



Caracterización del comportamiento futuro de la precipitación asociado al fenómeno de cambio climático en el área de producción hidroeléctrica embalse Arenal, Costa Rica

Characterization of the future behavior of precipitation associated with the climate change phenomenon in the hydroelectric production area Arenal reservoir, Costa Rica

Annette Marín Guzmán¹

Fecha de recibido: 28 de mayo de 2021

Fecha de aceptado: 14 de octubre de 2022

Resumen

La investigación abarca el estudio de la variabilidad de la precipitación asociada al proceso de cambio climático, en el área del embalse Arenal, Costa Rica, con el fin de identificar tendencias o comportamientos futuros que puedan generar alteraciones a la producción de hidroelectricidad. Se analizaron datos observados diarios de estaciones meteorológicas y series modeladas históricas de dos escenarios de forzamiento radiativo creciente (RCP 4.5 y RCP 8.5), con periodo base de 1971 al 2000, así como tres periodos futuros con horizonte al 2100 provenientes del modelo MRI-CGCM3 y regionalizados mediante técnicas estadísticas desarrolladas por AEMET.

El análisis de las variaciones futuras se llevó a cabo mediante el cálculo de índices climáticos definidos por el ETCCDI: índice de intensidad de precipitación simple, recuento anual de días cuando PRCP ≥ 1 mm,

¹ Profesional independiente, Costa Rica, correo electrónico: mannette92@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7016-05904>

duración máxima de la racha seca, duración máxima del período de lluvia y precipitación total anual en días húmedos.

A partir de estos, se identificó que en el área circundante al embalse Arenal, la precipitación presentaría alteraciones en intensidad y frecuencia, principalmente asociadas a disminuciones en la cantidad de precipitación anual, así como en el recuento de los días con lluvia y aumentos en la racha máxima de días secos consecutivos. En general, los índices que presentan variaciones significativas se caracterizan por efectos de mediana magnitud en comparación con los datos históricos, aunque índices como PRCPTOT, SDII y CDD presentarían cambios de efecto grande, principalmente entre el futuro medio y lejano, siendo la zona de Tilarán la más afectada, en comparación con la zona de La Fortuna.

Palabras clave: *cambio climático, precipitación, hidroelectricidad, embalse, índices climáticos.*

Abstract

Identifying and understanding the effects of climate change is critical to formulating optimal adaptation and mitigation measures. One of the priority issues for socioeconomic development is energy stability; however, some sources, such as hydroelectricity, are vulnerable to this phenomenon. Therefore, the main objective of the research is to identify the climatic variations that climate change could generate, with special emphasis on precipitation, in the hydroelectric production area of Arenal reservoir, Costa Rica.

The materials used include historical records of meteorological stations with a base period from 1971 to 2000, as well as modeled and downscaled series from the MRI-CGCM3 model, for the Central American zone, in two scenarios of increasing radiative forcing (RCP 4.5 and RCP 8.5) with future horizon to 2100.

Climatic variability was established by the calculation of climatic indices defined by the ETCCDI: simple precipitation intensity index, annual count of days when PRCP ≥ 1 mm, maximum duration of the dry spell, maximum duration of the period of rainfall and total annual precipitation on wet days.

The main findings of the research show evidence of alterations in the intensity and frequency of precipitation in the study area, mainly associated with decreases of medium magnitude in the amount of annual precipitation and the count of wet days, while there would be increases in the maximum length of dry spell, which is an unfavorable scenario for hydroelectric production and for other economic activities. In general, the indices that present significant variations are characterized by effects of medium magnitude compared to historical data, although indices such as PRCPTOT, SDII and CDD would present changes with a large effect, mainly between the medium and distant future, with the Tilarán area being the most affected, compared to the area of La Fortuna.

Key words: *climate change, precipitation, hydroelectricity, reservoir, climate indices.*

Introducción

Ante el panorama de cambio climático, se vuelve cada vez más necesario contar con fuentes de energía limpias, estables y seguras, que apoyen el desarrollo sostenible de las naciones. En este caso, la hidroelectricidad se perfila como una energía limpia y segura, no obstante, las alteraciones en el comportamiento de las variables climáticas, en especial la precipitación y la temperatura, ponen en riesgo su estabilidad espacio-temporal.

Las represas hidroeléctricas proporcionan servicios de producción eléctrica baja en emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), así como de almacenamiento y suministro de agua, control de inundaciones y recreación, lo cual las ha hecho populares alrededor del mundo, siendo actualmente la principal fuente de energía renovable con alrededor del 25% de la generación global (Hartmann, 2020).

A pesar de su popularidad, la hidroelectricidad enfrenta diversos retos ambientales, técnicos, económicos y culturales. Por ejemplo, debe competir con los precios de los hidrocarburos y los altos costos de construcción de los proyectos, además, asociado a las variaciones climáticas, los embalses de producción se ven afectados por procesos de sedimentación y erosión, incrementos en la evaporación y reducción de caudales, así como a cambios del uso del suelo (urbanización, fragmentación, pérdida de ecosistemas, desertificación) entre otros que disminuyen su productividad.

Según datos publicados por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe ([CEPAL], 2013, la demanda energética centroamericana al 2100, sin considerar los efectos del cambio climático, sería hasta diez veces mayor que la demanda de 2007, lo cual representaría un valor de 324 mil GWh. En el caso específico de Costa Rica, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) (2018), ha estimado ventas al 2040 de hasta 16 mil GWh en un escenario de alta demanda, el cual es bastante probable si se toman en cuenta las medidas de adaptación al cambio climático (sistemas de climatización, digitalización, transporte eléctrico, entre otras). Estos datos demuestran la magnitud de las presiones que enfrentarían los sistemas de producción y distribución de energía en la región centroamericana, necesarias para alcanzar el progreso socioeconómico según los modelos de desarrollo adoptados por estos países.

Los compromisos costarricenses relacionados a mitigación y adaptación al cambio climático se detallan en su Contribución Nacional Determinada (NDC por sus siglas en inglés), actualizada en el 2020. Para el eje de energía se han determinado seis contribuciones enfocadas en una ruta de desarrollo energético 100% renovable al 2030, para lo que se tratan temas de eficiencia energética, transporte eléctrico (pasajeros, carga e industria), promoción del hidrógeno verde y moratorias a la exploración y explotación de hidrocarburos en el territorio nacional.

Desde el 2015 la matriz eléctrica costarricense ha superado el 98% de generación con recursos limpios (Presidencia de la República de Costa Rica, 2019), con un aporte destacado de la hidroelectricidad que representa más del

67% (Grupo ICE, 2020), esto incluso cuando el país ha enfrentado los embates del fenómeno de El Niño y otras alteraciones climáticas regionales.

A pesar de contar con fuentes renovables diversas, que incluso producen excedentes de electricidad, en Costa Rica la estructura de consumo final de energía mantiene una gran dependencia de los derivados del petróleo, con alrededor del 66% en 2019 (Secretaría Planificación Subsector Energía ([SEPSE], 2019), consumidos mayoritariamente en el sector transporte, que a su vez es el responsable de alrededor del 50% de las emisiones de GEI en el territorio nacional, según datos del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI, 2015) (República de Costa Rica, 2019).

Las energías limpias representan una ventaja tanto para mitigar los efectos de cambio climático, como para la atracción de capitales e inversores, que son necesarios para lograr un futuro sostenible. A pesar de que Costa Rica promueva la generación energética renovable, su matriz energética continúa siendo dependientes de las variables climáticas a escala global, principalmente de la precipitación, por tanto, la seguridad energética se ha vuelto vulnerable ante los efectos del cambio climático.

