

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/index>

www.ucr.ac.cr / ISSN: 2215-2652

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
ENERO/JUNIO 2024 - VOLUMEN 34 (1)





El fenómeno ENSO y la precipitación de la Zona Protectora Monte Alto, Costa Rica

The ENSO phenomenon and the precipitation of the Monte Alto Protected Zone, Costa Rica

Gloriana Guzmán Vindas¹, Miguel Méndez García², Carlos Rojas Alvarado³

¹ Escuela de Ingeniería de Biosistemas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica,
email: gloriana.guzmanvindas@ucr.ac.cr

² Zona Protectora Monte Alto, Área de Conservación Tempisque, Guanacaste, Costa Rica,
email: miguel.mendez@sinac.go.cr

³ Escuela de Ingeniería de Biosistemas e Instituto de Investigaciones en Ingeniería, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica,
email: carlos.rojasalvarado@ucr.ac.cr

Palabras Clave:

Adaptación,
cambio climático,
eventos extremos,
Guanacaste,
Hojancha,
resiliencia.

Resumen

Mucho se habla de los cambios climáticos producto de fenómenos atmosféricos de orden regional y global; sin embargo, no siempre se cuenta con evidencia relacionada a ellos. Esta comprobación científica es necesaria para visualizar la dimensión de su efecto y para sentar las bases de manejo y conservación de los servicios ecosistémicos que sustentan el estilo de vida moderno. En este trabajo, se ha hecho un análisis de series de tiempo del registro mensual de precipitación de la Zona Protectora Monte Alto en Hojancha, Costa Rica, para el periodo entre mayo 2013 y noviembre 2022. Se ha descubierto que una disrupción del patrón temporal de precipitación durante la temporada lluviosa del año 2017 tomó alrededor de dos años para regresar a lo observado en el año 2013. Tal disrupción estuvo directamente vinculada con un periodo frío del fenómeno ENSO, conocido coloquialmente como “La Niña” y fue seguida por otra disrupción similar, cuyo efecto continuó hasta finales del 2022. Los datos acá presentados sugieren que el fenómeno ENSO tiene un efecto directo sobre la precipitación de la Zona Protectora Monte Alto, cuya función original en el contexto local es la de proveer agua potable a las comunidades aledañas. Las oscilaciones con variabilidad extrema en el ciclo hidrológico, aparentemente más frecuentes en los últimos años en el contexto local de este análisis, tienen un efecto real sobre la calidad de vida de las poblaciones afectadas y merecen seguir siendo documentadas y cuantificadas para incrementar la resiliencia por adaptación de las sociedades afectadas.

Recibido: 17/02/2023

Aceptado: 31/07/2023

Keywords:

Adaptation,
climate change,
extreme events,
Guanacaste,
Hojancha,
resilience.

Abstract

Much is discussed about the climatic changes associated with regional or global atmospheric phenomena. Empiric evidence, however, only sometimes supports such claims even though it is necessary to visualize the strength of their effects and their relevance for the management and conservation agendas of those biosystems supporting the modern lifestyle. This work conducted a time series analysis with monthly precipitation data from the Monte Alto Protected Zone in Hojancha, Costa Rica, between May 2013 and November 2022. A disruption in the temporal pattern was detected in the rainy season of 2017, and it took about two years to return to the state observed back in 2013. Such disruption was linked to a cold period of the ENSO phenomenon, colloquially known as “La Niña”, and followed by a second disruption with an effect lasting until this moment. The data presented herein suggests that ENSO directly affects the precipitation pattern in the Monte Alto Reserve, whose original conservation purpose was to provide drinking water to local populations. The oscillations in the hydrological cycle, apparently more frequent in the last years based on the local context of this analysis, influence the quality of life of the affected populations and deserve monitoring for proper documentation and quantification intended to increase human resilience by means of adaptation.

DOI: 10.15517/ri.v34i1.54178



INTRODUCCIÓN

El seguimiento de los patrones de precipitación en el tiempo es de suma importancia para la gestión inteligente del recurso hídrico. Desde hace muchas décadas se ha realizado tal tarea con un enfoque científico [1] y, recientemente, su estudio se ha orientado hacia la perspectiva ciudadana o la política [2, 3]. Ambas orientaciones encuentran su intersección lógica al visualizar el tema general de aprovisionamiento de agua como un recurso ecosistémico esencial para el mantenimiento del estilo de vida moderno [4].

