

# ANÁLISIS DETALLADO DE METODOLOGÍAS PARA DEFINICIÓN DE ÍNDICES DE SEQUÍA: CASO CUENCA RÍO SUMAPAZ, COLOMBIA

Laura P. Torres R. y Mario A. Díaz-Granados O.

Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental CIIA, Universidad de los Andes, Colombia  
E-mail: lp.torres1937@uniandes.edu.co, mdiazgra@uniandes.edu.co

## Introducción

Una sequía puede definirse como una deficiencia prolongada y anormal en la disponibilidad de agua para una determinada zona (Gumbel, 1963; Palmer, 1965; WMO, 1986; Torres, 2017). A nivel mundial, estos eventos se constituyen como una de las amenazas más graves y difíciles de predecir, medir y controlar, tanto en escalas nacionales como regionales. Los efectos asociados a estas ocurrencias tienden a ser de tipo socioeconómico relacionándose con pérdidas de cultivos y dificultades para suministrar agua para diversos usos.

Dado lo anterior, la región de Latinoamérica y el Caribe es particularmente vulnerable a estas amenazas porque sus economías dependen de forma importante de la agricultura: aproximadamente el 10% del PIB de estos países se basa en este sector y cerca del 80% de la productividad agrícola regional se genera a partir de cultivos dependientes de lluvia (FAO, s.f.). Además, la generación energética de la región también puede ser afectada por estos eventos. Para el año 2010, de acuerdo con información registrada en el Sistema de Información Económica-Energética (SIEE) de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), el 50% de la capacidad instalada de generación eléctrica para la región correspondía a plantas de tipo hidráulico, predominando en países como Brasil, Venezuela, Costa Rica, Paraguay, Colombia y Uruguay (con estos tres últimos encontrándose entre los cinco mayores exportadores netos de energía de la región) (Oxilia, 2012).

En Colombia las sequías, a diferencia de las inundaciones, han sido poco estudiadas, a pesar de los graves efectos que han generado. En 1992, un Niño severo llevó a la crisis energética más grave de la historia reciente del país, causando racionamientos en la mayor parte del territorio y el cambio de la zona horaria para minimizar la demanda energética (Oxford Business Group, 2016). Entre 1997 y 1998, los eventos secos produjeron daños totales por cerca de 575 millones de dólares (Comité Técnico Interagencial del Foro de Ministros de Medio Ambiente de América Latina y el Caribe, 2000). Finalmente, entre 2015 y 2016 otro fuerte Niño provocó racionamientos en las ciudades de Medellín y Cali, la reducción a un tercio de su capacidad del embalse de alimentación para Hido-Sogamoso y el incremento en el precio spot de la energía de un promedio entre 30 y 50 dólares por MWh, a más de 400 (Oxford Business Group, 2016).

Los índices de sequía (IS) se emplean para estudiar cuantitativamente la gravedad de los eventos utilizando información climática de fácil acceso (Vicente-Serrano et al., 2012). En los últimos años, se han desarrollado diversas metodologías para el cálculo de estos índices, con diferentes requerimientos de información de acuerdo con el tipo de sequía que busquen caracterizar (meteorológicas, agrícolas, hidrológicas y/o socioeconómicas). Varios de estos métodos han sido aplicados tanto en Colombia como en otros países de la región. Sin embargo, aún se encuentran falencias en análisis detallados del comportamiento de los índices, incluyendo sensibilidad a la longitud de los registros de entrada, consistencia en la identificación de eventos al comparar metodologías, planteamiento de relaciones numéricas unívocas entre diferentes índices y análisis de relaciones entre series de IS y series de índices de fenómenos macroclimáticos

(suponiendo que esta última resulta importante dada la incidencia de eventos ENSO en la hidrología de Latinoamérica).

En este trabajo, se presentan los resultados de los análisis llevados a cabo para series de IS obtenidas para estaciones de la cuenca del río Sumapaz, en Colombia. Se realizaron pruebas para verificar la sensibilidad de diferentes metodologías al cambio en la longitud del registro empleado; pruebas estadísticas para identificar tendencias temporales en series de magnitudes; comparaciones entre metodologías de cálculo de índices utilizando correlaciones cruzadas y ajuste de regresiones de diferente tipo, y finalmente, evaluaciones de correlaciones cruzadas entre series de IS y series de índices de fenómenos macroclimáticos.

## Métodos

Las metodologías de cálculo de IS utilizadas en el desarrollo de este trabajo fueron: Porcentaje de Normalidad (PN), Índice Estandarizado de Precipitación para escalas temporales de 1, 3, 6 y 9 meses (SPI1, SPI3, SPI6 y SPI9), Índice de Deciles (DI), Índice de Anomalía de Humedad de Palmer (Z), Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI), Índice de Sequía Hidrológica de Palmer (PHDI), Índice de Reconocimiento de Sequía (RDI) e Índice de Sequía de Caudales (SDI). Cada metodología de cálculo está indicada para un tipo de sequía particular (meteorológica, agrícola e hidrológica).

