índice se mantiene constante. No obstante, para el índice R20 mm, el RCP 8.5 muestra una tendencia positiva, lo que aumentaría el número de días

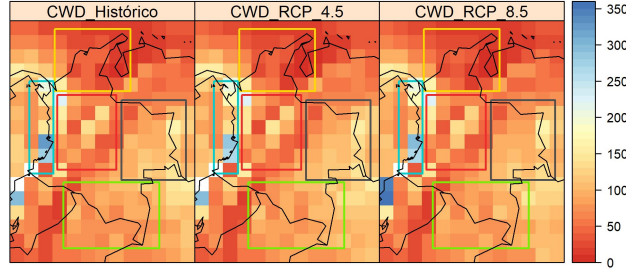


Figura 6: Índice CWD para las cinco zonas agroecológicas de Colombia. Los recuadros de colores representan las zonas: Amarillo (Caribe), Azul (Pacífico), Rojo (Andina), Gris (Llanos) y Verde (Amazonas).

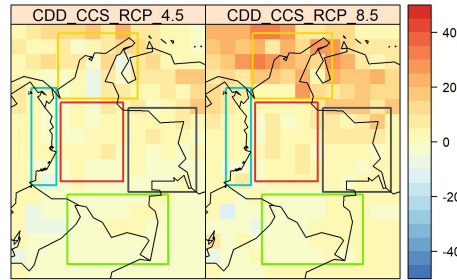


Figura 7: CCS para el índice CDD. Los recuadros de colores representan las zonas: Amarillo (Caribe), Azul (Pacífico), Rojo (Andina), Gris (Llanos) y Verde (Amazonas).

con lluvias mayores a 20 mm [8], la cual ha demostrado ser significativa a un nivel de confianza del 99.9% en estudios realizados sobre toda América del Sur [9].

En la figura 11 puede observarse cómo la mayor cantidad de días seguidos de sequía CDD es alta en la zona Caribe, aunque muy variable, llegando a sobrepasar los 100 días al año, e incluso casi llegando a tener 150 días al año seguidos de sequía. Se nota, en este caso, una alta tendencia a aumentar el valor del índice con el RCP 8.5, y aunque el RCP 4.5 trata de mantenerse estable, también muestra una leve tendencia de aumento. Esta zona es la más afectada, pues tiene una tendencia decreciente en días lluviosos y una tendencia a incrementar el número de días seguidos de sequía, fenómeno que se ha visto reportado por estudios de índices de precipitación con el CMIP5, aunque no mostraran diferencias significativas en la CCS [9], [10]. Para las demás zonas, el índice se mantiene bajo, y aunque hay en los RCP una tendencia a aumentar, no lo hace con una gran pendiente durante los próximos 30 años.

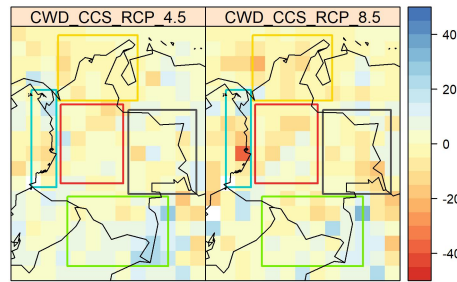


Figura 8: CCS para el índice CWD. Los recuadros de colores representan las zonas: Amarillo (Caribe), Azul (Pacífico), Rojo (Andina), Gris (Llanos) y Verde (Amazonas).