Bajo ese marco de trabajo, el efecto de fenómenos climáticos, como el ENSO, sobre la disponibilidad ecosistémica del recurso hídrico, debe ser monitoreado para comprender el grado de resiliencia y vulnerabilidad de las comunidades que se abastecen del mismo [5]. Lo anterior debido a que la disponibilidad de agua destinada a uso humano está directamente vinculada con tal aprovisionamiento ecosistémico a través del ciclo hidrológico [6]. Es decir, que el agua disponible para uso poblacional depende en gran medida de la recarga natural de los acuíferos y de los reservorios naturales presentes en los diferentes ecosistemas. Únicamente de esta forma se puede incrementar el grado de adaptabilidad presente y futuro de las poblaciones humanas y de los sistemas naturales circundantes [7].

En el caso de Costa Rica, la provincia de Guanacaste es quizás la región más vulnerable a los cambios en los regímenes de precipitación [8] y cualquier impacto se magnifica debido al uso inefectivo de las ciencias climáticas en esa parte del país [9]. En Guanacaste, desde hace muchos años, se han dado iniciativas de protección del recurso hídrico y un ejemplo de ello es la Zona Protectora Monte Alto, en el cantón de Hojancha [10], de la cual se extrae agua potable para algunas comunidades de ese sector de la provincia. En esa zona del país, se conoce bien el efecto del fenómeno ENSO como un promotor de desastres naturales, pero no necesariamente se concibe como un modulador hídrico a nivel paisajístico [3].

Debido a lo anterior, es importante evaluar registros de precipitación en la zona de Guanacaste cuando existan los datos adecuados para hacerlo. Por ello, el objetivo del presente trabajo es analizar el patrón de precipitación registrado en la Zona Protectora Monte Alto bajo el marco de análisis regional de efecto del fenómeno ENSO. Tal estrategia representa un insumo científico local con aporte al manejo del recurso hídrico en la zona de Guanacaste y a la comprensión de la vulnerabilidad socioeconómica regional.

Metodología

Este estudio se basa en datos obtenidos en la Zona Protectora Monte Alto (abreviada acá como ZPMA), una zona protegida adscrita al Área de Conservación Tempisque, localizada en la comunidad de Pilangosta de Hojancha, en la provincia de Guanacaste. Esta reserva protege zonas de bosque húmedo tropical y bosque muy húmedo premontano entre 430 y 880 msnm, y cuenta con una precipitación anual cercana a los 2500 litros por metro cuadrado en un periodo lluvioso que normalmente se extiende de mayo a noviembre.

En este sitio, se anota el acumulado de las precipitaciones diarias en una bitácora dedicada a tal registro y se hacen análisis

mensuales de precipitaciones desde el mes de mayo de 2013 cuando tal actividad comenzó a sistematizarse. Para efectos de registro, se usó un pluviómetro manual colocado en una zona abierta cercana al estacionamiento para visitantes. Este dispositivo está atado a un poste a una altura cercana a un metro de distancia de piso y no existe vegetación directamente dispuesta sobre el mismo. Para validar este registro, se llevó a cabo una correlación de tales datos con los registrados oficialmente por el Instituto Meteorológico Nacional en la estación de Pilangosta de Hojancha, a unos 3 km al noroeste.

Con el registro mensual de 115 meses (9 años y 7 meses continuos de datos) se procedió a realizar un análisis de series de tiempo con el paquete “technical trading rules (TTR)” en el ambiente R [11]. Con esta técnica, se puede descomponer la relación entre una variable dependiente del tiempo en varios componentes, dentro de los que la temporalidad y la tendencia general son muy relevantes porque permiten visualizar los patrones subyacentes, que son difíciles de analizar en la relación original.

