



Revista de la Facultad de Ingenierías - Universidad Nacional de Colombia - Bogotá

DYNA

ISSN: 0012-7353

ISSN: 2346-2183

Universidad Nacional de Colombia

Pérez-Ortiz, Mayra Alejandra; Montenegro-Murillo, Daniel David; Vargas-Franco, Viviana
Análisis de la influencia de la variabilidad climática en la precipitación de la cuenca del río Cali, Colombia
DYNA, vol. 89, núm. 221, 2022, Abril-Junio, pp. 168-177
Universidad Nacional de Colombia

DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v89n221.101607>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49672735019>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UNEN  redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Análisis de la influencia de la variabilidad climática en la precipitación de la cuenca del río Cali, Colombia

Mayra Alejandra Pérez-Ortiz ^a, Daniel David Montenegro-Murillo ^a & Viviana Vargas-Franco ^b

^a Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Facultad de Ingeniería y Administración, Palmira, Colombia. maperezo@unal.edu.co, ddmontnegrom@unal.edu.co

^b Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Departamento de Ciencias Básicas, Palmira, Colombia. vvargasf@unal.edu.co

Received: March 13th, 2022. Received in revised form: April 25th, 2022. Accepted: May 12th, 2022.

Resumen

El análisis de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación es un componente trascendental para la toma de decisiones en las cuencas hidrográficas debido a que influye en las actividades de las personas que habitan dichas cuencas; sin embargo, en Colombia este tipo de investigaciones se desarrollan principalmente a nivel nacional y departamental, dejando a un lado los estudios a nivel de cuenca hidrográfica. Razón por la cual, en este estudio, se realizó un análisis de la influencia del fenómeno El Niño Oscilación del Sur sobre la distribución espacial y temporal de la precipitación en la Cuenca Hidrográfica del río Cali. La metodología consistió en la estimación de datos faltantes, estimación de anomalías de precipitación y comparación de diversos índices como ONI, SOI y EMI y el análisis espacial y temporal de la precipitación. Durante los años de estudio 1972 a 2016 se observó una disminución del 10% de las lluvias en la zona alta de la cuenca del río Cali, con una tendencia negativa, además, se comprobó que los meses de mayo y agosto son más susceptibles a eventos de precipitación extremos en periodos del fenómeno ENOS. Entre las causas probables de la disminución de las precipitaciones en la zona de estudio, se ha encontrado que el cambio en el estado medio de las precipitaciones en el pacífico tropical (región andina) tienden a mostrar un patrón similar a El Niño.

Palabras clave: variabilidad climática; cuenca hidrográfica; ENOS; fenómeno El Niño; ONI; río Cali.

Analysis of the influence of climatic variability on precipitation in the Cali River basin, Colombia

Abstract

The analysis of the spatial and temporal variability of precipitation is a transcendental component for decision making in watersheds because it influences the activities of the people who inhabit them; however, in Colombia this type of research is carried out mainly at national and departmental levels, leaving aside studies at watershed scale. For this reason, in this study, an analysis of the influence of the El Niño Southern Oscillation phenomenon on the spatial and temporal distribution of precipitation in the Cali River Basin was carried out. The methodology consisted of the estimation of missing data, precipitation anomalies, comparison of various indices such as ONI, SOI and EMI and the spatial and temporal analysis of precipitation. During the study years 1972 to 2016, a 10% decrease in rainfall was observed in the upper area of the Cali River basin, with a negative trend, in addition, it was found that the months of May and August are more susceptible to events of extreme precipitation in periods of the ENSO phenomenon. Among the probable causes of the decrease in rainfall in the study area, it has been found that the change in the average state of rainfall in the tropical Pacific (Andean region) tends to show a pattern similar to El Niño.


Keywords: climatic variability; watershed; phenomenon El Niño; ENSO; ONI; Cali River.

1. Introducción

El comportamiento de las fases extremas de la

precipitación es un tema de gran preocupación en la actualidad, pues se encuentra asociado a los fenómenos de Variabilidad Climática (VC) y Cambio Climático (CC). El

How to cite: Pérez-Ortiz, M.A., Montenegro-Murillo, D.D. and Vargas-Franco, V., Análisis de la influencia de la variabilidad climática en la precipitación de la cuenca del río Cali, Colombia.. DYNA, 89(221), pp. 168-177, April - June, 2022.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia. 
Revista DYNA, 89(221), pp. 168-177, April - June, 2022, ISSN 0012-7353
DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v89n221.101607>

Panel Intergubernamental del Cambio Climático [1], confirmó que el impacto de los humanos en el sistema climático es evidentemente claro y este va en aumento, observándose los impactos en cada uno de los océanos y continentes del planeta. Los cambios climáticos desde 1950 no han tenido precedentes en los últimos milenios o decenios. El IPCC asegura con un 95% de certeza que las actividades humanas son la causa principal del calentamiento global terrestre y de los océanos. Además, enfatiza que cuanto mayor sea la incidencia de la actividad humana sobre el clima, mayores serán los riesgos y amenazas de impactos irreversible, graves y generalizados en la biodiversidad, los humanos y los ecosistemas terrestres y marítimos, y serán más duraderos los cambios en cada uno de los componentes del sistema climático [1]. El CC hace referencia a los continuos cambios en cuanto a las condiciones medias climáticas expresadas en la modificación, permanente o significativa, de la variabilidad alrededor de los datos promedios atmosféricos a grandes escalas de tiempo, a causa de procesos naturales o forzamientos externos como los cambios provocados en la composición de la atmósfera como consecuencia de actividades humanas [1]. Mientras que la VC está sujeta a las variaciones en las condiciones estadísticas del clima (fenómenos extremos, desviaciones típicas, entre otros), en todas las escalas espaciales y temporales, que no se ven limitadas por un fenómeno meteorológico en particular [2]. La VC se ve expresada en fenómenos naturales como El Niño, cuya manifestación se produce por el calentamiento del océano Pacífico, causando una disminución considerable en la cantidad de precipitación y un aumento en la temperatura del aire, y La Niña, que se expresa por el enfriamiento anormal de las aguas superficiales en el Pacífico central y oriental, en el caso de Colombia, frente a las costas del sur del país [3]. En este contexto, se encuentran hechos tales como los sucedidos en el periodo 1997-1998, donde una gran cantidad de ríos en Colombia disminuyeron sus caudales mínimos en comparación con los promedios mensuales, provocando sequías que dominaron cerca del 90% del país [4]. De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua (ENA) [5], Colombia es altamente sensible a la variabilidad hidroclimática, donde las zonas correspondientes en las áreas hidrográfica Magdalena – Cauca, Caribe y el Pacífico presentan la mayor variabilidad hidroclimática.

Diferentes autores se han encargado de desarrollar análisis de anomalías, tendencias, patrones espacio temporales de la precipitación, entre otras investigaciones [6-8], evidenciando así que el estudio del CC y las variables que lo constituyen son uno de los temas con mayor relevancia en la actualidad, pues se convierten en herramientas para la toma de decisiones en la adaptación del desarrollo cultural y de pensamiento de las poblaciones actuales [9]. Sin embargo, estas investigaciones no tienen mayor desarrollo en lugares específicos de países como Colombia, pues aunque se han realizado estudios concernientes a las ofertas hídricas en cuencas hidrográficas, cuyas variables de entrada solicitan datos históricos de precipitación, estos no contienen resultados contundentes en cuanto al comportamiento histórico de lluvias en las zonas estudiadas y, por ende, se limitan las herramientas para la toma de decisiones en

aspectos generales tales como las perturbaciones en las labores pesqueras, agrícolas, pecuarias [10], entre otras actividades que fomentan el desarrollo social y económico de una población. Además, se sabe que los eventos de precipitación extrema y sus características espacio temporales cobran relevancia para el desarrollo de aplicaciones prácticas tales como modelamientos hidrológicos, diseño de estructuras hidráulicas, planeación urbana, entre otros [11].

