

Estudio de la Influencia del Fenómeno El Niño - Oscilación del Sur en la Oferta Hídrica de la Cuenca Hidrográfica del Río Dagua¹

Analysis of the Influence of Phenomena El Niño - Southern Oscillation in the Water Supply of the Dagua River Drainage Watershed

S. E. Gutiérrez, Y. Carvajal, A. J. Ávila

Recibido Febrero 25 de 2013 – Aceptado Mayo 30 de 2013

Resumen - El estudio tuvo como objetivo analizar la oferta hídrica en la cuenca hidrográfica del río Dagua durante la ocurrencia de las fases extremas del fenómeno ENOS (El Niño Oscilación del Sur), mediante la implementación del cálculo de anomalías para la estimación de correlaciones significativas de variables macroclimáticas (VM) asociadas a ENOS (MEI, ONI, SOI, TSO en las Regiones Niño 3, Niño 4 y Niño 3-4) en la hidrometeorología de la cuenca. Los resultados indican que las fases extremas de ENOS (El Niño y La Niña) presentan efectos sobre la oferta hídrica de la cuenca, con reducciones del 39% en la media anual de la variable precipitación y aumentos

del 84%, mientras que el caudal del río Dagua, su principal afluente, presenta disminuciones del 40% e incrementos del 50%, respectivamente. Las VM asociadas al ENOS que mayor correlación significativa tienen sobre la hidrometeorología de la cuenca son el MEI ($r=-0,45$) y la Región Niño 3 ($r=-0,55$) a rezagos de 2 y 0 meses, respectivamente. Los resultados obtenidos proveen adelantos en los estudios hidrometeorológicos de la región y sirven como herramienta para la gestión y planificación del recurso hídrico.

Palabras Clave - Anomalía, Cambio Climático, Fenómeno ENOS, Oferta Hídrica, Variabilidad Climática.

Abstract - The study was aimed to analyze water supply in Dagua River watershed, during the occurrence of the ENSO'S extreme phases (El Niño Southern Oscillation). Calculation of anomalies was realized in order to estimate significant correlations of macroclimatic variables (MV) (MEI, ONI, SOI, TSO in the Niño 3, Niño 4 and Niño 3-4 region) at the watershed hydrometeorology. According to results, the ENSO'S extreme phases have effects upon water supply of watershed. The average annual precipitation was reduced 39% by "El Niño", and it was increased 84% by "La Niña". Besides, Dagua river flow, its main tributary, was reduced 40% (by El Niño), and increased 50% (by La Niña). MEI ($r = -0,45$) and the Niño 3 ($r = -0,55$) had significantly higher correlation among MV, over watershed hydrometeorology to lags of 2 and 0 months, respectively. The results provide advances at hydrometeorological studies of the region and attend as a tool for planning and management of water resources.

Key Words - Anomalies, Climate Change, ENSO phenomenon, Water supply, Climate variability.

¹ Producto derivado del proyecto "Estrategias de competitividad y sostenibilidad de sistemas productivos agrícolas en la microcuenca la centella (Dagua - Valle)", del grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos- IREHISA de la escuela EIDENAR de la Universidad del Valle, Cali-Colombia, con el apoyo de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca por el suministro de la información. S.G. Ingeniero Agrícola, Universidad del Valle. Investigador del Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos - IREHISA -. Facultad de Ingeniería. (sergio.gutierrez@correounivalle.edu.co). Y.C. Ingeniero Agrícola. Ph.D. en Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia. Profesor Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. Universidad del Valle. Director del Grupo IREHISA -. Cali. Colombia. (yesid.carvajal@correounivalle.edu.co).

A.A. Ingeniero Agrícola, Universidad del Valle. Joven Investigador de Colciencias. Investigador del Grupo IREHISA -. Facultad de Ingeniería. (alvaro.avila@correounivalle.edu.co).

I. INTRODUCCIÓN

Muchos países del mundo, incluyendo Colombia, se han centrado en estudiar los impactos sobre posibles cambios futuros en las precipitaciones y en los caudales de los ríos como consecuencia del cambio global (término que se refiere al cambio en aspectos generales, climático, político, económico y social) y una de las conclusiones se refiere a la importancia de vincular lo que sucede en la actualidad con la gestión del agua, en términos de su déficit y/o exceso, debido a la variabilidad climática natural [1].

La Variabilidad Climática (VC) y el Cambio Climático (CC) generan anomalías frecuentes en la precipitación que impactan frecuentemente la sociedad y los sectores productivos de nuestro país [2]. La localización al noroccidente de Suramérica propicia la influencia de los procesos que ocurren en los océanos Atlántico tropical, el mar Caribe y el Pacífico tropical, además de su cercanía con la selva amazónica. Colombia es un país susceptible a la manifestación de amenazas y desastres naturales, los cuales en un 90%, están asociados a fenómenos hidrometeorológicos. El Valle del Cauca es uno de los departamentos más afectados por su cercanía al Océano Pacífico [3].

Conocer el porcentaje de reducción y/o aumento de la precipitación y el caudal que se presentan en una cuenca cuando ocurren las fases extremas de El ENOS, es de vital importancia porque permite avanzar hacia un mejor conocimiento del comportamiento de la oferta hídrica en ella, teniendo como referencia que La Niña se caracteriza por la ocurrencia de precipitaciones intensas, crecidas de ríos, avalanchas, sedimentación e inundaciones de planicies [4], y El Niño por la ocurrencia de sequías, incendios forestales y racionamientos de energía; los cuales generan repercusiones sobre el manejo del recurso hídrico y la sociedad. Estudios recientes en el país realizados por [5] - [8], se han centrado en analizar los impactos sobre posibles cambios futuros o proyecciones en las precipitaciones y caudales de los ríos como consecuencia de la VC influenciada por el CC, resaltando la importancia de vincular los resultados a la gestión actual del agua, en función de su déficit y/o exceso por efecto de la VC.