Lo anterior plantea la interrogante de cuál será el comportamiento futuro de las variables climáticas a nivel nacional, ya que estas tienen consecuencias directas en el comportamiento del recurso hídrico y la recarga de los embalses utilizados en la producción energética. Para esto se analiza el comportamiento futuro de la precipitación en la zona de producción hidroeléctrica del embalse Arenal, el más extenso de Costa Rica, a partir de modelos y escenarios de cambio climático generados para la región centroamericana.

Área de estudio

El embalse Arenal se ubica entre los cantones de Tilarán y San Carlos, de las provincias de Guanacaste y Alajuela respectivamente (véase Figura 1). Se creó en 1979 como parte de la Planta Hidroeléctrica Arenal, administrada por el ICE.

Este reservorio tiene un área superficial de 87 km², un volumen útil de 1990 millones de m³, una profundidad media de 25.6 m y una longitud total de 29 km. La cota máxima de elevación es 545 msnm, sin embargo, durante el año presenta fluctuaciones de nivel de más de 10 m de amplitud (Umaña, 2006). Actualmente, es el único reservorio del país que permite el almacenaje de agua durante la estación lluviosa, para utilizarla en generación energética durante la estación seca (Presidencia de la República de Costa Rica, 2019).

El agua proveniente del embalse Arenal drena naturalmente hacia la vertiente Caribe, no obstante, es trasvasada hacia la vertiente Pacífico, donde es aprovechada para la generación eléctrica en tres plantas en cascada (Arenal, Dengo y Sandillal), con una potencia instalada conjunta de 363.4 MW, así como para el riego de áreas agropecuarias de la provincia de Guanacaste mediante el Sistema de Riego Arenal-Tempisque.

Según datos del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), la zona se caracteriza por un clima lluvioso de régimen Caribe, con una precipitación

media anual de 3100 mm y una temperatura media anual de 25 °C. Los meses donde se registran las mayores precipitaciones van de mayo a noviembre, mientras que los meses más secos van de diciembre a abril. La región norte presenta una vegetación de bosque muy húmedo subtropical, de mediana altura siempreverde de dos o tres estratos (Solano & Villalobos, 2000).

Este embalse cuenta con una diversidad ecológica y de actividades productivas importantes, por lo que en el año 2000 fue declarado Sitio Ramsar por la Convención de Humedales de Importancia Internacional (Vargas & León, 2012).



Figura 1. Mapa de ubicación del embalse Arenal y de las estaciones meteorológicas analizadas.

Datos y metodología

Las variaciones climáticas en el área próxima al embalse se analizaron mediante datos observados de precipitación acumulada diaria de estaciones meteorológicas cercanas, así como datos históricos y escenarios futuros de modelos regionalizados para Centroamérica.

Los datos observados corresponden a series temporales de frecuencia diaria registradas por dos estaciones meteorológicas del IMN, cuya ubicación se encuentra en el mapa de la Figura 1. Ambas estaciones fueron seleccionadas ya que cuentan con registros suficientes para el periodo base de 1971 al 2000, así como porcentajes de ausentismo menores al 20%. Las características principales de las series se muestran en el Cuadro 1.

Estas estaciones también registran la temperatura del aire, sin embargo, no se incluye en el análisis, ya que no se contaba con datos suficientes debido al

corto periodo de registro y al porcentaje de datos ausentes, lo cual limita la calidad de resultados derivados.

Cuadro 1. Metadatos de las series de precipitación de las estaciones analizadas

Estación	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altitud (msnm)	Fecha inicio	Fecha final	% datos ausentes
76002 Tilarán	10° 29' 52"	84° 56' 44"	562	1 de junio de 1948	30 de abril de 2007	9%
69540 La Fortuna de San Carlos	10° 28' 00"	84° 39' 00"	250	1 de mayo de 1971	28 de febrero de 1994	14%

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, 2020

En la Figura 2 se muestra el comportamiento mensual de la precipitación en las dos estaciones de estudio. Los datos mostrados son los observados durante el periodo base (1971-2000). En ambos gráficos se identifica fácilmente el comportamiento estacional de la precipitación, con una estación lluviosa de mayo a noviembre y una estación seca de diciembre a abril.

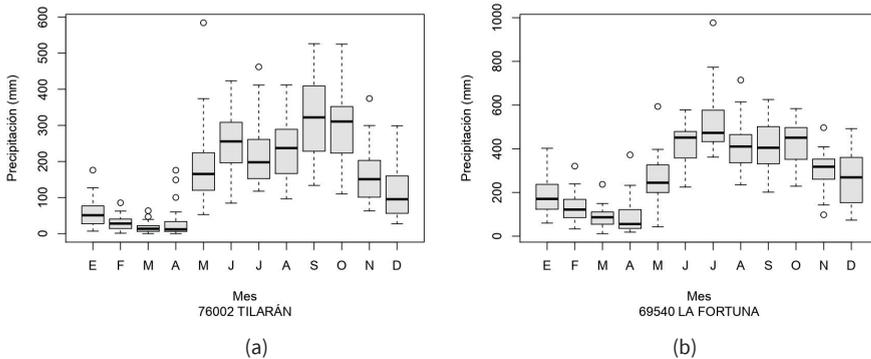


Figura 2. Régimen de precipitación mensual (a) estación 76002, Tilarán, (b) estación 69540, La Fortuna.

Los datos históricos y escenarios futuros modelados fueron descargados del *Visor de escenarios de cambio climático sobre Centroamérica* del programa EUROCLIMA+. Este visor permite consultar proyecciones regionalizadas de cambio climático para los países centroamericanos, realizadas mediante las proyecciones globales del Quinto Informe de Evaluación (AR5) del IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático) (EUROCLIMA+, 2020).

Desde la página web (<https://centroamerica.aemet.es/>) es posible descargar registros históricos de frecuencia diaria de variables e índices climáticos en el periodo base de 1971 al 2000, así como series diarias en escenarios futuros con cuatro gradientes crecientes de forzamiento radiativo

(*Representative Concentration Pathways*, RCP por sus siglas en inglés) para el año 2100, provenientes de varios modelos regionalizados.

Para el presente análisis se trabajó con las series diarias de precipitación histórica y escenarios futuros (RCP 4.5 y RCP 8.5) del modelo MRI-CGCM3. Este modelo, desarrollado por el *Meteorological Research Institute* (MRI), fue regionalizado mediante técnicas estadísticas desarrolladas en la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), con lo cual se alcanzó una resolución de rejilla de $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ para la variable de precipitación.

Las variaciones climáticas fueron analizadas a partir del cálculo de índices climáticos, definidos por el Equipo Experto de la Detección e Índices del Cambio Climático, ETCCDI por sus siglas en inglés. Los índices de interés se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Índices de Cambio Climático del ETCCDI analizados

<i>Índice</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidad</i>
PRCPTOT	Precipitación total anual en días húmedos (PRCP \geq 1 mm)	mm
SDII	Índice de intensidad de precipitación simple	mm/días
R1mm	Recuento anual de días cuando PRCP \geq 1 mm	días
CWD	Duración máxima del período de lluvia, número máximo de días consecutivos con PRCP \geq 1 mm	días
CDD	Duración máxima de la racha seca, número máximo de días consecutivos con PRCP $<$ 1 mm	días

Por tanto, la metodología seguida inició con el análisis exploratorio de las series de tiempo observadas, a partir del cálculo de estadísticos descriptivos y análisis gráfico. Esto con el fin de identificar tendencias, anomalías o falta de homogeneidad en los datos. Los datos atípicos y máximos estacionales fueron analizados contra datos históricos de eventos climáticos generadores de exceso de precipitación sobre el territorio nacional, como lo son los huracanes del Caribe y el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), en su fase fría o La Niña. Todos los datos atípicos coincidieron con este tipo de eventos, por lo que no se consideró excluirlos o corregirlos, con el fin de no afectar la variabilidad intrínseca de la precipitación observada.

