

Evaluación del nivel de mejora en el monitoreo de sequías a escala regional en Colombia, a partir de indicadores ecohidrológicos basados en teledetección

Evaluation of the improvement level in drought monitoring in Colombia from the integration of ecohydrological indices based on remote sensing

Celis Rodríguez, Jorge Andrés; Vanegas Beltrán, Diana Ximena; Vergara Arrieta, Humberto José

Resumen



La sequía es un complejo fenómeno natural recurrente que se da en diferentes partes del mundo (Liu, y otros, 2016) y según la FAO sus estragos principalmente se asocian a riesgos en la seguridad; en este fenómeno intervienen gran número de variables hidrológicas lo cual dificulta aún más su detección. (National Drought Mitigation Center, 2016) Categoriza las sequías principalmente en meteorológica, agrícola e hidrológica; típicamente se utiliza un índice de detección independiente para cada una de estas sequías. El objetivo principal de esta investigación es evaluar la mejora que existe en la detección de sequías mediante el uso integrado de indicadores eco hidrológicos estimados con datos de monitoreo remoto en comparación con la habilidad individual del índice de precipitación. La zona de estudio determinada correspondió a la cuenca del Río Meta la cual con un área de cerca de 105,000Km², es un afluente del Orinoco y se ubica en una zona con gran actividad agrícola, ganadera, piscícola y minero energética.

Abstract



Drought is a worldwide phenomenon representing a risk for food security and water resources management. Predicting drought presents difficulties due the number of hydrological variables and processes involved in it. Drought is usually categorized and estimated with individual indices targeting a specific nature: meteorological, hydrological or agricultural drought. The main objective of this research was to evaluate the improvement on drought detection through the integrated use of multiple remote-sensing based ecological and hydrological indices compared to the individual use of each of the indices. The study area was the Meta River catchment, an affluent of the Orinoco River with an approximated drainage of 105,000 km² and located on the eastern region of Colombia. A motivation of this study is that the proposed remote-sensing based approach can serve as a complementary tool for drought detection in this region; wherein-situ ground measurement stations with limited spatial coverage represent the only source of information.

Recibido / Received: 15 de Octubre del 2016 Aprobado / Approved: 25 de Octubre del 2016

Tipo de artículo / Type of paper: Artículo de investigación científica y tecnológica.

Afiliación Institucional de los autores / Institutional Affiliation of authors: Hydrometeorology and Remote Sensing (HyDROS) Laboratory, The University of Oklahoma, Norman,

Autor para comunicaciones / Author communications: jcelis@unbosque.edu.co; Jorge.a.celis.rodriguez-1@ou.edu Dianaximena@gmail.com humber@ou.edu; Humberto.Vergara-Arrieta@noaa.gov
Los autores declaran que no tienen conflicto de interés.

La línea base de este estudio se construyó con el set de datos 3B42-V7 de las estimaciones de precipitación satelital de la NASA¹, se tomaron los datos de 01/1998 a 12/2016 bajo una resolución temporal de 3h y una espacial de 25Km; las estimaciones de precipitación satelital y caudal simulado se compararon con registros de 175 estaciones hidrometeorológicas IDEAM; dado que esta entidad según se encontró utiliza principalmente el índice de precipitación estandarizado (SPI) se construyó la línea base con respecto a este índice. El resultado de esta construcción mostró que la búsqueda de eventos bajo condiciones muy extremas, intensidades inferiores a -1.5 y persistencias de la intensidad por más de 12 meses, lograron eliminar el ruido generado por eventos pequeños al usar otros criterios de búsqueda y para esta zona logró mostrar los eventos de mayor relevancia para nuestros datos. Procedimiento similar se realizó para los demás índices estandarizados cuyos datos se simularon a través de EF5 configurado con los datos de precipitación TRMM²; el índice de humedad del suelo estandarizado (SSI asociado a sequía agrícola), índice de escorrentía estandarizado (SRI asociado a sequía hidrológica), los cuales bajo criterios similares a los utilizados en la línea base lograron detectar también eventos extremos; para el caso del LSWI (Índice de agua de superficie del terreno) con una fuente de datos de la misión MODIS brindó un complemento adicional a la visión del fenómeno. En conclusión se encontró que si bien los diferentes índices mostraron una alta coincidencia en la mayoría de eventos detectados, se logra aprobar la hipótesis que sugiere que la habilidad de detección al utilizar múltiples índices mejora en comparación con la detección individual; esto afirmado gracias a que al hacer la comparación de los principales eventos detectados se logró comprobar que cada índice aporta un elemento diferente y particular al tipo de sequía al cual se le asocia, fortaleciendo la visión del fenómeno mejorando su detección a nivel temporal y espacial.

Palabras clave: TRMM; SPI,SSI,SRI, LSWI, Modelación hidrológica, EF5; Monitoreo Remoto.

The study baseline was generated based on the Standardized Precipitation Index (SPI) estimated with NASA's satellite precipitation dataset3B42-V7 from 01/1998-12/2016 with a 3-hour temporal resolution and 0.25°X0.25° horizontal resolution. The SPI is the index officially used by the National Institute of Hydrology and Meteorology (IDEAM) in Colombia for drought monitoring. The satellite-based estimates were compared and analyzed with measurement data from 175 hydrological and meteorological of IDEAM's gauge network across the basin. The estimation of the Standardized Soil Moisture Index and Standardized Runoff Index were developed using simulations results of the Ensemble Framework For Flash Flood Forecasting (EF5)system, which was configured using a 1-km resolution digital elevation dataset. A Land Surface Water Index from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) was also included to account for the impact on vegetation. The hypothesis behind this study is that the integration of the multiple indices can offer a holistic view of the phenomenon, which can lead to improved detection of droughts. Future work will explore the use of Global Precipitation Measurement data and the incorporation of ground water storage estimates from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE).

Keywords: TRMM; Drought indices (SPI, SSI, SRI, LSWI), EF5; Remote Sensing.

1. NASA: Administración Nacional Espacial y Aeronáutica (por sus siglas en inglés).

2. TRMM: Misión de Medición de Lluvia Tropical (por sus siglas en inglés).

Introducción

La sequía es un fenómeno natural complejo de cuantificar, dado el alto número de variables espacio temporales que en ella intervienen; sus impactos afectan ambiental, social y económicamente (Liu, y otros, 2016). Produce efectos devastadores en la seguridad alimentaria y en la productividad de cultivos (FAO, 2011). La economía y los

ecosistemas se ven afectados directamente. Es de interés mencionar que algunos estudios destacan una correlación positiva entre la enfermedad en el reino vegetal y las sequías, esta correlación existe en agro ecosistemas y bosques (Desprez-Loustao, b, Nageleisen, Piou, & Vannini, 2006).

Existen diferentes tipos de sequías que han sido comúnmente aceptadas. La sequía meteorológica, agrícola e hidrológica; estas se orientan a la medición de la sequía como un fenómeno físico. Según establece (National Drought Mitigation Center, 2016) la sequía meteorológica se asocia a una deficiencia de precipitación, mientras que la agrícola a déficit en la humedad del suelo y la hidrológica a una disminución en los caudales y ó los reservorios. En la actualidad, existen gran cantidad de índices que se pueden construir para detectar sequías. Generalmente valorados por una sola unidad numérica, lo cual facilita el análisis para la toma de decisiones. Es difícil afirmar que un índice es inherentemente superior a los demás en todas las circunstancias. Por lo anterior podemos encontrar índices hidrológicos que se enfocan en la medición específica de algún elemento del ciclo hidrológico; otros índices llamados eco-hidrológicos, miden la respuesta vegetal ante la disponibilidad hídrica o de alguno de los parámetros del ciclo hidrológico. Dado que la precipitación es el elemento de entrada más influyente en el ciclo hidrológico, parte de los indicadores más utilizados a escala global se basan en este elemento y por consiguiente en la detección de la sequía meteorológica.