Los cambios registrados hasta el momento en los regímenes de lluvia y de caudal relacionados con las fases extremas de El ENOS, están ocasionando alteraciones en los procesos naturales que conforman el ciclo hidrológico y están afectando la dinámica y la distribución espacio-temporal de la oferta hídrica en las diferentes regiones del país, tanto en cantidad, como en calidad [9]. Actualmente el tema de la conservación de los recursos naturales y en especial del recurso hídrico se han convertido en un asunto de interés mundial debido al deterioro de las fuentes y a la escasez generada por varios factores: unos antrópicos, como la explotación desmedida de las fuentes hídricas o

la contaminación de las mismas, y otros naturales como el fenómeno ENOS, en sus fases extremas.

Para determinar la influencia de las fases extremas de El ENOS sobre la oferta hídrica de la cuenca Dagua se analizaron las alteraciones de las variables hidrometeorológicas precipitación y caudal, mediante el cálculo de anomalías ocurridas durante las fases extremas de El ENOS, El Niño y La Niña, teniendo como referencia los años Normales (No ENOS). Además de las anomalías, a nivel internacional se han usado técnicas estadísticas, desde correlaciones múltiples (medidas a través de coeficientes de correlación Pearson) hasta diferentes tipos de análisis multivariado con series de tiempo, para determinar el grado de asociación de El fenómeno ENOS y la oferta hídrica de una zona determinada [10].

El conocimiento adecuado de las condiciones hidrometeorológicas debido a la influencia de las fases extremas de El ENOS permite: establecer estrategias en la gestión del recurso hídrico, mejorar el conocimiento sobre el comportamiento de los cultivos frente a una determinada coyuntura o condiciones climáticas, minimizar pérdidas tanto humanas como económicas, avanzar en la búsqueda de mejorar la adaptación frente a la VC, así como ajustar los calendarios de siembra y cosecha de acuerdo a las predicciones climáticas y mejorar las organizaciones institucionales tanto públicas como privadas [11].

II. METODOLOGÍA

En este estudio se determinaron las alteraciones de la oferta hídrica influenciadas por la VC y el CC, estableciendo relaciones significativas entre VM asociadas al ENOS y la hidrometeorología de la cuenca; esto con el fin de aportar al conocimiento del comportamiento hidrológico en ésta y brindar elementos de juicio a los planificadores del recurso hídrico en el establecimiento de estrategias y medidas de prevención y mitigación, ante la ocurrencia de eventos extremos.

A. Descripción de la zona de estudio

La cuenca hidrográfica del río Dagua se localiza en el occidente del departamento del Valle del Cauca, vertiente del Océano Pacífico, en el flanco oeste de la cordillera Occidental, limita al sur con la cuenca del río Anchicayá, al occidente con el océano Pacífico, al norte con la cuenca del río Calima y al oriente con las cuencas de los ríos Cali, Arroyohondo, Yumbo, Mulaló, Vijes y Yotoco [12]. Tiene una extensión de 142200 hectáreas, a partir de la costa del Océano Pacífico con 0 msnm hasta los 2600 msnm. El río Dagua nace en los Farallones de Cali, en la línea divisoria de aguas con la cuenca hidrográfica del río Cali, a 2000 msnm aproximadamente, en el corregimiento de San Bernardo, municipio de Dagua y entrega sus aguas al Océano Pacífico [13].

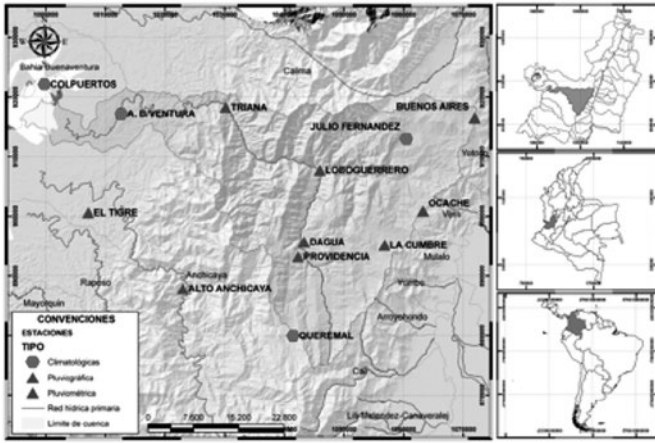


Fig. 1. Ubicación geográfica de la cuenca hidrográfica del río Dagua (Fuente: [14]).

B. Información hidrológica y red de medición

Previo a la obtención de la información utilizada para el estudio, se procedió a determinar las principales características morfológicas y fisiográficas de la cuenca como: área, perímetro, tiempo de concentración, sinuosidad del cauce, índice de alargamiento del cauce, entre otros, dada la relevancia que tiene estos parámetros para inferir el comportamiento de los procesos de transporte del agua en la cuenca.

