



Centro de Investigaciones Geofísicas, Escuela de Física y Centro de Investigación en Matemática Pura y Aplicada, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica
(hugo.hidalgo@ucr.ac.cr)



Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica, Escuela de Física y Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica
(erick.alfaro@ucr.ac.cr)

Proyecciones de cambio climático en eventos extremos para el cantón Dota

Hugo G. Hidalgo

Eric J. Alfaro

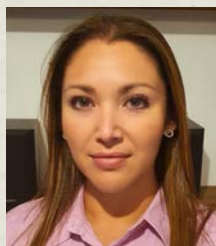
Paula M. Pérez-Briceño

Blanca Calderón-Solera

Vladimir Naranjo



Centro de Investigaciones Geofísicas y Escuela de Geografía, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica
(paula.perez@ucr.ac.cr)



Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica
(blanca.calderonsolera@ucr.ac.cr)



Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, Costa Rica, San José, Costa Rica
(vnaranjo@cfa.cr)

El cantón Dota en San José empieza a enfrentar problemas de disponibilidad de agua, por lo que en esta investigación se modelaron eventos extremos de precipitación y temperatura bajo el escenario de cambio climático pesimista de concentraciones, el cual podrá utilizarse como insumo del análisis de riesgo climático. Como una forma de determinar la oferta de agua dentro del cantón, se estimó el balance hídrico para la cuenca madre. Estos insumos pueden ser utilizados por los habitantes del cantón y funcionarios de instituciones para la toma de decisiones en el futuro con relación con el tema del agua.

Para ello se evaluaron las posibles amenazas de eventos hidroclimáticos extremos proyectados hacia el futuro usando modelos climáticos de circulación general de última generación (GCMs, por sus siglas en inglés). Las estimaciones diarias de precipitación (P), temperatura media (T_{prom}), temperatura máxima (T_{max}) y temperatura mínima (T_{min}) para 12 subcuencas del cantón Dota (**Figura 1**) provenientes de seis diferentes GCMs, fueron cambiadas de escala de la resolución nativa de los modelos a una resolución final de 1 km mediante un método estadístico, que

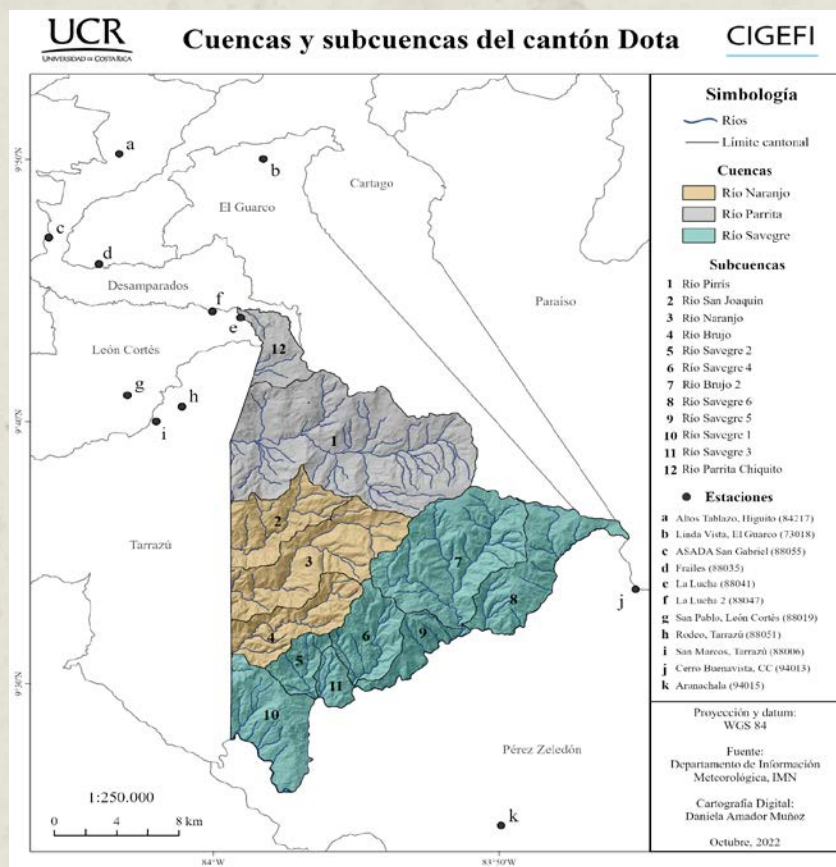


Figura 1. Delimitación de las 12 subcuencas dentro del cantón Dota y la ubicación de las estaciones meteorológicas del IMN.

luego se usaron para calcular índices de eventos extremos desde 1979 a 2099.