En Colombia, según reflejan la mayor parte de informes y el último estudio nacional del agua (ENA 2014) desarrollado por el *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales* (IDEAM), principal institución Colombiana responsable en temas hidrometeorológicos, su monitoreo de sequía se basa en el índice de precipitación estandarizado (SPI por sus siglas en inglés). Este índice ofrece algunas ventajas con respecto a otros similares como el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI por sus siglas en inglés) ya que además de ser más fácil de estimar, permite comparar zonas con diversidad de condiciones gracias a su principio estadístico; el cual se basa en el número de desviaciones que existe entre la precipitación actual y la histórica (McKee, Doesken, & Kleist, 1993), permite volver comparables zonas supremamente húmedas como el Chocó biogeográfico ubicado en el pacífico Colombiano y zonas predominantemente secas como la Guajira, al norte de Colombia. Sin embargo debido a que el SPI tiene su base en la distribución probabilística, un mayor número de datos representa mayor significancia estadística y esto un resultado más acertado (Hayes, Svoboda, Wall, & Widhalm, 2011), convirtiéndose esto en una limitante para aquellas zonas con carencia de registros continuos de información.

El SPI al no tomar en consideración condiciones de suelo, ni almacenamientos antecedentes (IDEAM, 2006), ni otro elemento diferente a la precipitación, representando una limitación hidrológica, a razón de esto, autores como (Liu, y otros, 2012) en sus estudios han buscado tomar al menos un elemento adicional a la precipitación para la detección de sequías. En Colombia según diferentes documentos, el SPI construido por el IDEAM se basa en datos de precipitación registrados por sus estaciones meteorológicas. Sin embargo debido a las condiciones orográficas del territorio colombiano, las dinámicas hidroclimáticas y algunos elementos sociales, la cobertura de la red de monitoreo, la calidad y continuidad de los registros se pueden ver afectados en distintas zonas, por esto autores como (Andres Felipe Hurtado Montoya, 2009) destacan la necesidad del uso de información obtenida a través de fuentes de datos complementarias como lo pueden ser las plataformas satelitales.

El uso de sistemas de monitoreo remoto, como lo son los satélites y radares; ha alcanzado un gran desarrollo a escala global en los últimos años. En parte se puede atribuir a que la información satelital, en su mayoría está abierta al público y ofrece gran diversidad de productos. Los beneficios que ofrecen los datos obtenidos con radares y satélites, son la diversidad de productos, una frecuencia alta de recepción de datos y captación de todos los rincones del globo, dificultad que experimentan las redes de monitoreo en tierra (Vergara, Hong, Gourley, Emmanouil N. Anagnostou, & Kirstetter, 2013). Si bien la vanguardia en el tema está liderada por China y Estados Unidos de América; la teledetección en Colombia ha sido utilizada ampliamente para el procesamiento de los sistemas de información geográfica (SIG), en algunas investigaciones han aplicado los productos para desarrollar modelos de inundación, escenarios de sismología volcánica, detección y caracterización de humedales entre otros; donde el elemento común ha sido el manejo de una escala regional.

En las estimaciones satelitales de precipitación, los productos de la Misión de Medición Tropical de Lluvia (TRMM por sus siglas en inglés) se han convertido en el estándar espacial para la medición de precipitación (National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2015). Su información ha sido pieza clave de numerosos estudios a nivel global. (DINKU, RUIZ, CONNOR,

& CECCATO, 2010) Hizo una evaluación e inter comparación entre distintos productos de precipitación satelital en Colombia como el 3B42RT de la misión TRMM, PERSIANN, GSMaP, CMORPH, entre otros y utilizó cerca de 600 estaciones terrestres del IDEAM para la validación. Finalizando en resultados razonablemente buenos para los valores de precipitación TRMM diaria sobre terreno complejo y los mejores resultados los obtuvieron sobre los llanos orientales; no obstante encontraron que los productos PERSIANN y GSMaP-MVK tuvieron un rendimiento bastante bajo. Otro estudio que fue de gran aporte fue el desarrollado por (Gonzalez & Jurado, 2014) el cual, evaluó la utilidad de estimaciones satelitales 3B42RT para la modelación de inundaciones en sistemas de alerta temprana para la Cuenca del Río Bogotá, el estudio encontró que el producto TRMM tiene habilidad para caracterizar a escala regional los rangos y distribución de la lluvia, no obstante presentó una incertidumbre en la identificación de la magnitud de la información. Resultados como los mostrados anteriormente reflejan que a pesar de presentar algunas limitaciones, las estimaciones y simulaciones desarrolladas con base en productos satelitales son lo suficientemente acertadas para representar resultados que se ajustan a la realidad, resultando en un elemento importante para la toma de decisiones o robustecer un sistema de monitoreo o alertas tempranas.

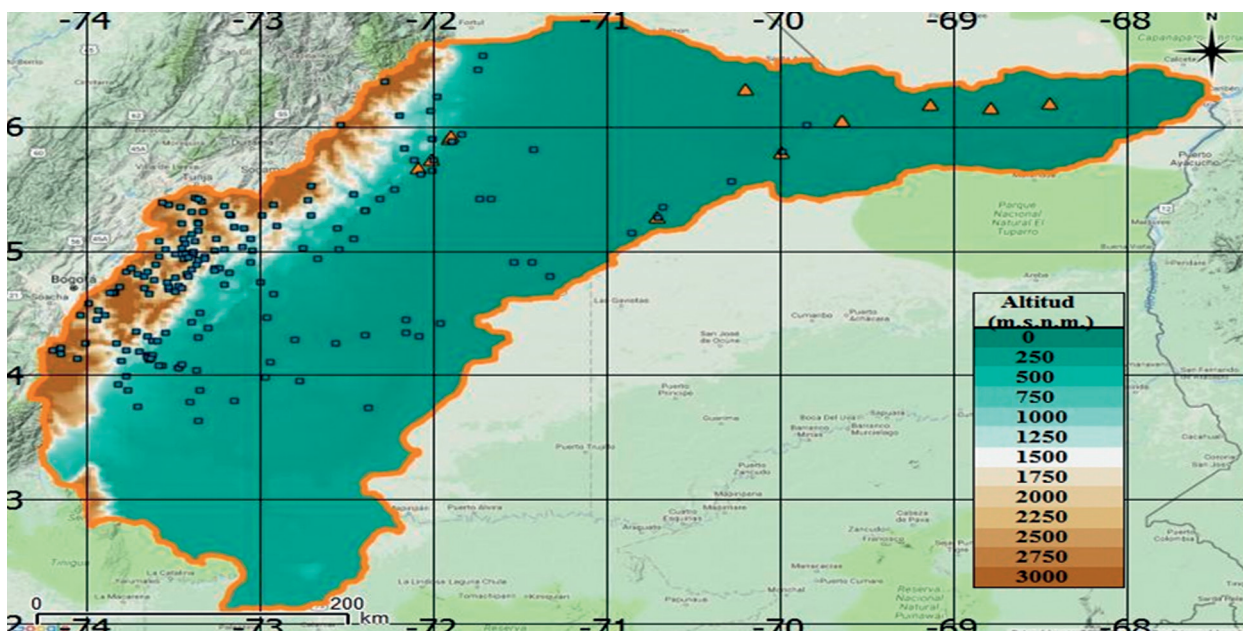
Esta investigación propone una metodología para la detección de sequías, utilizando de forma integrada índices hidrológicos estandarizados como lo son el SPI, el índice de humedad del suelo estandarizado (SSI por sus siglas en inglés), el índice de escorrentía estandarizado (SRI por sus siglas en inglés) y el índice eco-hidrológico de agua de la superficie terrestre (LSWI por sus siglas en inglés), todos estimados a partir de información satelital con el fin de mostrar el nivel de mejora que existe tras el uso integrado de diferentes indicadores de sequía, donde se supone una visión más completa del fenómeno.