El comportamiento de la precipitación en Colombia tiene varias incidencias (lluvias torrenciales, sequías, inundaciones, crecientes, entre otros) y variables que se deben tener en cuenta, entre estas el Fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) ya mencionado, donde estudios realizados retratan los resultados producto de las evaluaciones sobre su influencia en las conductas de las lluvias. Por ejemplo, se ha utilizado el software Climate Explorer para evaluar la influencia de dichos eventos en la precipitación y temperatura de Colombia, donde determinan que El Niño tiene mayor fuerza en el centro, occidente y norte del país [12]. Con respecto a la zona de estudio, en el Estudio Nacional del Agua [5] se identificó que la región correspondiente a la cuenca hidrográfica del río Cali se caracteriza por presentar un índice de aridez moderado a deficitario del agua. Cardona et al. [13], calcularon diferentes índices para detectar cambios o tendencias en la precipitación diaria de la cuenca del río Cali, donde encontraron tendencias mayoritariamente positivas con incrementos equivalentes de 14,5 mm/año hacia el Nor-Este de la cuenca e identificaron que las precipitaciones máximas tienden a aumentar en las zonas baja y alta de la cuenca. Montoya y Carvajal [14] concluyen que la cuenca del río Cali tiende a concentrar importantes volúmenes de agua a causa de lluvias intensas, lo que promueve la formación de crecientes de gran magnitud.

Por otro lado, en otras investigaciones se determina el fuerte impacto de los fenómenos ENOS en la parte sur de América Latina, tanto en escalas de tiempo estacionales como interanuales, hecho determinado gracias al análisis efectuado sobre la respuesta de precipitación a estos eventos, teniendo en cuenta las diferentes características regionales de la precipitación sobre dicha zona [15-16]. En este contexto, se utiliza como recurso analítico las anomalías de precipitación y la regionalización, identificando cómo las anomalías húmedas (o positivas) resultan de la mejora de las propiedades de circulación climática que ya existen, favoreciendo la precipitación durante una temporada dada en regiones particulares, donde el patrón mejor definido para dicho resultado es el de La Niña [15-16].

Considerando lo anteriormente mencionado, es relevante comprender que tanto los ecosistemas como la sociedad son muy sensibles a la variabilidad climática y sus extremos, otro claro ejemplo es la incidencia que tiene una gran ola de calor, pues esta produce mayores impactos sobre la integridad humana que la suma de varios días calurosos [17]. Entonces, es importante reconocer que la detección oportuna de los cambios abruptos en los eventos climáticos específicos y sus impactos, se constituyen como herramientas esenciales para la comprensión de la base científica del CC y la VC para la toma de decisiones [18]. Además, se debe considerar que dichos eventos sean investigados dentro de contextos regionales [19], de tal forma que exista una mayor asertividad en los resultados obtenidos; por ejemplo, la elección

de un acontecimiento catalogado como sequía en una etapa determinada, depende de la hidroclimatología de la región, la vulnerabilidad de sus componentes sociales y ecológicos, el propósito del estudio y la disponibilidad de la información [20], por tanto, se identifica que estas diferencias resultan principalmente porque el clima de cada región se ve influenciado por la posición continental, la latitud, la longitud, la condición topográfica y los sistemas de circulación atmosférica, conllevando a que las respuestas al CC tiendan a variar [21].

Finalmente, se encontró que se ha empleado la comparación con algunos indicadores macro-climáticos congruentes con la zona de estudio, en orden de evaluar los cambios en las temperaturas y precipitaciones extremas en Indonesia [22].

Por lo tanto, siguiendo este orden de ideas y las diferentes metodologías empleadas para evaluar uno o más eventos asociados a las precipitaciones, en este artículo se aplicaron diferentes análisis utilizando el apoyo de los autores ya mencionados, con el fin de desarrollar un estudio sobre el fenómeno ENOS y el comportamiento de las lluvias en la cuenca hidrográfica del río Cali durante el periodo 1972-2016.

2. Materiales y métodos

2.1 Zona de estudio

La cuenca hidrográfica del río Cali se encuentra ubicada en el suroccidente del departamento Valle del Cauca sobre la región andina colombiana (Fig. 1), cuenta con un área aproximada de 215 km² y se extiende desde la cordillera Occidental en los Farallones de Cali a una altura cercana a los 4000 msnm, hasta su desembocadura en el río Cauca a aproximadamente 1000 msnm. Esta cuenca se encuentra dotada de una alta biodiversidad y provee una gran variedad de servicios ecosistémicos tales como regulación climática, regulación del recurso hídrico, recreación y ecoturismo, entre otros, además, contiene aproximadamente 1086 nacimientos hídricos y el mayor uso que se le da al agua está orientado hacia las actividades domésticas, contribuyendo con el 20% del suministro de agua en el municipio de Santiago de Cali [23]. De igual forma, el 12,27% de la cuenca se encuentra destinado para zonas urbanas y suburbanas, el 2,2% para zonas industriales, mayoritariamente el 20,14% para ganadería extensiva, el 3,16% para cultivos transitorios y permanentes, entre otros usos del suelo, que demuestran su importancia para el desarrollo, social y económico de su población, permanente o transitoria [23].

2.2 Datos

Los datos de precipitación utilizados para el presente artículo se obtuvieron a través la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Se recopiló información de 11 estaciones pluviométricas, pluviográficas y climatológicas (Tabla 1) para un periodo de 44 años (1972 – 2016), de las cuales 10 pertenecen a la CVC [24] y una de IDEAM [25] (Fig. 1). Adicionalmente, se utilizaron 24 estaciones aledañas a la cuenca para realizar las diferentes interpolaciones y observar la distribución espacial y temporal de las precipitaciones.

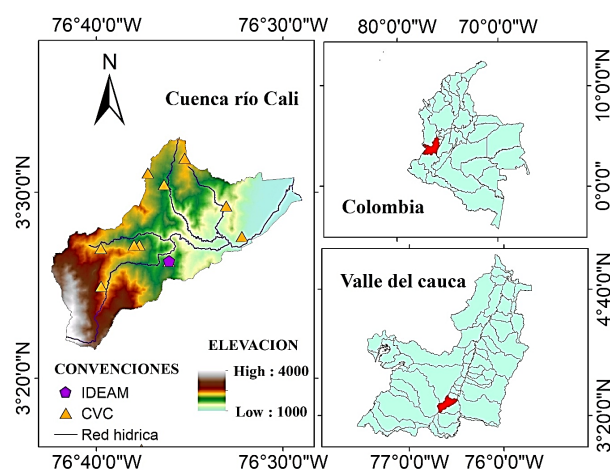


Figura 1 Ubicación geográfica de la cuenca hidrográfica del río Cali. Fuente: los autores.

Tabla 1.

Estaciones pluviométricas (PM), pluviográficas (PG) y climatológicas (CL) localizadas sobre la cuenca del río Cali.

Estación	Longitud	Latitud	Fuente	Tipo
Aguacatal	-76,606189	3,506601	CVC	PM
Brasilía	-76,628423	3,452556	CVC	PG
Colegio San Luis	-76,5366	3,460086	CVC	PG
La Leonera	-76,633012	3,452657	CVC	PM
La Teresita	-76,662901	3,449742	CVC	CL
Montebello	-76,550582	3,487402	CVC	PM
Peñas Blancas	-76,662484	3,415628	CVC	PG
Pichinde	-76,601556	3,438194	IDEAM	PM
San Pablo	-76,620675	3,517025	CVC	PM
Villa Aracelly	-76,587885	3,530407	CVC	PM
Yanaconas	-76,601796	3,438151	CVC	PM

Fuente: CVC [24]; IDEAM [25].