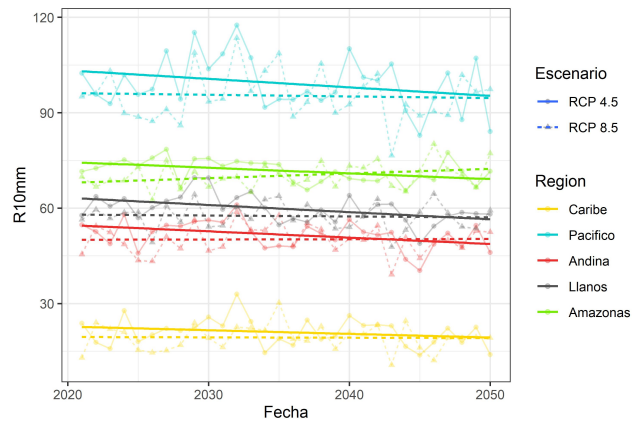


Figura 9: Índice R10mm del período futuro para las cinco zonas agroecológicas de Colombia.

En el caso del índice CWD (figura 12), la zona Pacífica tiene los mayores valores del índice (se mueve al rededor de los 150 días al año), mientras que las zonas Llanos, Andina y Amazonas se mueven entre los 75 y los 100 días al año. Para estas zonas no se encuentra una gran diferencia entre los RCP y parecen mantenerse estables, aunque hay una leve tendencia decreciente para las zonas Andina y Amazonas con el escenario de RCP 4.5. La zona Caribe muestra los valores más bajos del índice y, además, muestra una tendencia a decrecer en los próximos 30 años con ambos escenarios futuros, indicando una vez más la tendencia de esta zona a tener posibles dificultades en producción agrícola.

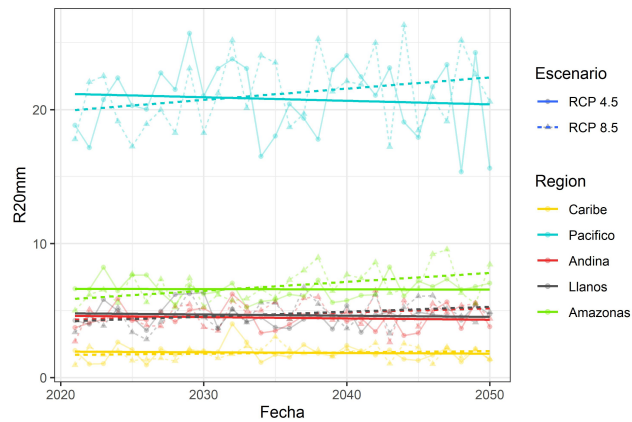


Figura 10: Índice R20mm del período futuro para las cinco zonas agroecológicas de Colombia.

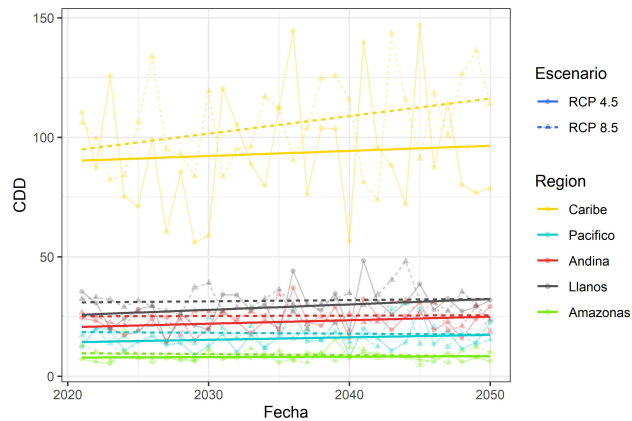


Figura 11: Índice CDD del período futuro para las cinco zonas agroecológicas de Colombia.

4. Conclusiones

La zona agroecológica más afectada por el cambio en índices extremos de precipitación fue la zona Caribe, la cual, aunque varía entre suelos áridos y suelos fértiles, representa parte del porcentaje de aporte agrícola del país. El índice CDD tuvo una tendencia a aumentar mientras que índices como el R10mm y el CWD tuvieron una tendencia a disminuir en esta zona que ya tiene valores bajos de dichos índices.

