

El fenómeno ENOS y el análisis de la variabilidad de las series de tiempo de precipitación en el Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica

El Niño Southern Oscillation (ENSO) Phenomenon and the Analysis of Time Series Variability in Precipitation within the Guanacaste Conservation Area, Costa Rica

O fenômeno ENOS e a análise da variabilidade das séries temporais de precipitação na Área de Conservação Guanacaste, Costa Rica

Mauricio Vega Araya¹
Universidad Nacional de Costa Rica



Resumen

El pacífico noroeste de Costa Rica es una región con una estacionalidad en el régimen de lluvias muy marcada. Sumado a dicha estacionalidad, esta área de Costa Rica es propensa a fenómenos hidroclimáticos extremos como sequías e inundaciones, por ejemplo. La escasa distribución de pluviómetros o bien, la no disponibilidad de información pertinente, hacen que los datos complementarios obtenidos de satélites y sus respectivas reanálisis, sean fundamentales para disponer de información crucial y así poder fundamentar las acciones de gestión del recurso hídrico y sus repercusiones en los ecosistemas, tanto naturales como productivos. Para analizar los patrones de precipitación, se analizaron las series de tiempo de precipitación del producto CHIRPS para cinco ecorregiones delimitadas en el Área de Conservación Guanacaste, en el Pacífico noroeste de Costa Rica. Estas curvas se correlacionaron con las series de tiempo de las regiones de monitoreo de la temperatura superficial del mar en las regiones Niño 1.2, Niño 3, Niño 3.4 y Niño 4. Todas las ecorregiones

1 Bachiller en Ingeniería Forestal con énfasis en Manejo Forestal y Licenciatura en Ingeniería Forestal con especialización en Desarrollo Forestal de la Universidad Nacional de Costa Rica, Doctor en Sensoramiento Remoto y Monitoreo Forestal de la Universidad de Georg-August de Alemania, email: mauricio.vega.araya@una.cr,  <https://orcid.org/0000-0003-3377-6924>.

analizadas correlacionaron de forma negativa y fuertemente con la región del Niño 1.2, con valores de R entre -0.72 y -0.74. Por otra parte, se detectó un rezago en la curva de Niño 4 de cuatro a cinco meses, con la curva de la región Niño 1.2. El estudio sugiere que la anomalía del Niño 4, con un desfase de aproximadamente 4 a 5 meses, puede ser utilizada como indicador de posibles impactos en los patrones de precipitación en las diferentes ecorregiones estudiadas. Este tiempo es suficiente para planear acciones, sobre todo en el sector agroproductivo. En este trabajo se muestra el potencial de predictibilidad de los efectos del fenómeno ENOS sobre el patrón de la precipitación para áreas extensas y con cierta homogeneidad ecosistémica, como son las ecorregiones en el Área de Conservación Guanacaste.

Palabras clave: Área de Conservación Guanacaste, precipitación, ecorregiones, ENOS.



Abstract

The Pacific Northwest of Costa Rica is a region with marked seasonality in rainfall patterns. This area of Costa Rica is prone to extreme hydroclimatic phenomena such as droughts and floods. Due to the limited distribution of rainfall gauges and the unavailability of relevant information, complementary data obtained from satellites and their respective reanalyses become imperative for acquiring crucial information. This information can support water resource management actions and their impacts on both natural and productive ecosystems.

To analyze the precipitation patterns, we utilized the CHIRPS product's precipitation time series for five ecoregions within the Guanacaste Conservation Area, located in the northwestern Pacific region of Costa Rica. These curves were strongly and negatively correlated with time series from sea surface temperature monitoring regions, including Niño 1.2, Niño 3, Niño 3.4, and Niño 4.

All analyzed ecoregions exhibited strong negative correlations with the Niño 1.2 region, with correlation coefficients (R values) ranging between -0.72 to -0.74. Additionally, a lag of four to five months was observed in the Niño 4 curve compared to the Niño 1.2 region. This study suggests that the Niño 4 anomaly, with a lag of approximately 4 to 5 months, can serve as an indicator of possible impacts on precipitation patterns in different ecoregions. This provides sufficient time to plan actions, particularly within the agricultural sector. This study demonstrates the potential predictability of the effects of ENSO phenomenon on precipitation patterns for large areas with a certain eco-systemic homogeneity, such as the ecoregions in the Guanacaste Conservation Area.

Keywords: Guanacaste Conservation Area, precipitation, ecoregions, ENSO



Resumo

O noroeste pacífico da Costa Rica é uma região com uma sazonalidade no regime de chuvas muito marcada. Somado a essa sazonalidade, esta área da Costa Rica é propensa a fenômenos hidroclimáticos extremos como secas e inundações, por exemplo. A distribuição limitada de pluviômetros ou a falta de disponibilidade de informações relevantes fazem com que os dados complementares obtidos de satélites e suas respectivas reanálises sejam fundamentais para obter informações cruciais e, assim, embasar as ações de gestão dos recursos hídricos e suas repercussões nos ecossistemas, tanto naturais quanto produtivos. Para analisar os padrões de precipitação, foram analisadas as séries temporais de precipitação do produto CHIRPS para cinco ecorregiões delimitadas na

Área de Conservação Guanacaste, no Pacífico noroeste da Costa Rica. Estas curvas foram correlacionadas com as séries temporais das regiões de monitoramento da temperatura superficial do mar nas regiões Niño 1.2, Niño 3, Niño 3.4 e Niño 4. Todas as ecorregiões analisadas correlacionaram de forma negativa e forte com a região do Niño 1.2, com valores de R entre -0.72 e -0.74. Além disso, foi detectado um atraso na curva do Niño 4 de quatro a cinco meses, em relação à curva da região Niño 1.2. O estudo sugere que a anomalia do El Niño 4, com um desfasamento de aproximadamente 4 a 5 meses, pode ser utilizada como indicador de possíveis impactos nos padrões de precipitação nas diferentes ecorregiões estudadas. Este tempo é suficiente para planejar ações, especialmente no setor agroprodutivo. Neste trabalho, é demonstrado o potencial de previsibilidade dos efeitos do fenômeno ENOS sobre o padrão de precipitação em áreas extensas e com certa homogeneidade ecossistêmica, como as ecorregiões na Área de Conservação Guanacaste.

Palavras-chave: Área de Conservação Guanacaste, precipitação, ecorregiões, ENOS

Introducción

El fenómeno de la precipitación brinda información importante sobre la variabilidad y cambio climático y sobre la disponibilidad de agua para los ecosistemas. Esta información es fundamental para entender la dinámica de los ecosistemas y su productividad, así como para valorar los impactos de los fenómenos hidroclimáticos extremos (Awange, Hu, and Khaki, 2019).

Para un análisis hidroclimatológico adecuado, se necesitan datos, estos, por lo general, provienen de estaciones de medición de precipitación, es decir las estaciones convencionales de medición en tierra (Dinku et al. 2018), pero desafortunadamente éstas son escasas y están distribuidas de forma desigual. Una dificultad común en muchas partes del mundo es que los registros históricos no son adecuados o contienen huecos en las mediciones.

Una alternativa para superar esta dificultad, son las Estimaciones de Precipitación por Satélite (EPS), ampliamente utilizadas como complemento o sustituto de las observaciones de las estaciones de en tierra. Estas estimaciones proporcionan una cobertura completa de alta resolución (casi global) con un muestreo regular y de fácil acceso (Tang et al. 2015). Los EPS incluyen satélites geoestacionarios y satélites de órbita terrestre baja (Kidd et al. 2012) y utilizan información que va desde las bandas espectrales visibles hasta las infrarrojas de los satélites geoestacionarios (GEO Geostationary Earth Orbit por sus siglas en inglés) y las bandas espectrales

de microondas de los satélites de órbita terrestre baja (SOTB) (Awange and Forootan, 2016). Los sensores de infrarrojos visibles y térmicos permiten una alta frecuencia de muestreo y proporcionan a la vez información importante sobre el movimiento de las nubes y el sistema meteorológico, no obstante, su relación con la lluvia es indirecta. Por otro lado, los sensores pasivos de microondas infieren directa y físicamente sobre la lluvia, pero con un muestreo temporal insuficiente (Qin et al. 2014). Por ello, los EPS han combinado recientemente las estimaciones basadas en microondas e infrarrojos para mejorar la resolución y la precisión de las precipitaciones a partir de diferentes sensores (Awange and Forootan, 2016).