El cantón Dota es el cantón 17 de la provincia San José y tiene una extensión de 404.5 km². Dentro del cantón, se identificaron 12 microcuencas que se muestran en la **Figura 1**, así como las estaciones meteorológicas que se utilizaron para el análisis. Estas estaciones son las más cercanas al cantón. El **Cuadro 1** contiene la información del área en kilómetros cuadrados y área relativa al porcentaje de cada una de las 12 cuencas.

Cuadro 1. Subcuencas en el cantón Dota.

#	Nombre	Área (km ²)	Porcentaje relativo (%)
1	Subcuenca Río Pirris	111.02	27.49
2	Subcuenca Río San Joaquín	26.19	6.48
3	Subcuenca Río Naranjo	45.76	11.33
4	Subcuenca Río Brujo 1	24.58	6.09
5	Subcuenca Río Savegre 2	10.97	2.72
6	Subcuenca Río Savegre 4	21.92	5.43
7	Subcuenca Río Brujo 2	61.4	15.20
8	Subcuenca Río Savegre 6	35.46	8.78
9	Subcuenca Río Savegre 5	13.32	3.30
10	Subcuenca Río Savegre 1	31.43	7.78
11	Subcuenca Río Savegre 3	7.36	1.82
12	Subcuenca Río Parrita Chiquito	15.11	3.74
Área Total		404.52	100



Vista panorámica de Dota desde la laguna don Manuel. Fotografía: Kattia Bonilla Gamboa.



Zona de Los Santos. Fotografía: Kattia Bonilla Gamboa.

Cuadro 2. Modelos CMIP6 usados en el estudio, la institución que los ejecutó y su resolución nominal.

Modelo	Institución	Resolución Nativa (km)
ACCESS-CM2	CSIRO-ARCCSS	250
AWI-CM-1-1-MR	AWI	100
EC-EARTH3	EC-EARTH Consortium	100
EC-EARTH3-Veg	EC-EARTH Consortium	100
GFDL-ESM4	NOAA-GFDL	100
MPI-ESM1-2-HR	MPI-M	100

Los datos diarios de los GCMs correspondientes a la última generación de modelos (conocidos en inglés como Coupled Model Intercomparison Project -Phase 6 o CMIP6) fueron descargados de World Climate Research Programme (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>). Las variables usadas fueron P, Tprom, Tmax

y Tmin. Se usaron seis modelos (**Cuadro 2**), considerados como de bajo sesgo para América Central de acuerdo con la selección de *Almazroui et al. (2021)*. Se trabajó con el escenario intensivo de concentraciones SSP5-8.5, que corresponde a un escenario futuro pesimista de emisiones de gases de efecto invernadero.

Cuadro 3. Lista de los índices de precipitación diaria de CLIMDEX.

Identificador	Nombre	Nombre del indicador	Definición	Unidades
1	CDD	Días secos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con lluvia diaria $< 1\text{mm}$	Días
2	CWD	Días húmedos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con lluvia diaria $\geq 1\text{mm}$	Días
3	PRCPTOT	Precipitación total anual en días húmedos	Total anual de PRCP en días húmedos ($RR \geq 1\text{mm}$)	mm
4	R10mm	Número de días con precipitaciones fuertes	Conteo anual de días cuando la precipitación fue $\geq 10\text{mm}$	días
5	R20mm	Número de días con precipitaciones muy fuertes	Conteo anual de días cuando la precipitación fue $\geq 20\text{mm}$	días
6	R95p	Días muy húmedos	Total anual de PRCP cuando $RR >$ al percentil 95	mm
7	R99p	Días extremadamente húmedos	Total anual de PRCP cuando $RR >$ al percentil 99	mm
8	RX1day	Cantidad máxima de precipitación en 1 día	Máximo anual de precipitación en 1 día	mm
9	RX5day	Cantidad máxima de precipitación en 5 días	Máximo anual de precipitación en 5 días	mm
10	SDII	Índice simple de intensidad diaria	Precipitación anual total dividida entre el número de días húmedos en el año	mm/día

Fuente: Aguilar *et al.*, 2005.