Zona de Estudio, Datos y Modelo

Zona de estudio

El área de estudio, correspondió a la Cuenca del Río Meta. El río Meta tiene una longitud estimada de 1.000Km y su cuenca un área aproximada de 105.000Km² (Luna, 2016) de los cuales 31.695Km² se ubican en la sub área del Río Meta en el departamento del Meta (CORMACARENA, 2011). El río circula de occidente a oriente y su cuenca comprende las partes altas de la cordillera oriental (Sumapaz y Sierra Nevada del Cocuy), un área de piedemonte y una extensa área de sabanas inundables, sabanas

Mapa 1. Zona de Estudio, Estaciones de Monitoreo Ideam utilizadas, meteorológicas(azul) e hidrológicas(Naranja).



bien drenadas y parte de la altillanura (Luna, 2016). “Todas las subcuencas que integran la cuenca del Río Meta presentan sus nacimientos en las estribaciones de la cordillera oriental y el piedemonte llanero en la sabana, su régimen se convierte en meándrico, por cuanto la pendiente se minimiza, nivelando y estabilizando su carga y caudal con una amplia llanura de inundación hasta su desembocadura” (Corporación Autónoma Regional de la Orinoquia CORPORINOQUIA, 05/2007) .

La cuenca hace parte de la gran Cuenca del Orinoco, segunda unidad biogeográfica más amplia de Colombia por sus expresiones climáticas, edáficas y potencial demográfico, económico y natural (Corporación Autónoma Regional de la Orinoquia CORPORINOQUIA, 05/2007). La cuenca del Río Meta se puede dividir en alta, media y baja (León, 2005). El Río Meta nace en los Andes (Luna, 2016) y desemboca cargado sedimentos suspendidos y electrolitos (Carvajal-Chitty, 1993); aporta un caudal importante al desembocar en la cuenca media del Orinoco (León, 2005). La cuenca del Río Meta según (CORMACARENA, 2011) se extiende desde el páramo Chingaza, donde nace el río Guatiquía; se alimenta de aguas de la Laguna Chingaza, así como de varios ríos y quebradas que aumentan su caudal mientras desciende para desembocar en el río Humea, alimentando así la cuenca (CORMACARENA, 2011).

Se determinó trabajar en la cuenca del Río Meta, dado que al hacer una revisión de las zonas con mayor número de eventos de sequía registrados por fuentes oficiales (IDEAM) en el ENA 2014 y registros no oficiales (prensa), la cuenca del río Meta mostró el mayor número de eventos por Km², comprendida la cuenca como la zona de Meta y Casanare según la zonificación hidrográfica del IDEAM fundamenta en la resolución 0338 de 1978. El número de eventos es crítico para la validación de los fenómenos que sean detectados con la metodología propuesta en esta investigación. Además esta zona cumple con elementos que según la mayoría de estudios consultados favorecen la habilidad del producto satelital, elementos como la dimensión del área, un relieve predominantemente homogéneo (salvo el área límite con la cordillera) como se observa en el mapa 1, elementos que favorecen la habilidad del producto. También según (DINKU, RUIZ, CONNOR, & CECCATO, 2010) esta zona responde exitosamente al producto satelital de la misión TRMM.

Datos

Para este estudio se logró recopilar registros de precipitación y caudales de 175 estaciones de monitoreo del IDEAM. Las observaciones de precipitación (total mensual) correspondieron a 168 estaciones meteorológicas que en el mapa 1 se aprecian de color azul y las observaciones de caudales (caudal medio) se obtuvieron de 9 estaciones hidrológicas, mostradas en color naranja en el mapa 1. Todos los datos fueron suministrados gratuitamente por IDEAM.

La información satelital que se utilizó, fue el set de datos del producto 3B42-V7 de la misión TRMM de la NASA y JAXA. Los datos utilizados contaron con una resolución temporal de 3 horas, una resolución espacial de 25 Km o lo que es igual una resolución horizontal de 0.25° X 0.25° y constituyen un periodo de información entre Enero de 1998 y Diciembre de 2016. Los datos del instrumento MODIS de la NASA, correspondieron al producto MOD09-A1, bajo una resolución temporal de 8 días, una resolución espacial de 500 m, para el periodo 1999-2015. No obstante la información fue recopilada por el grupo investigación de Earth Observation and Modeling Facility (EOMF por sus siglas en inglés) de la Universidad de Oklahoma; (www.eomf.ou.edu); quienes suministraron directamente las estimaciones del LSWI.

Dado que fue necesario realizar la configuración del modelo hidrológico, se utilizó información adicional. El modelo de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés) se obtuvo de la misión GTOPO30 del servicio geológico americano (USGS por sus siglas en inglés). Otra información requerida para la configuración del modelo fue la evapotranspiración potencial (PET), la cual se descargó de FEWSNET; el área de radio impermeable se descargó de Harmonized World Soil Database (<http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/>) y los demás parámetros de suelo, se descargaron de ISRIC (World Soil Information <http://www.isric.org/>); toda esta información con una resolución espacial de 1 Km.

Modelo

La simulación de los datos de caudales, humedad del suelo y escorrentía hidrológica, los últimos dos necesarios para la estimación del SSI y el SRI, respectivamente;

se realizó mediante el marco de trabajo integrado para la predicción de inundaciones o crecidas repentinas (EF5 por sus siglas en inglés). Un software para la realización de simulaciones hidrológicas distribuidas de forma operacional, desarrollado por el grupo de Hidrometeorología y Monitoreo Remoto de la Universidad de Oklahoma (HyDROS por sus siglas en inglés).

EF5 requiere como entrada elementos críticos del balance hídrico, precipitación (P) y evapotranspiración potencial (PET). Así mismo la información del terreno juega un papel fundamental en los resultados del modelo, la configuración básica exige la información del DEM, acumulación y dirección de flujo, estas últimas dos obtenidas en este estudio a partir del DEM.

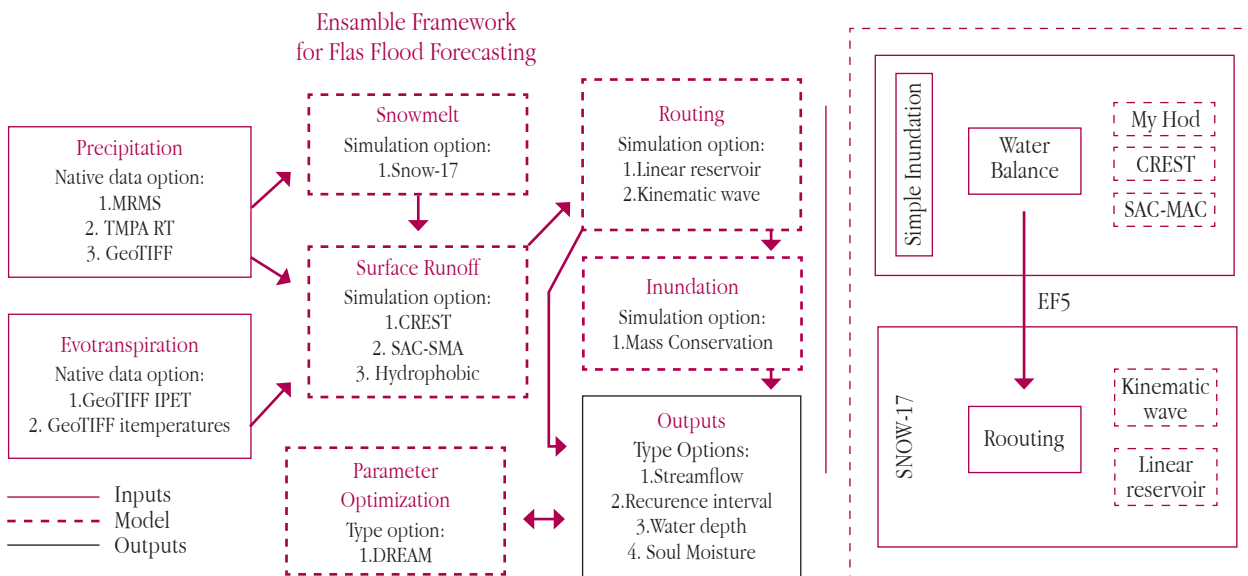
Este modelo contiene dos métodos de enrutamiento que pueden mezclarse y combinarse. El componentes del balance hídrico, utilizado en este estudio se basó en el modelo hidrológico distribuido CREST; sin embargo como se aprecia en la figura 1., es posible utilizar el modelo hidrológico de Contabilidad en la humedad del suelo-Sacramento (SMA-SAC por sus siglas en inglés) o el modelo HyMOD el cual aún se encuentra en desarrollo; por otra parte el ruteo que se utilizó, fue el modelo de ola cinemática y próximamente EF5 espera incorporar el modelo de reservorio lineal que se encuentra en desarrolló (University of Oklahoma. All Rights Reserved., 2016).