Otras ventajas del uso de las EPS son la cobertura a gran escala, la resolución espacio-temporal relativamente alta y la accesibilidad pública (Wu et al. 2019). Debido a estas ventajas, las EPS desempeñan un papel cada vez más importante a la hora de proporcionar recursos de datos complementarios para la vigilancia de la sequía (Yan, Liu and Chen, 2018). Además, generan estimaciones casi en tiempo real que son muy útiles para la gestión de los recursos hídricos y para diversas aplicaciones hidrológicas (Serrat-Capdevila, Valdes and Stakhiv, 2014).

En la actualidad, un amplio abanico de centros de datos proporciona productos de precipitación en teselas con datos basados en satélites. Algunos conjuntos de datos basados en satélites son del Centro Global de Climatología de las Precipitaciones (GPCP por sus siglas en inglés) (Schneider et al. 2014) y la Unidad de Investigación del Clima (CRU por sus siglas en inglés) (Harris et al. 2014), por ejemplo. Además, los datos de reanálisis creados a partir de la combinación de datos de observación y simulación/medición, como el ERA5 (ECMWF Re- análisis, por sus siglas en inglés) (Hersbach et al. 2020) y el ERA-Interim (Dee et al. 2011), los cuales fueron procesados por el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF por sus siglas en inglés). En cuanto a los conjuntos de datos de medición por satélite, otro ejemplo es el de la Misión de Medición de Precipitaciones Tropicales (TRMM por sus siglas en inglés) (Huffman et al. 2007), (Kummerow et al. 1998), la serie Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN) (Hsu et al. 1997), (Sorooshian et al. 2000), y el servicio del Grupo de Riesgos Climáticos: Precipitación por Infrarrojos

con Datos de Estaciones (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data (CHIRPS por sus siglas en inglés) (Funk et al. 2015).

El conjunto de datos CHIRPS, en el cual se base el presente análisis, es un registro de precipitaciones a largo plazo desarrollado para el análisis de tendencias y el seguimiento estacional de las precipitaciones y de las sequías (Funk et al. 2015). El conjunto de datos fue validado en varias regiones en un análisis a escala mundial y proporcionó una variabilidad satisfactoria de las precipitaciones mensuales, estacionales y anuales (Beck et al. 2017).

Relacionado con la precipitación, El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) es un fenómeno natural que involucra temperaturas oceánicas fluctuantes en el Pacífico ecuatorial (Figura 2). Se ha denominado al fenómeno ENOS como la interacción climática océano-atmósfera a gran escala asociada con un aumento de las temperaturas superficiales del mar cuya periodicidad es repetitiva. Geográficamente este patrón que se extiende a lo largo del Océano Pacífico ecuatorial central y el Pacífico central-oriental (Trenberth, 1997). Por otra parte, ENOS es un factor clave de la variabilidad climática global en escalas de tiempo interanuales, influenciando los monzones globales (Wang et al. 2013), (Losada et al. 2012).

Sin embargo, y aunque la incertidumbre en los cambios que puedan suceder en la variación de las temperaturas superficiales del nivel medio del mar y por ende del fenómeno ENOS, es probable que los cambios pluviométricos de provocados o influenciados por ENOS se intensifiquen en un planeta más cálido (Yun et al. 2021).

Tomando en cuenta la relación que existe entre ENOS y los patrones de precipitación, en este trabajo se presenta un análisis local de precipitación en 5 ecorregiones de que contiene el Área de Conservación Guanacaste (ACG), Costa Rica y su relación con ENOS. Para ello se correlacionaron las series de precipitación histórica en 5 ecorregiones de ACG y las series históricas de las regiones de monitoreo del fenómeno ENOS.

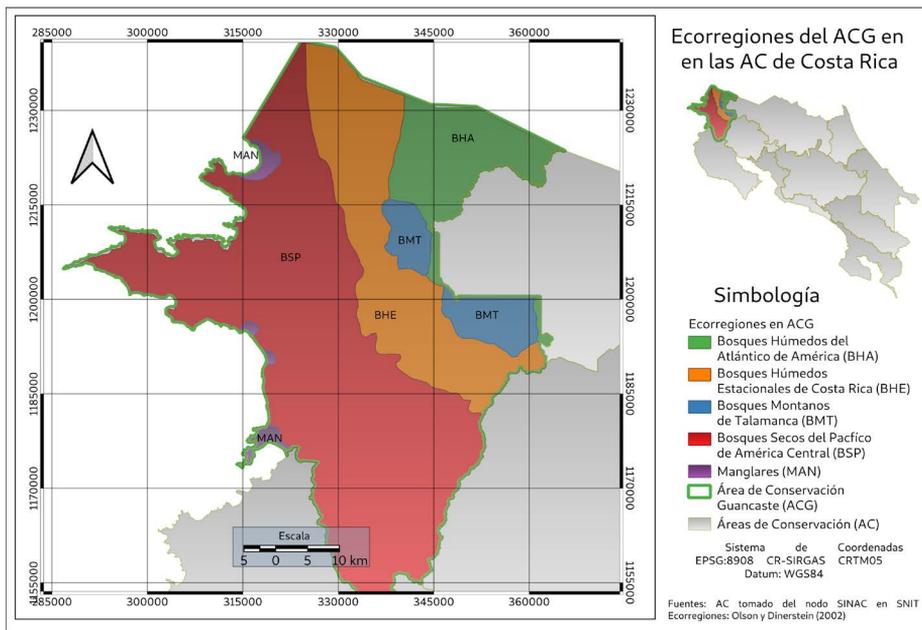
Área de estudio

El Área de Conservación Guanacaste (ACG) posee un área de 293 697 ha que combina 133 853 ha en Áreas Silvestres Protegidas (ASP), según el nodo SINAC (Sistema Nacional de Áreas de Conservación) en Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT), visitado en 2022. Estas ASP protegen zonas marinas que se extienden en algunas zonas 8km en el Océano

Pacífico hasta unos 22km en otros sectores. Por otro lado, protegen áreas terrestres que conectan los bosques de influencia Caribe de la Cordillera Volcánica de Guanacaste hasta los manglares en la costa Pacífica.

Se utilizaron las ecorregiones definidas por (Olson and Dinerstein, 2002) en el polígono del Área de Conservación Guanacaste (ACG). El polígono del ACG fue tomado del nodo del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) que está alojado en el SNIT. Dicho nodo se puede acceder desde la dirección <http://geos1pne.sirefor.go.cr/wfs>.

Figura 1. Ecorregiones del Área de Conservación Guanacaste para el análisis de la influencia del fenómeno ENOS en la precipitación por ecorregión



Fuente: Elaboración propia.