Respecto a las pruebas para verificar sensibilidad a la longitud del registro utilizado, éstas se llevaron a cabo empleando regresiones lineales simples entre series de IS calculadas con el registro completo disponible (de precipitación y temperatura) y series donde se usaron periodos de 30 años (según la recomendación de la WMO). Este procedimiento fue aplicado a las 5 estaciones disponibles con registros superiores a 30 años y para 8 metodologías de cálculo de IS.

La variabilidad temporal de series de magnitudes de IS fue evaluada utilizando información de 4 estaciones climatológicas, distribuidas espacialmente en la región de interés. Las pruebas estadísticas realizadas incluyeron Mann-Kendall, Ro de Spearman, regresión lineal y Mann-Kendall modificado (cuando la serie analizada mostró auto-correlación). El procedimiento se realizó para 7 metodologías de cálculo de IS y 2 escalas de magnitudes (9 meses y 12 meses).

Las correlaciones cruzadas analizadas, tanto entre series de IS (*i*) como respecto a series de índices de fenómenos macroclimáticos (*ii*), fueron calculadas utilizando XLSTAT. Para el caso (*i*), las comparaciones se llevaron a cabo entre metodologías aconsejadas para el mismo tipo de sequía. En el caso (*ii*), las correlaciones fueron analizadas frente a series de Oscilación del Atlántico Norte (NAO), Índice de Oscilación del Sur (SOI) y Temperatura Superficial del Mar (anomalía SST 3.4). Este último procedimiento se realizó para todas las metodologías de cálculo de IS disponibles en cada estación (mínimo 6 y máximo 10, dependiendo del tipo de estación analizada).

En cuanto al análisis de regresión, éste también se desarrolló agrupando metodologías de cálculo de IS recomendadas para los mismos tipos de eventos. Resulta importante mencionar que el cálculo de series de SDI utiliza caudales por lo que fue necesario identificar estaciones climáticas cercanas para poder comparar los resultados con otras metodologías.

## Resultados

En la Figura 1 se presentan los resultados obtenidos para el análisis de sensibilidad a la longitud del registro utilizado, para la estación climatológica ordinaria de Pandi. La figura permite concluir que la relación entre las series obtenidas utilizando el registro completo y periodos de 30 años fue lineal. De igual manera, se pudo observar que todas las series de SPI presentaron menos variabilidad que las obtenidas en el caso de los índices de Palmer (Z, PDSI y PHDI). Sin embargo, en todas las comparaciones, los coeficientes de determinación obtenidos estuvieron por encima de 0.96, las pendientes fueron cercanas a 1.0 y los interceptos aproximadamente de 0.0. Dado lo anterior, se concluyó que las metodologías de cálculo de IS son relativamente robustas a cambios en la extensión del registro empleado.

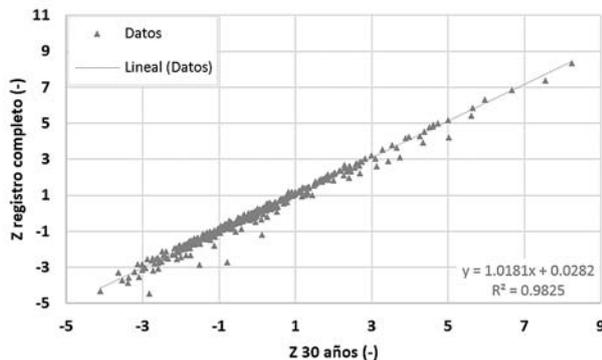


Figura 1.- Comparación longitud registro, estación Pandi, periodo 1980-2010.

Respecto a los resultados relacionados con el análisis de variabilidad de magnitudes en series de IS, se estableció que DI fue la metodología que mostró presencia de tendencias en la mayor parte de estaciones (para 5 de los 8 casos evaluados). Por otro lado, PDSI, PN y Z no evidenciaron tendencias en ninguno de los casos y SPI1, PHDI y RDI en algunos de éstos. En cuanto a la distribución espacial de los resultados, pudo concluirse que en términos regionales no fue evidente la existencia de ninguna tendencia; es decir, que no se apreció un incremento en las magnitudes de eventos secos para la totalidad del área de estudio. Lo anterior debido a que las diferentes metodologías de cálculo de IS no mostraron consistencia haciendo imposible la validación puntual y por ende, también la regional.

En cuanto a la comparación de IS por medio de correlaciones cruzadas, se construyeron correlogramas como el presentado en la Figura 2, en los que se observa el coeficiente de correlación lineal del Pearson obtenido para las dos series de IS analizadas aplicando rezagos desde -27 a 27 meses entre series. En general, se identificó que las mejores correlaciones entre series fueron mayores a 0 (relación directa) y se relacionaron con rezagos positivos. Igualmente, se hallaron correlaciones altas al comparar series de SPI con PN, PDSI con RDI y SPI9 con PHDI. Los coeficientes tendieron a reducirse al realizar comparaciones de cualquier metodología con DI. Finalmente, este procedimiento permitió establecer que 9 meses es la escala de agregación óptima para el cálculo de SDI. Lo anterior debido a que así se maximiza la correlación lineal con el índice de sequía hidrológica más comúnmente utilizado (SPI9).