Una de las ventajas que posee EF5, es que posee internamente un modelo de múltiples núcleos lo cual le permite tomar ventaja de diferentes núcleos y estrategias computacionales para generar simulaciones de forma más rápida (HyDROS; NASA, The University of Oklahoma, 2014). Es importante resaltar que en este modelo la generación de escorrentía y acumulación de flujo se encuentran acopladas lo cual permite realizar simulaciones más reales (HyDROS; NASA, The University of Oklahoma, 2014). La calibración de EF5 se presenta de una forma muy amigable para el usuario, se soporta en distintos bloques que el usuario debe calibrar y configurar respecto a su interés particular. EF5 permite configurar más de 1 bloque (P) y (PET) para permitir al usuario trabajar con información proveniente de distintas fuentes. Los bloques siguientes consisten en la configuración de los datos espaciales de la cuenca y las estaciones para poder iniciar el ruteo y la simulación a través del modelo hidrológico de interés, para mayor detalle sobre la configuración e información de EF5 se recomienda visitar (EF5.ou.edu).

Metodología

El primer paso, consistió en la validación de los datos de precipitación satelital y caudal simulado. Para ello fue necesario identificar las estaciones meteorológicas existentes en un pixel (625Km²). Dada la resolución hori-

Figura1. a) Síntesis general EF5. b) Estructura del modelo. Elaborados por (University of Oklahoma. All Rights Reserved., 2016)



zonal del producto satelital TRMM es posible encontrar más de una estación de monitoreo en un pixel. Este procedimiento se realizó para poder desarrollar una comparación entre la información de las observaciones del IDEAM y las estimaciones de lluvia del producto satelital 3B42-V7. Para esto, se utilizaron distintos índices de validación estadística, los cuales han sido ampliamente utilizados en estudios similares (Hong, y otros, 2009). El primer índice fue el sesgo relativo (Bias) este evalúa el sesgo sistemático de la precipitación satelital; toma los valores de la precipitación satelital (P_s) y los compara con los observados (P_{obs}) para determinar el desplazamiento vertical de la precipitación satelital con respecto a los registros (University of Oklahoma. All Rights Reserved., 2016). Es importante para observar las subestimaciones y sobreestimaciones del producto. El coeficiente de correlación (CC) es utilizado para evaluar la agregación o relación entre la precipitación 3B42-V7 y los registros IDEAM, en una escala entre -1 y 1, donde 0 es no óptimo y 1 óptimo o deseable dado el comportamiento similar entre los datos; muestra el desplazamiento general entre las dos series de tiempo.

$$(1) \quad Bias = \frac{\sum_{i=1}^n P_s - \sum_{i=1}^n P_{Obs}}{\sum_{i=1}^n P_{Obs}} \times 100$$

$$(2) \quad CC = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{Obsi} - \bar{P}_{Obs}) \times \sum_{i=1}^n (P_{Si} - \bar{P}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{Obsi} - \bar{P}_{Obs})^2 \times \sum_{i=1}^n (P_{Si} - \bar{P}_s)^2}}$$

El sesgo y el coeficiente de correlación fueron los indicadores utilizados para la evaluación de la precipitación y caudales. Lo anterior debido a que estos indicadores muestran de manera más clara el comportamiento entre los datos observados y simulados según se observó en otros estudios como el de (Liu, Yi; Ren, Liliang; Hong, Yang; Zhu, Ye; Yang, Xiaoli; Yuan, Fei; ShanhumJiang, 2016) que utilizan además índices como la media de error absoluto (MAE por sus siglas en inglés) la cual mide el promedio de la magnitud del error; el RMSE (root mean square error) brinda un mejor acercamiento que el Mean Absolute Error y es capaz de medir la relación lineal así como la desviación entre las series de datos (Liu, Yi; Ren, Liliang; Hong, Yang; Zhu, Ye; Yang, Xiaoli; Yuan, Fei; ShanhumJiang, 2016), que si bien pueden complementar la evaluación, en ocasiones

su interpretación puede presentar una mayor complejidad y su aporte no representa una diferencia contundente a los resultados que se pueden encontrar mediante los indicadores ya propuestos.

En el caso de la evaluación de precipitación, para aquellos casos con 2 o más estaciones, se calculó el promedio de los índices obtenidos con cada una de las estaciones dentro del pixel. Mediante la construcción de estos índices estadísticos se puede medir la correspondencia entre los valores registrados en las estaciones en tierra y aquellos obtenidos en la misión TRMM (Hong, y otros, 2009).

El segundo paso, consistió en la construcción del SPI, el cual se propuso como la línea base de los demás índices estandarizados. Es sugerido estimarlo con un largo periodo de información para poder hablar de una escala climática y una significancia estadísticamente representativa (McKee, Doesken, & Kleist, 1993). El principio de estos índices estandarizados, sugiere que los datos deben presentar un comportamiento normal. Dado que la información hidrológica es continua, es posible hacer un análisis probabilístico utilizando distribuciones de frecuencia continua (Bedient, Huber, & Vieux, 2012) para determinar se presentan de forma normal. El comportamiento de la información puede ser analizado mediante la construcción de la función de densidad de la probabilidad (PDF por sus siglas en inglés) ó mediante los momentos de la distribución, estos momentos se convierten en indicadores de la forma de la distribución (Bedient, Huber, & Vieux, 2012).

Los principales momentos de la distribución son la media (3), una medida de tendencia central que indica en que parte sobre el eje x se encuentra el grueso de la distribución (Bedient, Huber, & Vieux, 2012), la desviación estándar (4) que representa la escala o propagación de la distribución (Bedient, Huber, & Vieux, 2012). Otros momentos superiores pueden ser utilizados, no obstante en estudios relacionados al tema hidrológico el más utilizado es la asimetría (skewness) (5), el cual es un parámetro de forma y muestra si la distribución es simétrica cuando obtiene un valor de 0 (Bedient, Huber, & Vieux, 2012), su rango varía de -1 a 1. Finalmente un complemento importante es la curtosis (6) el cual refleja que tan cercanos o alejados se encuentran el grueso de los datos con respecto a la distribución normal (National Institute of Standards and Technology (NIST), S.D.).

$$(3) \quad \hat{\mu} = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$(4) \quad \hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum x_i^2 - n\bar{x}^2}{n-1}}$$

$$(5) \quad \hat{s} = \frac{n}{(n-1)(n-2)} * \frac{\sum (x_i - \bar{x})^3}{\hat{\sigma}_x^3}$$

$$(6) \quad \hat{K} = \frac{\sum_{x_i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\hat{\sigma}_x} \right)^4}{s^4}$$

Finalizado el análisis de la distribución, si se encuentra un comportamiento no normal, es necesario aplicar técnicas de transformación para la normalización de los datos como la distribución normal, distribución log normal, Box Cox, Gamma (Pearson 3) ó Log Pearson 3(LP3) por mencionar algunas (Bedient, Huber, & Vieux, 2012). Con certeza de estar trabajando con una serie de datos con comportamiento normal, se hace la estimación del índice de precipitación estandarizada (SPI), el cual puede ser estimado en diferentes escalas de acumulaciones de tiempo 3,6,12,24,48 meses (McKee, Doesken, & Kleist, 1993) los denomina *i* quién, según sus resultados destaca el desempeño de las escalas *i* de 12 y 24 meses. El SPI en términos simples es la diferencia de precipitación con el promedio de una serie de tiempo sobre la desviación estándar (McKee, Doesken, & Kleist, 1993) como se aprecia en la ecuación (7).