Marco metodológico

Se analizó las series de tiempo de la precipitación de las 5 ecorregiones en el ACG (ver Figura 1). Las ecorregiones son: Bosques Húmedos del Atlántico (BHA), Bosques Húmedos Estacionales (BHE), Bosques Montanos de Talamanca (BMT), Manglares (MAN) y finalmente los Bosques Secos del Pacífico (BSP). La precipitación se basó en el producto de Climate

Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS, por sus siglas en inglés) versión 2.0 (Funk et al. 2015), a la cual se accedió mediante la plataforma de Google Earth Engine (Gorelick et al. 2017). La base de datos CHIRPS posee una serie de tiempo espacial que inicia el primero de enero de 1981 y va con un mes de rezago al mes actual. Para el área de estudio se utilizó una resolución de píxel de unos 5.5*5.5km. Se usó el producto CHIRPS que agrega la precipitación cada 5 días, para finalmente calcular la precipitación total mensual y por año de toda la serie de tiempo por ecorregión. La serie de tiempo se define según la Ecuación

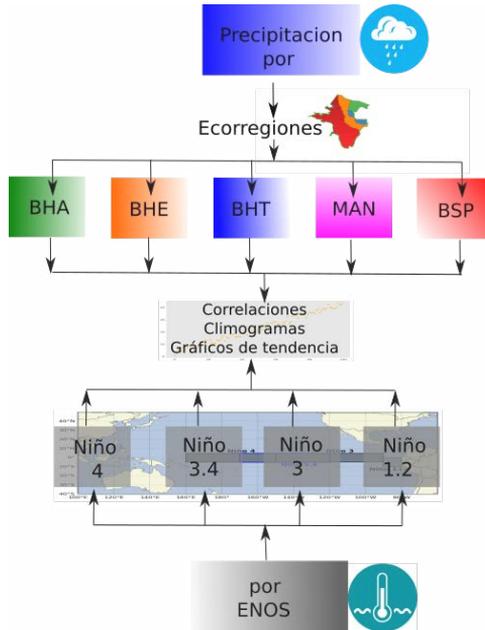
$$X_t, t \in T, (eq:1)$$

donde X es la secuencia de la variable (precipitación) que se indexa en los intervalos de tiempo t que pertenece a T que es el periodo de análisis.

A todas las series de tiempo de la precipitación por ecorregión, se desagregó en las componentes de tendencia (T=trend), estacionalidad (S=seasonal) y componentes irregulares o residuos (R=remainder), T.S.R. por sus siglas en inglés (Cleveland et al. 1990). Para ello se utilizó el lenguaje de programación R (R Core Team 2021). Posteriormente a la descomposición de las series, se graficó cada una de las series y se identificó si cada serie es aditiva o multiplicativa. Se utilizó el método “LOESS” (LOcally wEighted Scatterplot Smoother, por sus siglas en inglés) para descomponer las series de tiempo en tendencia, estacionalidad y componentes irregulares. Este método se usó para estimar relaciones no lineales en las series (Cleveland et al. 1990). Los dos grandes parámetros que se configuran al usar T, S y R son: el parámetro de tendencias (t.window) y el de estacionalidad (s.window). Para este estudio se configuraron los valores de t.window en 10 y s.window en “periodic”.

El esquema de análisis se ejemplifica en la Figura 2, donde primero se obtienen los datos de las series de tiempo de precipitación para las 5 ecorregiones y posteriormente se obtienen los datos de las temperaturas superficiales y sus anomalías por región de monitoreo de la temperatura superficial del mar (RMTSM).

Figura 2. Esquema general aplicado para los análisis por ecorregiones del Área de Conservación Guanacaste y la influencia del fenómeno ENOS en la precipitación por ecorregión



Fuente: Elaboración propia.

Las regiones para el monitoreo la temperatura superficial del mar (RMTSM) para ENOS son: Niño 1.2 90°O y 80°O, Niño 3 150°O y 90°O, Niño 3.4 170°O y 120°O y finalmente la región Niño 4 150°O y 160°E (Trenberth, 1997) (Anexo 1).

Las series de tiempo de las temperaturas y sus anomalías de las 4 cuatro regiones (RMTSM) fueron tomadas de <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/sstoi.indices>.

Se usó la prueba T para examinar si el coeficiente de correlación de las series de tiempo es igual a cero o no. Se parte del supuesto de que las series de tiempo están distribuidas normalmente. Específicamente, se usó la prueba de correlación de rangos de Spearman (r_s) (Wilks, 2011). Esta prueba de correlación tiene en cuenta la clasificación mientras mide la correlación entre dos variables. El valor se sitúa entre +1 y -1, probando las siguientes hipótesis:

$$H_0: r_s = 0 \text{ hipótesis nula}$$
$$H_A: r_s \neq 0 \text{ hipótesis alternativa}$$

Se usó la regla de contraste del valor r contra un nivel de significación (alfa= 0.05), la prueba de hipótesis es estadísticamente significativa y debe rechazarse la hipótesis nula.

Cuando los valores de r_s son cercanos a 0 la correlación es débil, por el contrario cuando se acerca a 1 o -1 la correlación entre las variables es muy fuerte.

Sin embargo, se agruparon los valores r_s para las correlaciones utilizando los rangos propuestos para el valor absoluto del coeficiente de correlación que puede describirse como $[\pm 0,00 \pm 0,19]$, $[\pm 0,20 \pm 0,39]$, $[\pm 0,40 \pm 0,59]$, $[\pm 0,60 \pm 0,79]$ y $[\pm 0,80 \pm 1,0]$, que representan las correlaciones muy débil, débil, moderada, fuerte y muy fuerte, respectivamente (Evans, 1996).

Se usó la técnica de suavizado de medias móviles para visualizar el comportamiento de las series de precipitación.

Resultados

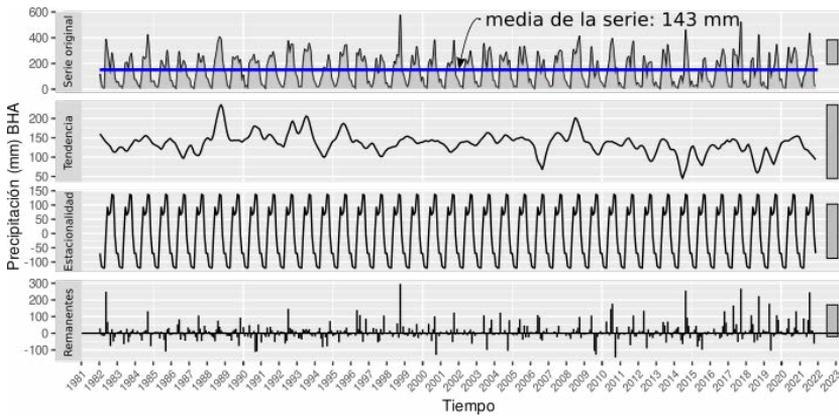
Se presentan los resultados por cada una de las ecorregiones del Área de Conservación Guanacaste.

Precipitación por ecorregión en el ACG

La media histórica para la ecorregión BHA es 143mm (Figura3), la cual no difiere mucho de la ecorregión BHE que es 154mm (Figura 4). Por otro lado, y como lo muestra la Figura 5, la ecorregión BMT, posee la media de 184mm, la cual es la más alta de todas las ecorregiones, mientras que la ecorregión Manglares presenta 133mm, similar a los BSP con 139mm.

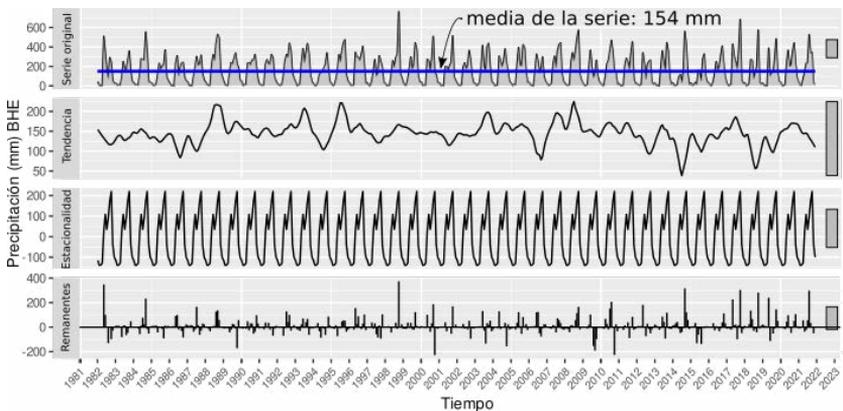
Como se muestra en la Figura 1, la ecorregión Manglares (MAN) tiene áreas pequeñas y debido al tamaño de píxel utilizado en los productos CHIRPS, es de esperar que la precipitación en esta ecorregión sea similar a la de los BSP, además de ser vecinas poseen continuidad espacial.