Posteriormente, se inició con un proceso de suavizamiento de la relación original usando un factor de media móvil simple de orden 3. Este paso se realizó para minimizar el peso de las fluctuaciones naturales asociadas con la variabilidad natural del sistema. Tras ese paso, se procedió a descomponer la serie de tiempo en cuatro componentes llamados “observado”, “tendencia”, “temporalidad” y “aleatorio”, que explican, respectivamente, las relaciones numéricas originales, la tendencia subyacente en los datos, las características cíclicas y al final se comparan todas las anteriores con un patrón azaroso. En el caso del componente de temporalidad, se obtuvieron los coeficientes de variación temporal más altos y bajos en la serie, iguales para cada año, y los que estadísticamente indican cuales periodos mensuales son los más y menos lluviosos en la base de datos estudiada.

De forma paralela a lo anterior, se accedió a la información de dos índices del fenómeno ENSO rutinariamente publicados por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, www.noaa.gov). Estos índices, llamados ONI y Niño 1+2, corresponden con dos estimadores mensuales de variabilidad de temperatura en el Océano Pacífico y son útiles para evaluar el efecto de fenómeno ENSO sobre el clima regional o local. De esta forma, a cada mes en la serie de datos se le asignó el correspondiente valor de cada índice y, con el caso del ONI, se clasificaron los diferentes meses en “cálidos”, si el valor del índice fue mayor a 0.5, “neutrales” con valores entre 0.5 y -0.5, y “fríos” cuando el índice mostró valores menores a -0.5. En el estudio rutinario del fenómeno ENSO, los meses cálidos están asociados con la manifestación climática conocida como “El Niño” con déficits típicos en precipitaciones; los meses fríos con “La Niña” que trae un aumento en las mismas, y los meses neutrales con precipitaciones en rangos medios. El índice Niño 1+2 muestra un promedio de las temperaturas de la superficie del océano en la zona más cercana a la costa americana entre los 0° - 10° de latitud sur. Desde el año 1950, su valor ha oscilado entre los 18.9 - 29.3 °C, con un promedio de 23.0 °C, y su interpretación es similar a la del índice ONI con valores altos asociados con “El Niño”, fríos con “La Niña” e intermedios con los periodos “neutrales”.

Con base en un cambio en las desviaciones con respecto a la precipitación media, se dividió el set de datos temporal en dos secciones. La primera sección de 52 meses correspondió con el periodo entre mayo 2013 y agosto 2017 (desviación general de -24.13, llamado Periodo A) y la segunda sección de 63 meses correspondió con el periodo entre setiembre 2017 y noviembre 2022 (desviación general de 19.01, llamado Periodo B). Para cada uno de estos periodos, así como para la base de datos general, se obtuvieron los valores medios de precipitación y las correspondientes desviaciones estándar. De igual forma, se cuantificaron las frecuencias relativas de observaciones en periodos cálidos, neutrales y fríos por cada uno de estos periodos, y se hizo una prueba de Chi cuadrado para determinar diferencias en tal composición de frecuencias relativas por periodo.

Al mismo tiempo se hicieron pruebas estadísticas de Kruskal Wallis para evaluar diferencias en los valores de precipitación, los valores de los índices ENSO y los coeficientes de “tendencia” extraídos del análisis de series de tiempo según categoría ENSO (meses “fríos”, “cálidos” y “neutrales”). En todos los casos, se evaluó la homocedasticidad con una prueba de Levene y en los casos de diferencias, se usó una prueba de Tukey para evaluar la presencia de estas. Para evaluar diferencias asociadas con los mismos indicadores entre periodos A y B, se usaron pruebas de Mann Whitney. El efecto relativo del fenómeno ENSO sobre las precipitaciones observadas en Monte Alto se abordó a partir de un análisis de regresión lineal aplicado a los coeficientes de tendencia y el índice ONI. En todos los casos de análisis, para

efectos de prueba de hipótesis, se usó un valor alfa de 0.05 y las pruebas se corrieron en el *software* PAST v4.06b [12].