2.3 Procedimiento

Para estimar la influencia del fenómeno ENOS en el comportamiento de las precipitaciones en la cuenca del río Cali, se realizaron una serie de pasos secuenciales que permitieran cumplir con el objetivo trazado del estudio (Fig. 2). A continuación, se presenta un esquema metodológico del procedimiento desarrollado para luego hacer un desglose más específico del mismo.

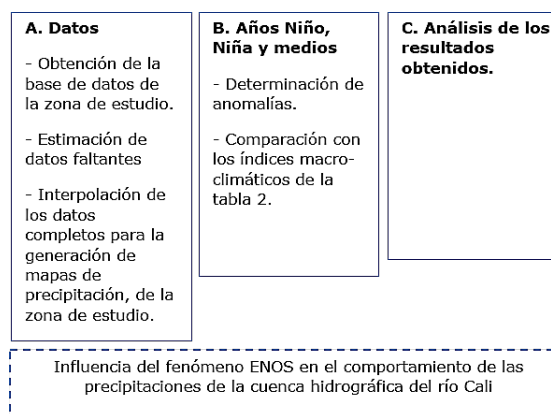


Figura 2 Esquema metodológico del procedimiento empleado para la obtención de resultados.

Fuente: los autores.

2.4 Análisis y tratamiento preliminar de las bases de datos

Uno de los mayores inconvenientes de las bases de datos de precipitación es la falta de algunos valores, por lo cual se realizó un proceso de análisis de valores faltantes y reconstrucción de bases de datos mediante el método de redes neuronales función base radial (mediante el lenguaje de programación R), teniendo en cuenta que este que logra altas eficiencias de acuerdo con lo descrito por Matich [26].

2.5 Índices macro climáticos asociados al ENOS

Debido a la gran influencia que han tenido los fenómenos climáticos en las actividades humanas, ha sido necesario crear herramientas que representen o estimen la situación climática global [27], hecho que conlleva al desarrollo de distintos índices, teniendo en cuenta la no estacionalidad de dichos fenómenos. Existen diferentes índices macro-climáticos, sin embargo, con base al artículo de Ávila et al. [10] se eligieron tres (Tabla 2), considerando que estos son los que mejor representan el fenómeno ENOS en Colombia. El comportamiento de los índices es comparado en el presente estudio.

Para la selección de años Niño, Niña y Normales, se obtuvo la información del periodo disponible en el momento de hacer el estudio (1972-2016), de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) [31], como se presenta en la Tabla 3.

Tabla 2.
Índices macro-climáticos

Índice macro-climático	Definición	Interpretación
Índice de Oscilación del Sur (Southern Oscillation Index) SOI	Se basa en la observación de las diferencias de presión a nivel del mar entre Tahití y Darwin, Australia.	La fase negativa del SOI representa la presión del aire por debajo de lo normal en Tahití y por encima de lo normal en Darwin, dando esto cabida al fenómeno del Niño, y en la fase opuesta, al fenómeno de la Niña.
Índice Oceánico del Niño ONI	Se utiliza para identificar eventos fríos (Niña) y cálidos (Niño) en el océano Pacífico tropical. Su cálculo sale de la media móvil de 3 meses de las anomalías de la temperatura superficial del mar para la región comprendida entre 5°N-5°S y 120°O-170°W.	Teniendo en cuenta que sus valores fluctúan entre +1 y -1, se comprende que cuando se obtienen resultados por encima de +0,5 este umbral hace referencia al Niño y cuando estos son inferiores a -0,5, se hace alusión al fenómeno de la Niña.
Índice Multivariado ENOS MEI	Está relacionado con las variables de interacción océano - atmósfera más relevante para el análisis del comportamiento anómalo en el Pacífico tropical, producto que resulta de un proceso estadístico especial de agregación de estas.	Para este índice, cuando un valor da negativo, significa un enfriamiento, contrario a esto, se refiere a un calentamiento, haciendo entonces alusión a los fenómenos Niña y Niño, respectivamente.

Fuente: adaptado de NOAA [28]; Informes Anuales, [29]; Informes Anuales, [30].

Tabla 3.

Años Niño, Niña y normales, pertenecientes al periodo 1972 - 2016.

Fenómeno	Intensidad	Años
El Niño	Débil	1976, 1977, 1979, 1994, 2004, 2006.
	Medio	1986, 1987, 1991, 2009, 2016.
	Fuerte	1972.
	Muy fuerte	1982, 1997, 2015.
La Niña	Débil	1974, 1983, 1984, 1995, 2000, 2011.
	Medio	1998, 2007, 2010.
	Fuerte	1973, 1975, 1988.
Normales		1978, 1980, 1981, 1985, 1989, 1990, 1993, 1996, 1999, 2001, 2003, 2005, 2008, 2012, 2013.

Fuente: Adaptado de NOAA, [31]

2.6 Anomalías de precipitación

Las anomalías son indicadores que permiten interpretar si en un año ha llovido por encima o por debajo de lo normal o lo esperado, convirtiéndose estas en herramientas útiles para la determinación de años Niña y Niño [32]. Entonces, con el fin de comparar las anomalías presentes en el conjunto de datos de estudio con los índices macro-climáticos, se optó por calcular la alteración en porcentaje de las precipitaciones en las 11 estaciones observadas dentro de la cuenca utilizando la ec. (1) [33].

$$\%Anomalía = \frac{X_{pi} - \bar{X}_{pi}}{\bar{X}_{pi}} \times 100\% \quad (1)$$

X_{pi} = precipitación del mes i .

\bar{X}_{pi} = precipitación promedio del mes i en el periodo de tiempo 1972-2016.

2.7 Anomalías vs. índices macro-climáticos

Teniendo en cuenta los diferentes estudios más relevantes para la zona de estudio, que desarrollan la comparación entre las anomalías de precipitación y los índices macro-climáticos [10,22], se aplicó dicho método con el fin de determinar, entre los indicadores tomados en cuenta (Tabla 2), cuál era el más adecuado para definir los años Niño y Niña en la cuenca del río Cali de acuerdo con el comportamiento de su precipitación para luego, realizar los análisis correspondientes. Para evaluar la comparación propuesta, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson el cual es uno de los métodos más usados para interpretar las relaciones existentes entre dos o más variables (ec. 2), de tal forma que se pueda determinar su relevancia, cuyos resultados se encuentran entre +1 y -1 [34].

$$P(\alpha_i, \alpha_j) = \frac{cov(\alpha_i, \alpha_j)}{\sqrt{var(\alpha_i) \times var(\alpha_j)}} \quad (2)$$

Donde: $cov(\alpha_i, \alpha_j)$ es la covarianza, $var(\alpha_i)$ es la varianza de i y $var(\alpha_j)$ es la varianza de j . De este método de comparación se entiende que cuando el producto de la correlación entre las variables es más cercano a +1, su relación viene siendo más directa y cuando este se acerca a -1, la relación presente se considera como indirecta.

2.8 Interpolaciones

Con el fin de obtener mapas con la información de la precipitación sobre la zona de estudio se aplicó el método de *Empirical Bayesian Kriging* (EBK), el cual tiene a la ec. 3 [35] como base para su funcionamiento.