Figura 3. Precipitación y descomposición de la serie de tiempo de la precipitación en mm para Bosques Húmedos del Atlántico (BHA)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Precipitación y descomposición de la serie de tiempo de la precipitación en mm para Bosques Húmedos Estacionales (BHE)

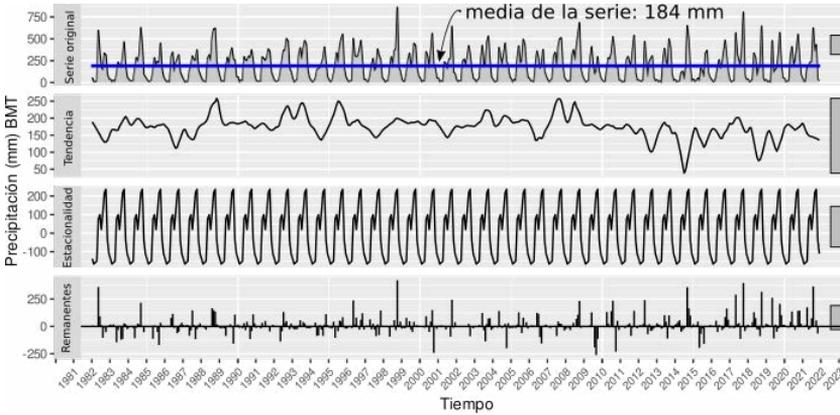


Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, la precipitación media en la ecorregión de BHT es de 184mm (Figura 5), esta ecorregión tiene influencia de la humedad proveniente del Caribe, sin embargo, tiene una estacionalidad marcada que va de mayo a noviembre, con un descenso en la precipitación en julio. La precipitación de esta ecorregión, en la curva de tendencia, presenta una fuerte disminución en el año 2015, donde se registró un Niño fuerte.

En esta ecorregión, se dan las más altas elevaciones en promedio con 1154m.s.n.m con una elevación mínima de 641 y una máxima de 1906m.s.n.m, en el Parque Nacional Rincón de la Vieja (NASA 2000). En esta ecorregión y dadas las características de elevación y de su posición respecto a los vientos, se encuentra lo que se denomina bosque nuboso (Personal del Área de Conservación Guanacaste, 2022).

Figura 5. Precipitación y descomposición de la serie de tiempo de la precipitación en mm para la ecorregión Bosques Húmedos de Talamanca (BHT)

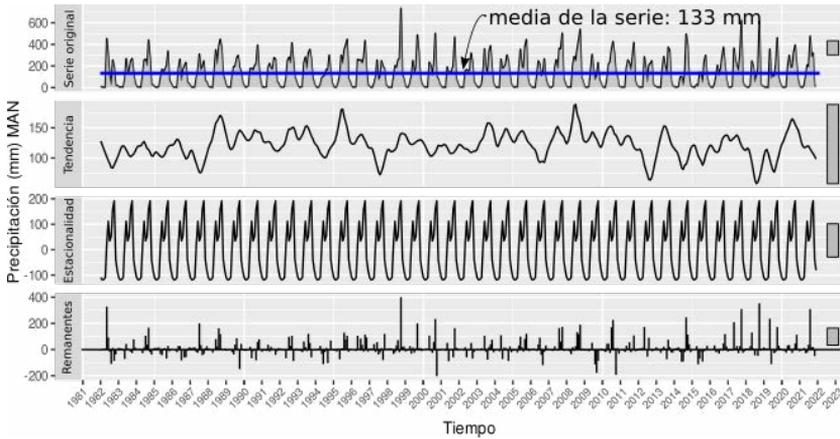


Fuente: Elaboración propia.

La ecorregión Manglares, en el ACG, posee dos picos recientes de tendencia de poca precipitación, uno en 2012 y el otro en 2018-2019. Esto difiere de la tendencia de BMT, BHE y BHA. Esta ecorregión posee al igual que todas, una estacionalidad marcada.

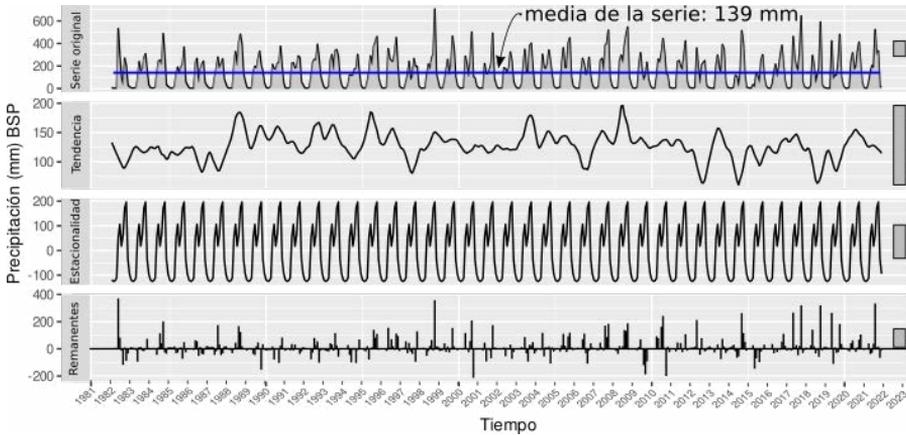
En la ecorregión de BSP encontramos tres picos recientes de descenso en las precipitaciones, mostrados por la curva de tendencia. El primero en 2012-2013, el segundo en 2014-2015 y el tercero en 2018-2019 (Figura 7). Este comportamiento que se muestra en la curva de tendencia parece indicar que la tendencia general es la de disminuir la precipitación en esta ecorregión. Parece haber, de igual forma, una fuerte estacionalidad. Este comportamiento es muy similar a la ecorregión MAN.

Figura 6. Precipitación y descomposición de la serie de tiempo de la precipitación en mm para Manglares (MAN)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Precipitación y descomposición de la serie de tiempo de la precipitación en mm para Bosques Secos del Pacífico (BSP)



Fuente: Elaboración propia.

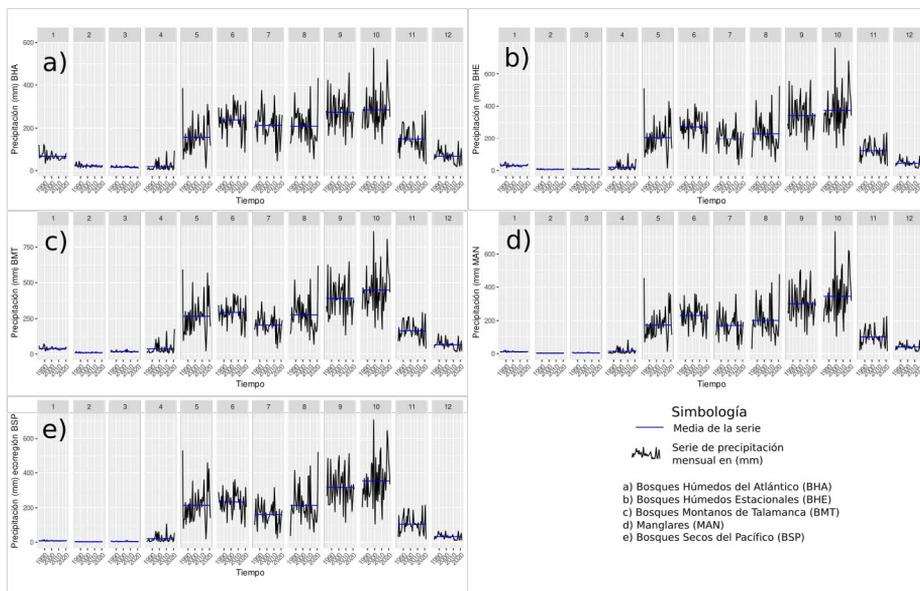
Precipitación mensual por ecorregión

En el conjunto de gráficos presentados en la Figura 8, se presentan las curvas de precipitación mensual por ecorregión. En estos gráficos se puede identificar la estacionalidad, principalmente si se observa la línea de la media de la serie mensual. De igual forma se pueden consultar los

climogramas que se presentan en el Anexo 12. Por ejemplo, las ecorregiones de BSP y MAN presentan meses secos de enero a marzo. Para los meses de diciembre y abril, la media indica que son meses de transición. Resalta un mes de abril en la ecorregión BSP que superó los 100mm de lluvia en el año 2010.