RESULTADOS

La correlación entre los valores de precipitación registrados en la ZPMA y la estación de Pilangosta del Instituto Meteorológico Nacional fue de 0.97, con un coeficiente de determinación de 0.94. Según el análisis de series de tiempo (Fig. 1), se observó una clara estacionalidad del patrón de precipitaciones durante cada año en la relación de datos observados (figura superior) y en la relación de datos temporales (tercera figura de arriba hacia abajo). En esta última, los coeficientes de variación temporal más altos y bajos en la serie analizada correspondieron a los valores de 212.86 para el mes de noviembre (más húmedo cada año) y -213.74 para el mes de marzo (más seco cada año). De forma esperada, la relación aleatoria mostró oscilaciones sin patrón definido alrededor del valor central de cero (figura inferior). Sin embargo, de manera interesante, la relación de tendencia sugirió un aumento en la variabilidad asociada con las precipitaciones en el tiempo (segunda figura de arriba hacia abajo). Tal aumento se mostró como una disrupción de un patrón oscilatorio alrededor de 217 ± 188 litros por metro cuadrado hasta el periodo lluvioso del año 2017, a partir de cuya fecha se incrementó la magnitud y el periodo de las oscilaciones alrededor de un valor cercano a los 261 ± 248 litros por metro cuadrado.

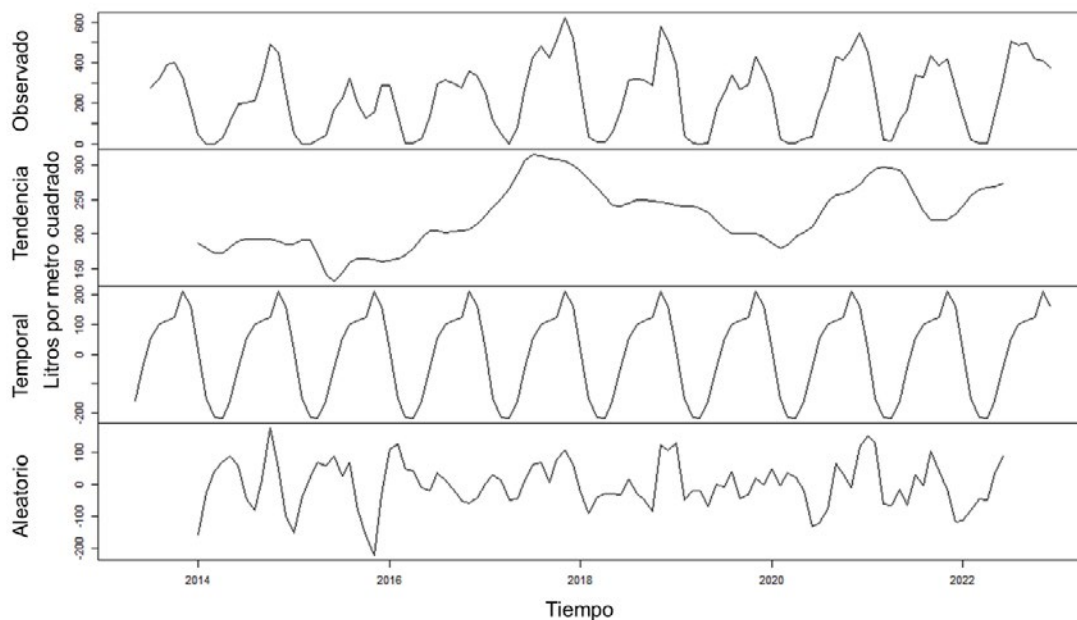


Fig. 1. Diagramas de patrones subyacentes generados a partir del análisis de series de tiempo aplicado al registro de precipitaciones del periodo 2013-2022 de la ZPMA.

Se determinó que la precipitación anual en Monte Alto oscila alrededor de 2756 ± 223 litros por metro cuadrado. De forma similar, el valor medio registrado de los índices ONI y Niño 1+2 fue de -0.0004 ± 0.87 y 23.13 ± 2.26 , respectivamente; y el valor medio de los coeficientes de tendencia fue de 225 ± 45 litros por metro cuadrado. Se encontraron diferencias en las frecuencias relativas de meses categorizados según el índice ONI entre el set de datos general y los dos periodos evaluados ($\chi^2 = 36.49$, $P < 0.001$). Se observó que, tanto para la base de datos general como para el Periodo A (Fig. 2), la mayor frecuencia estuvo asociada con los meses neutrales en un 45 % y un 58 %, respectivamente; mientras que para el Periodo B en un 49 % de los meses fueron fríos.