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i) \quad (3)$$

Donde: $Z(S_i)$ es el valor medio en la ubicación i , λ_i hace referencia a una ponderación desconocida para el valor medio en la ubicación i , S_0 corresponde a la ubicación de la predicción y N es la cantidad de valores medidos.

La ventaja de este método consiste en que maneja un conjunto de funciones aleatorias intrínsecas, las cuales le permiten corregir las tendencias de los datos tomando en cuenta que las desviaciones de estos pueden ser significativas o no [35]. Su funcionamiento consiste en la generación y manejo simultáneo de muchos modelos de semivariogramas, en función de la distancia y dirección entre dos puntos y de errores estándar para su consecuente corrección, de tal forma que se obtenga una imagen completa [36].

Cabe mencionar que este método fue aplicado a través del software Arcmap 10.3 usando la extensión Geostatistical Analyst la cual permite la generación de superficies óptimas útiles para el análisis de datos atmosféricos [36].

A partir de estas interpolaciones se realizaron promedios de los diferentes fenómenos ENOS, con lo cual se permitió reconocer cuales son las zonas más afectadas por las sequías o las altas precipitaciones, adicionalmente se realizaron agrupaciones en ciertos intervalos de años describiendo el número de años Niño y Niña que había en cada una y de esta manera reconocer como ha ido evolucionando la influencia del ENOS en el tiempo.

3. Resultados

3.1 Correlación de la precipitación con los índices macro-climáticos relacionados con el ENOS

En la Tabla 4 se observa que la correlación promedio obtenida para el SOI es positiva, hecho contrario a los pertenecientes a los índices MEI y el ONI. Así mismo, el índice con mayor porcentaje de correlación directa le corresponde al SOI debido a la naturaleza positiva de su resultado y, en cuanto al MEI y el ONI, el mayor porcentaje de correlación inversa concuerda con el segundo.

3.2 Distribución espacio temporal del fenómeno ENOS

Con base a los años definidos como Niño (15), Niña (12) y normales (15) [28] (de acuerdo con el índice ONI) se presenta la Fig. 3 donde, inicialmente, se encuentra una notable diferencia en los rangos durante los diferentes fenómenos en los cuales La Niña cuenta con un rango de precipitación de 3232 mm (cuenca alta) y 1174 mm (cuenca baja), mientras que el rango de precipitación de El Niño está comprendido entre 2841-1014 mm.

Tabla 4.

Coefficientes de correlación entre los índices macro-climáticos (SOI, MEI y ONI) y las anomalías porcentuales determinadas.

Estación	SOI	MEI	ONI
Aguacatal	0,127012	-0,1932137	-0,24866024
Brasilia	0,23406384	-0,33589096	-0,35494804
Colegio San Luis	0,15286558	-0,24668712	-0,29342112
La Leonera	0,07249124	-0,19467661	-0,13876644
La Teresita	-0,08372181	-0,07679414	-0,05598958
Montebello	0,2382313	-0,30135249	-0,3209015
Peñas Blancas	0,27447415	-0,37181867	-0,39400153
Pichinde	0,29807382	-0,40808488	-0,44153705
San Pablo	0,26458198	-0,36481591	-0,4225377
Villa Aracelly	0,24170261	-0,33659004	-0,36156186
Yanaconas	0,28676259	-0,40808488	-0,44153705
Correlación promedio	0,19147514	-0,27156876	-0,30590914

Fuente: los autores.

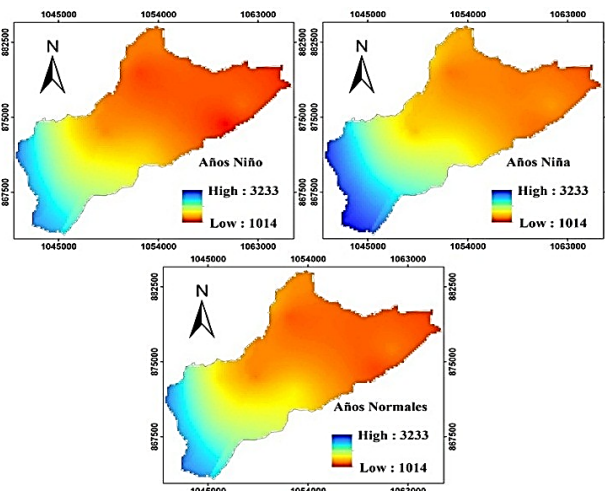


Figura 3 Distribución espacial de las precipitaciones durante los años del fenómeno ENOS y los normales.

Fuente: los autores.

3.3 Distribución espacio temporal de las anomalías teniendo en cuenta los periodos del fenómeno ENOS

Aunque en la distribución espacial de las precipitaciones durante la fase fría o caliente del fenómeno ENOS no se observan cambios sobresalientes, las anomalías confirman la influencia de este evento en la cuenca, la cual se ve afectada principalmente en su parte alta con valores de -126 y 284 mm por debajo y por encima del promedio, respectivamente (Fig. 4); de la misma manera cabe resaltar que de los años que se encuentran dentro del rango que el ONI considera como normales, algunos presentan anomalías negativas o positivas (Fig. 5), por lo cual se puede inferir que este índice no diferencia con precisión algunos años con algunas de las anomalías valoradas en el presente artículo.

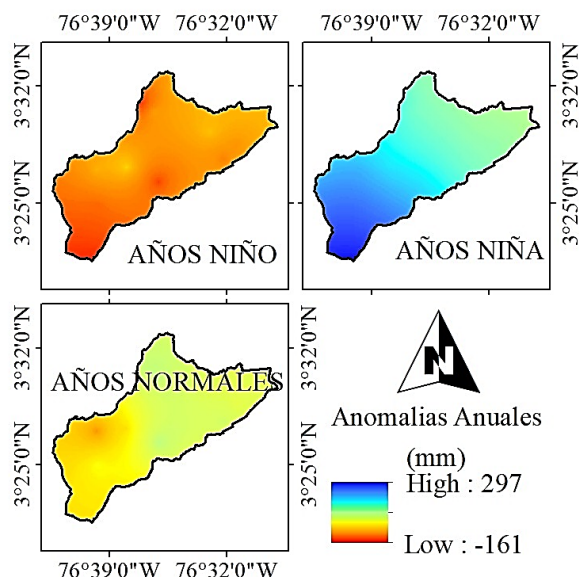


Figura 4 Distribución espacial de las Anomalías durante el fenómeno ENOS.
Fuente: los autores.

Una vez establecidos los mapas de distribución de las anomalías, se muestra en la Fig. 5 el contraste entre estas y el índice ONI, donde la mayor parte de los valores positivos o negativos coinciden, no obstante, la magnitud de estos

difiere, por lo tanto, el posible impacto por un evento Niña o Niño se ve subestimado por el índice ONI. Igualmente, se identifica que las estaciones de Pichinde, Yanaconas (zona media de la cuenca) y San Pablo (zona baja de la cuenca) presentan los valores más cercanos entre las anomalías calculadas y los valores del índice ONI.

3.4 Promedio mensual de precipitaciones

En orden de establecer el promedio mensual de las precipitaciones y su comportamiento se enseña la Fig. 6, donde se comprende que en la cuenca del río Cali en julio y agosto se presenta la menor cantidad de precipitación y en abril y mayo se identifican mayores precipitaciones, en toda la cuenca. Es importante mencionar que en la Fig. 6 todas las curvas (precipitación promedio, años: Normales, Niño y Niña) sobrepasan el límite superior del gráfico de control en abril y mayo, esto implica que, las precipitaciones son altas en estos meses en presencia o ausencia de las fases cálida (Niño) y húmeda (Niña) del ENOS. Con respecto a la Niña, se observa el comportamiento esperado de mayores precipitaciones en todos los meses, donde incluso en los meses más secos la curva no alcanza a sobrepasar el límite inferior de la Fig. 6. No obstante, la curva de los años clasificados como normales presentan un comportamiento más cercano a la curva de la fase Niño. En términos generales, la Fig. 6 denota un comportamiento bimodal de la precipitación en la cuenca hidrográfica del río Cali.