Para todas las ecorregiones, el mes de mayo es el mes de inicio de la estación lluviosa. Para el año 2015, todas las ecorregiones presentan un mes de mayo con precipitaciones menores a 50mm, lo cual es muy por debajo de la media para el mes. Por ejemplo, si tomamos en cuenta la media de los meses de mayo, de las diferentes series donde todas tienen un promedio de superior a 150mm en el mes. Ese mismo año (2015), para todas las ecorregiones se presentan precipitaciones de junio y julio muy por debajo de la media. Por ejemplo, en la BMT, el mes de julio para este año tiene el histórico de julio más bajo.

Figura 8. Precipitación mensual en mm por ecorregión: a) BHA, b) BHE, c) BMT, d) MAN y e) BSP



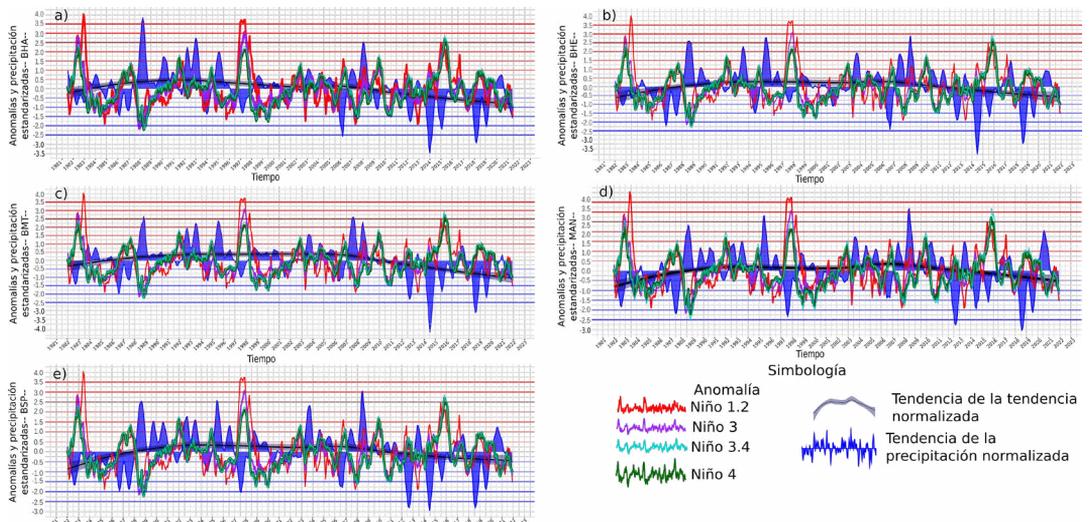
Fuente: Elaboración propia.

El fenómeno ENOS, las tendencias y las correlaciones de la precipitación en las ecorregiones del ACG.

En la Figura 9, se presentan las series de tiempo de las tendencias normalizadas de la precipitación por ecorregión con las temperaturas y sus anomalías por región de monitoreo de las temperaturas superficiales del mar (RMTSM).

En general, el patrón que siguen las curvas consiste en que cuando se dan anomalías en la fase caliente de ENOS, la precipitación disminuye, esto para todas las regiones de RMTSM. Caso contrario, cuando las anomalías son de fase fría (NIÑA) se presentan precipitaciones mayores a lo normal. Sin embargo, hay excepciones, por ejemplo, en la ecorregión BHA en el año 2009, hubo una anomalía en la región de RMTSM Niño 1.2 de +1.12 y una tendencia en precipitación de +2.5. El mismo fenómeno ocurrió en 1994 sólo que con tendencia a menos precipitación cuando hubo una fase fría de -1.22 en la región Niño 1.2.

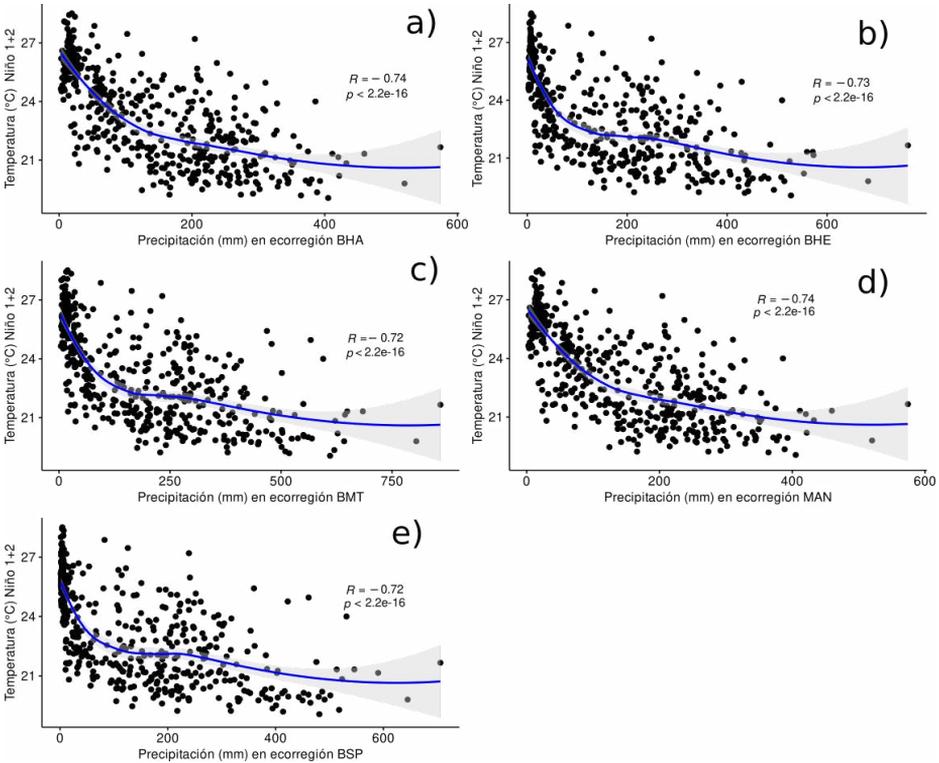
Figura 9. Tendencias de la precipitación normalizadas por ecorregión con las anomalías de las regiones de monitoreo de las temperaturas superficiales del mar (RMTSM). En a) BHA, b) BHE, c) BMT, d) MAN y e) BSP.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 10, se presentan las correlaciones para las ecorregiones y únicamente la temperatura en la RMTSM Niño 1.2. Sin embargo, en el cuadro en anexo 2, se pueden consultar todas las pruebas de contraste r y sus respectivos valores de p .

Figura 10. Correlaciones entre la precipitación en las ecorregiones a) BHA, b) BHE, c) BMT, d) MAN y e) BSP contra la temperatura superficial del mar en la región Niño 1.2.



Fuente: Elaboración propia.

Todas las ecorregiones del ACG, en la prueba r , para las temperaturas superficiales en la región Niño 1.2, presentan valores catalogados como fuertes ($[\pm 0,60 \pm 0,79]$). Las correlaciones son negativas, es decir cuando se disminuye en temperatura, aumenta en precipitación. El resto de los valores de r para las otras regiones y sus anomalías son muy débiles a débiles.

Igualmente, y dado que la región Niño 1.2, fue la que presentó los valores de correlación más altos, es que se presenta en el Anexo 12 los climogramas por ecorregión. En estos climogramas, se puede evidenciar que cuando los valores de la temperatura superficial en Niño 1.2 son los más altos para los meses secos en todas las ecorregiones y caso contrario, cuando estas temperaturas presentan los valores bajos es que se dan las precipitaciones más altas por mes.

Discusión

- Series por ecorregión:

Los valores de las medias de las series de tiempo difieren para todas las ecorregiones. La mayor diferencia la presenta la ecorregión de BMT que posee la influencia de los vientos del Caribe, que provoca mucha nubosidad y humedad.