Seguidamente, se identificó el modelo de mejor ajuste para las series observadas, según los datos disponibles en el visor de EUROCLIMA+. En este caso se contó con 17 modelos análogos, con una resolución de 5.5 km para la variable de precipitación. Por tanto, para el análisis se seleccionaron los cuatro puntos de medición de los modelos más cercanos a cada estación meteorológica, con el fin de ser utilizados como patrón de comparación con los datos observados.

Para esto fue necesario trasladar los datos históricos del modelo al punto de ubicación de la estación. El traslado se realizó mediante el método de

ponderación por el inverso de la distancia, IDW por sus siglas en inglés. Este método se sustenta en la ponderación de registros del entorno, mediante una función inversa de la distancia que separa cada punto de medición con el punto de interés. Por tanto, la serie de datos históricos modelados en cada estación se determinó mediante la ponderación espacial de las cuatro series de los puntos de rejilla circundantes.

Con las series observadas y las históricas modeladas en cada punto de estación, se procedió a la comparación cuantitativa y cualitativa de las series, con cada uno de los 17 modelos disponibles. Esto se realizó mediante el cálculo de estadísticos de comparación (coeficiente de correlación, coeficiente de Nash-Sutcliffe y raíz del error medio cuadrático), modelos de regresión lineal, así como por medio de los estadísticos descriptivos (medidas de tendencia central y dispersión), de forma cuantitativa y gráfica. Con esto se determinó que la serie histórica del modelo MRI-CGCM3, es la que mejor se ajusta al comportamiento observado de la precipitación en ambas estaciones, ya que los demás modelos tienden a subestimar las observaciones generales y a sobreestimar los registros máximos estacionales.

Una vez definido el modelo de mejor ajuste, se calcularon los índices climáticos descritos en el Cuadro 2, para las series históricas (1971-2000) y las series futuras (2010-2040, 2041-2070, 2071-2100) en dos escenarios RCP (RCP4.5 y RCP8.5) para las series trasladadas al punto de observación. Luego se analizaron las tendencias y el comportamiento futuro de la precipitación mediante métodos cuantitativos y gráficos.

Para identificar la existencia de diferencias estadísticamente significativas en la magnitud de los índices del periodo histórico y los futuros, se realizó un análisis de contraste mediante pruebas de hipótesis. Para esto se aplicó la prueba t-Student de dos colas para muestras independientes, con hipótesis nula de igualdad de medias ($H_0: \mu_1 = \mu_2$), para lo que fue necesario comprobar los supuestos de normalidad, independencia e igualdad de varianzas.

Debido a que las series se componen de al menos 30 datos cada una, la prueba t-Student es robusta incluso cuando la normalidad se ve comprometida (Amat, 2016), sin embargo, en dichos casos los resultados fueron comprobados mediante la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney; mostrando consistencia con los resultados de la prueba anterior. En el caso donde, con una significancia de 0.05, se consideró que existía suficiente evidencia estadística para asumir que las medias eran distintas se calculó el tamaño del efecto mediante la d de Cohen, el cual informa la diferencia en desviaciones estándar entre los dos grupos comparados; el efecto es calificado como pequeño ($d > 0.20$), mediano ($d > 0.5$) o grande ($d > 0.80$) (Ventura-León, 2018).

Resultados y discusión

El comportamiento futuro de la precipitación se analizó de forma simplificada a partir del cálculo de índices climáticos y de sus estadísticos descriptivos.

Para esto se calcularon cinco índices para los datos históricos del periodo base (1971-2000) y de tres escenarios futuros: futuro próximo del 2011 al 2040, futuro medio del 2041 al 2070 y futuro lejano que va del 2071 al 2100.

Debido a la marcada estacionalidad de la precipitación en el área de estudio, los índices fueron calculados anualmente considerando dicho comportamiento, es decir, los resultados presentados a continuación se subdividen en estación lluviosa y estación seca para cada año durante los tres periodos futuros. Esto con el fin de contar con un panorama más amplio, ya que la agrupación anual puede ocultar detalles de la ocurrencia de eventos extremos de precipitación o sequía, que son de interés en la investigación.

En el Cuadro 3 se muestran el valor promedio, la desviación estándar y la pendiente del modelo de regresión lineal de los índices climáticos durante el periodo base según los datos históricos. A partir del análisis de estacionariedad de los índices anuales durante el periodo base, se tiene que el valor promedio es un buen indicador para resumir su comportamiento temporal, ya que los valores anuales no muestran fluctuaciones bruscas, debido a esto, los valores promedio de los índices del periodo base son utilizados como medida de referencia para caracterizar el comportamiento de los índices en los tres periodos futuros.

Durante el periodo base, la precipitación total anual registrada en la zona del embalse Arenal varió en promedio de 1418 mm en la zona alta y alrededor de 3289 mm en la zona baja, de estos el 80% ocurrió durante la época lluviosa. Debido a la topografía y a la influencia de los vientos Alisios, en la localidad de La Fortuna se presentaron lluvias de magnitudes mayores al doble que las que caracterizan a la zona alta, donde se alimenta principalmente el embalse. No obstante, solamente en el sector de Tilarán se presentó una tendencia positiva del índice PRCPTOT durante los meses más lluviosos.

El índice de intensidad de precipitación simple (SDII), establece la relación entre la precipitación diaria de los días húmedos (precipitación ≥ 1 mm) y la cantidad de días con lluvia, por tanto, es la medida ponderada de lluvia de cada día húmedo del año. En el periodo de 1971 al 2000, en la zona de Tilarán llovieron alrededor de 11 mm cada día húmedo, mientras que en La Fortuna fueron aproximadamente 21 mm/día. En ambos sitios el valor promedio de SDII durante la época lluviosa y la época seca mostró muy poca variación.

Con respecto a la cantidad de días con lluvia ($R1mm$), se observó un comportamiento estable a lo largo del periodo base, tanto en la estación lluviosa como en la seca. En la estación Tilarán se registró precipitación en promedio durante 125 días al año, de estos 98 días se ubican entre los meses de mayo a noviembre y los restantes 27 días de lluvia ocurrieron en la estación seca. En el caso de La Fortuna, 112 días de lluvia tuvieron lugar en la estación lluviosa y cerca de 47 días durante la estación seca. En este caso se nota que a pesar de que la precipitación es bastante menor en cantidad y ocurrencia durante la estación seca, a lo largo del año no hay una ausencia completa de precipitación, esto es estratégico para asegurar el funcionamiento continuo del embalse, así como de otras actividades productivas.

Cuadro 3. Resumen de los estadísticos descriptivos y tendencias de los índices climáticos para el periodo base (1971-2000) en las estaciones de análisis

Índice	76002 Tilarán Estación Lluviosa			69540 La Fortuna Estación Lluviosa		
	Promedio	Desv. Estándar	Pendiente	Promedio	Desv. Estándar	Pendiente
PRCPTOT (mm)	1127.18	163.58	2.88	2267.43	285.27	-0.46
SDII (mm/día)	11.47	0.75	0.00	20.23	1.60	-0.01
R1mm (días)	98.23	12.37	0.26	112.10	11.03	0.05
CWD (días)	13.17	4.96	-0.07	16.60	7.11	-0.13
CDD (días)	10.80	4.89	-0.10	9.60	4.06	0.09

Índice	76002 Tilarán Estación Seca			69540 La Fortuna Estación Seca		
	Promedio	Desv. Estándar	Pendiente	Promedio	Desv. Estándar	Pendiente
PRCPTOT (mm)	291.11	83.03	-1.19	1021.72	296.32	-1.41
SDII (mm/día)	10.80	2.65	-0.04	21.84	5.10	-0.01
R1mm (días)	27.10	5.38	0.00	46.80	7.55	-0.01
CWD (días)	3.33	1.12	0.00	5.23	1.65	-0.03
CDD (días)	29.50	11.06	-0.26	18.77	5.26	-0.09

Relacionado a esto, se analizó el índice CWD, definido como el máximo de días húmedos consecutivos. Este permite establecer los periodos de lluvia continua que alimentan al reservorio, los cuales deben ser tomados en consideración tanto para la producción energética como para la gestión del riesgo de desastre, ya que lluvias persistentes pueden representar riesgos de inundación o sobre flujos que pueden afectar el funcionamiento normal de la planta hidroeléctrica.