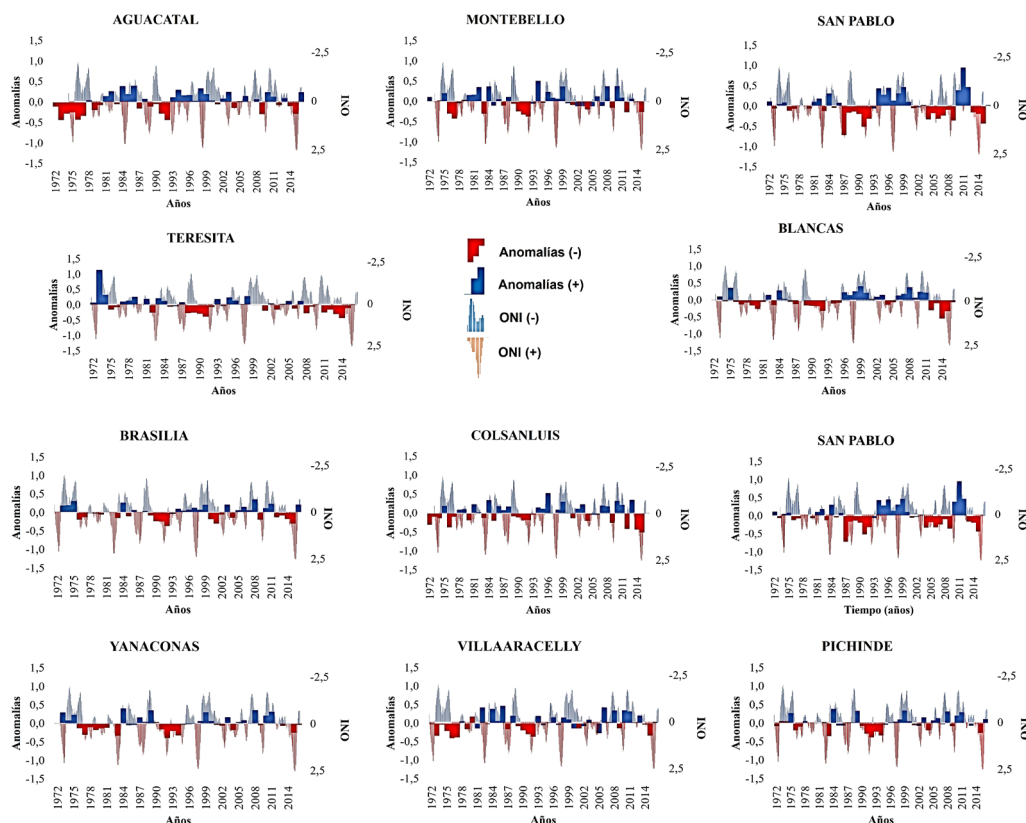


Figura 5 Distribución temporal de las anomalías promedio de precipitación en las estaciones de la cuenca del río Cali.
Fuente: los autores.

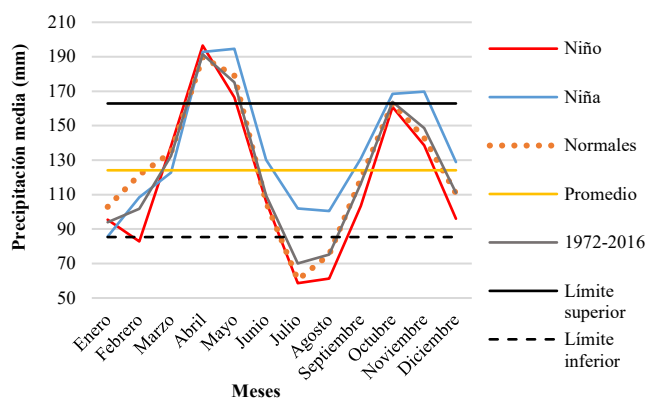


Figura 6 Precipitación media mensual del periodo 1972-2016 en años Niña, Niño y normales.

Fuente: los autores.

3.5 Eventos de precipitación

Los eventos de precipitación permiten observar qué tan frecuente es el número de lluvias sobre un área, de tal forma que se identifiquen intensidades y vulnerabilidades. Para esto se presenta la Fig. 7, donde se aprecia que las estaciones localizadas en la parte alta de la cuenca presentan una mayor cantidad de eventos de lluvia, por encima de los 150 mm de lámina de precipitación, en contraste con aquellas que están ubicadas en la parte baja de la misma, con láminas predominantes de 60 – 120 mm.

De igual forma, se observa que en el periodo de tiempo 1972 – 1982 se presenta un mayor el número de eventos se precipitación en comparación con los años posteriores (en la cuenca alta), soportando así la idea sobre una disminución en la precipitación en la zona y, así mismo, la influencia del evento Niño en el comportamiento general de las lluvias, predominando sobre la fase Niña del fenómeno ENOS [37].