Un evento de sequía para una escala de tiempo *i*, inicia cuando el SPI es continuamente negativo y adquiere un valor de -1 o inferior, comprendiendo que el fenómeno inicia desde el momento en que empieza a adquirir valores negativos hasta cuando vuelve a estar por encima de 0 (McKee, Doesken, & Kleist, 1993), la siguiente tabla muestra las categorías de sequía que enmarcan los diferentes valores de SPI. Su rango oscila entre 3 y -3.

En la construcción de la línea base, inicialmente se definió la escala de meses *i* a utilizar en la detección. Este paso es fundamental dada la importancia que la escala representa, cuando los periodos de tiempo son cortos (3-6 meses)

Tabla 1. Categorías del índice de precipitación estándar (McKee, Doesken, & Kleist, 1993).

Categorías del índice de precipitación estándar	
Rango	Categorías
> 2,0	Extremadamente húmedo
> 1,5	Muy húmedo
1,0 – 1,49	Moderadamente húmedo
-0,99 – 0,99	Condiciones Normales
-1,0 – -1,49	Moderadamente seco
-1,5 – -1,99	Muy seco
< -2,00	Extremadamente seco

el SPI se mueve más frecuentemente y se puede encontrar una gráfica más ruidosa (McKee, Doesken, & Kleist, 1993). La ventaja de trabajar con periodos más largos, es que el SPI responde más lentamente a los cambios en la precipitación mostrando menor número de picos o periodos para condiciones húmedas y secas (McKee, Doesken, & Kleist, 1993), lo anterior resulta en menor número de eventos. Reflejando aquellos más prolongados. Dado que el registro de datos con el que se cuenta no es un periodo tan prolongado se descarta la escala *i* de 48 meses; otros estudios (Liu, y otros, 2012) utilizan la escala *i* de 12 meses dado el desempeño que tiene en la detección de sequías. Esta metodología propone utilizar la escala *i* de 12 meses dado el comportamiento de sus gráficas y el desempeño que muestra en otros estudios (McKee, Doesken, & Kleist, 1993) (Liu, y otros, 2012). Determinada la escala de *i* meses a utilizar para la estimación del SPI, el siguiente paso en la construcción de la línea base, consiste en determinar los criterios a utilizar para la identificación de eventos de sequía, los cuales serán definidos y explicados con más detalle en la sección de resultados.

Definida la línea base e iniciada la detección de sequías, es importante revisar la correspondencia de los eventos detectados en comparación con aquellos reportados. Ya que el SSI y el SRI comparten el mismo principio estandarizado del SPI, los datos también deben presentar comportamiento normal. Debido a que estos dos índices son obtenidos a partir la simulación hidrológica, las series de datos para la estimación de los índices están desde

Enero de 1999, ya que el año anterior se utiliza como calentamiento del modelo. Con certeza de tener serie de datos de humedad del suelo (SM) y escorrentía hidrológica (QR), con comportamiento normal, se procede a realizar la estimación de los índices SSI(8) y SRI (9).

$$(8) \quad SSI = \frac{(SM)_{Actual \text{ promedio}} - (SM)_{Histórica \text{ promedio}}}{\hat{\sigma}_{SM(Histórica)}}$$

$$(9) \quad SRI = \frac{(QR)_{Actual \text{ promedio}} - (QR)_{Histórica \text{ promedio}}}{\hat{\sigma}_{R(Histórica)}}$$

Estimados los índices estandarizados y detectados los principales eventos, se utilizó la información del índice de agua en la superficie terrestre (LSWI por sus siglas en inglés), datos que fueron calculados y facilitados por el grupo de investigación Earth Observation and Modeling Facility (EOMF por sus siglas en inglés) de la Universidad de Oklahoma; (www.eomf.ou.edu). El LSWI brinda el factor diferencial con cualquier estudio similar, ya que incorpora la variable eco hidrológica para la detección del fenómeno; la ecuación que rige a este índice esta descrita a continuación, en esta Infrarrojo Cercano (NIR por sus siglas en inglés) está relacionado con el índice de superficie foliar (LAI) y logra alcanzar las hojas que no son visibles desde arriba, por otra parte el SWIR (Longitud de onda de infrarrojo corta por sus siglas en inglés) logra detectar la humedad presente en la planta. El rango de este índice oscila entre -1 y 1 donde los valores negativos se asocian a vegetación seca, amarilla y madera muerta; mientras que los valores positivos a vegetación verde y saludable (Vanegas, Diana Ximena, 2011) y (Xiao, Boles, Liu, Zhuang, & Liu, 2002).

$$(10) \quad LSWI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}}$$

Finalizada la construcción de todos los índices se procedió a realizar de manera comparativa la evaluación de sus resultados para encontrar el nivel de mejora que existe en la habilidad de detección entre la metodología integrada propuesta en esta investigación y la habilidad mostrada de forma individual.

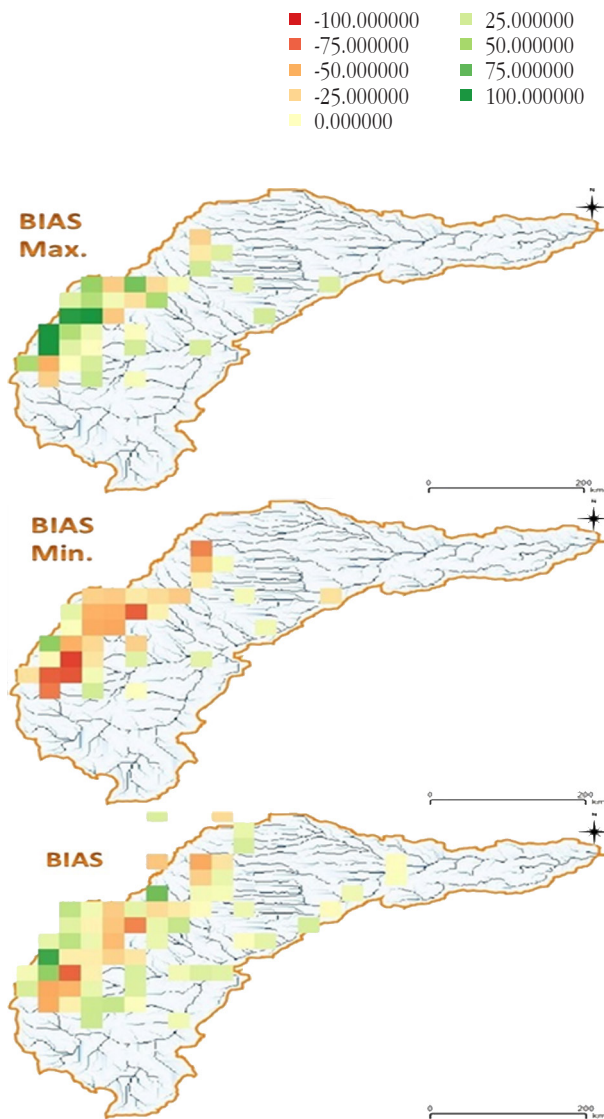
Resultados y Discusión

Debido a la cobertura espacial de la red de monitoreo terrestre, sólo se logró hacer la evaluación de las estimaciones satelitales en 70 pixeles de un total de 192 que cubren la zona de estudio en esta investigación.

La figura 2. muestra los mapas del resultado del sesgo para la cuenca. El promedio para la Cuenca es del 3.04% teniendo valores entre -74% y 86%; donde la zona principal del río de la Cuenca hacia la parte media y baja del Río Meta mostró los mejores resultados. En la figura 3, se logran apreciar los mapas del coeficiente de correlación, en el que el mapa muestra un coeficiente de correlación predominantemente óptimo en los datos promedio, resultando con una media de 0.77 con valores de hasta 0.93, en la que la zona ubicada fuera del pie de monte mostró excelentes resultados. Sin embargo un pixel ubicado en la corriente de Casanare con presencia de 2 estaciones y otro en la corriente de Guavio fueron la excepción a este comportamiento, mostrando los coeficientes más bajos con valores cercanos a 0.25.