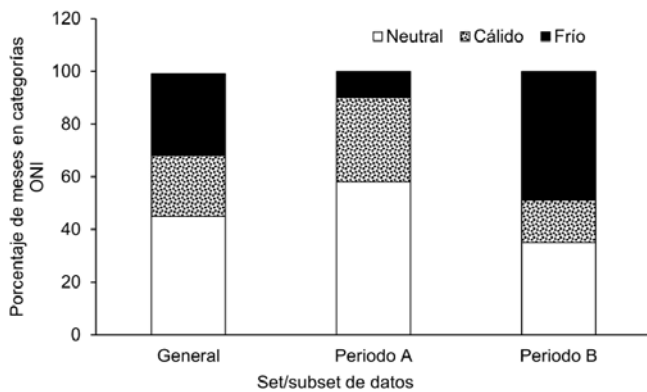


Fig. 2. Distribución porcentual de la clasificación mensual aplicada según el valor del Índice ONI para el set de datos completo y para cada periodo identificado.

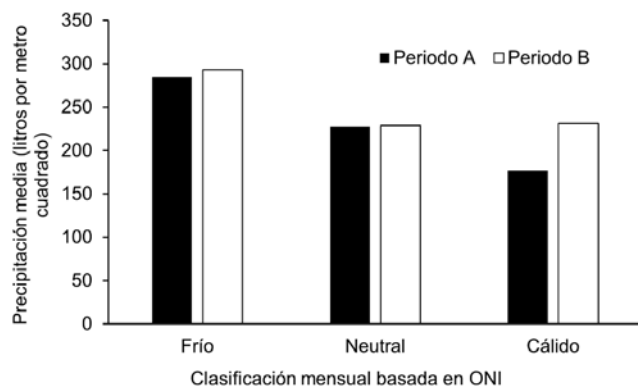


Fig. 3. Valores de precipitación media por periodos de análisis y tipo de mes según la clasificación basada en el Índice ONI.

No se observaron diferencias significativas en la precipitación según la categorización mensual en estados cálidos, fríos o neutrales, lo cual se mantuvo aún dentro de los periodos analizados (Fig. 3); pero sí hubo diferencias en los valores del índice Niño 1+2 ($H = 11.6$; $P < 0.003$, Levene $P = 0.4$) y en los coeficientes de tendencia ($H = 30.2$; $P < 0.0001$, Levene $P = 0.08$), siempre con los meses fríos mostrando la ubicación de las diferencias (Tukey $P < 0.05$ en ambos casos). De forma similar, no hubo diferencias

en precipitación entre los Periodos A y B; pero sí se observaron diferencias en los índices ONI ($U = 870.5$; $P < 0.0001$) o Niño 1+2 ($U = 1164$; $P < 0.007$) y en los coeficientes de tendencia ($U = 777$; $P < 0.0004$, Fig. 4).

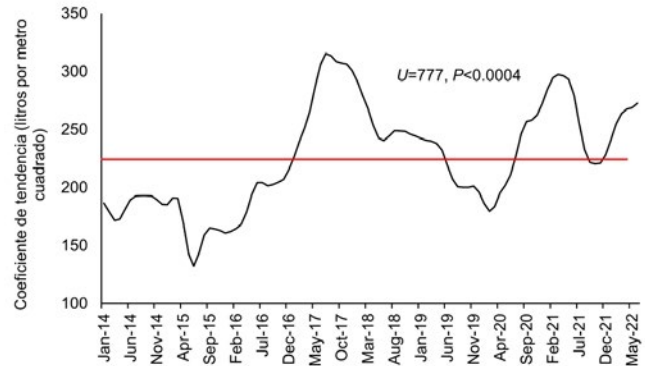


Fig. 4. Variación significativa (U Mann Whitney) en los valores del coeficiente de tendencia entre periodos A y B según el registro de precipitaciones de la ZPMA durante 2013-2022. La línea roja indica el valor medio de periodo completo.

Finalmente, al analizar la relación entre los dos índices del fenómeno ENSO y la tendencia en las precipitaciones observadas en Monte Alto, se encontró una correlación de intensidad media, pero significativa, entre el ONI y la relación de tendencia (Fig. 5). En esta relación, se observa claramente cómo a menor valor de ONI (asociados con estados fríos, o “La Niña”) hay una mayor tendencia a precipitaciones, cuya magnitud y variabilidad también se ve incrementada. La significancia de la relación sugiere que la tendencia en las precipitaciones es dependiente del ONI.