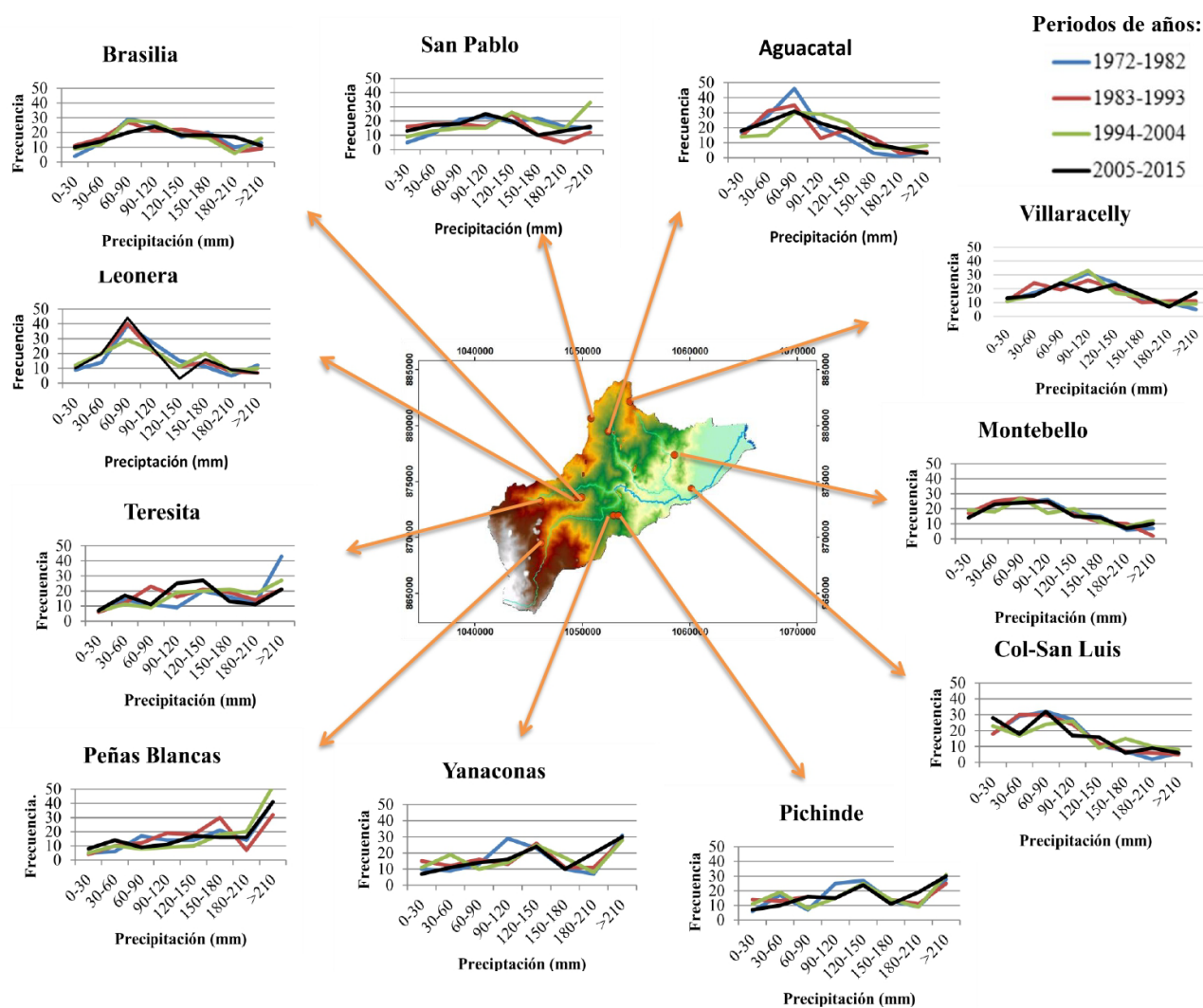


Figura 7 Número de eventos de precipitación en la Cuenca hidrográfica del río Cali, por estación.

Fuente: los autores.

4. Discusión

Teniendo en cuenta lo descrito sobre la correlación de Pearson y su interpretación [34], se comprende que el índice ONI es el índice que presenta mayor afinidad con las anomalías porcentuales generadas a partir de la precipitación en la cuenca del río Cali pues, aunque su resultado es negativo, hay que considerar que la interpretación del ONI es opuesta a la de las anomalías de este estudio, es decir, cuando las anomalías calculadas son positivas, se habla de La Niña en cambio, cuando el índice ONI es positivo se interpreta un fenómeno Niño, ocurriendo el mismo sistema con los valores negativos [32]. Dicho índice es utilizado en otros artículos que tienen en cuenta el fenómeno ENOS para su investigación. Gutiérrez y Carvajal [38] mencionan que el índice ONI se constituye como uno de los más completos para el monitoreo del ENOS, gracias a la cantidad de variables que este maneja. Ávila et al [10] encontraron que el índice ONI representa acertadamente la variable de precipitación sobre la cuenca del río Cali. Enriquez et al [33] utilizaron al índice ONI como uno de los referentes para la selección de años Niña y Niño, gracias a la confiabilidad de sus registros. Por lo anterior, se generó mayor confianza en la escogencia del ONI para el presente estudio.

Por otro lado, con los resultados ya expuestos de la Fig. 4, se ratifica que, con las anomalías de precipitación, se comprenden mejor los cambios extremos que se viven en ambos eventos del fenómeno ENOS [39]. Por su parte, en los años normales no se alcanzan aumentos del 10.8%, pero si se llegan hasta disminuciones del 5.8% con aumentos leves de la precipitación en la zona baja. Por lo tanto, si se comprende que temperaturas promedio globales en un futuro cercano van a aumentar [34], se puede entender que el evento Niño adquiere mayor relevancia en el comportamiento general de la precipitación en la cuenca en cuestión. De igual forma, del presente estudio se observan las reiteradas coincidencias entre los valores de las anomalías y el índice ONI, que indican menores y mayores tasas de precipitación, lo que implica que, al igual que en otros trabajos [15], el índice escogido presenta mayor consistencia con las anomalías negativas (Niño) que con las positivas (Niña). Con respecto a esto, Urrutia y Vuille [40] mencionan que el cambio en el estado medio de las precipitaciones en el pacífico tropical (región andina) tienden a mostrar un patrón similar a El Niño. Lo anterior implica la incidencia de eventos de sequía meteorológica asociados al déficit de precipitación [5]. De acuerdo con IDEAM [5], en el 2015 el país presentó una sequía prolongada sobre las regiones Pacífico, Caribe y la cordillera de los Andes, en este contexto, cuando se comparan estos resultados con las anomalías obtenidas en las estaciones de este estudio sobre la cuenca del río Cali, también se encuentran valores negativos de esta variable, asociados al fenómeno El Niño, por lo tanto, existe coincidencia entre ambos trabajos. Lo anterior resulta por los recurrentes eventos de déficit de precipitación que presenta la región Andina del país, explicado en el ENA [5].

Teniendo en cuenta estos resultados, es importante comprender que el fenómeno El Niño representa un reto para los tomadores de decisiones, ya que, a diferencia de otras amenazas de evolución lenta, este se encarga de exacerbar y

modificar patrones climáticos, así como de fortalecer amenazas como inundaciones, sequías, incendios forestales y enfermedades transmitidas por vectores [41]. Staupe y Kruke [42] concluyen que los enfoques de contingencia no son suficientes para la preparación de las comunidades y ecosistemas a desastres asociados a El Niño, ya que inhibe la gestión proactiva necesaria en la etapa inicial del fenómeno. De esta forma, las comunidades requieren de información oportuna que les permita adoptar estrategias apropiadas para afrontar eventos extremos climáticos, en lugar de esperar los planes de contingencia que se ejecutan solo cuando hay pérdidas significativas [42].

Asimismo, se encontró que la cuenca hidrográfica del río Cali presenta una tendencia bimodal de la precipitación, comportamiento típico de la región andina colombiana, zona en que la cuenca se encuentra ubicada [12,43]. Al igual que en el plan de manejo del parque nacional natural Farallones de Cali [44], en este trabajo se encontró que el comportamiento bimodal se caracteriza por una temporada húmeda (entre marzo – mayo) y dos temporadas secas (diciembre – febrero y junio – agosto).

Finalmente, al considerar los resultados de la investigación, se puede inferir que las personas asentadas en la cuenca, especialmente aquellas localizadas en la parte baja de la misma tienden a sufrir, en mayor medida, la escasez de agua y degradación de los suelos, eventos típicos de la región de los Andes [45] y, así mismo, se estaría hablando de una mayor influencia por parte de la fase Niño en el comportamiento general de las precipitaciones de la zona de estudio, apoyando una vez más la idea de un incremento en las temperaturas promedio globales en un futuro cercano [37]. Por su parte, se presenta la zona alta de la cuenca la cual presenta mayor número de eventos de precipitación que superan los 150 mm, condición que, sumada a las altas pendientes del terreno y sismos, se desencadenan en amenazas de deslizamientos y licuación [44]. Igualmente, el aumento de eventos de precipitación en la zona alta de la cuenca corresponde con el Parque Nacional Natural Farallones de Cali, el cual se caracteriza por presentar lluvias promedio de 2000 a 2500 mm/año y una humedad relativa del 85%, la cual desencadena fuertes precipitaciones conocidas como lluvias orográficas [44].