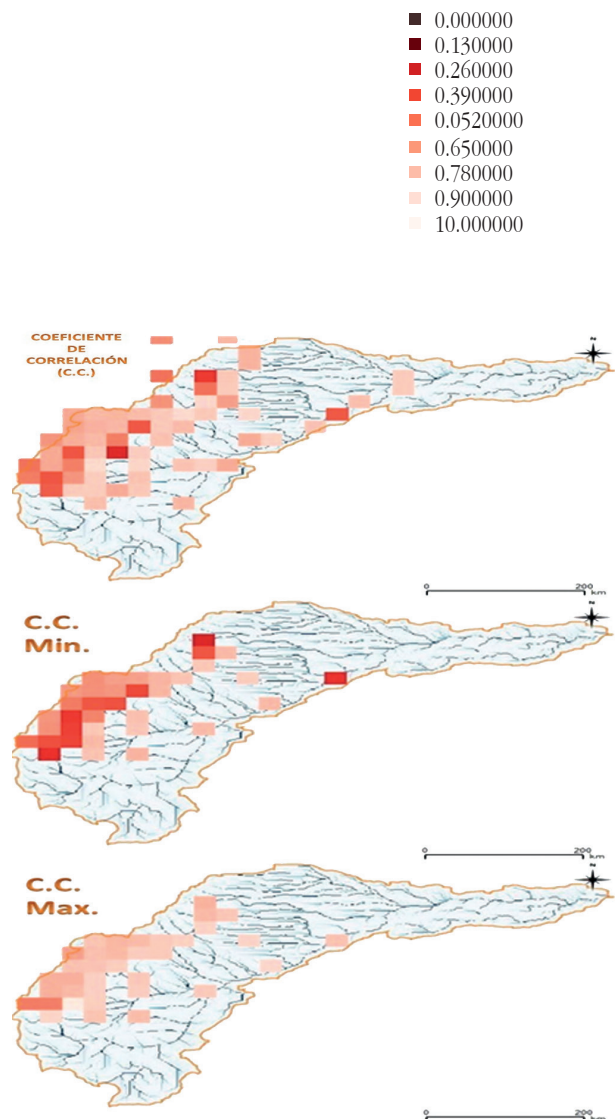
Es posible considerar que los datos de precipitación satelital y el las observaciones presentan un comportamiento similar, esto gracias a los resultados obtenidos en el coeficiente de correlación, el cual presentó en promedio un valor de 0.77, indicativo de una alta relación lineal entre los datos; algunos estudiosos del tema sugieren como coeficiente de correlación ideal aquel superior a 0.85; es importante resaltar que los datos de las series de precipitación entre sí ya presentaban una variación importante en un mismo pixel, esto se puede observar al agrupar los valores mínimos de coeficiente de correlación para aquellos pixeles con dos o más estaciones, donde al comparar los valores máximos y mínimos de aquellos pixeles con más de 1 estación, se observó que en el caso del máximo tenían valores entre 0.87 y 0.97; sin embargo para el de más bajo desempeño sus valores oscilaban entre 0.21 y 0.56; a pesar de esto el grueso de pixeles presentaron muy buenos coeficientes de correlación. En su mayoría las zonas localizadas en la parte alta de la cuenca presentaron rendimientos bastante negativos; no obstante no es suficiente asociar su ubicación en la zona montañosa con este desempeño, dado que si bien la mayoría de los pixeles que tuvieron estos valores por debajo de 0.5 se ubican en esa zona, el grueso de pixeles que se ubican en esa área presentaron desempeños supe-

Figura 2. BIAS; Mapal. BIAS promedio (Ubicado parte superior). Mapa II. BIAS Mínimo en píxeles con 2 o más estaciones (costado inferior izquierdo). Mapa III. BIAS Máximo en píxeles con 2 o más estaciones (costado inferior derecho). Fuente: Propia.



riores a 0.7. Al observar los mapas del sesgo se puede afirmar con base a los resultados que existe una ligera sobre estimación del producto satelital en la zona media y baja del cauce principal (Río Meta), soportado en que tanto los puntos unitarios (píxeles con una sola estación) como aquellos con múltiple estaciones presentaron una tendencia a un sesgo positivo. La zona más próxima al límite occidental de la cuenca donde se ubica el mayor número de estaciones mostró una gran variabilidad, en

Figura 3. Coeficiente de Correlación de (P). Mapal. C.C. promedio (Ubicado parte superior). Mapa II. C.C. Mínimo en píxeles con 2 o más estaciones (costado inferior izquierdo). Mapa III. C.C. Máximo parte inferior derecha. Fuente: Propia.



esta región es posible observar que la mayor parte de los píxeles ubicados sobre la parte más occidental del borde de la cuenca a la altura de zonas como el parque natural Chingaza, y en general, la parte con mayor elevación sobre la cuenca mostraron marcadas sobre estimaciones, aquellos ligeramente más al sur oriente en áreas como Villavicencio mostraron intensas subestimaciones y posteriormente manteniendo esa dirección se volvían a presentar sobre estimaciones; esta alta variabilidad se

encontró en la parte más montañosa de la cuenca; sin embargo dada la diversidad de valores encontrados no es posible atribuir el sesgo únicamente a esta condición geográfica; para comprender un poco más el comportamiento de los resultados se hizo un acercamiento a estas áreas donde se encontró que gran parte de las sub estimaciones se ubicaban en zonas que reflejan la transición del sistema montañoso a una condición plana, debido a que este fenómeno fue la condición predominante más no la condición absoluta, se menciona como elemento de interés para estudios próximos donde sería bastante interesante determinar si este tipo de condición geográfica genera alguna incidencia particular en la refracción y esto es lo que genera la subestimación del producto satelital. En adición, es importante destacar que al hacer al determinar el error absoluto y RMSE relativo, los puntos con los mayores valores se ubicaron en la zona ya mencionada, lo cual sugiere el pie de monte como una zona de interés; no obstante pese al alto rango de los resultados, los valores más altos suponen un elemento mínimo de la muestra. Los resultados aquí encontrados reafirman lo sugerido en otros estudios (Vergara, Hong, Gourley, Emmanouil N. Anagnostou, & Kirstetter, 2013) que indican que en cuencas de mayor área se esperan valores de error relativo RMSE más altos; un elemento que se encontró, dado que la cobertura espacial de cada

pixel de precipitación es de 625Km^2 . Al revisar las observaciones entre algunas estaciones ubicadas en un mismo pixel, aquellas estaciones con diferencias de alturas superiores a los 200m presentaron a nivel general mayor variación en los datos de las series de tiempo, como es de esperarse; no obstante, no fue un factor que se pudiera asumir como determinante en la diferencia de los registros, resaltando el caso mostrado entre estaciones como “Sta. Maria” y “Hato Burrari” que con 2 metros de diferencia altitudinal mostraron una alta variación entre sus datos; lo anterior se puede justificar parcialmente en la gran cantidad de datos faltantes que si bien explican la diferencia en la precipitación acumulada; dadas las condiciones similares de ambos puntos es difícil comprender el porqué en periodos como el 11/2010 a 08/2012, una de las estaciones triplica los valores registrados por la otra; esta dinámica observada entre los datos de las observaciones permiten justificar en parte, los resultados bajos en coeficientes de correlación en algunos pixeles; sin embargo dado que no fue elemento crítico en este estudio y nuestros resultados a nivel general fueron óptimos y no se observó un error sistemático para la zona de estudio, se continuó el trabajo con las estimaciones satelitales originales. Sin embargo, se recomienda revisar con más detalle el comportamiento entre los datos de referencia (observaciones) en futuros estudios.

Mapa.2. Estaciones Hidrológicas y Meteorológicas utilizadas en la ZE.