El método empleado para el cambio de escala es el de Navarro-Racines *et al.* (2020) y los detalles se pueden encontrar en Hidalgo *et al.* (2024).

La delimitación de las subcuencas se realizó a partir de un modelo de elevación digital construido con las curvas de nivel de 10 m, escala 1:5 000 del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT). Se extrajeron las curvas de nivel con un área de influencia de 2 km al cantón Dota. Con la herramienta de Análisis de Terreno y el complemento de Hidrología se determinaron las acumulaciones de flujo, la red de canales y posteriormente las cuencas a partir de puntos de aforo que en algunos casos coincide con el límite del

cantón en el software SAGA GIS¹ (System for Automated Geoscientific Analyses). A cada cuenca se le calculó el área y se determinó el porcentaje que representa del cantón. Los datos fueron procesados en CRTM05 (EPSG: 5367) y se compartieron los vértices de las subcuencas en coordenadas geográficas (EPSG: 4326)

Para identificar las tendencias históricas y futuras en los eventos extremos se calcularon los índices de CLIMDEX (<https://www.climdex.org>; Aguilar *et al.*, 2005) usando los datos de las variables mencionadas para cada una de las subcuencas de Dota. En los Cuadros 3 y 4 se muestran las definiciones de los índices.

¹ <https://saga-gis.sourceforge.io/>

Cuadro 4. Lista de los índices de temperatura máxima diaria (Tmax) y mínima diaria (Tmin) de CLIMDEX.

Identificador	Nombre	Nombre del indicador	Definición	Unidades
1	CSDI	Indicador de la duración de la ola de frío	Conteo anual de días con al menos 6 días consecutivos cuando $TN < \text{percentil } 10$	% días
2	DTR	Rango de temperatura diurna	Diferencia de la media anual entre Tmax y Tmin	°C
3	TN10p	Noches frescas	Porcentaje de días cuando Tmin $< \text{percentil } 10$	% días
4	TN90p	Noches cálidas	Porcentaje de días cuando Tmin $> \text{percentil } 90$	% días
5	TNn	Mínima Tmin	Valor anual mínimo de Tmin diaria	°C
6	TNx	Máxima Tmin	Valor anual máximo de Tmin diaria	°C
7	TX10p	Días frescos	Porcentaje de días cuando Tmax $< \text{percentil } 10$	% días
8	TX90p	Días cálidos	Porcentaje de días cuando Tmax $> \text{percentil } 90$	% días
9	TXn	Mínimo Tmax	Valor mínimo anual de Tmax diaria	°C
10	TXx	Máximo Tmax	Valor máximo anual de Tmax diaria	°C
11	WSDI	Indicador de la duración de la ola de calor	Conteo anual de días con al menos 6 días consecutivos cuando $Tmax > \text{percentil } 90$	% días

Fuente: Aguilar *et al.*, 2005.

Se calcularon las tendencias de los índices usando regresión lineal junto con su significancia al 95% de confianza. A continuación se describen los principales resultados de los cálculos de los índices:

Precipitación: El análisis de las tendencias (1979-2099) en CDD y CWD implica que la manera en que llueve cambiará en el futuro, con períodos secos máximos más largos (en el noroeste del cantón) y períodos de lluvias máximos (temporales) cada vez más cortos.

El análisis de tendencias de los períodos 1979-2050 y 2051-2099 PRCPTOT, indica que podría aumentar en el mediano plazo,

pero luego se presentarían disminuciones importantes en la precipitación en la segunda mitad del siglo. El que la precipitación anual no cambie en el período histórico no significa que el cambio climático no pueda afectar los recursos hídricos, ya que los aumentos en la temperatura pueden afectar la demanda de agua de la atmósfera y reducir los caudales totales y en la recarga. La situación en la segunda mitad del siglo es muy crítica, ya que la aridez aumentaría por las reducciones en la disponibilidad de agua (precipitación) y aumentos en la demanda de agua causados por la evapotranspiración potencial (PET). El R10mm,

R20mm y SDII tienen resultados similares a PRCPTOT. Los resultados de los índices R95p y R99p confirman que, aunque el total *máximo* de duración de días secos consecutivos está creciendo en algunas regiones, las lluvias extremas capturan una fracción cada vez mayor de los totales anuales; esto tiene repercusiones en el aumento de posibles inundaciones y deslizamientos, y posibles afectaciones en la agricultura en el futuro del cantón.