Posteriormente, se recopiló los registros de precipitación mensual y caudal medio mensual, el análisis exploratorio y confirmatorio de datos para la variable precipitación se obtuvo de los estudios realizados en [15], los cuales realizaron investigaciones en la misma cuenca hidrográfica del río Dagua, en él se llevó a cabo la recopilación de la información temática hidrometeorológica y cartográfica, selección de las estaciones hidrometeorológicas a usar, análisis de estadísticos básicos, estimación de datos faltantes (mediante el método de proporciones normales). Ya con la información completa realizaron el análisis exploratorio de datos (análisis descriptivo, valores extremos, análisis gráfico, prueba de hipótesis para normalidad) y análisis confirmatorio (considerando la prueba no paramétrica de U Mann Whitney).

Para efectos de un mejor desarrollo de la investigación, se dividió la cuenca del río Dagua en dos zonas clasificándolas según la altura sobre el nivel del mar (zona baja de 0 a 900 msnm y zona alta de 900 a 2000 msnm), teniendo en cuenta que este es un factor que delimita procesos climáticos como la precipitación.

C. Análisis de anomalías estandarizadas

Una de las formas de conocer cuánto aumentaron y/o disminuyeron las precipitaciones y los caudales medios trimestrales en la cuenca cuando ocurre un evento extremo asociado al ENOS, consiste en determinar un periodo

común de registros; para este caso el período comprendido entre 1982-2010 en la variable precipitación y 1982-2005 en la variable caudal, para seguidamente calcular anomalías anuales promedio de estas dos variables haciendo uso de (1) para cada evento ENOS ocurrido (años El Niño, años La Niña y años Normales) con el fin de determinar los años que presentaron mayor afectación por estas fases dentro del periodo de 29 años y generar mapas de anomalías de precipitación y gráficos comparativos de caudal de los datos obtenidos para cada fase, con el objetivo de conocer los porcentajes de reducción y aumento de la oferta hídrica de la cuenca.

$$\text{Anomalia}_{X_i \text{EN}_{\text{año}i}} =$$

$$\left(\frac{X_{i \text{año}i \text{ El Niño}} - X_{i \text{medio Normal anual } i}}{X_{i \text{medio Normal anual } i}} \right) * 100 \quad (1)$$

D. Correlación entre variables macroclimáticas asociadas a El ENOS y variables hidrometeorológicas de la cuenca

Para encontrar la relación existente entre las VM asociadas al fenómeno ENOS (variables independientes) en relación con las variables hidrometeorológicas de precipitación y caudal de la cuenca Dagua (variables dependientes), se estimaron coeficientes de correlación de Pearson (r), por ser el más utilizado para estudiar el grado de relación lineal que existe entre variables cuantitativas [7], este procedimiento se realizó teniendo en cuenta el periodo común de registro escogido para cada variable dependiente, se realizaron 12 rezagos anticipados (variable hidrometeorológica desfasada t meses frente a la variable macroclimática, se representa con signo negativo) y 12 rezagos continuos (variable macroclimática desfasada t meses frente a la variable hidrometeorológica, se representa con signo positivo) con el fin de establecer la tendencia de los valores de los coeficientes de correlación y determinar en qué mes se presentó mayor incidencia (valor de correlación) de las VM asociadas a El ENOS sobre las variables hidrometeorológicas de la cuenca. Esto se realizó teniendo en cuenta las escalas temporales mensual, bimensual y trimestral multianual en que son entregados los datos por los centros de registro.

Las VM asociadas al ENOS que se usaron en este estudio, se seleccionaron teniendo en cuenta la ubicación donde es registrada la información, la vigencia de funcionamiento y la relación de estas variables con la hidrometeorología de la zona de estudio, siguiendo la metodología usada en [7]. A continuación se mencionan las VM aplicadas en la investigación:

(i) La Temperatura en la Superficie del Océano (TSO), definida como la anomalía mensual de esta variable en cuatro sectores del océano Pacífico alrededor de la línea ecuatorial, denominadas en orden de este a oeste: NIÑO 4, NIÑO 3-4, NIÑO 3, NIÑO 1+2; pero para este estudio se usaron todas

las temperaturas excepto las de la región NIÑO 1+2, que según estudios como los de [4] es la que menos relación tiene con la climatología del país; (ii) El Índice de Oscilación del Sur (SOI), que se define como la diferencia de las anomalías mensuales de presión atmosférica estandarizadas entre un centro de alta presión en Tahití (17° S, 150° O) y un centro de baja presión cerca de Darwin (12° S, 131° E); la fase cálida de El ENOS está asociada a un SOI negativo (iii) El Índice Multivariado de El ENOS (MEI), el cual relaciona las principales variables en el océano Pacífico: presión a nivel del mar, componentes zonal y meridional de los vientos de superficie, temperatura de la superficie del océano, temperatura del aire en la superficie y nubosidad; valores positivos del MEI se relacionan con la fase El Niño [7]. (iv) El índice oceánico del Niño (ONI), este índice es calculado como la media móvil de tres puntos de la serie mensual de anomalías de la temperatura de la superficie del océano en la Región Niño 3-4. Valores positivos del ONI, mayores o iguales a 0,5 por 5 meses consecutivos o más indican la ocurrencia de un evento El NIÑO. Valores negativos del ONI, inferiores o iguales a -0,5 por 5 meses consecutivos o más indican la ocurrencia de un evento La NIÑA [5].