Según los registros del periodo base, durante los meses lluviosos se presentaron en promedio rachas de máximo 13 días continuos de lluvia en Tilarán y cerca de 17 días continuos en La Fortuna. En cuanto al periodo seco, se contabilizaron en promedio tres días continuos con precipitación en la

zona alta y hasta cinco días continuos en la zona baja del embalse. El índice CWD presentó un comportamiento estable durante el periodo de estudio, sin evidencia significativa de crecimiento o decrecimiento.

Por último, el índice CDD se define como el máximo de días secos consecutivos, es decir, aquellos días con precipitación acumulada por debajo de 1 mm. Este permite identificar la duración de periodos secos, que pueden provocar inestabilidades en la producción hidroeléctrica. La máxima racha seca se presentó en Tilarán durante la temporada seca, con un promedio de hasta 30 días consecutivos sin lluvia, mientras que en el sector de La Fortuna se experimentaron en promedio 19 días consecutivos sin lluvia.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los índices de interés según los datos del modelo MRI-CGCM3 para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. En los cuadros se muestran el valor promedio, la desviación estándar, la pendiente del modelo de regresión lineal, el valor-p de la prueba t-Student de contraste de medias y el tamaño del efecto representado por el valor de la d de Cohen. En este caso solamente se muestran los índices, que con una significancia de 0.05, demostraron suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula de igualdad de medias (valor-p < 0.05), es decir, los índices cuya media es significativamente distinta a la del periodo base.

Escenario RCP 4.5

El escenario RCP 4.5 describe una trayectoria de concentración atmosférica de GEI con un forzamiento radiativo que se estabiliza en 4.5 W/m^2 después del 2100, por lo que, según el IPCC (2014), es considerado un escenario intermedio. En términos generales es comparable con el escenario B1 del *Informe Especial del IPCC sobre Escenarios de Emisiones (IE-EE)* (IPCC, 2014), caracterizado por una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados de siglo para luego descender, así como por un crecimiento económico enfocado en servicios, información y el desarrollo de tecnologías limpias, que apoyan las soluciones globales para la sostenibilidad económica, social y ambiental (IPCC, 2007).

En el Cuadro 4 se exhiben los resultados para la localidad de la estación Tilarán, ubicada aguas arriba del embalse Arenal. Según las condiciones de este escenario se esperarían variaciones significativas en todos los índices analizados al menos durante alguno de los tres periodos futuros; solamente el índice SDII muestra diferencias significativas durante todo el periodo de estudio.

En el Cuadro 5 se resumen los resultados para los índices con variaciones significativas durante todo el periodo de estudio en la zona de La Fortuna. A partir de este se advierte que el futuro lejano es donde se esperan cambios más generalizados en el comportamiento de la precipitación, además, en el futuro medio las condiciones son estadísticamente similares a las del periodo base, ya que no se identificaron alteraciones significativas en ninguno de los índices analizados.

Cuadro 4. Resumen de las características generales de los índices climáticos con variaciones significativas durante el periodo futuro del escenario RCP 4.5 en la estación 76002 , Tilarán

<i>Escenario</i>	<i>Índice-Estación*</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Pendiente</i>	<i>Valor- p</i>	<i>Tamaño del efecto</i>	
Futuro próximo	PRCPTOT-SC	244.31	77.07	2.35	0.027	0.58	
2011-2040	SDII-SC	9.45	2.42	0.02	0.043	0.53	
Futuro medio	CWD-LL	11.23	4.61	-0.14	0.041	0.40	
2041-2070	SDII-SC	9.22	1.97	0.04	0.011	0.68	
Futuro lejano	PRCPTOT-LL	1029.26	178.43	-2.17	0.031	0.57	
	R1MM-LL	90.47	11.40	-0.14	0.014	0.65	
	CDD-LL	13.67	4.87	-0.01	0.027	0.59	
	2071-2100	PRCPTOT-SC	235.59	86.59	2.47	0.014	0.65
	SDII-SC	8.39	1.93	0.01	0.000	1.04	

*Estación climatológica: estación seca (SC), estación lluviosa (LL).

Cuadro 5. Resumen de las características generales de los índices climáticos con variaciones significativas durante el periodo futuro del escenario RCP 4.5 en la estación 69540, La Fortuna

<i>Escenario</i>	<i>Índice-Estación*</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Pendiente</i>	<i>Valor-p</i>	<i>Tamaño del efecto</i>	
Futuro próximo	CWD-SC	4.40	1.10	-0.03	0.026	0.59	
2011-2040							
Futuro medio	—	—	—	—	—	—	
2041-2070							
Futuro lejano	PRCPTOT-LL	2095.81	293.18	-4.16	0.025	0.59	
	R1mm-LL	105.50	9.50	0.05	0.016	0.64	
	CWD-LL	12.70	4.43	0.02	0.014	0.66	
	2071-2100	CWD-SC	4.63	1.65	0.04	0.037	0.36
	CDD-SC	16.20	5.05	0.12	0.010	0.50	

*Estación climatológica: estación seca (SC), estación lluviosa (LL).

De acuerdo con los resultados anteriores, a lo largo del futuro próximo los cambios en el comportamiento de la precipitación se estarían dando principalmente durante la estación seca, tanto en la zona alta como baja del embalse. En general se esperarían disminuciones de la precipitación total y en la cantidad de lluvia durante los días húmedos, así como en la racha de días húmedos continuos.

Específicamente en el área de Tilarán, el índice PRCPTOT experimentaría en promedio reducciones de hasta 16% con respecto a la media del periodo base, mientras que para el índice SDII la disminución sería en promedio del 13%. En cuanto a la zona baja del embalse, en las cercanías de la estación La Fortuna, solamente el índice CWD mostraría variaciones significativas en su comportamiento con respecto al periodo histórico, ya que según los datos del modelo este se contraería un 16%, con un valor medio de alrededor de 4.40 días consecutivos de lluvia durante la estación seca. En este caso, el efecto del forzamiento radiativo en los índices es de mediana magnitud durante este periodo futuro.

Para los siguientes 30 años, en el futuro medio, los principales efectos del aumento en la concentración de GEI en la atmósfera se observarían en la zona de Tilarán, siendo los índices SDII y CWD los que cambiarían notablemente, el primero durante la estación seca y el segundo durante la estación lluviosa. La máxima racha lluviosa durante los meses de mayo a noviembre sería en promedio de 11 días, lo que representa una reducción de dos días con respecto al dato base, lo que indica un efecto leve. En cuanto al SDII de la estación seca, cada día húmedo se registrarían en promedio 9.21 mm/día, en contraposición a los 10.80 mm/día del periodo histórico, lo que representa lluvias aproximadamente 15% menos intensas, con un efecto medio sobre el valor del índice.

Avanzando, en el futuro lejano es donde la precipitación experimentaría las mayores alteraciones, ya que en cuatro de los cinco índices analizados hay variaciones relevantes al menos durante alguna de las estaciones del año. En la zona de Tilarán se observarían disminuciones del índice PRCPTOT durante todos los meses del año, aunque con mayor magnitud durante la estación seca, ya que en promedio se registrarían 236 mm entre los meses de diciembre y abril, es decir, 19% menos que durante el periodo base.