Las zona Andina y Llanos, las cuales representan otro alto porcentaje en economía, tuvieron un comportamiento de índices extremos de precipitación mucho más estables, y aunque la tendencia en algunos índices como R10mm y

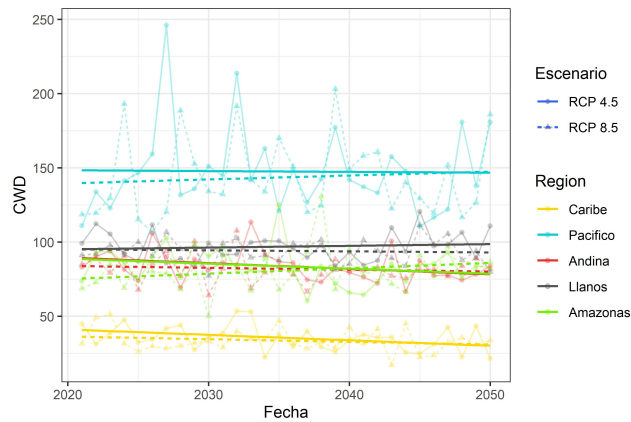


Figura 12: Índice CWD del período futuro para las cinco zonas agroecológicas de Colombia.

CWD es decreciente, no lo hace de una manera fuerte, al igual que la tendencia creciente del índice CDD.

Referencias

- [1] C. E. González-Orozco, M. Porcel, D. F. Alzate Velásquez y J. O. Orduz-Rodríguez, «Extreme climate variability weakens a major tropical agricultural hub», *Ecological Indicators*, vol. 111, n.º January, pág. 106 015, 2020, ISSN: 1470160X. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.106015. dirección: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106015>.
- [2] MADR, *Plan Frutícola Nacional*. 2006.
- [3] DNP, *Plan Nacional de Desarrollo*. Bogotá, 2018.
- [4] —, *Bases del plan nacional de desarrollo 2018-2022*. Bogotá, 2019.
- [5] J. E. Montealegre Bocanegra, «Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia», Bogotá, inf. téc., 2007.
- [6] FAO, *Calendario de cultivos: América Latina y el Caribe*, 186. Roma, 2006, ISBN: 92-5-305537-5.
- [7] M. Iturbide, J. Bedia, S. Herrera, J. Baño-Medina, J. Fernández, M. D. Frías, R. Manzananas, D. San-Martín, E. Cimadevilla, A. S. Cofiño y J. M. Gutiérrez, «The R-based climate4R open framework for reproducible climate data access and post-processing», *Environmental Modelling and Software*, vol. 111, n.º August 2018, págs. 42-54, 2019, ISSN: 13648152. DOI: 10.1016/j.envsoft.2018.09.009.

- [8] M. C. Kruk, A. M. Lorrey, G. M. Griffiths, M. Lander, E. J. Gibney, H. J. Diamond y J. J. Marra, «On the state of the knowledge of rainfall extremes in the western and northern Pacific basin», *International Journal of Climatology*, vol. 35, n.º 3, págs. 321-336, 2015, ISSN: 10970088. DOI: 10.1002/joc.3990.
- [9] M. d. l. M. Skansi, M. Brunet, J. Sigró, E. Aguilar, J. A. Arevalo Groening, O. J. Bentancur, Y. R. Castellón Geier, R. L. Correa Amaya, H. Jácome, A. Malheiros Ramos, C. Oria Rojas, A. M. Pasten, S. Sallons Mitro, C. Villaroel Jiménez, R. Martínez, L. V. Alexander y P. D. Jones, «Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America», *Global and Planetary Change*, vol. 100, págs. 295-307, 2013, ISSN: 09218181. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2012.11.004. dirección: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.11.004>.
- [10] J. Sillmann, V. V. Kharin, F. W. Zwiers, X. Zhang y D. Bronaugh, «Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections», *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 118, n.º 6, págs. 2473-2493, 2013, ISSN: 21698996. DOI: 10.1002/jgrd.50188.