El análisis de correlación cruzada es usado para medir el grado de asociación lineal entre dos variables y se refiere al grado de variación conjunta que existe entre las variables relacionadas. Para determinar si los coeficientes de correlación obtenidos tienen un valor estadísticamente significativo se determinó el valor de significancia de los resultados con la probabilidad (p) de obtener un valor para el estadístico tan extremo como el realmente observado [16], si la hipótesis nula fuera cierta; para este caso de estudio, se rechazó la hipótesis nula de independencia lineal, es decir, la hipótesis de que el coeficiente de correlación vale cero en la población, y se determinó que existe relación lineal significativa, cuando el nivel crítico p fue menor que el nivel de significancia establecido en 5%.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Análisis de las series de precipitación y caudal

Después de realizar el análisis de las precipitaciones por zonas se tiene que, la zona baja de la cuenca presenta mayores precipitaciones, la cual varía entre los 6880 mm y 7853 mm anuales, por su parte, en la zona alta se presentan precipitaciones anuales entre 815 mm y 1486 mm, estos valores se pueden explicar ya que la zona alta es afectada por un enclave subxerofítico en el corregimiento de Loboguerrero y Atuncela, además por la presencia de un bosque muy seco, mientras que en la zona baja hay formaciones de bosque húmedo tropical.

El comportamiento del caudal medio se ve influenciado por el régimen de las precipitaciones en la zona baja, debido a su ubicación dentro de la cuenca, presentando dos picos de altos caudales haciéndose más representativo en el segundo

en el trimestre oct-nov-dic y dos periodos bajos en los meses de febrero-marzo y julio-agosto; cabe recordar que la variable caudal presenta un desfase continuo en relación con la variable precipitación, por lo que suceda con las lluvias se verán reflejadas tiempo después sobre los caudales.

B. Influencia de las fases de El ENOS en las Anomalías de precipitación

Generar mapas de anomalías con la finalidad de observar en que parte de la cuenca Dagua se presentó un mayor impacto de El ENOS, en cuanto a reducción y aumento de las lluvias, sirve para tener una idea de cuáles serán las zonas que se afectarán en el momento de ocurrir nuevamente eventos de tal magnitud en la región y así poder contar con planes de contingencia, para que no se vean afectadas las diferentes actividades económicas de la región y también para prevenir pérdidas humanas en el momento que un desastre se presente debido a estos eventos.

C. Evento El Niño, año de 1983

En este año se presentó uno de los eventos El Niño de mayor intensidad de los últimos 29 años en la región, que trajo consigo disminuciones en la precipitación, los cuales terminaron con un promedio anual para este año de 2187 mm, lo que significó una reducción del 23%, teniendo en cuenta que la media anual de precipitación para la cuenca Dagua es de 2849 mm.

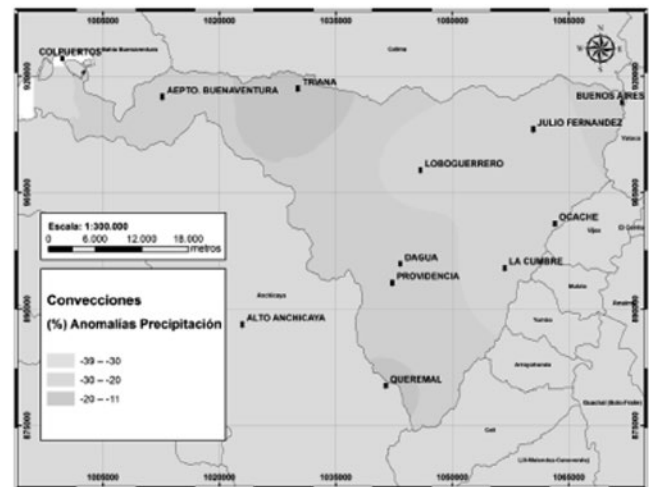


Fig. 2. Representación geográfica de las anomalías de precipitación ocurrida durante el evento El Niño en el año de 1983.

Cuando la cuenca está bajo el efecto de un evento extremo El Niño (Fig. 2), las áreas que presentan mayor reducción de las precipitaciones de acuerdo a los resultados fueron en la parte nor-occidental, sobre las estaciones La Cumbre (39%), Ocache (31%), Julio Fernández (34%) y Buenos Aires (26%), las cuales hacen parte de la zona alta; en la zona baja las disminuciones estuvieron constantes con un 25%, con excepción de la estación Loboguerrero (35%),

y se presentó un comportamiento particular sobre la estación Triana con disminuciones menores de la precipitación (11%).

D. Evento La Niña, año de 1999

En el año de 1999 se presentó uno de los eventos La Niña más fuertes de los últimos 29 años, que generó aumentos de la precipitación de un 18% con respecto a la media anual de la cuenca Dagua (2849 mm), es decir, para ese año la precipitación anual fue de 3361 mm.

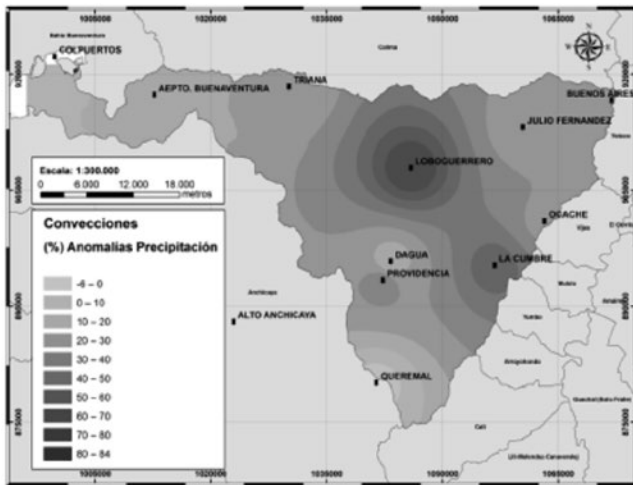


Fig. 3. Representación geográfica de las anomalías de precipitación ocurrida durante el evento La Niña en el año de 1999.