5. Conclusiones

En este trabajo se investigó el fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) tanto en la distribución espaciotemporal de las lluvias en la cuenca hidrográfica del río Cali, como en la cantidad de precipitación sobre la misma. En primer lugar, se observó que, aunque el índice ONI tiene mayor relación con las anomalías señaladas en la zona de estudio, no necesariamente es el más preciso para señalar los años Niño y Niña del fenómeno ENOS, hecho que probablemente se debe a que este índice es de orden macroclimático, es decir, de orden global y, por lo tanto, no está especializado para la zona en estudio. En segundo lugar, se obtuvo que los regímenes de lluvia sobre la cuenca del río Cali, durante todos los años estudiados, se comportan de igual manera, es decir, mayores precipitaciones en la parte alta y menores en la zona baja. No obstante, de acuerdo con

los fenómenos de El Niño analizados, se observó una mayor afectación en la zona alta de la cuenca por la disminución de las lluvias en un 10%, teniendo en cuenta la información de 3 estaciones ubicadas en la parte alta (Teresita, La Leonera y Peñas Blancas), con una tendencia negativa, en los 45 años del periodo de estudio (1972-2016), hecho corroborado en las gráficas de distribución de anomalías (Fig. 4). En tercer lugar, es consistente que los meses de mayor cuidado en la cuenca corresponden a abril, mayo y junio, con una mayor lámina de precipitación promedio, y a junio, julio y agosto, con una menor lámina de precipitación, debido a que estos se alejan del rango de aceptación de control referido para todos los meses del año promedio, hecho que puede ser aseverado por los fenómenos de la Niña (en el caso de abril, mayo y junio) y el Niño (en el caso de junio, julio y agosto). Este estudio demuestra que la lámina de precipitación de la cuenca tiende a disminuir, hecho que le confiere un mayor peso al evento Niño en cuanto a su influencia en el comportamiento general de las lluvias sobre la zona, indicando entonces la necesidad de emplear planes de acción y adaptación que disminuyan el nivel de vulnerabilidad de las poblaciones presentes en la cuenca más afectadas tomando como prioridad los esquemas de respuesta para los posibles escenarios de sequías.

Finalmente, se recomienda que es importante desarrollar un análisis de tendencias de la influencia de la variabilidad climática en la precipitación de la cuenca hidrográfica del río Cali que facilite el planteamiento de medidas de adaptación para los habitantes frente al fenómeno ENOS.

Referencias

- [1] IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Mitigation of climate change, Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, [en línea]. 2014, 16 P. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_frontmatter.pdf
- [2] Quintero-Angel M., Carvajal-Escobar, Y. y Aldunce, P., Adaptación a la variabilidad y el cambio climático: intersecciones con la gestión del riesgo. Luna Azul, [en línea]. 34, pp. 257-271, 2012. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n34/n34a15.pdf>
- [3] SIAC – Sistema de Información Ambiental de Colombia. Fenómenos del Niño y la Niña, [en línea]. 2017. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/siac/ninoy Nina>
- [4] CAF – Corporación Andina de Fomento. Las lecciones de El Niño. Memorias del fenómeno El Niño 1997-1998. Retos y propuestas para la región andina [en línea], Caracas, Venezuela, 2000. Disponible en: [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/D84B63B2401862B505257E14005821AF/\\$FILE/Las_lecciones_de_El_Ni%C3%B1o_Venezuela.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/D84B63B2401862B505257E14005821AF/$FILE/Las_lecciones_de_El_Ni%C3%B1o_Venezuela.pdf)
- [5] IDEAM – Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Estudio Nacional del Agua, [en línea], Bogotá, Colombia, 2018. Disponible en: <https://cta.org.co/descargables-biblionet/agua-y-medio-ambiente/Estudio-Nacional-del-Agua-2018.pdf>
- [6] Ford, T., Precipitation anomalies in Eastern-Central Iowa from 1640 – Present. Journal of Hydrology, 519, pp. 918-924, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.021>
- [7] Campos-Aranda D., Búsqueda de tendencias en la precipitación anual del estado de Zacatecas, México, en 30 registros con más de 50 años, Ingeniería, Investigación y Tecnología, 16(3), pp. 355-368, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.05.008>
- [8] Zheng Y., He Y. and Chen X., Spatiotemporal pattern of precipitation concentration and its possible causes in the Pearl River basin, China, Journal of Cleaner Production, 161, pp. 1020-1031, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.156>
- [9] Cortés-Cortés, A., Variabilidad espacial y temporal de la precipitación en una ciudad de media montaña andina, MSc Tesis, Departamento de Arquitectura y Urbanismo. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, 2010.
- [10] Ávila-Díaz, A., Carvajal-Escobar, Y. y Gutiérrez-Serna, S., Análisis de la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Cali, Tecnura, [en línea]. 18(41), pp. 120-133, 2014. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-921X2014000300010&script=sci_abstract&tlng=es
- [11] Duan, L., Zheng, J., Li, W., Liu T. and Luo, Y., Multivariate properties of extreme precipitation events in the Pearl River basin, China: magnitude, frequency, timing, and related causes, Hydrological Processes, 31(21), pp. 3662-3671, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.11286>
- [12] Puertas-Orozco, O. y Carvajal-Escobar, Y., Incidencia de El Niño - Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, utilizando Climate Explorer, Revista Ingeniería y Desarrollo, [en línea]. (23), pp. 104-118, 2008. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612008000100009&lng=en&tlng=es
- [13] Cardona-Guerrero, F., Ávila-Díaz, A.J., Carvajal-Escobar, Y. y Jiménez-Escobar, H., Tendencias en las series de precipitación en dos cuencas torrenciales andinas del Valle del Cauca (Colombia), Tecno Lógicas, 17(32), pp. 85-95, 2014.
- [14] Montoya, A.H. and Carvajal, Y., Caracterización fisiográfica e hidrológica: cuenca hidrográfica del río Cali, Ciencia y Tecnología, 1(2), pp. 33-40, 1998.
- [15] Penalba, O. and Rivera, J., Precipitation response to El Niño/La Niña events in Southern South America – emphasis in regional drought occurrences, Adv. Geosci., 42, pp. 1-14, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5194/adgeo-42-1-2016>
- [16] Grimm, A., Barros, V. and Doyle, M., Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events, Journal of Climate, 13(1), pp. 35-58, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<0035:CVISSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<0035:CVISSA>2.0.CO;2)
- [17] Lenton, T., Dakos, V., Bathiany, S. and Scheffer, M., Observed trend in the magnitude and persistence of monthly temperature variability, Scientific Reports, 7(1), pp. 1-10, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06382-x>
- [18] Ummenhofer, C. and Meehl, G., Extreme weather and climate events with ecological relevance: a review, Phil. Trans. R. Soc., 372(1723), 2017. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0135>
- [19] Hisdal, H. and Tallaksen, L., Estimation of regional meteorological and hydrological drought characteristics: a case study for Denmark, Journal of Hydrology, 281, pp. 230-247, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00233-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00233-6)
- [20] Fleig, A., Tallaksen, L., Hisdal, H. and Demuth, S., A global evaluation of streamflow drought characteristics, Hydrol. Earth. Syst. Sci., 10, pp. 535-552, 2006. DOI: <https://doi.org/10.5194/hessd-2-2427-2005>
- [21] Aigang, L., Tianming, W., Shichang, K., Aigang, L. and Deqian, P., DOI: Impact of global warming on altitude effect in China in the past half century, International Conference on Environmental Science and Information Application Technology, 2009, pp. 708-710. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESIAT.2009.553>
- [22] Supari, T.F., Juneng, L. and Aldrian, E., Observed changes in extreme temperature and precipitation over Indonesia, International Journal of Climatology, 37, pp. 1979-1997, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4829>
- [23] CVC – Corporación Regional del Valle del Cauca y Fundación Pachamama. Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Cali [en línea], 1ª Ed., Santiago de Cali, Colombia, [en línea]. 2011. Disponible en: https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/Planes_y_Programas/Planes_de_Ordenacion_y_Manejo_de_Cuencas_Hidrograficas/Cali/POMCH%20Rio%20Cali%202011.pdf
- [24] CVC – Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, Visor Geográfico Avanzado, [en línea]. 2017. Disponible en: https://geo.cvc.gov.co/visor_avanzado/
- [25] IDEAM – Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos, [en