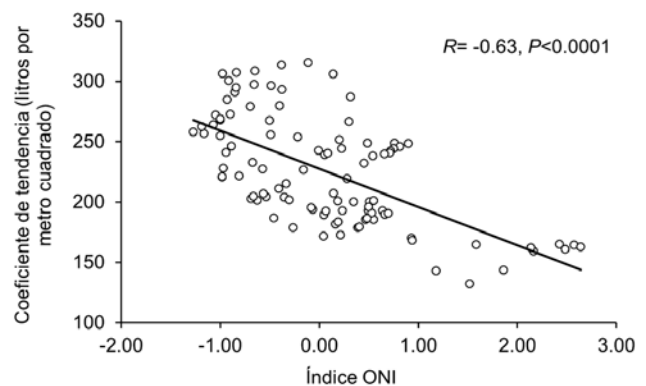


Fig. 5. Diagrama de correlación entre el coeficiente de tendencia extraído del análisis de series de tiempo y el Índice ONI para el periodo 2013-2022 a partir del registro de precipitaciones de la ZPMA.

DISCUSIÓN

Los datos de precipitación registrados en la ZPMA son confiables según la comparación llevada a cabo con datos oficiales y los resultados expuestos en este análisis apuntan en

dos direcciones. En primer lugar, sugieren que el fenómeno ENSO ha afectado el patrón de precipitación en la ZPMA en el periodo analizado y que tal efecto se expresa en mayor grado durante los periodos fríos o de “La Niña”. En segundo lugar, debido a que la disrupción inicial observada en el registro de analizado se dio alrededor de agosto del 2017, es fácil observar que la tendencia generalizada de precipitaciones se ha manifestado de forma diferente antes y después de la misma.

Los resultados acá mostrados no implican causalidad de ninguna forma y no se puede establecer únicamente con este estudio que el fenómeno ENSO es el principal factor de efecto sobre las precipitaciones registradas en la ZPMA. Existen otras variables importantes como los cambios en el uso del suelo, la variabilidad asociada con la Zona de Convergencia Intertropical y la frecuencia o intensidad estacional de formación de ciclones tropicales [13]. Sin embargo, los resultados expuestos acá son útiles para mostrar el vínculo entre variables de ámbito regional como el fenómeno ENSO y el efecto potencial en las precipitaciones locales.

Es interesante ver que tanto el índice ONI como el Niño 1+2 mostraron validez en términos de las interpretaciones llevadas a cabo. En el caso del primero, su uso facilitó la visualización de patrones gráficos al ser un índice más intuitivo y general. Sin embargo, el índice Niño 1+2 evidenció diferencias significativas entre las tres categorías del fenómeno ENSO, al ser un índice más sensible a los patrones climáticos cercanos a la costa americana. Para efectos de monitoreo futuro en la ZPMA, ambos índices pueden seguir usándose para análisis y estudio de los patrones de precipitación.

Es importante conocer que, para el sitio de estudio escogido, las relaciones entre los valores registrados de precipitación y los índices del fenómeno ENSO existen para la década pasada (como ha sido visto acá en los resultados) y que la variabilidad en el patrón de precipitaciones ha aumentado de alguna forma durante los últimos años. Esto también ha sido observado en otros registros regionales [3] y puede tener implicaciones en la funcionalidad de los sistemas biológicos de la ZPMA como algunos modelos sugieren [8]. Sin embargo, más allá del efecto real en la productividad primaria, cualquier alteración en los patrones de precipitación puede tener alto potencial de impacto en las reservas hídricas (p.ej., mantos acuíferos, [14]) y el aprovisionamiento hídrico ecosistémico (p.ej., vía biomasa, [15]) de un sitio dado. En el caso de la ZPMA, al ser un sitio de provisión local de agua para consumo humano, el impacto potencial de cualquier alteración se podría traducir en problemas de abastecimiento de agua [16, 17]. Por ejemplo, con datos de la oferta hídrica mensual de la Dirección de Aguas para la zona de Nicoya y los valores promedio mensuales de precipitación de Monte Alto, la alta correlación ($r = 0.95$, $r^2 = 0.91$, no mostrado anteriormente) sugiere fuertemente un vínculo estrecho entre ambas variables.