Con respecto a la variación de la precipitación mensual, existe estacionalidad en todas las ecorregiones, sin embargo, en los años 2014 y 2015, se presentaron anomalías en todas las RMTSM. Por ejemplo, en la región Niño 1.2 se presenta en el año 2014 una anomalía de 1.36 en el mes de Julio. Para ese mes, la precipitación en ecorregión BSP fue de 22mm de lluvia, cuando el promedio para el mes, en la serie, es de 161mm. Cabe resaltar que la precipitación en BSP en el mes de junio de 2014, fue de 109mm, muy inferior a la media de la serie con 233mm. Por otra parte, en el año 2015, la anomalía para la región Niño 1.2 fue de 2.48 como un máximo en el mes de julio. De igual forma que en 2014, para julio de 2015, la precipitación es de 109mm (la media es 161mm). Sin embargo, lo más crítico referente al periodo 2014-2015, fue la poca precipitación que cayó en el mes de mayo de 2015 con únicamente 18 mm, cuando la media del mes, en la serie para esta ecorregión fue de 208mm en BSP. Los meses siguientes, de junio a octubre, tienen valores por debajo de la media, esto llevó a la declaratoria de emergencia por sequía para los cantones de la provincia de Guanacaste (entre otros) (MP-MAG, 2015). Para esta ecorregión (BSP) que normalmente tiene una estacionalidad bien marcada, el estrés hídrico provocado por el efecto combinado de precipitaciones por debajo de la media en dos años (2014-2015) pudo haber influido en la dinámica fisiológica de muchas especies. Por ejemplo, en mortalidad de robles encinos

(*Quercus oleoides*) que se pueden notar a simple vista en muchas áreas con robles encinos en los Parques Nacionales de Santa Rosa y Parque Nacional de Guanacaste. Esta mortalidad ha sido documentada por (Powers et al. 2020). Por otra parte, el cómo las especies se adaptan a eventos de déficit de agua, ha generado el interés de la comunidad científica, particularmente por la preocupación de que los eventos extremos aumenten en magnitud y frecuencia (Corlett, 2016; Allen et al. 2017; Pfeifer et al. 2018).

Cabe señalar que para las ecorregiones BHA, BHE la precipitación en el mes de mayo de 2015 fue de 12.6mm y 15.3mm respectivamente. Estos valores están por debajo de la media histórica del mes de abril con 19.2mm y 20.3mm, respectivamente, esto por supuesto, está totalmente abajo de la media histórica para mayo que es 157.3 y 205.7 en el mismo orden de BHA y BHE. Esta irregularidad implica, prácticamente, un alargue de la estación lluviosa de un mes.

Con relación al fenómeno ENOS y las tendencias de la precipitación en ACG, y como se mostró en la Figura 9, la tendencia normalizada en todas las ecorregiones es a disminuir en precipitación a medida que las anomalías incrementan en temperatura. Por otra parte, todas las ecorregiones muestran una tendencia a la disminución de la precipitación desde el año 2008, con picos de anomalías negativas en 2012, 2014, 2015, 2016, 2018 y 2019. Este comportamiento puede estar relacionado, además, con meses con muy baja precipitación en las estaciones secas de 2014 y 2015, particularmente. Es posible que se presentara un efecto acumulado de menos precipitación en general a partir de 2008. Por ejemplo, en la ecorregión BSP la precipitación en Setiembre de 2009 fue de 109mm, cuando la media histórica es 317mm. De igual forma, en octubre de 2010, la precipitación fue de 134mm, cuando la media del mes es 353mm.

Respecto a las correlaciones entre las series de tiempo de la precipitación por ecorregión con las RMTSM, todas las ecorregiones correlacionaron positivamente con la RMTSM del Niño 1.2. Esta correlación se define como fuerte ($[\pm 0,60 \pm 7,9]$). Esto implica e indica que al ser la región más cercana al territorio continental de Costa Rica y por ende al ACG, el retraso en las series de tiempo es menor que (rezago= cero), que por ejemplo, en la región Niño 4. Si comparamos las series de tiempo de las diferentes RMTSM (Figura 9), vemos que Niño 4, Niño 3.4 son similares en su comportamiento y muy similares en intensidad. El hecho

de que la RMTSM del Niño 1.2 presente correlaciones fuertes con la precipitación, hace que se pueda establecer una relación con las diferentes intensidades de las anomalías del fenómeno ENOS con posibles déficits de precipitación y con base en esto planificar posibles acciones de mitigación. Por ejemplo, el comportamiento de las curvas de las diferentes RMTSM son similares, sin embargo, el fenómeno de ENOS se desarrolla de Este y Oeste del Océano Pacífico Tropical, esto implica que la RMTSM Niño 4, alcanza temperaturas de anomalía antes que las otras regiones de RMTSM. En el año 2018, la RMTSM Niño 4, alcanzó valores de anomalía de la magnitud de 0.5 en Julio. Para ese mismo mes, la RMTSM de Niño 1.2, tenía temperaturas de -0.3, luego fue incrementando hasta llegar a 0.5 en el mes de Octubre (CRRH-SICA 2019). Esto da una diferencia entre regiones para este año de 4 meses, la cual es suficiente para planear acciones, sobre todo en el sector agroproductivo.

Conclusiones

En el presente trabajo se muestra el potencial de predictibilidad de los efectos del fenómeno ENOS sobre el patrón de precipitación para áreas extensas y con cierta homogeneidad ecosistémica, como son las ecorregiones en el Área de Conservación Guanacaste. Para ello se correlacionaron y se estudiaron las series de tiempo desde 1981 hasta 2022, tanto en precipitación como en la temperatura media por región de monitoreo en el Océano Pacífico.

El entender cómo el fenómeno del NIÑO afecta el patrón de estacionalidad y potencia eventos climáticos extremos, es fundamental para entender los efectos en la productividad ecosistémica, así como las posibles repercusiones en ecosistemas específicos, como puede asociarse con la mortalidad de parches de roble encino en el Área de Conservación Guanacaste.

La mejor correlación denominada como fuerte ($[\pm 0,60 \pm 0,79]$), se obtuvo en la Región de Monitoreo de las Temperaturas Superficiales del Mar (RMTSM) Niño 1.2, esto para todas las ecorregiones.

El rezago de la curva de serie de tiempo del RSTSM Niño 4 es de +4 o 5 meses, sin embargo, es posible utilizar esta anomalía, cuando se dé, como indicador de posibles afectaciones en el patrón de precipitación en las diferentes ecorregiones evaluadas.

Para todas las ecorregiones y de forma general, cuando las temperaturas en la región Niño 1.2 son altas, la precipitación disminuye (enero a abril), provocando la estacionalidad. De forma contraria cuando las temperaturas de medias de la serie son bajas, se presenta los picos de precipitación (mayo a octubre). El mes de mayo es crítico, pues inicia la época lluviosa y cuando no llueve lo suficiente en este mes, existe un alargue del periodo seco. Este alargue, tiene puede repercutir en la productividad de los ecosistemas y en la disponibilidad de agua en general.

Con relación a la tendencia de la precipitación, ésta muestra para todas las ecorregiones, una disminución sostenida desde el año 2008. Luego del 2008, se han presentado eventos hidro meteorológicos extremos, especialmente sequías, que pueden relacionarse con la mortalidad de robles encinos. Sin embargo, las causas específicas de esta mortalidad deben corroborarse, por ejemplo, si la mortalidad es por causa de un patógeno.