Durante la estación lluviosa, la precipitación total se vería disminuida alrededor de 9% en las cercanías del embalse, en la zona alta la precipitación total de los meses lluviosos rondaría en 1029 mm, mientras que en la zona baja serían 2096 mm, en ambos el efecto es de mediana magnitud según el valor de la *d* de Cohen.

En esta misma estación, el recuento anual de días de lluvia también se vería afectado, en el caso de la estación Tilarán, durante el futuro lejano habría en promedio 90 días de lluvia de mayo a noviembre, lo cual representa una disminución del 8% con respecto al valor medio del periodo base; mientras que en La Fortuna se tendría en promedio 105 días de lluvia para el mismo periodo, por lo que la disminución sería de un 6%.

Por otro lado, las disminuciones en el índice CDW se agudizan en la parte baja del embalse con reducciones progresivas durante los tres periodos futuros, pasando de 17 días consecutivos durante el periodo base a solamente 13 días durante el futuro lejano. Durante la estación seca el índice CWD no presenta tendencias generalizadas a la baja o al alza del 2011 al 2100, su moda se mantiene en tres días consecutivos en la zona de Tilarán y en cinco días consecutivos en La Fortuna, los mismos valores promedio durante el periodo histórico.

A lo largo de los meses lluviosos del periodo base, el CDD tomó valores muy similares entre las estaciones de Tilarán y La Fortuna, en promedio de 10 y 11 días consecutivos respectivamente; esta racha se mantendría durante la época lluviosa del futuro próximo y medio, sin embargo, a partir del 2071 se esperan aumentos alrededor del 27% en Tilarán y del 10% en La Fortuna, lo que representa rachas secas en promedio de 14 días en la zona alta. Además, en este periodo se identificaron rachas secas máximas de hasta 25 días en Tilarán y 21 días en La Fortuna, lo que indica que al menos durante tres semanas seguidas de la época lluviosa presentarán condiciones de sequía. Propiamente en la estación seca, este índice experimentaría aumentos considerables en la zona de La Fortuna, donde las rachas secas serían en promedio de 16 días consecutivos, lo que puede interferir en la producción de electricidad.

Escenario RCP 8.5

El escenario RCP 8.5 contempla una trayectoria de muy alto nivel de emisiones de GEI, con un forzamiento radiativo total para el año 2100 de 8.5 W/m². Esta trayectoria de concentración es equivalente, en términos generales, al escenario A1FI del EE-IE (IPCC, 2014), caracterizado por un crecimiento poblacional que alcanza su máximo a mediados del siglo, con una utilización intensiva de combustibles fósiles a pesar del desarrollo de tecnologías más eficientes (IPCC, 2000).

Seguidamente se detallan los resultados de los índices con variaciones significativas de acuerdo con los datos de este escenario. En el Cuadro 6 se muestran los resultados de la zona de Tilarán; esta se caracterizaría por alteraciones en el comportamiento de la precipitación principalmente en el transcurso del futuro medio y lejano, tanto en la estación lluviosa como en la estación seca, con especial énfasis en la cantidad de agua llovida.

En cuanto a la zona baja del embalse, en las cercanías de La Fortuna, la precipitación también modificaría su comportamiento respecto de la línea base; en el futuro próximo se esperarían alteraciones en su distribución temporal especialmente a lo largo de la estación seca, mientras que en los años siguientes los cambios se propagarían a lo largo del año, con particular importancia en la precipitación total, número de días lluviosos y la racha de días secos consecutivos.

Conforme al comportamiento de los índices según las condiciones de este escenario, el área del embalse Arenal presentaría alteraciones significativas

en la distribución temporal de la precipitación, principalmente durante la estación seca, mientras que las principales alteraciones en cuanto a la cantidad de lluvia se observarían durante los meses típicamente lluviosos.

Cuadro 6. Resumen de las características generales de los índices climáticos con variaciones significativas durante el escenario RCP 8.5 en la estación 76002, Tilarán

<i>Escenario</i>	<i>Índice- Estación*</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Pendiente</i>	<i>Valor-p</i>	<i>Tamaño del efecto</i>
Futuro próximo 2011-2040	CDD-LL	13.57	5.04	0.30	0.035	0.56
	CDD-SC	23.93	5.72	0.15	0.018	0.63
Futuro medio 2041-2070	PRCPTOT-LL	991.47	188.45	3.83	0.004	0.77
	SDII - LL	10.96	0.83	0.03	0.016	0.64
	R1mm-LL	90.20	14.39	0.17	0.024	0.60
	CDD-LL	13.70	4.78	0.10	0.024	0.60
	SDII-SC	9.28	1.83	0.03	0.012	0.67
Futuro lejano 2071-2100	PRCPTOT-LL	1028.45	185.04	-6.62	0.033	0.57
	R1mm-LL	88.33	12.80	-0.47	0.003	0.79
	CDD-LL	15.23	5.96	0.21	0.003	0.81
	PRCPTOT-SC	250.64	72.57	-0.09	0.049	0.52
	SDII-SC	8.49	2.40	0.01	0.001	0.91

*Estación climatológica: estación seca (SC), estación lluviosa (LL).

Cuadro 7. Resumen de las características generales de los índices climáticos con variaciones significativas durante el escenario RCP 8.5 en la estación 69540, La Fortuna

<i>Escenario</i>	<i>Índice - Estación*</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Pendiente</i>	<i>Valor - p</i>	<i>Tamaño del efecto</i>
Futuro próximo 2011-2040	CWD-SC	4.37	1.16	0.05	0.023	0.61
	CDD-SC	16.47	5.01	0.00	0.013	0.45
Futuro medio 2041-2070	PRCPTOT-LL	2025.06	331.46	5.01	0.004	0.78
	SDII-LL	18.99	1.78	-0.01	0.006	0.74
	CDD-SC	14.97	3.69	0.06	0.002	0.84
Futuro lejano 2071-2100	PRCPTOT-LL	2051.73	297.83	-14.68	0.006	0.74
	R1mm-LL	103.27	10.10	-0.52	0.002	0.84
	CWD-LL	14.07	6.06	-0.23	0.046	0.38
	CWD-SC	4.50	1.36	-0.02	0.028	0.48
	CDD-SC	16.47	4.34	-0.08	0.015	0.48

*Estación climatológica: estación seca (SC), estación lluviosa (LL).

En relación a lo anterior, a lo largo del futuro próximo las variaciones representativas se reflejarían en los índices CDD y CDW, en ambos sitios de medición, las cuales serían de mediana magnitud según el tamaño el efecto calculado. A lo largo de los meses secos, el índice CDD se vería reducido en un 19% en el área de Tilarán, por lo que en promedio la racha máxima de días secos consecutivos sería de 24 días, mientras que en el sector de la Fortuna el índice experimentaría disminuciones en promedio del 12%; esto quiere decir que las rachas secas serían menos intensas, aunque, al no haber alteraciones en la cantidad de lluvia, podrían esperarse lluvias más frecuentes, pero de menor intensidad. Sin embargo, se advierte un comportamiento contrario durante la estación lluviosa de la zona alta del embalse Arenal, ya que el índice CDD experimentaría aumentos significativos, por lo que la racha de días secos se ampliaría en promedio un 26%, pasando de 11 días consecutivos en el periodo histórico a alrededor de 13.5 días durante el futuro próximo.