Cuando la cuenca está bajo el efecto de un evento extremo La Niña de El ENOS (Fig. 3), los aumentos en las precipitaciones más fuertes se presentaron en la zona alta sobre las áreas de incidencia de las estaciones Loboguerrero (84%), seguido de La Cumbre (58%), y Providencia (38%), un comportamiento particular se presentó sobre la estación Dagua, con menores aumentos en la precipitación (9%), a pesar de estar en un área donde las estaciones cercanas mostraron los máximos aumentos como la estación Providencia, por último se observó que las áreas de incidencia de las estaciones Queremal y en toda la zona baja se evidenciaron aumentos (entre 0 y 6%) con tendencias a disminuciones del 6% en la precipitación.

En general, se evidenció que en la zona alta de la cuenca se presentan mayores reducciones y aumentos de la precipitación, lo cual además de presentar cierta incidencia por la fase de El fenómeno ENOS en que se encuentre, se remonta más al efecto de la existencia de un enclave subxerofítico ubicado entre los corregimientos de Loboguerrero y Atuncela, el cual influencia la zona baja del municipio de Restrepo y zona alta del municipio La Cumbre, donde se encuentra vegetación propia de ambientes con precipitación menor que la evapotranspiración, pero sin llegar a condiciones de extrema sequía. Este Enclave Subxerofítico es considerado como una Reserva de Conservación según [15].

E. Influencia de las fases de El ENOS en las Anomalías de Caudal

En el análisis de las anomalías de caudal generadas por El ENOS, se calcularon anomalías para cada uno de las fases del ENOS (El Niño y La Niña) con el fin conocer el año de mayor porcentaje de reducción y de aumentos en el caudal del río Dagua, para después pasar a hacer un análisis trimestral de estos años en específico.

Para el caso de la variable caudal el evento El Niño más representativo durante estos 23 años de registro fue el ocurrido en el año de 1992, ocasionando una disminución en el caudal del río Dagua de 31%; este resultado no concuerda con el máximo valor registrado de las anomalías en la variable precipitación, el cual tuvo lugar en el año de 1983. En cuanto los eventos La Niña, el año de mayor intensidad en nuestro periodo, fue el ocurrido en el año de 1999, el cual generó aumentos en el caudal de 32%; este resultado en el evento La Niña concuerda con el de mayor aumento de la variable precipitación en el mismo año.

En general se observó (Fig. 4) que el trimestre MAM (Marzo-Abril-Mayo) es el que mayor aumento en el caudal presentó durante el efecto del evento La Niña (1999), con un valor positivo de anomalía del 50%; en el caso del evento El Niño (1992), las máximas reducciones del caudal tiene lugar en el trimestre DEF (Diciembre-Enero-Febrero), con un valor negativo de anomalía del 40%, en comparación con el año Normal (1990).

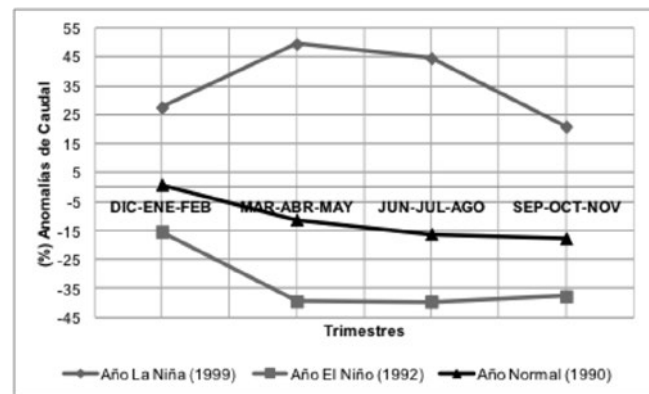


Fig. 4. Análisis de los años más representativos de EL ENOS sobre la variable caudal.

F. Análisis de las correlaciones entre variables macroclimáticas asociadas a El ENOS y las hidrometeorológicas

Las fases extremas de El ENOS afectan el clima del territorio nacional y tienen efectos, en particular, sobre la magnitud y los componentes del ciclo hidrológico [17]. La variabilidad de la hidrometeorología de la región podría involucrar la influencia de diversas VM, lo que hace útil cuantificar el grado de dependencia lineal entre las mismas

a través de coeficientes de correlación cruzada a diferentes rezagos en el tiempo [18], todo esto para conocer el grado de asociación entre ellas.

Aunque la distribución espacial de las estaciones dentro de la cuenca del río Dagua no es muy uniforme, se observó que a diferencia de los resultados obtenidos por [19] - [21], en los que se menciona que espacialmente la correlación entre los índices representativos de El ENOS y la hidrometeorología de Colombia es más baja en el oriente colombiano, se obtuvieron resultados que contrastan con lo anterior, ya que a medida que se analizaban la relación entre la macrovariable MEI y las estaciones, con respecto a la ubicación de occidente a oriente, el valor del coeficiente de correlación disminuía (Fig. 5), obteniendo su valor máximo ($r=-0,45$) en el centro de la cuenca (estación Julio Fernández), lo que permite inferir que el comportamiento de las correlaciones se puede atribuir a la presencia de la cordillera de los Andes y la cercanía de esta cuenca con el océano Pacífico. Cabe resaltar que el comportamiento de los demás índices representativos de El ENOS con respecto a la variables precipitación fueron similares entre sí, presentando valores mínimos en las estaciones cercanas al occidente de la cuenca para luego registrar valores máximos entre las estaciones Providencia y Julio Fernández (que geográficamente se encuentran ubicadas en el centro), y disminuir su grado de asociación al oriente de la cuenca (zona alta).