Algunos modelos recientes han identificado que los periodos cálidos del fenómeno ENSO, conocidos como “El Niño”, tienden a acortarse bajo la influencia global del cambio climático

[18], principalmente por el establecimiento permanente de las condiciones áridas típicamente asociadas con esas fases cálidas. Sin embargo, debido a la termodinámica global, tal tendencia implica una posibilidad alta de redistribución energética, que se traduce en periodos de “La Niña” más frecuentes o extendidos como ha sido sugerido en otros modelos [19]. El registro de precipitación de la ZPMA no es tan extenso como para poder analizar patrones interdecadales y evaluar la frecuencia de tales eventos. Sin embargo, la tendencia observada en la década estudiada apunta en la dirección de un mayor efecto de “La Niña” sobre los datos analizados, particularmente en el Periodo B (Figs. 2 y 3). A pesar de lo anterior, para el periodo completo de análisis, los dos índices del fenómeno ENSO mostraron valores promedio cercanos a la zona neutral (cerca a 0 para el ONI y cerca del promedio histórico de 23.0 para el Niño 1+2).

Si bien los periodos fríos, o sea aquellos asociados con “La Niña”, están asociados con incrementos en precipitaciones, el análisis realizado acá no muestra que las lluvias han aumentado en la ZPMA, sino que la variabilidad asociada con ellas sí lo ha hecho. El efecto de tal redistribución de variabilidad es que los eventos con niveles altos de precipitaciones se incrementan, pero en periodos cortos, que no dan suficiente tiempo para que los fenómenos naturales de infiltración (en el caso de mantos acuíferos) o absorción (en el caso de productores primarios) se lleven a cabo [20]. De esta forma, los sistemas naturales asociados con el ciclo hidrológico, como los de reserva de agua en bosques, se ven afectados por estos procesos. Conjuntamente los sistemas humanos de provisión del recurso hídrico a las poblaciones aledañas también son afectados, como se mencionó en el caso de la oferta de agua en Nicoya, ya que se pueden observar variaciones en los niveles de caudal asociados con las tomas de agua para abastecimiento. En ambos casos, el efecto sobre la calidad de vida en la población local puede ser serio y difícil de manejar socioculturalmente.

CONCLUSIONES

El presente estudio muestra que, durante la última década, una disrupción en el patrón de precipitaciones registrado en la ZPMA puede servir para dividir tal registro en dos periodos. De estos últimos, los años más recientes muestran mayor variabilidad en la distribución de precipitaciones y han estado sujetos a un efecto constante de periodos fríos del fenómeno ENSO con mayor frecuencia que los años anteriores. Se recomienda seguir registrando la precipitación en la ZPMA para evaluar el desarrollo de cualquier otro esquema en el futuro. Para los encargados de tomar decisiones asociadas con la administración de los sistemas de abastecimiento de agua potable a las comunidades aledañas, es importante conocer y monitorear frecuentemente lo acá mostrado. Bajo el panorama de patrones diferenciados de influencia del fenómeno ENSO en el contexto de cambio climático y según la previsión de mayor aridez en la zona de Guanacaste, es necesario darle seguimiento a todo lo anterior.