Temperaturas máximas y mínimas: El indicador de la duración de la ola de frío (CSDI) muestra algo muy particular y es que a partir de aproximadamente 2020 no habrá más olas de frío en la región (de acuerdo con la definición del índice y considerando que la ola de frío está definida sobre el período histórico). El rango diurno de temperatura (DTR) tiene una señal muy clara en la región hacia disminuciones significativas a través del tiempo. Esto es producto de que, aunque Tmax está creciendo, Tmin está creciendo aún más y la diferencia entre ambas (DTR) está disminuyendo. TN10p (noches frescas) indica lo mismo que CSDI, aproximadamente en 2020 dejó de haber noches frías (según la definición de noche fría en el período histórico) y en cuanto a TN90p a partir de 2040 todas las noches serán cálidas. Los días frescos (TX10p) dejaron de existir en aproximadamente 2020. Por otra parte, el 100 % de los días se catalogarán como días cálidos (TX90p) en 2060. Los índices de valor anual mínimo de temperatura mínima diaria (TNn), valor anual máximo de temperatura mínima diaria (TNx), valor

mínimo anual de temperatura máxima diaria (TXn) y valor máximo anual de temperatura máxima diaria (TXx) muestran tendencias significativas positivas monotónicas en todas las variables y épocas en que se calcularon las tendencias. Es evidente que se proyecta un calentamiento de la región en las próximas décadas, tanto en el día como en la noche. El indicador de la duración de la ola de calor (WSDI) muestra un aumento en el porcentaje de días que son parte de olas de calor a través del tiempo, y en muchos años después del 2080 el 100 % de los días tienen temperaturas muy extremas (mayores al percentil 90 del período histórico).

En conclusión, se proyectan cambios significativos en los índices de extremos de precipitación y temperatura en el cantón Dota. Se encontró que la precipitación anual en días húmedos no ha cambiado en el período histórico (1979-2014), pero que podría aumentar significativamente si se considera la variación proyectada hasta mediados de siglo (1979-2050). Sin embargo, hacia la segunda mitad de siglo se proyecta una disminución drástica y significativa de la precipitación. Esto es particularmente preocupante porque se prevé que en esta época se experimenten los mayores aumentos en la temperatura promedio; y ambos efectos producirían aumentos en la aridez y reducciones drásticas en los recursos hídricos del cantón. Otra situación que se encontró es que la forma en que llueve también cambiará, hacia eventos extremos acumulando mayores totales de lluvia durante el año.

Esto plantea una disyuntiva, por un lado, existe el riesgo de que las sequías eventualmente se convertirán en una preocupación, pero el de inundaciones repentinas debidas a eventos hidrometeorológicos extremos también aumentará, tomando en cuenta que el tipo de suelo predominante que al ser arcilloso se expande con el agua y la infiltración es poca, pero con una mayor escorrentía. El problema del aumento en las sequías parece no ser una preocupación en el corto o mediano plazo, pero el de los eventos hidrometeorológicos húmedos extremos parece ser lo más apremiante (en la primera mitad del siglo). Por supuesto, siempre existirán años húmedos y secos producto de la *variabilidad climática natural* (no antrópica) del clima causado por diferentes forzantes climáticos como por ejemplo los eventos asociados con las fases cálidas (eventos tipo El Niño) o frías (eventos tipo La Niña) de El Niño-Oscilación del Sur, que pueden causar déficits o excesos de lluvia en años particulares que exacerbaban el efecto de la acción antrópica en el clima. Se recomienda empezar a gestionar los recursos hídricos para adaptarse a esta variabilidad, ya que constituye un primer paso en la dirección correcta ante la adaptación al cambio climático (Hidalgo-León *et al.*, 2015; Hidalgo, 2021).