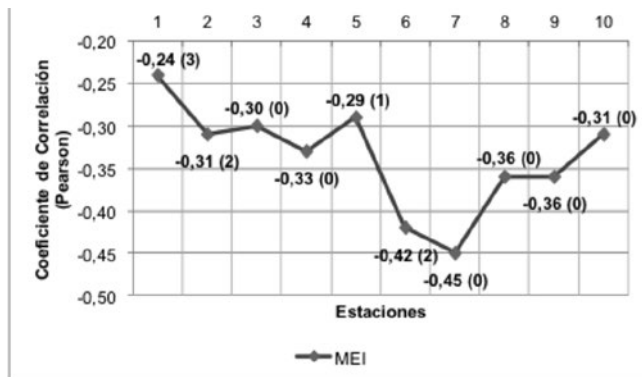


Fig. 5. Comportamiento de la relación entre la VM MEI y las estaciones de estudio en la cuenca del río Dagua ubicadas de Occidente a Oriente, rezago entre paréntesis.

(donde, 1: Aeropuerto, 2: Colpuertos, 3: Triana, 4: Loboguerrero, 5: Dagua, 6: Providencia, 7: Julio Fernández, 8: Buenos Aires, 9: Ocache, 10: La Cumbre).

De acuerdo a los análisis de los resultados se observó una relación inversamente proporcional a la altura entre las VM asociadas a El ENOS y la hidrometeorología de la región, es decir, a medida que la altura va aumentando el coeficiente va disminuyendo, cambiando la concepción de lo que se tenía anteriormente acerca de la ubicación espacial y la baja correlación hacia el oriente, según [20] y [21]. Ratificando la importancia que tiene la cordillera como una de las principales fuerzas influyentes en los fenómenos hidrometeorológicos.

El efecto de las fases extremas de El ENOS en la región depende de la época del año y de las diferentes condiciones de vulnerabilidad de los sectores productivos a nivel nacional, teniendo en cuenta que el país está regido en la zona andina por un comportamiento bimodal, con dos periodos húmedos y dos periodos secos durante el año [22].

En la Tabla I se muestran los resultados de los máximos valores del coeficiente de correlación " r ", con su respectiva significancia estadística o valor " p ", que para este estudio presentaron valores de 0,00, indicando que los resultados obtenidos son confiables estadísticamente y el valor del rezago en meses en el cual se presentó; calculados de la relación entre las VM sobre las variables hidrometeorológicas de precipitación y caudal en la cuenca del río Dagua. Se determinó que el tiempo de rezago en que se presentaron las máximas relaciones fue entre -1 y 3 meses, posicionando este como el tiempo de reacción meteorológico después de presentarse una anomalía en el océano Pacífico o una alteración en las VM asociadas a ENOS; también se observó que la región de mayor influencia de El ENOS sobre la cuenca del río Dagua, fue en el área de influencia de las estaciones Providencia y Julio Fernández, ubicadas en la zona alta.

Las mayores correlaciones en la variable precipitación se obtuvieron con la macrovariable MEI ($r=-0,45$) a un rezago de 0 meses, seguido por el ONI con $r=-0,43$ a un

TABLA I
MEJORES CORRELACIONES ENTRE LAS VM ASOCIADAS A EL ENOS Y LAS VARIABLES HIDROMETEOROLÓGICAS DE LA CUENCA.

| VM asociadas a El ENOS | r^* | Rezagos** | r^* | Rezagos** |
|------------------------|-----------------|-----------|----------|-----------|
| | [Precipitación] | [Meses] | [Caudal] | [Meses] |
| MEI | -0,45 | 0 | -0,52 | 1 |
| ONI | -0,43 | 3 | -0,5 | 3 |
| SOI | 0,32 | -1 | 0,43 | 2 |
| REGIÓN NIÑO 3 | -0,39 | 2 | -0,55 | 2 |
| REGIÓN NIÑO 4 | -0,39 | 2 | -0,5 | 3 |
| REGIÓN NIÑO 3-4 | -0,35 | 3 | -0,42 | 4 |

rezago de 3 meses, como se puede observar las mejores correlaciones se dieron para las VM que interpretan índices (MEI, ONI y SOI) atribuyendo esto a la cantidad de variables que éstas reúnen, es decir, son los más completos en materia de monitoreo de El ENOS y son los que mayor relación presenta con la hidrometeorología de la cuenca, lo que concuerda con los estudios en [5], en los que menciona que la duración y magnitud de los eventos hidrológicos extremos en las cuencas del país se ve fuertemente influenciada por las fases extremas de El ENOS.

En el caso de la estación limnigráfica, se presentó mayor uniformidad en el comportamiento del grado de asociación con las VM representativas de El ENOS, asimismo, los valores de los coeficientes de correlación a medida que se realizaron los rezagos correspondientes presentaron armonía y similitud en todas las VM asociadas a El ENOS utilizadas en este estudio. Las mayores correlaciones entre las VM y la variable caudal en la cuenca Dagua se obtuvieron con la región Niño 3, con un coeficiente de correlación (r) de $-0,55$ a un rezago de 2 meses, seguido por la macrovariable MEI con $r=-0,52$ a un rezago de 1 mes; en general los mejores valores de correlación se presentaron entre los rezagos 1 y 3 meses, definiéndose como el periodo de reacción o de afectación en el caudal después de presentarse la anomalía en las VM.