REFERENCIAS

- [1] E.C. Barrett y M.J. Beaumont, “Satellite rainfall monitoring: An overview”, *Remote Sens*, vol. 11, no. 1-4, pp. 23–48, Oct. 1994, doi: 10.1080/02757259409532257.
- [2] G. Tiplado y P. Allamano, “Citizen science and community-based rain monitoring initiatives: an interdisciplinary approach across sociology and water science”, *WIREs Water*, vol. 4, no. 2, e1200, Dic. 2017, doi: 10.1002/wat2.1200.
- [3] H.G. Hidalgo, “Climate Variability and Change in Central America: What Does It Mean for Water Managers?”, *Front. Water*, vol. 2, 632739, Ene. 2021, doi: 0.3389/frwa.2020.632739.
- [4] T. Betancur, E. Bocanegra, E. Custodio, M. Manzano y G.C. da Silva, “Estado y factores de cambio de los servicios ecosistémicos de aprovisionamiento en humedales relacionados con aguas subterráneas en Iberoamérica y España”, *Biota Colomb.*, vol. 17, sup. 1, pp. 106–119, Mar. 2016, doi: 10.21068/c2016s01a06.
- [5] X.F. Li et al., “Global distribution of the intensity and frequency of hourly precipitation and their responses to ENSO”, *Clim. Dyn.*, vol. 54, 48234839, Jun. 2020, doi: 10.1007/s00382-020-05258-7.
- [6] L. Strohmenger, P. Ackerer, B. Belfort y M.C. Pierret, “Local and seasonal climate change and its influence on the hydrological cycle in a mountainous forested catchment”, *J. Hydrol.*, vol. 610, 127914, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.127914.
- [7] B.W. Abbott et al., “Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions”, *Nat. Geosci.*, vol. 12, pp. 533–540, Jun. 2019, doi:10.1038/s41561-019-0374-y.
- [8] K. Stan et al., “Climate change scenarios and projected impacts for forest productivity in Guanacaste Province (Costa Rica): lessons for tropical forest regions”, *Reg. Environ. Change*, vol. 20, 14, Feb. 2020, doi: 10.1007/s10113-020-01602-z.
- [9] G.W. Parodi y M. Babcock, “Scientific forecast use and factors of influence in water-constrained contexts: The case of Guanacaste, Costa Rica”, *Clim. Serv.*, vol. 18, 100169, Abr., 2020, doi: 10.1016/j.cliser.2020.100169.
- [10] J. García Giraldo y M. Méndez García, *Experiencia de manejo participativo Fundación Pro Reserva Forestal Monte Alto*. Costa Rica: Área de Conservación Tempisque, 2017.
- [11] R Core Team. “R: A language and environment for statistical computing”. R Software. <https://www.r-project.org/> (accesado en Feb. 17, 2023).
- [12] Ø. Hammer, D.A.T. Harper y P.D. Ryan, “Paleontological Statistics software package for education and data analysis”, *Palaeontol. Electron.*, vol. 4, no.1, p. 9, May. 2001.
- [13] R.W. Higgins, A. Leetmaa, Y. Xue y A. Barnston, “Dominant Factors Influencing the Seasonal Predictability of U.S. Precipitation and Surface Air Temperature”, *J. Clim.*, vol. 13, no. 22, pp. 3994-4017, November 2000, doi: 10.1175/1520-0442(2000)013<3994:DFITSP>2.0.CO;2.
- [14] R. Sánchez-Murillo y C. Birkel, “Groundwater recharge mechanisms inferred from isoscapes in a complex tropical mountainous region”, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 23, no. 10, pp. 5060-5069, May 2016, doi: 10.1002/2016GL068888.
- [15] D. Hui et al., “Effects of precipitation changes on switchgrass photosynthesis, growth, and biomass: A mesocosm experiment”, *PLOS ONE*, vol. 13, No. 2, e0192555, Feb. 2018, 10.1371/journal.pone.0192555.
- [16] J. García Giraldo y M. Méndez García, *Experiencia de manejo participativo: Fundación Pro Reserva Forestal Monte Alto*, 1ra ed. Hojanca (Guanacaste), Costa Rica: Infoterra Editores S.A., 2017.
- [17] J. Krishnaswami, N., Kelkar y C. Birkel, “Positive and neutral effects of forest cover on dry-season stream flow in Costa Rica identified from Bayesian regression models with informative prior distributions”, *Hydrol. Proces.*, vol. 32, no. 24, pp. 3604-3614, Nov. 2018, doi: 10.1002/hyp.13288.
- [18] Z. Yan et al., “Eastward shift and extension of ENSO-induced tropical precipitation anomalies under global warming”, *Sci. Adv.*, vol. 6, no. 2, eaax4177, Ene. 2020, doi: 10.1126/sciadv.aax4177.
- [19] S. Marjani, O. Alizadeh-Choobari y P. Irannejad, P, “Frequency of extreme El Niño and La Niña events under global warming”, *Clim. Dyn.*, vol. 53, pp. 5799–5813, Jul. 2019, doi: 10.1007/s00382-019-04902-1.
- [20] J.S., Kaplan, D. Giménez, D.R. Hirmas, N.A. Brunsell, J.M. Blair y A.K. Knapp, “Decadal-scale shifts in soil hydraulic properties as induced by altered precipitation”, *Sci. Adv.*, vol. 5, no.9, aau6635, Set. 2019, doi: 10.1126/sciadv.aau6635.