Los análisis de regresión estudiados permitieron notar que por lo general las series de IS presentan relaciones claras entre sí. Sin embargo, y confirmando resultados previos, la variabilidad tendió a incrementarse al utilizar DI. Respecto al ajuste logrado para las regresiones planteadas, se obtuvieron resultados satisfactorios al relacionar PN con SPI1, PN con SPI1, SPI1 con Z y SPI6 con RDI. En los demás casos comparados, aunque las relaciones mostraron ser directas, la dispersión no permitió el

planteamiento de regresiones adecuadas.

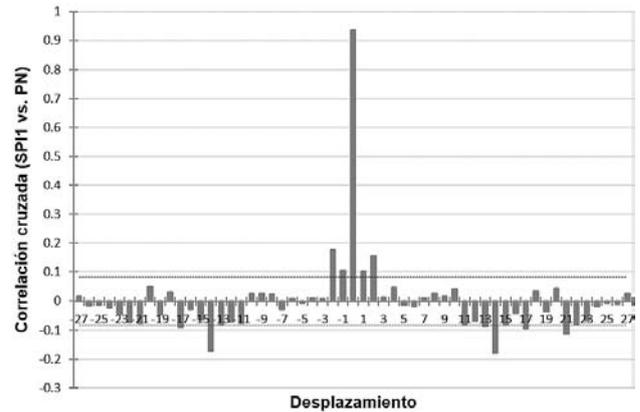


Figura 2.- Análisis de correlación cruzada, estación Pandi, SPI1 vs. PN.

Por último, el análisis de correlaciones cruzadas entre series de IS y de índices macroclimáticos permitió concluir que en Colombia la incidencia del ENSO en la ocurrencia de eventos de sequía es evidente. Todas las series de índices de sequía comparadas con índices de fenómenos macroclimáticos, mostraron correlaciones estadísticamente significativas siendo éstas mejores en el caso del SOI y SST que en el del NAO. Sin embargo, la magnitud de los coeficientes de correlación obtenidos no fue lo suficientemente importante como para plantear un enfoque predictivo, basado en índices de fenómenos macroclimáticos. Igualmente, el comportamiento observado en los correlogramas reveló relativa simetría, indicando que el ciclo hidrológico anual determina las temporadas secas y húmedas en el país y a su vez, se relaciona fuertemente con la ocurrencia de Niño y Niña. Finalmente, se concluyó que los fenómenos macroclimáticos se relacionan con la ocurrencia de eventos fuertes y de duraciones considerables en la zona de estudio.

## Referencias

- Comité Técnico Interagencial del Foro de Ministros de Medio Ambiente de América Latina y el Caribe.** (2000). *Panorama del impacto ambiental de los recientes desastres naturales en América Latina y el Caribe*. CEPAL - PNUMA. Recuperado el 05 de Febrero de 2018, de <http://www.pnuma.org/forodeminstros/12-barbados/bbdt02e-PanoramalmpactoAmbiental.pdf>
- FAO.** (s.f.). *AQUASTAT*. Recuperado el 14 de Noviembre de 2017, de <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=en>
- Gumbel, E.** (1963). Statistical forecast of droughts. *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin*, 8(1), 5-23. doi:10.1080/02626666309493293
- Oxford Business Group.** (2016). Energy & Utilities Overview. *The Report: Colombia 2016*, 74-75.
- Oxilia, V.** (2012). *Matriz Energética en América Latina y el Caribe, Situación Actual y Perspectivas de las Energías Renovables*. La Habana: OLADE. Recuperado el 07 de Febrero de 2018, de [http://www.olade.org/sites/default/files/presentaciones-sej/8\\_Presentaci%C3%B3n%20OLADE%20UPADI%20201.pdf](http://www.olade.org/sites/default/files/presentaciones-sej/8_Presentaci%C3%B3n%20OLADE%20UPADI%20201.pdf)
- Palmer, W.** (1965). *Meteorological Drought*. Washington: U.S. Weather Bureau.
- Torres, L.** (2017). *Análisis detallado de metodologías para definición de índices de sequía y planteamiento de procedimientos para la calibración de escalas de gravedad de las mismas: estudio en 2 cuencas de Colombia (Tesis de maestría no publicada)*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Vicente-Serrano et al.** (2012). Análisis comparativo de diferentes índices de sequía para aplicaciones ecológicas, agrícolas e hidrológicas. *Cambio climático: Extremos e impactos - 8º Congreso Internacional de la Asociación Española de Climatología (AEC)* (pp. 679-690). Salamanca: AEC.
- WMO.** (1986). *Report on Drought and Countries Affected by Drought During 1974-1985*. Ginebra: WMO.