Los altos valores de correlación entre las VM y el caudal indican que el comportamiento de los caudales en la cuenca está mayormente influenciado por el fenómeno ENOS que la variable precipitación, esto se debe en parte a que los caudales en las cuencas presentan una mayor persistencia significativa, debido al proceso de almacenaje de agua en los acuíferos y/o a las condiciones de humedad antecedentes en el suelo, que aportan una mayor memoria histórica en las series de caudal. En general, todas las VM presentan estructuras de autocorrelación significativas, con el siguiente orden de persistencia de mayor a menor: VM, caudal y precipitación. Las VM y los caudales, tienen un tiempo de evolución más lento comparadas con la precipitación mensual, de ahí que sea más fácil predecir su comportamiento.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados permiten inferir que las fases extremas de El ENOS (El Niño y La Niña) presentan efecto sobre la oferta hídrica de la cuenca, en la media anual de la variable precipitación con reducciones del 39% (1111 mm/anales) y aumentos del 84% (2393 mm/anales); y en la media anual de la variable caudal, con disminuciones del 40% (11,6 m³/s) y aumentos del 50% (14,5 m³/s) sobre su afluente.

En los resultados del análisis de la oferta hídrica, las VM MEI y Temperatura en la Región Niño 3 presentaron mayor grado de incidencia sobre las variables hidrometeorológicas de la cuenca con una correlación significativa de $-0,45$ (precipitación) a un rezago de 0 meses y $-0,55$ (caudal) a un rezago de 2 meses, respectivamente.

Se evidenció que al estar bajo un evento extremo El Niño y La Niña de un fenómeno ENOS, se presenta mayor afectación sobre la zona alta en las áreas de incidencia de las estaciones Loboguerrero y La Cumbre. Se observó también que la fase extrema de El ENOS que genera mayores anomalías sobre la variable precipitación es la fase La Niña, donde sus valores sobrepasan el 60% de la media anual.

Los resultados de las correlaciones incluyendo el efecto de las variables macroclimáticas asociadas a El ENOS, sirven para mejorar el ajuste y la predicción de la precipitación y el caudal mensual en la cuenca ya que los valores presentados en rezagos diferentes a cero pueden ser usadas como variables predictoras, además es una herramienta de gran importancia para la gestión y la planificación del recurso hídrico de la región.

AGRADECIMIENTOS

Al grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos- IREHISA de la escuela EIDENAR de la Universidad del Valle, Cali-Colombia, por el apoyo a esta investigación y a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca por el suministro de la información. Al proyecto "Estrategias de competitividad y sostenibilidad de sistemas productivos agrícolas en la microcuenca la centella (Dagua - Valle)".

REFERENCIAS

- [1] Y. Carvajal et al., "*Incidencia del Fenómeno ENOS en la Hidroclimatología del Valle del Río Cauca, Colombia*". Bulletin Institute Francaised 'Etudes Andines, vol. 27, núm. 3, pp. 743-756, 1998.
- [2] G. Hurtado, "*El Clima: Origen y Aplicaciones*". Memorias: I congreso nacional del clima 2010 "El desarrollo económico de Colombia bajo un nuevo escenario climático". Instituto de Hidrología, meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Bogotá, Julio 13 a 15 de 2010.
- [3] Y. Carvajal-Escobar, "*Inundaciones en Colombia. ¿Estamos Preparados para Enfrentar la Variabilidad y el Cambio Climático?*". Revista Memorias, vol. 9, núm. 16, pp. 105-119, 2012.
- [4] G. Poveda, "*La Hidroclimatología de Colombia: Una Síntesis desde la Escala Interdecadal hasta la Escala Diurna*". Revista Ciencias de la Tierra, vol. XXVIII, 107, pp. 201-221, 2004.
- [5] G. Guarín and A. Ochoa, "*Impacto de la Variabilidad Climática en la Producción de Banano en el Urabá Antioqueño*". Numeral 10: Índices macroclimáticos, precipitación y producción en Urabá. M.S. thesis, Ingeniería de Recursos Hídricos, Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [6] F. Paredes and E. Guevara, "*Desarrollo y Evaluación de un Modelo para Predecir Sequías Meteorológicas en los Llanos de Venezuela*". Revista Bioagro, vol. 1, pp. 3-10, 2010.
- [7] O. Puertas and Y. Carvajal-Escobar, "*Incidencia de El Niño Oscilación del Sur en la Precipitación y la Temperatura del Aire en Colombia, Utilizando el Climate Explorer*". Revista Ingeniería y Desarrollo, vol. 23, pp. 104-118, 2008.
- [8] G. Poveda and J. Sánchez, "*Predicción de Caudales Medios Mensuales Utilizando Métodos Espectrales y Redes Neuronales*". Memoria: XVII Congreso Nacional de Hidráulica e Hidrología, Popayán, Septiembre 14 a 16 de 2006.
- [9] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia -IDEAM -, "*Efectos Naturales y Socioeconómicos del Fenómeno el Niño en Colombia*". Ministerio del medio Ambiente. Bogotá D.C., Colombia, 2002.