En el caso del índice CWD, durante la estación lluviosa se esperarían en promedio 12 días consecutivos de lluvia en la zona de Tilarán y 14 días en el sector de La Fortuna, por lo que la racha lluviosa experimentaría disminuciones de entre 9% y 16% con respecto a los valores medios históricos de este índice. Las condiciones esperadas no varían considerablemente con respecto a las del escenario anterior, aunque los valores extremos del índice son en general más bajos en el escenario RCP 8.5, lo que indica un comportamiento más restringido en la fluctuación de los días de lluvias persistentes. En cuanto a la estación seca, el índice CWD mantendría un valor promedio de tres días consecutivos con lluvia en la estación Tilarán durante los tres periodos futuros, al igual que durante el periodo base. Por su parte, en La Fortuna el índice tendría un valor promedio cercano a los 4.5 días, lo que representa una leve baja con respecto al CWD de la línea base cuyo valor es de cinco días, por lo que a pesar de que sus variaciones son significativas, especialmente en La Fortuna, el efecto del aumento en la concentración de GEI es leve en este índice, lo cual generaría un comportamiento estable a lo largo del periodo de estudio, con mayores afectaciones en el sector aguas abajo del embalse.

Al alcanzar el futuro medio, se experimentarían cambios tanto en la distribución temporal como en la cantidad de lluvia a lo largo del área de estudio. A partir del 2041 la precipitación total anual se vería reducida en especial durante los meses de la estación lluviosa. En el área de Tilarán la precipitación total de los meses de mayo a noviembre se reduciría en promedio un 12%, representado por un PRCPTOT promedio de 991.5 mm cada año; dicho comportamiento es generalizado para la zona aguas abajo del embalse, ya que según los datos del modelo trasladados a la estación La Fortuna, aquí la precipitación total disminuiría en promedio 11%, lo que supone un promedio anual de 2025 mm durante la estación lluviosa.

En el periodo de 2041 al 2070 se observa claramente una tendencia a la baja en el índice SDII en ambos sitios de medición, caracterizado por decrecimientos promedio de 4% a 6% durante la estación lluviosa. En La

Fortuna se esperan aumentos leves de la precipitación media de los días con lluvia de la época seca con un valor promedio de 22.42 mm/día, no obstante, la escorrentía aguas abajo del embalse no es aprovechable para la generación energética, aunque sí para otros usos principalmente agropecuarios y turísticos.

Durante la estación seca se muestra una tendencia generalizada a la baja del índice SDII en la zona de Tilarán con valores promedio de decrecimiento de 11% durante el futuro cercano, 14% durante el futuro medio y hasta 21% en el futuro lejano, dichos resultados son similares a los obtenidos en el escenario RCP 4.5 por lo que el aumento de forzamiento radiativo no parece ser un factor aislado en este comportamiento decreciente.

Con respecto a la cantidad de días de lluvia, R1mm, se identificó una tendencia estable a lo largo de la temporada lluviosa del futuro medio, sin embargo, con valores bastante menores a los de la línea base. Por ejemplo, durante la época lluviosa del futuro medio, el índice R1mm presenta los valores más bajos registrados por el modelo, lo que implica en promedio disminuciones de entre 5% y 8% para la zona baja y alta del embalse Arenal respectivamente, y valores máximos de entre 30% y 43%. En la zona de Tilarán en general se esperarían valores por debajo del promedio histórico, con una media de 90 días de lluvia de mayo a noviembre. En La Fortuna se mantendrían una distribución de frecuencia bastante similar a la del periodo base a lo largo de todo el año.

En el transcurso del futuro medio también se identificaron alteraciones en la cantidad de días secos continuos en ambos sitios de medición, aunque en la zona de Tilarán ocurrirían en los meses lluviosos, mientras que en La Fortuna los cambios se experimentarían en la época seca. Aguas arriba, el índice CDD obtendría un valor promedio de 13.70 días, lo que denota un aumento del 27% en relación al valor medio histórico, esto representa uno de los escenarios más desfavorables para la producción energética, ya que al verse reducida la precipitación total y aumentada la racha de días secos consecutivos, el caudal de los ríos y el relleno del embalse se ven comprometidos. Dicha afectación ocurriría solamente durante los meses lluviosos en la zona alta, mientras que, en La Fortuna, el índice CDD se vería reducido, pero esta vez en la temporada seca, alcanzando un valor promedio de 14.97 días, lo que representa un tamaño de efecto alto ($d = 0.84$). Al reducirse la precipitación total y la racha de días secos consecutivos se esperarían precipitaciones menos intensas y dispersas a lo largo de los meses secos, lo que, asociado al aumento de la temperatura, el comportamiento de los vientos y otros factores antrópicos pueden generar afectaciones en la calidad de los suelos, erosión y en eventuales problemas de sedimentación en el embalse.

Por último, en el futuro lejano, habría continuidad en el comportamiento de los índices con respecto al del futuro medio, ya que se mantendría la condición de disminución de los índices PRCPOT, R1mm, SDII y CWD, así como aumentos en el CDD especialmente durante la estación lluviosa.

La precipitación total de los meses lluviosos presenta una tendencia generalizada a la baja, en ambos sitios de medición, siendo la zona de La Fortuna la más afectada por esta tendencia, con una diferencia en promedio de 10% entre el valor medio del periodo y el valor medio de la línea base, por tanto, este comportamiento es clasificado como de efecto medio; esta tendencia decreciente se acentuaría desde el inicio del futuro medio (2041). Además, durante el último quinquenio del periodo de estudio (2095-2100), la precipitación acumulada anual de la época lluviosa en el área del embalse Arenal muestra valores por debajo del promedio de la línea base, lo que repercutirá significativamente en la estabilidad de la producción hidroeléctrica al finalizar el siglo XXI.

Por su parte, durante la época seca, la contabilización de precipitación es bastante constante a lo largo del periodo de estudio, las mayores variaciones ocurrirían en la estación de Tilarán hacia el futuro lejano, con déficits de lluvias de hasta 14% con respecto al valor promedio de la línea base. En la estación de la Fortuna, la precipitación presentaría un comportamiento bastante similar al observado durante el periodo base, en promedio la disminución sería cercana al 1%, con valores promedio en el rango de los 1000 a los 1010 mm anuales durante la época seca.

Asociado a la reducción de la precipitación total, también se esperaría que el índice de intensidad de precipitación simple (SDII) disminuya en magnitud, por lo que las lluvias serían más débiles, en especial durante la época seca. En Tilarán, durante el futuro lejano solamente en tres años aislados se superaría el valor medio histórico del índice, por lo que a pesar de que la tendencia del índice entre los años 2071 y 2100 sea estable, los valores son en promedio un 21% menores a los registrados durante el periodo base, lo que se clasifica como un efecto grande. Como ha sido mencionado con anterioridad, este es un comportamiento que tienen inicio desde el futuro próximo y se mantiene, cada vez más pronunciado, hasta el final del periodo de estudio, en ambos escenarios, por lo que es un comportamiento bastante probable, debe dársele importancia en la planificación de la producción eléctrica, con mayor énfasis en los meses secos del año.

En el caso de que las condiciones del escenario RCP 8.5 fueran las esperadas, el índice R1mm sufriría mayores fluctuaciones, ya que con el aumento en la concentración de GEI y el consecuente aumento de la temperatura, los porcentajes de disminución de días de lluvia son cercanos al doble de los esperados en el escenario anterior. Además, durante el futuro lejano se observan valores consecutivos por debajo del valor promedio histórico en ambas estaciones durante la temporada lluviosa, particularmente desde el año 2077, con una tendencia a la baja para los años siguientes si se mantiene las condiciones del escenario RCP 8.5, por lo que el efecto del aumento en el forzamiento radiativo es grande tanto en Tilarán ($d = 0.79$) como en La Fortuna ($d = 0.84$).

Otra modificación en el comportamiento de la precipitación, serían las identificadas según los valores del índice CWD, cuyo efecto es significativo

solamente en el área de La Fortuna, sin embargo, estaría presente a lo largo de todo el año, tanto en la época seca como lluviosa. A partir del 2071, la racha máxima de días con lluvia disminuiría en promedio un 15% en los meses lluviosos y un 14% en los meses secos, con una tendencia decreciente a lo largo del periodo lejano. Estas disminuciones son de efecto medio, ya que durante la época lluviosa el CWD sería en promedio de 14 días, mientras que en los meses secos sería de 4.5 días; por lo que a pesar de que el índice presenta una tendencia decreciente aparentemente lenta, es preciso tomar en cuenta este comportamiento en la planificación de actividades productivas como la agricultura y la ganadería que caracterizan la zona aguas abajo del embalse Arenal.