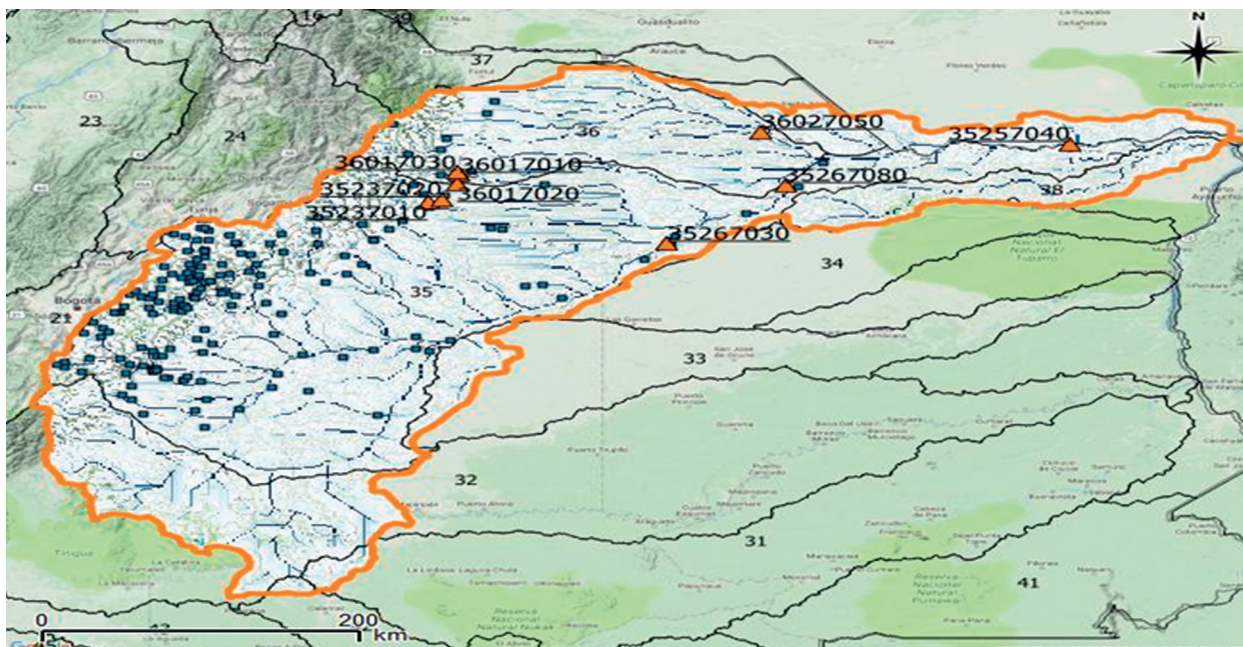


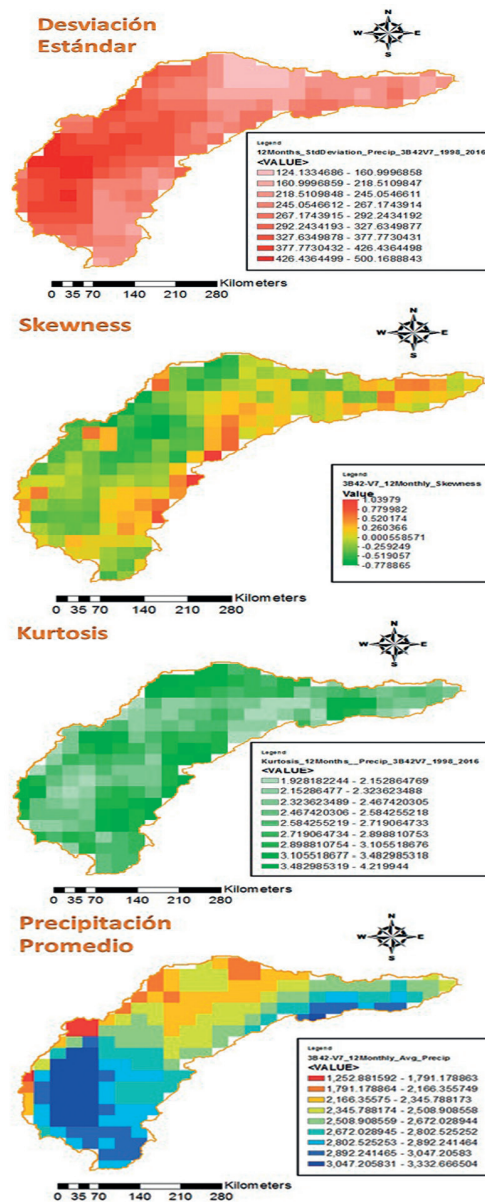
Tabla 2. Evaluación de Caudales.

Evaluación de Caudales		
Código Estación	Sesgo(%)	Coefficiente de Correlación
35237010	7.87	0.72
35237020	249	0.207
35257040	176	0.75
35267030	207	0.79
35267080	184	0.77
36017010	32	0.76
36017020	36	0.15
36017030	-11	0.4
36027050	249	0.6

En la evaluación de caudales se encontraron sesgos bastante buenos por el orden del 7% y sesgos bastante altos con valores superiores al 200%, esto último principalmente en aquellas más cercana al pie de monte, por lo cual es posible inferir que para esas estaciones parte del error de la precipitación, se transfirió al modelo. Estos resultados en parte se explican también, por un error que existe en las capa de acumulación de flujo; si bien un error similar se detecto cuando se trabajó inicialmente, con una resolución de 5Km y en parte disminuyó al utilizar datos con resolución de 1 Km; estando en un nivel de desarrollo avanzado en esta investigación se encontró que el programa estaba tomando un caudal significativo correspondiente a otra cuenca, esto en la zona sur occidental de nuestra zona de estudio. Al hacer una revisión se logró detectar que este error incrementaba en mas de 40.000Km² el área de drenaje de nuestra área de estudio; es así como pixeles como el 3523010 cuyo caudal no se ve afectado por este error presenta un sesgo de solo el 7.8%, mientras que puntos como el del pixel 35267030, el cual es el primero en recibir este caudal adicional presenta sobre estimaciones de hasta 200%. Dado el avance que presentaba el proyecto en el momento de detectar este error y que la principal entrada de datos en este estudio es la precipitación se decidió continuar con el proyecto, teniendo presente este error. Es importante mencionar, que por la cantidad de información que se tuvo disponible frente al parámetro de caudales, no es

posible afirmar un comportamiento general de los datos para toda la cuenca; sin embargo los puntos evaluados a nivel general, mostraron un desempeño bastante óptimo y una relación lineal bastante cercana con los datos de las observaciones, destacando que la sobreestimación era un elemento que se esperaba según ya se mencionó. Lo anterior supone esta zona como un lugar donde aplicar técnicas de monitoreo remoto puede resultar muy útil;

Figura 4. Mapas Momentos de la Distribución, datos originales, escala 12Meses. Mapa I. Precipitación Promedio. Mapa II. Kurtosis. Mapa III. Skewness. Mapa IV. Desviación Estándar. Fuente Propia.



adicional a que presenta una muy baja cobertura de estaciones en algunas zonas de la cuenca, que en esta evaluación mostraron una excelente respuesta a los datos de estimación satelital TRMM.

Al realizar la evaluación de los momentos de la distribución, se encontró que al aumentar las acumulaciones de tiempo la normalidad en el comportamiento de los datos disminuía, prueba de esto es la figura 4 donde al hacer esta evaluación para las acumulaciones de precipitación satelital de 12 meses, se aprecia en algunos pixeles marcadas asimetrías como refleja el mapa del skewness. Por lo anterior fue necesario aplicar un procedimiento de transformación de los datos para su normalización, no obstante al aplicar la función gamma y otras similares ya mencionadas la transformación de los datos no se obtuvo los resultados esperados ya que el skewness en algunos puntos continuaba presentando valores distintos a 0, por lo tanto se aplicó la transformación Box Cox utilizada (Liu, y otros, 2012) para remover la asimetría y esta obtuvo el desempeño esperado; las ecuaciones 11.a y 11.b de la transformación Box Cox, (X) representa los valores originales de las series de tiempo, (Y) su valor transformado y lambda es un parámetro para el cual los valores (Y) de la serie de tiempo están distribuidos de forma normal.