- [10] M. Martelo, *“Influencia de las Variables Macroclimáticas en el Clima de Venezuela”*. Dirección de hidrología, meteorología y oceanología – dirección general de cuencas hidrográficas – Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales. Caracas, Venezuela, 2003.
- [11] O. Bernal, *“Uso del Pronóstico en el Sector Agropecuario. Memorias: I congreso nacional del clima 2010 “El desarrollo económico de Colombia bajo un nuevo escenario climático”*. Instituto de Hidrología, meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Bogotá, Julio 13 a 15 de 2010.
- [12] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca -CVC-, *“Ficha Técnica Cuenca Dagua”*. Grupo Sistema de Información Ambiental, Dirección Técnica Ambiental. Cali, Colombia, 2008.
- [13] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca -CVC-, *“Balance Oferta - Demanda de Agua Superficial, Cuenca del Río Dagua”*. Dirección Técnica Ambiental, Grupo de Recursos Hídricos. Cali, Colombia, 2007.
- [14] Grupo de Investigación en ingeniería de recursos hídricos y suelos -IREHISA-, *“Estrategias de Competitividad y Sostenibilidad de Sistemas Productivos Agrícolas en la Microcuenca la Centella (Dagua - Valle)”*. Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2009. (Proyecto en ejecución).
- [15] L. Cardona and F. Cardona, *“Caracterización Climática y Análisis de Tendencias de Precipitación Diaria como Indicadores de Variabilidad Climática y Cambio Climático en la Cuenca Hidrográfica del Río Dagua en el Valle del Cauca”*. Thesis, Facultad de ingeniería, Escuela de ingeniería de recursos naturales y del ambiente, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2011.
- [16] D. Gujarati, *“Principio de Econometría”*. McGraw-Hill/ Interamericana de España. Tercera edición. España, 546 p. 2006.
- [17] M. Bedoya et al., *“Capítulo 7. Alteraciones del Régimen Hidrológico y de la Oferta Hídrica por Variabilidad y Cambio Climático”*. Estudio Nacional del agua 2010. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Colombia, pp. 282-320, 2010.
- [18] Y. Carvajal-Escobar, *“El Uso de Funciones Ortogonales Empíricas y Análisis de Correlación Canónica en el Estudio de la Variabilidad Hidrometeorológica, Aplicación al Valle del Cauca-Colombia”* Ph.D. dissertation, Departamento de ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, España, 2004.
- [19] G. Poveda and O. Mesa. *“Feedbacks between Hydrological Processes in Tropical South America and Large Scale Oceanic-Atmospheric Phenomena”*. Journal of Climate, vol. 10, pp. 2690-2702. 1997.
- [20] G. Poveda et al., *“Influencia de Fenómenos Macroclimáticos sobre el Ciclo Anual de la Hidrología Colombiana: Cuantificación Lineal, No Lineal y Percentiles Probabilísticos”*. Meteorología Colombiana, vol. 6, pp. 121-130. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C., 2002.
- [21] A. Ávila et al., *“Análisis de la Influencia de El Niño y La Niña en la Oferta Hídrica Mensual de la Cuenca del Río Cali”*. Revista Tecnura, 2013. (En proceso de evaluación).
- [22] J. Inzunza. (2001). *“Tema 7. Cambio Climático Global”*. Pedagogía en Ciencias Naturales y Carreras de la infancia. Universidad de Concepción. Chile. [online]. Available: <http://www2.udec.cl/~jinzunza/infancia/tema7.pdf>



Sergio Enrique Gutiérrez Serna nació en Santiago de Cali, Colombia, en 1988. Realizó sus estudios de pregrado en ingeniería agrícola de la Universidad del Valle, Cali, Colombia, en 2013.

Sus intereses de investigación incluyen el estudio espacio-temporal de la variabilidad hidrológica y climática, y su impacto en la región, tanto socioeconómico como ambiental. Con el fin de promover la generación e integración de mejores conocimientos sobre fenómenos macroclimáticos y de eventos hidroclimáticos extremos.



Yesid Carvajal Escobar nació en Santiago de Cali, Colombia, en 1966. Realizó sus estudios de pregrado en ingeniería agrícola de la Universidad del Valle, recibió M Sc. En suelos y aguas de la universidad nacional de Colombia, en 1995 y MSC. En hidrología aplicada en CEDEX Madrid, en 1999 y el Ph.D en Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, en 2004.

Desde 2002 hasta ahora se ha desempeñado como Director Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos – IREHISA y desde el 2004 hasta ahora como

Profesor Titular de la Escuela de Ingeniería de recursos naturales y del Ambiente, Universidad del Valle. Es autor de tres libros y de más de 15 artículos. Sus intereses de investigación incluyen diversos temas como, adaptación a la variabilidad y el cambio climático, variabilidad hidrológica y climática, sistemas productivos agropecuarios sostenibles y gestión integrada de cuencas hidrográficas.

Álvaro Javier Ávila Díaz nació en Puerto Tejada-Cauca, Colombia, en 1990. Realizó sus estudios de pregrado en Ingeniería Agrícola de la Universidad del Valle, Cali, Colombia, en 2012.

Desde 2011 hace parte del Grupo IREHISA como asistente de investigación apoyando la parte hidrológica de diferentes proyectos relacionados a la gestión integral de recursos hídricos. Desde el 2013 es parte del Programa de Formación del Programa de Jóvenes Investigadores e Innovadores - 2012, otorgado por El Departamento Administrativo

de Ciencia, Tecnología e Innovación COLCIENCIAS, donde se encuentra elaborando investigaciones que permitan mejorar el sistema de monitoreo hidrometeorológico existente en cuencas torrenciales andinas.