Hay que tener en cuenta de que las conclusiones de este estudio están basadas en el ensamble de seis modelos climáticos usando el escenario pesimista de concentraciones, un método de cambio de escala estadístico, por lo cual es

importante que este estudio se complemente con un monitoreo constante de las variables hidrológicas y meteorológicas en el cantón (cabe destacar que no hay estaciones meteorológicas del IMN en las subcuencas del cantón, ni estaciones de caudal en los ríos).

Agradecimientos

Este trabajo se realizó dentro del marco del proyecto “Productos climáticos para el cantón Dota” (C2-806) apoyado por el Colegio Federados de Ingenieros y Arquitectos. Se agradece también al apoyo recibido a través de los siguientes proyectos inscritos en la Vicerrectoría de Investigación, Universidad de Costa Rica: B9454 (apoyado por Fondo de Grupos), C2103, C3991 (UCREA), A4906 (PESCTMA), B0810 y del apoyo brindado por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC), Ottawa, Canadá y el Consejo Superior Universitario Centroamericano (CSUCA) al proyecto RC4 (C4-468, CR-66, SIA 0054-23). Las opiniones aquí expresadas no representan necesariamente las del IDRC, CSUCA o las de la Junta de Gobernadores. HH y EA agradecen también a la Escuela de Física, UCR, por el tiempo cedido para realizar la investigación. A la estudiante Daniela Amador por su aporte en la cartografía y a la señora Kattia Bonilla Gamboa por las fotografías de la zona.

Referencias

- ArcGIS Pro. (2022). *Cómo funciona de Tópo a ráster*. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-topo-to-raster-works.htm#:~:text=La%20herramienta%20De%20topo%20a,1996%2C%202000%2C%202011>.
- Aguilar E., Peterson T. C., Obando P. R., Frutos R., Retana J. A., Solera M. and Valle V. E. (2005). Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110, 1-15. <https://doi.org/10.1029/2005JD006119>
- Almazroui, M., Islam, M. N., Saeed, F., Saeed, S., Ismail, M., Ehsan, M. A., Diallo, I., O'Brien, E., Ashfaq, M., Martínez-Castro, D., Cavazos, T., Cerezo-Mota, R., Tippet, M. K., Gutowski, W. J., Alfaro, E. J., Hidalgo, H. G., Vichot-Llano, A., Campbell, J. D., Kamil, S., Rashid, I. U., Sylla, M. B., Stephenson, T., Taylor, M., & Barlow, M. (2021). Projected Changes in Temperature and Precipitation Over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 GCMs. *Earth Syst Environ*, 5(1), 1-24. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00199-5>.
- Centro de Investigaciones Agronómicas. (2016). *Mapa de Suelos de Costa Rica*. <http://www.cia.ucr.ac.cr/es/mapa-de-suelos-de-costarica>
- Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017): *ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate*. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), Accedido: junio, 2022. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>
- Fick, S.E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12): 4302-4315.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M.,...
- Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146 (730), pp. 1999-2049
- Hidalgo, H. G. (2021). Climate Variability and Change in Central America: What Does It Mean for Water Managers? *Frontiers in Water*, 2, 632739. doi: 10.3389/frwa.2020.632739
- Hidalgo-León, H. G., Herrero-Madriz, C., Alfaro-Martínez, E. J., Muñoz, A. G., Mora-Sandí, N. P., Mora-Alvarado, D. A., & Chacón Salazar, V. H. (2015). Las aguas urbanas en Costa Rica/Urban Waters in Costa Rica. En: *Desafíos del agua urbana en las Américas. Perspectivas de las Academias de Ciencias/Urban water challenges in the Americas. A perspective from the Academies of Sciences*. Red Interamericana de Academias de Ciencias/The Inter-American Network of Academies of Sciences (eds.) (Hugo Hidalgo, editor del capítulo/ chapter editor). 208-233/202-225.
- Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J., & Quesada-Román, A. (En prensa). (2024). Flood projections for selected Costa Rican main basins using CMIP6 climate models downscaled output in the HBV hydrological model for scenario SSP5-8.5. *Hydrological Research Letters*, 17(4), 98-105.
- Navarro-Racines, C., Tarapues, J., Thornton, P., Jarvis, A., & Ramirez-Villegas, J. (2020). High-resolution and bias-corrected CMIP5 projections for climate change impact assessments. *Sci Data* 7, 7, doi: 10.1038/s41597-019-0343-8