- línea]. 2017. Disponible en: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- [26] Matich, D., Redes neuronales: conceptos básicos y aplicaciones, Universidad Tecnológica Nacional — Facultad Regional Rosario, Departamento de Ingeniería Química, Argentina, [en línea]. 2001. Disponible en: https://www.fro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/5_anio/orientadora/monografias/matich-redesneuronales.pdf
- [27] López-de la Cruz, J., Análisis de la influencia de los fenómenos macroclimáticos en los caudales máximos en la España Peninsular, Programa de doctorado de ingeniería hidráulica y medio ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, España, [en línea]. 2010. Disponible en: http://luvia.dihma.upv.es/ES/publi/tfin_pfc_docs/TFM_JLOPEZ.pdf
- [28] NOAA – National centers for Environmental Information. Southern Oscillation Index (SOI), [en línea]. 2017. Disponible en: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/>
- [29] Informes anuales. Índice oceánico de El Niño (ONI), [en línea]. 2017. Disponible en: [http://informesanuales.xm.com.co/2013/SitePages/operacion/2-8-Anex-Indice-oceanico-de-El-Ni%C3%B1o-\(ONI\).aspx](http://informesanuales.xm.com.co/2013/SitePages/operacion/2-8-Anex-Indice-oceanico-de-El-Ni%C3%B1o-(ONI).aspx)
- [30] Informes anuales. Índice Multivariado ENSO, [en línea]. 2017. Disponible en: <http://informesanuales.xm.com.co/2013/SitePages/operacion/2-9-Anex-Indice-multivariado-ENSO.aspx>
- [31] NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. Cold and warm episodes by season, [en línea]. 2018. Disponible en: http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- [32] IDEAM – Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Informe análisis compuesto según el índice ENSO ONI, para la temperatura media trimestral de Colombia, Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático Subdirección de Meteorología – IDEAM, [en línea]. 2012. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Variabilidad+Climatic+a+Trimestral+Temperatura+%28Ruiz%2C+Guzman%2C+Arango%2C+Dorado%29.pdf/a2b3f5ff-2d8a-4436-be46-8459ced500cb>
- [33] Enriquez, O., Guzmán, A. y Narváez, G., Análisis del comportamiento de la precipitación en el municipio de Buenaventura (Valle del Cauca, Colombia) en condiciones de desarrollo de los fenómenos El Niño y La Niña, Cuadernos de Geografía, 23(1), pp. 165-178, 2014. DOI: <https://doi.org/10.15446/rcdg.v23n1.41090>
- [34] Mu, Y., Liu X. and Wang, L., A Pearson's correlation coefficient-based decision tree and its parallel implementation, Information Sciences, 435, pp. 40-58, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2017.12.059>
- [35] Arcgis for Desktop. ¿Qué es un Kriging Bayesiano empírico?, [en línea]. 2018. Disponible en: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/guide-books/extensions/geostatistical-analyst/what-is-empirical-bayesian-kriging-.htm#>
- [36] Krivoruchko, K., Empirical Bayesian Kriging implemented in ArcGIS Geostatistical Analyst, [en línea]. 2012, pp. 1-10. Disponible en: <https://www.esri.com/news/arcuser/1012/files/ebk.pdf>
- [37] Baker-Blocker, A. and Kahler, K., El Niño and La Niña, Encyclopedia of Environmental Issues, Revised Edition, 2013, 4 P.
- [38] Gutiérrez, S.E., Carvajal, Y. y Ávila, A.J., Estudio de la Influencia del Fenómeno El Niño - Oscilación del Sur en la oferta hídrica de la cuenca hidrográfica del río Dagua, Entre Ciencia e Ingeniería, [en línea]. (13), pp. 26-33, 2013. Disponible en: <https://revistas.ucp.edu.co/index.php/entrecienciaingenieria/article/view/648/650>
- [39] Montealegre-Bocanegra J.E. y Pabon-Caicedo, J.D., La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña-Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia, Meteorol. Colomb., [en línea]. 2, pp.7-21, 2000. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/281605886_La_variabilidad_climatica_interanual_asociada_al_ciclo_El_Niño-La_Niña-Oscilacion_del_Sur_y_su_efecto_en_el_patron_pluviometrico_de_Colombia
- [40] Urrutia, R. and Vuille, M., Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century, Journal of Geophysical Research, 114, pp. 1-15, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008JD011021>
- [41] Zebiak, S.E., Orlove, B., Muñoz, A.G., Vaughan, C., Hansen, J., Troy, T., Thomson, M.C., Lustig, A. and Garvin, S., Investigating El Niño-Southern Oscillation and society relationships, WIREs Climate Change, 6(1), pp. 17-34, 2015.
- [42] Staupé-Delgado, R. and Kruke, B.I., El Niño-induced droughts in the Colombian Andes: towards a critique of contingency thinking, Disaster Prevention and Management, 26(4), pp. 382-395, 2017.
- [43] IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, UNAL – Universidad Nacional de Colombia. la variabilidad climática y el cambio climático en Colombia. Bogotá, Colombia, [en línea], 2018. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023778/variabilidad.pdf>
- [44] Parques Nacionales Naturales de Colombia Dirección Territorial Suroccidente. Plan de manejo parque nacional natural Farrallones de Cali, Cali, Colombia, [en línea], 2005. Disponible en: <https://www.parquesnacionales.gov.co/portal/wp-content/uploads/2013/12/PlandeManejoFarallonesdeCali.pdf>
- [45] Pardo-Martínez, C. I. and Alfonso, W., Climate change in Colombia: a study to evaluate trends and perspectives for achieving sustainable development from society, International Journal of Climate Change Strategies and Management, 10(4), pp. 632-652, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-04-2017-0087>.

V. Vargas-Franco, obtuvo su doble titulación en Matemáticas y Estadística en la Universidad del Valle, Colombia, en los años 1987 y 1994 respectivamente, posee una Maestría en Ingeniería de Sistemas culminada en el año de 1997 y un Doctorado en Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Actualmente se desempeña como docente de estadística en la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira y es directora del Grupo de investigación Monitoreo, Modelación y Gestión de Cuencas Hidrográficas (GECH), donde sus líneas de investigación van enfocadas a la modelación integrada del recurso hídrico, mejoramiento de la calidad del agua y Modelos estadísticos aplicados a la evaluación de los recursos hídricos. ORCID: 0000-0002-6448-9234

D.D. Montenegro-Murillo, completó su pregrado en Ingeniería Ambiental 2018 en la Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia. Actualmente es integrante del Grupo de investigación Monitoreo, Modelación y Gestión de Cuencas Hidrográficas (GECH) y es estudiante de la Maestría en Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, dentro de sus intereses incluye la modelación meteorológica, análisis estadístico de las variables climáticas, pronósticos y el uso de modelos de inteligencia artificial para el procesamiento y análisis de los datos. ORCID: 0000-0002-6881-9544

M.A. Pérez-Ortiz, es Ingeniera Ambiental graduada en el 2018 en la Universidad Nacional de Colombia, Palmira. Actualmente es integrante del Grupo de investigación Monitoreo, Modelación y Gestión de Cuencas Hidrográficas (GECH) y estudiante de la Maestría en Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, dentro de sus intereses se incluyen análisis de la variabilidad y el cambio climático, educación ambiental, uso de modelos de inteligencia artificial para el procesamiento y gestión de cuencas hidrográficas. ORCID: /0000-0001-6792-3537