Por último, el índice CDD presentaría alteraciones a lo largo de todo el año, pero de forma espacialmente diferenciada. Esto se debe a que los cambios significativos del índice en los meses lluviosos solamente afectarían a la zona de Tilarán, mientras que, en los meses secos, sería en La Fortuna donde se experimentarían los cambios en el comportamiento del índice. Uno de los efectos más grandes experimentados durante todo el periodo de estudio es el aumento de la racha de días secos consecutivos durante los meses lluviosos en la zona alta del embalse, ya que con un aumento del 41%, el índice crecería de 11 días consecutivos en el periodo base a 15 días consecutivos durante el futuro lejano, lo que es una de las principales amenazas a la estabilidad de la producción hidroeléctrica, ya que la ampliación de la racha seca en los meses de recarga supone un inconveniente en el funcionamiento de la planta.

En cuanto a la zona baja del embalse, el índice CDD, contrario a lo anterior, sufriría una disminución del 12%, con una racha de días secos consecutivos promedio de 16.5 días, en lugar de los 19 días del periodo histórico. Este comportamiento es bastante similar al observado en el escenario RCP 4.5, donde el índice obtuvo un valor de 16.2 días consecutivos, por lo que, para ambos escenarios, el efecto del aumento en la concentración de GEI es de intensidad media.

Conclusiones

A partir de los resultados anteriores se establece que, según los datos del modelo MRI-CGCM3, en el área circundante al embalse Arenal, la precipitación presentaría alteraciones en intensidad y frecuencia, principalmente asociadas a disminuciones en la cantidad de precipitación anual, así como en el recuento de los días con lluvia y aumentos en la racha máxima de días secos consecutivos. En general, los índices que presentan variaciones significativas se caracterizan por efectos de mediana magnitud en comparación con los datos históricos, aunque índices como PRCPTOT, SDII y CDD presentarían cambios de efecto alto, principalmente entre el futuro medio y lejano, siendo la zona de Tilarán, donde se alimenta principalmente el embalse Arenal, la más afectada, en comparación con la zona de La Fortuna.

Según las condiciones del escenario RCP 4.5, en el sector de Tilarán, durante los dos primeros periodos futuros, las principales afectaciones serían

en la intensidad de las lluvias, especialmente durante los meses secos del año, ya que al identificarse reducciones en la precipitación total anual y no así en el recuento de días con lluvia, se esperarían distribuciones temporales similares a las del periodo base, pero con menor cantidad de lluvia, lo cual afectaría la recarga del embalse, de acuíferos, así como reducciones en los caudales de la red hídrica. De forma puntual, en el sector de La Fortuna, la precipitación mantendría un comportamiento estable en comparación con los datos históricos, sin embargo, las variaciones aguas arriba, principalmente la disminución en los caudales, puede acarrear algunos problemas de abastecimiento para las comunidades de este sector. Según el tamaño del efecto de estas alteraciones se esperarían temporadas secas medianamente más intensas, que a su vez afectarían a otras actividades humanas y productivas de la zona norte del país.

Dichas condiciones empeorarían en el futuro lejano, ya que aquí se presentan disminuciones en la precipitación total durante todo el año, lo cual, asociado a la reducción en la cantidad de días con lluvia, se esperarían precipitaciones menos intensas y con menor frecuencia, principalmente durante la estación lluviosa, donde además se experimentarían rachas secas más extensas. En la zona de estudio la precipitación se reduciría en cantidad y frecuencia con un efecto medio-grande ($d_{prom} = 0.70$) en Tilarán y medio ($d_{prom} = 0.55$) en La Fortuna.

En cuanto a los resultados generales del escenario RCP 8.5, durante el futuro próximo se esperaría un comportamiento distinto al del escenario anterior, ya que los índices con variaciones significativas indican alteraciones asociadas a la distribución temporal de las precipitaciones; durante los meses lluviosos, se esperan rachas secas más intensas, mientras que, en los meses secos, las lluvias serían mucho más dispersas a lo largo del tiempo.

Sin embargo, a partir del futuro medio es donde se identifican las mayores diferencias con el escenario anterior debido a que el efecto del aumento en la concentración de GEI evidencia cambios más severos en el comportamiento de la precipitación en la zona de estudio. Según las condiciones del escenario RCP 8.5 se experimentarían cambios significativos en la mayoría de los índices analizados, principalmente hacia la baja, con un efecto medio ($d_{prom} = 0.66$) en Tilarán y un efecto grande ($d_{prom} = 0.79$) en La Fortuna. El valor promedio de los índices indican condiciones con menor cantidad de precipitación y con cambios en la frecuencia de dicha variable; el índice PRCPTOT presentaría descensos de efecto medio a alto en ambos sitios de medición, lo que es una de las alteraciones más preocupantes tanto para el funcionamiento de las plantas hidroeléctricas de la zona, así como para el desarrollo de otras actividades como abastecimiento, riego, ganadería, entre otras, lo cual dificultaría el desarrollo socioeconómico de esta zona.

Las tendencias descritas se mantienen a lo largo del futuro lejano, en general los cambios en los índices se caracterizarían por efectos medios a grandes, con mayor ocurrencia durante los meses lluviosos del año. La precipitación total anual muestra en general valores por debajo del promedio

histórico, con tendencia decreciente durante todo el año, por lo que son de esperar lluvias menos intensas, que en conjunto con rachas secas más extensas pueden provocar periodos de sequía extremos; esto conlleva problemas de erosión y colmatación a lo largo del embalse, con consecuencias negativas en la productividad y vida útil del reservorio y de otras estructuras de generación hidroeléctrica.

Los procesos de erosión y acumulación de sedimentos son parte de las dinámicas actuales del embalse Arenal, provocadas por la influencia de viento y del agua y por la falta de cobertura boscosa en algunas partes del perímetro del lago. Dichos procesos han llegado a ser problemáticos, según Araya (2005), ciertos sectores del lago, mayoritariamente al sur-oeste, han debido ser intervenidos por el ICE, mediante la colocación de gaviones y cúmulos de piedra para frenar el desprendimiento de materiales; mientras que en el perímetro sur del embalse se ha identificado la formación de bancos de arena e islotes, lo que asociado al arrastre de plantas acuáticas afectan la toma de agua y el funcionamiento del embalse. En ambos escenarios este tipo de problemáticas se verían incrementadas, además, la ocurrencia de eventos extremos de precipitación o sequía también es muy probable si la concentración de GEI continúa aumentando, lo que generaría inestabilidades atmosféricas con consecuencias directas en la zona norte del país.

Los efectos del cambio climático en la producción energética son diversos y varían en el tiempo y el espacio, por lo que su caracterización es un proceso complejo, es necesario identificar la acción conjunta de las diversas variables climáticas, hidrológicas, edáficas, socioeconómicas, entre otras. Este trabajo aborda de forma puntual e interpretativa el comportamiento de la precipitación, ya que esta es una de las principales variables de entrada en los sistemas hidrológico, climático y eléctrico del territorio nacional. El cálculo de índices climáticos permite caracterizar de forma ágil y normalizada las tendencias y dinámicas de las variables climáticas, lo que facilita su interpretación, comparación y comunicación; sin embargo, para establecer efectos concretos sobre el sistema eléctrico nacional deben incluirse variables climáticas como la temperatura, viento y caudal, lo cual permite un análisis más profundo.