Referencias bibliográficas

- Allen, K; Allen, K., Dupuy, J., Gei, M., Hulshof, C., Medvigy, D., Pizano, C, Salgado, B, et al. (2017). Will Seasonally Dry Tropical Forests Be Sensitive or Resistant to Future Changes in Rainfall Regimes? *Environmental Research Letters*, 12(2). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5968>.
- Awange, J; Hu, K; Khaki, M. (2019). The Newly Merged Satellite Remotely Sensed, Gauge and Reanalysis-Based Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation: Evaluation over Australia and Africa (1981–2016). *Science of the Total Environment*, 670, 448–65.
- Awange, J; Forootan, E. (2016). An Evaluation of High-Resolution Gridded Precipitation Products over Bhutan (1998–2012). *International Journal of Climatology*, 36(3), 1067–87.
- Beck, H, Vergopolan, N; Pan, M; Levizzani, V; Van Dijk, A; Weedon, P; Brocca, P; Pappenberger, F; Huffman, G and Wood, E. (2017). Global-Scale Evaluation of 22 Precipitation Datasets Using Gauge Observations and Hydrological Modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12), 6201–17.
- Cleveland, R; Cleveland, J; Terpenning, I. (1990). A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess (with Discussion). *Journal of Official Statistics*, 6(1).

- Comité Regional de Recursos Hidráulicos CRRH y Sistema de la Integración Centroamericana SICA. (2019). *El Niño Oscilación Del Sur (Enos)*. CRRH-SICA https://centroclima.org/wp-content/uploads/2019/02/El_Ni%C3%B1o_febrero_2019.pdf.
- Corlett, R. (2016). The Impacts of Droughts in Tropical Forests. *Trends in Plant Science*, 21(7), 584–93. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.02.003>.
- Dee, P; Uppala, S; Simmons, A; Berrisford, P; Poli, P; Kobayashi, S; Andrae, U; et al. (2011). The Era-Interim Reanalysis: Configuration and Performance of the Data Assimilation System. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553–97.
- Dinku, T., Funk, C., Peterson, P., Maidment, R., Tadesse, T., Gadain, H., & Ceccato, P. (2018). Validation of the Chirps Satellite Rainfall Estimates over Eastern Africa. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144, 292–312.
- Evans, J. (1996). *Straight Forward Statistics for the Behavioral Sciences*. Brooks/Cole Pub. Co, Pacific Grove.
- Funk, C., Peterson, P; Landsfeld, P; Pedreros, D Verdin, J; Rowland, B; Romero, Husak, G; Michaelsen, J; and Verdin, A (2015). A Quasi-Global Precipitation Time Series for Drought Monitoring: *U.S. Geological Survey Data Serie,s* 832. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.
- Gorelick, N, Hancher, M; Dixon, M; Ilyushchenko, S; Thau, D; and Moore, R (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale Geospatial Analysis for Everyone. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T., & Lister, D. (2014). Updated High-Resolution Grids of Monthly Climatic Observations—the Cru Ts3. 10 Dataset. *International Journal of Climatologyt*, 34(3), 623–642.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J. et al. (2020). The Era5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049.
- Hsu, K; Gao, X; Sorooshian, S, and Gupta, H. (1997). Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 36(9), 1176–90.

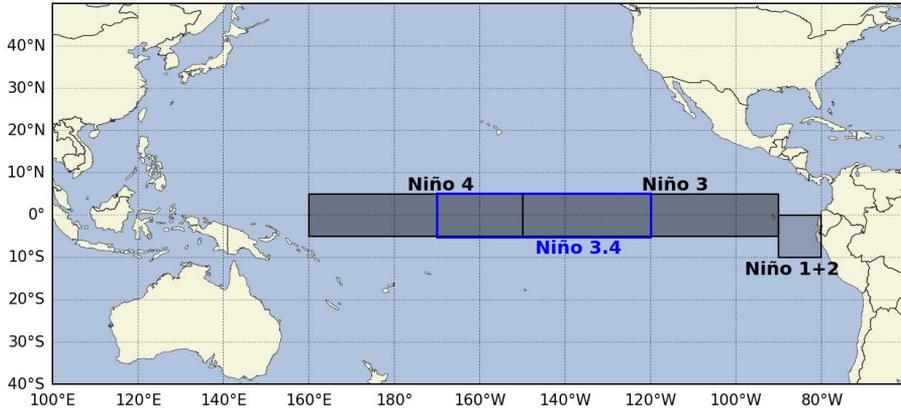
- Huffman, G., Bolvin, D., Nelkin, E., Wolff, D., Adler, R., Gu, G., ... Stocker, E. (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1), 38-55.
- Kidd, C., Bauer, P., Turk, J., Huffman, G., Joyce, R., Hsu, K., & Braithwaite, D. (2012). Intercomparison of High-Resolution Precipitation Products over Northwest Europe. *Journal of Hydrometeorology*, 13(1), 67-83.
- Kummerow, C., Barnes, W., Kozu, T., Shiue, J., & Simpson, J. (1998). The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15(3), 809-817.
- Losada, T., Rodriguez-Fonseca, B., Mohino, E., Bader, J., Janicot, S., & Mechoso, C. R. (2012). Tropical SST and Sahel Rainfall: A Non-Stationary Relationship. *Geophysical Research Letters*, 39(12).
- Ministerio de Planificación-Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2015). *Plan General de la Emergencia por Sequía. Según Decreto Ejecutivo N° 38642-MP-MAG, publicado en La Gaceta N°195, del viernes 10 de octubre del 2014. San José, Costa Rica. CNE. MP-MAG. https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=78091&nValor3=98281&strTipM=TC#ddown.*
- NASA. (2000). *Digital Elevation Model - SRTM 1 Arc-Second 30m*. NASA, NGA. <http://lpdaac.usgs.gov>
- National Centers for Environmental Information. (s.f). *Equatorial Pacific Sea Surface Temperatures*. <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/sst>.
- National Weather Service, Climate Prediction Center (s.f). *Monthly Atmospheric & SST Indices*. <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/sstoi.indices>.
- Olson, D; Dinerstein, E. (2002). *The Global 200: Priority Ecoregions for Global Conservation*. http://maps.tnc.org/gis/_data.html.
- Personal del Área de Conservación Guanacaste. (2022). *Sitio Web Del área de Conservación Guanacaste*.
- Pfeifer, M., Gonsamo, A., Woodgate, W., Cayuela, L., Marshall, A. R., Ledo, A., Paine, P; Marchant, P; et al. (2018). Tropical Forest Canopies and Their Relationships with Climate and Disturbance: Results

- from a Global Dataset of Consistent Field-Based Measurements. *Forest Ecosystems*, 5. <https://doi.org/10.1186/s40663-017-0118-7>.
- Powers, J. S., Vargas G, G., Brodrribb, T. J., Schwartz, N. B., Pérez-Aviles, D., Smith-Martin, C. M., ... & Medvigy, D. (2020). A Catastrophic Tropical Drought Kills Hydraulically Vulnerable Tree Species. *Global Change Biology*, 26(5), 3122-3133. <https://doi.org/10.1111/gcb.15037>
- Qin, Y., Chen, Z., Shen, Y., Zhang, S., & Shi, R. (2014). Evaluation of Satellite Rainfall Estimates over the Chinese Mainland. *Remote Sensing*, 6(11), 11649–72.
- R Core Team. (2021). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>.
- Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Ziese, M., & Rudolf, B. (2014). GPCP's New Land Surface Precipitation Climatology Based on Quality-Controlled in Situ Data and Its Role in Quantifying the Global Water Cycle. *Theoretical and Applied Climatology*, 115(1), 15–40.
- Serrat, A; Valdes, J; Stakhiv, E. (2014). Water Management Applications for Satellite Precipitation Products: Synthesis and Recommendations. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 50(2), 509–25.
- Sorooshian, S., Hsu, K., Gao, X., Gupta, H., Imam, B., & Braithwaite, D. (2000). Evaluation of Persiann System Satellite-Based Estimates of Tropical Rainfall. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(9), 2035–46.
- Tang, L., Tian, Y., Yan, F., & Habib, E. (2015). An Improved Procedure for the Validation of Satellite-Based Precipitation Estimates. *Atmospheric Research*, 163, 61–73.
- Trenberth, K. (1997). The Definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12), 2771–7. <http://www.cgd.ucar.edu/staff/trenberth/trenberth.papers/defnBAMS.pdf>.
- Wang, B., Liu, J., Kim, H. J., Webster, P. J., Yim, S. Y., & Xiang, B. (2013). Northern Hemisphere Summer Monsoon Intensified by Mega-El Niño/Southern Oscillation and Atlantic Multidecadal Oscillation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(14), 5347–5352. <https://doi.org/10.1073/pnas.1219405110>