Los datos analizados provienen de un solo modelo, que, aunque robusto, solo representa una posible realidad, existen otros factores que no necesariamente se toman en cuenta. Se recomienda replicar esta caracterización con los datos de otros modelos o variables, considerando el ajuste de los valores históricos modelados con el comportamiento de los valores históricos observados.

Según escenarios de cambio climático generales para Centroamérica y Costa Rica, se esperan aumentos en la temperatura, y una mayor variabilidad climática, caracterizada por eventos extremos (Alvarado *et al.*, 2012). Esto afecta el funcionamiento general de los embalses y plantas generadoras. Un estudio reciente publicado por el IMN (2020) muestra que el cantón de Tilarán, donde se ubica el 90% del embalse Arenal, es propenso a eventos

hidrometeorológicos extremos. La zona norte del embalse, en las cercanías de los poblados de Tilarán, Santa Rosa, Sabalito y Aguacate tienen un riesgo alto o medio-alto ante eventos extremos secos, mientras que la zona media y sur del reservorio presenta riesgo alto o medio-alto a eventos extremos lluviosos, esto según registros documentados de este tipo de eventos en el pasado y las condiciones socioeconómicas del cantón. Lo antes descrito concuerda con el comportamiento esperado de la precipitación según los datos proyectados por el modelo analizado, por lo que su probabilidad de ocurrencia podría ser alta si no se toman acciones inmediatas para el manejo del recurso hídrico. Ambos extremos, eventos secos o lluviosos son perjudiciales para el buen funcionamiento de las plantas hidroeléctricas, ya sea por la falta de agua o por reducciones en la vida útil de las estructuras.

A pesar de que la matriz de generación eléctrica costarricense proviene prácticamente en su totalidad de fuentes renovables, los combustibles fósiles continúan siendo la mayor fuente de consumo energético, en especial para el transporte, lo que genera la mayor cantidad de los GEI a nivel nacional. El *Plan Nacional de Transporte Eléctrico 2018-2030* se perfila como una buena medida de mitigación de GEI, no obstante, plantea metas de larga data como dejar de depender de los combustibles fósiles para el transporte y la producción en 2085. La transformación paulatina del parque automotor, que es cada vez mayor, representa una nueva presión al sistema energético nacional, cuya demanda va en aumento, por lo tanto, deben analizarse a profundidad el comportamiento de las variables hidroclimáticas como la precipitación, la temperatura, los caudales y el viento, para comprender su comportamiento futuro y establecer medidas de mitigación y adaptación energética contextualizadas, ambiciosas y viables en el contexto costarricense, así como promover fuentes limpias alternativas como la geotermia y la biomasa.

Referencias

- Alvarado, L.; Contreras, W.; Alfaro, M.; Jiménez, E. (2012). *Escenarios de cambio climático regionalizados para Costa Rica*. Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones, Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica. <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/EscenariosCambioClimatico/escenariosCCRegionalizados2012.pdf>
- Amat, J. (2016). T-test: Comparación de medias poblacionales independientes. *Ciencia de Datos*. https://www.cienciadedatos.net/documentos/12_t-test#
- Araya, A. (2005). Situación actual del entorno del lago Arenal. *Reflexiones*, 84(2), 71-77. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/reflexiones/article/view/11423>
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) (2013). *Cambio climático en Centroamérica: guía de navegación*. CEPAL Subse de México. Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/26122-cambio-climatico-centroamerica-guia-navegacion>

- ETCCDI (Equipo Experto de la Detección e Índices del Cambio Climático) (2009). *Climate Change Indices. Definitions of the 27 core indices. Climate and Ocean Variability, Predictability, and Change.*
http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml
- EUROCLIMA+ (2020). Visor de escenarios de cambio climático sobre Centroamérica: Manual de usuarios. Programa EUROCLIMA+, FIIAPP - AEMET.
<https://centroamerica.aemet.es/documentacion.html>
- Grupo ICE (2020). *Somos electricidad renovable y solidaria.* San José, Costa Rica.
https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/7a3172c0-b703-4bbf-9d61-b363e822f1c1/Fasciculo_Electricidad_2020_compressed.pdf?MOD=AJPERES&CVID=m.pLjj8
- Hartmann J. (2020). *Manual de Entrenamiento sobre Cambio Climático e Hidroenergía.* Proyecto AICCA, Ministerio del Ambiente y Agua de Ecuador-CONDESAN, Quito-Ecuador. <https://condesan.org/recursos/manual-entrenamiento-cambio-climatico-e-hidroenergia/>
- ICE (Instituto Costarricense de Electricidad) (2018). *Proyecciones de la demanda eléctrica de Costa Rica 2018-2040.* Dirección Corporativa de Electricidad.
<https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/741c8397-09f0-4109-a444-bed598cb7440/PROYECCION+DE+LA+DEMANDA+ELECTRICA+2018-2040.pdf?MOD=AJPERES&CVID=mrl1cAQ>
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional) (2020). Riesgo ante eventos hidrometeorológicos extremos en los cantones de Bagaces, Tilarán, Abangares y en los distritos de Cóbano, Lepanto y Paquera. Departamento de Climatología e Investigaciones Aplicadas. Proyecto Implementación de medidas de adaptación del Recurso Hídrico al Cambio Climático. San José, Costa Rica.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) (2000). *Informe Especial del IPCC sobre Escenarios de Emisiones (IE-EE).* ISBN: 92-9169-413-4. <https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-sp.pdf>
- IPCC (2007). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. enhen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza.
- MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía) (2019). *Plan nacional de transporte eléctrico 2018-2030.* San José, Costa Rica. ISBN 978-9977-50-150-5.
<https://sepse.go.cr/documentos/PlanTranspElect.pdf>
- Presidencia de la República de Costa Rica (2019). Costa Rica superará 99% de generación eléctrica renovable en 2019. Comunicado de prensa.

<https://www.presidencia.go.cr/comunicados/2019/12/costa-rica-superara-99-de-generacion-electrica-renovable-en-2019/>

Presidencia de la República de Costa Rica (2019). Planta Arenal cumple 40 años de generar electricidad renovable. Comunicado de prensa.

<https://www.presidencia.go.cr/comunicados/2019/12/planta-arenal-cumple-40-anos-de-generar-electricidad-renovable/>

República de Costa Rica (2019) 2do. *Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Primera Edición. <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/bur2019/>

República de Costa Rica. (2020). *Contribución Nacionalmente Determinada de Costa Rica*. San José, Costa Rica: CMNUCC. <https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Costa%20Rica%20First/Contribucio%CC%81n%20Nacionalmente%20Determinada%20de%20Costa%20Rica%202020%20-%20Versio%CC%81n%20Completa.pdf>

SEPSE (Secretaría Planificación Subrector Energía) (2019). *Costa Rica Balance energético nacional 2019-Diagrama de flujo*. <https://sepse.go.cr/wp-content/uploads/2020/12/diagrama-sankey-2019-g-191120.pdf>

Solano, J., & Villalobos, R. (2000). *Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica*. San José: Instituto Meteorológico Nacional. Instituto Meteorológico Nacional. www.imn.ac.cr

Umaña-Villalobos, G. (2006). Ciclo anual de estratificación y circulación en el embalse Arenal, Costa Rica. Yearly cycle of stratification and circulation at Arenal Reservoir, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 54(1), 257-263. DOI: <https://doi.org/10.15517/rbt.v54i1.26849>

Vargas, L., & León, A. (2012). Coordinando esfuerzos para la integración y desarrollo en las cuencas embalse Arenal y Tempisque. La labor de Cidecat. *Revista de Ciencias Ambientales*, 43(1), 39-46. DOI: <https://doi.org/10.15359/rca.43-1.4>

Ventura-León, J. (2018). Otras formas de entender la d de Cohen. *Revista Evaluar*, 18(3), 73-78. DOI: <https://doi.org/10.35670/1667-4545.v18.n3.22305>