- Wilks, D. (2011). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic press.
- Wu, W., Li, Y., Luo, X., Zhang, Y., Ji, X., & Li, X. (2019). Performance Evaluation of the Chirps Precipitation Dataset and Its Utility in Drought Monitoring over Yunnan Province, China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 2145–62.
- Yan, G; Yi, L; Xi, C. (2018). Evaluating Satellite-Based Precipitation Products in Monitoring Drought Events in Southwest China. *International Journal of Remote Sensing*, 39(10), 3186–3214.
- Yun, K; Lee, J. Timmermann, A; and et al. (2021). Increasing Enso–Rainfall Variability Due to Changes in Future Tropical Temperature–Rainfall Relationship. *Communications Earth & Environment*. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00108-8>.
- Zambrano, M. (2020). *HydroTSM: Time Series Management, Analysis and Interpolation for Hydrological Modelling*. <https://github.com/hzambran/hydroTSM>.

Anexos

Anexo 1. Regiones de monitoreo de la temperatura superficial del mar (RMTSM) para el fenómeno ENOS en el Pacífico Ecuatorial



Fuente: Trenberth (1997); National Centers for Environmental Information (s.p).

Anexo 2. Cuadro de valores por ecorregión para prueba de contraste del valor r , el valor de significancia p para las temperaturas superficiales y las anomalías de las temperaturas respectivas. Las ecorregiones son: Bosques Húmedos del Atlántico (BHA), Bosques Húmedos Estacionales (BHE), Bosques Montanos de Talamanca (BMT), Manglares (MAN) y Bosques Secos del Pacífico (BSP)

**Cuadro
Valores por ecorregión**

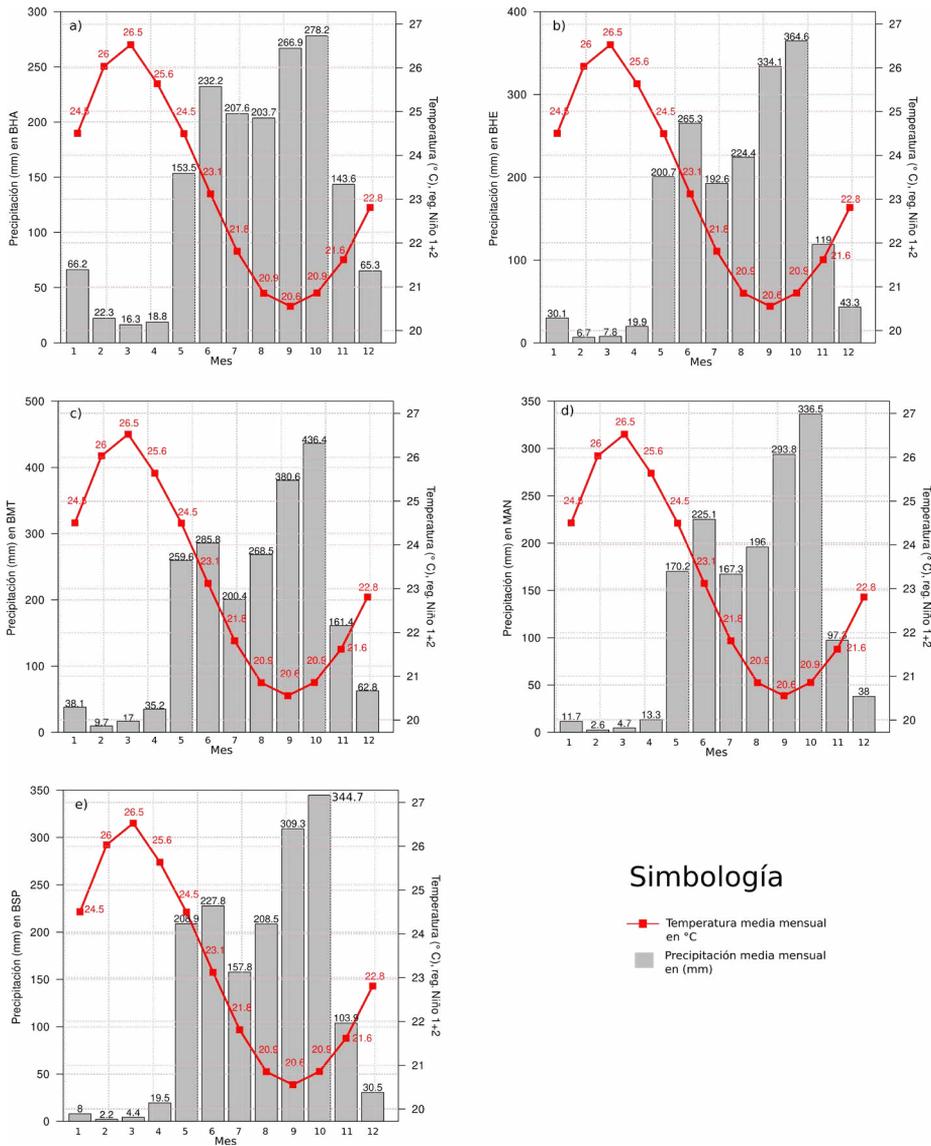
Ecorregión	r Temp Niño 1+2	Valor p	r Anom. Niño 1+2	Valor p	r Temp Niño 3	Valor p	r Anom Niño 3	Valor p	r Temp Niño 3,4	Valor p	r Anom Niño 3,4	Valor p	Rr Temp Niño 4	Valor p	r Anom Niño 4	Valor p
BHA	-0.74	<2.2e-16	-0.31	1.633e-12	-0.44	<2.2e-16	-0.36	2.834e-16	-0.09	0.03505	-0.36	9.361e-16	0.18	8.408e-05	-0.35	9.361E-16
BHE	-0.73	<2.2e-16	-0.29	6.856e-11	-0.38	<2.2e-16	-0.37	<2.2e-16	-0.04	0.4123	-0.38	<2.2e-16	0.21	2.924e-06	-0.38	<2.2e-16
BMT	-0.72	<2.2e-16	-0.26	4.297e-09	-0.4	<2.2e-16	-0.38	<2.2e-16	-0.03	0.5359	-0.39	<2.2e-16	0.21	3.113e-06	-0.38	<2.2e-16
MAN	-0.74	<2.2e-16	-0.32	1.416e-12	-0.44	<2.2e-16	-0.33	5.672e-14	-0.1	0.0350	-0.32	2.992e-13	0.18	8.408e-05	-0.32	2.992e-13
BSP	-0.72	<2.2e-16	-0.31	5.572e-12	-0.34	1.419e-14	-0.34	2.087e-14	-0.003	0.9412	-0.34	2.903e-14	0.22	1.009e-06	-0.34	2.903e-14

Fuente: Elaboración propia.

En el anexo 3 se presentan los climogramas por ecorregión, que muestran los valores medios de precipitación por mes, así como para la temperatura superficial en la región Niño 1.2 en el Océano Pacífico. Se presentan únicamente los climogramas para esta región debido a que las correlaciones resultaron fuertes para la región Niño 1.2. Todas las ecorregiones poseen una estacionalidad marcada con disminución de la precipitación en los meses de diciembre a abril. Sin embargo, la ecorregión de los Bosques Húmedos de Atlántico (BHA), aunque presenta estacionalidad, hay por lo general, el doble de lluvia en los meses de transición de diciembre y abril. Es claro que conforme las temperaturas en la región Niño 1.2 son altas, la precipitación disminuye y viceversa.

Para la elaboración de dichos climogramas se utilizó el paquete en R denominado hydroTSM ([Zambrano, 2020](#)).

Anexo 3. Climogramas para las ecorregiones en estudio y las temperaturas superficiales de la región Niño 1-2



Fuente elaboración propia