$$(11.a.) \quad Y = \frac{x^\lambda - 1}{\lambda}, \lambda \neq 0 \quad (11.a.)$$

$$(11.b.) \quad Y = \ln x, \lambda = 0 \quad (11.b.)$$

La detección de eventos se sugiere basada en la intensidad del evento y la persistencia en meses del mismo, esta consideración se hace soportada en que uno de los elementos críticos para el análisis de la sequía son la persistencia y la duración (McKee, Doesken, & Kleist, 1993). Estudios nacionales también toman en cuenta la persistencia del evento, un ejemplo es (IDEAM, S.D.) que considera el periodo de sequía cuando se tienen más de 3 meses consecutivos de valores negativos de SPI; si bien (McKee, Doesken, & Kleist, 1993) considera el evento de sequía cuando inician condiciones moderadamente secas no especifica un tiempo en particular de persistencia para considerar un evento, sino que menciona la continuidad en valores inferiores a -1. (Kumar, Murthyb, Saib, & Royb, 2010) Refleja interés en aquellos valores de

-1.5 e (IDEAM, 2015) aquellos superiores a -2. Dado que los valores iguales o superiores a -2, están asociados a un evento extremadamente seco inicialmente se propone este criterio; no obstante tomando elementos como los mencionados en el estudio realizado en Fort Collins, Colorado por (McKee, Doesken, & Kleist, 1993) la persistencia juega un papel determinante e incide directamente en el impacto; basados en estos elementos esta metodología propone para detectar 2 tipos de eventos, los cuales dada su persistencia e intensidad podrían llegar a ser catalogados como extremos.

Tabla 3. Criterios para la búsqueda de eventos de sequía extremos. Fuente: Propia.

Escala para Detección de Eventos de Sequía Extremos			
Clase	Escala i meses SPI	Rango SPI	Persistencia en meses
A	12	X ≤ -2.0	12
B	12	X ≤ -1.5	24

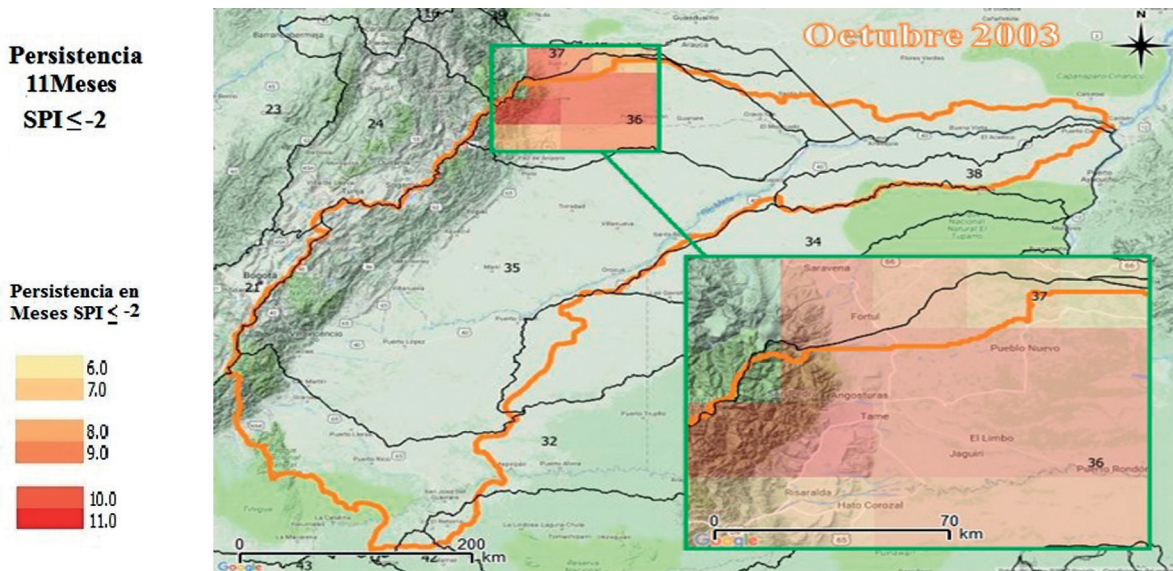
Los eventos a detectar, mostrados en la tabla 2 toman registros de las anomalías que persistieron como mínimo en condición muy seca entre 1 y 2 años, lo cual permite enfocarse en aquellas zonas que según los datos del satélite, se puede inferir representa una gran anomalía con gran potencial de impacto. Definidos los criterios temporales se hace una búsqueda de aquellos eventos que cumplen con las condiciones de intensidad y persistencia para ambas clasificaciones (A & B). Encontrados los eventos son objeto de comparación con los registros del IDEAM y de prensa para validar la existencia de los mismos; no obstante dado que los eventos SPI de referencia tomados del IDEAM, fueron elaborados bajo acumulaciones mensuales i de 1,3,6 y 12 meses con persistencias de 2 y 3 meses en nuestra zona de estudio; se espera que algunos de los eventos registrados en el ENA 2014 no se encuentren en las fechas de eventos detectados en este estudio como críticos. Sin embargo, debido a los periodos de persistencia utilizados se espera visualizar una coincidencia en los mapas SPI con fechas cercanas a los reportes con al menos un reducto o persistencia de condición seca en las zonas reportadas; debido a que, al estar manejando escalas temporales i diferentes para el cálculo del SPI se espera una ligera variación. Dado que se busca detectar los eventos más extremos,

se presentaran dos tipos de mapas en esta investigación, el primero el de persistencias, muestra la cantidad en meses que un píxel mantuvo una persistencia de la condición muy seca o extremadamente seca; por efectos de visualización los mapas mostraran solo las mayores persistencias en meses para permitir mejor identificación del fenómeno extremo; los otros mapas a mostrar son los de los índices, los cuales mostraran en la mayor parte de los casos las zonas que presentaban condiciones secas,

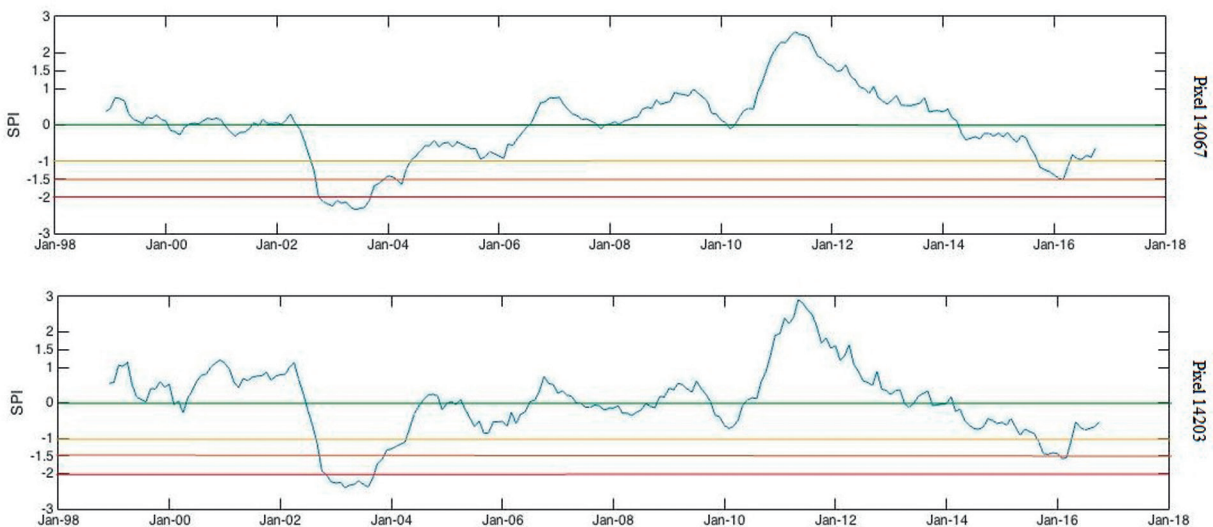
todos estos serán representados para el primer día del mes referido en cada mapa.

A continuación se muestra el resultado que el SPI, construido con información satelital, logró detectar para un evento constituido como clase A y B, respectivamente. En el primer caso al no lograr encontrar un resultado con una persistencia de 1 año, se tuvo que hacer un ajuste a una búsqueda de persistencia de 11 meses, que se muestra en el siguiente mapa.

Mapa 5. Mapa Persistencia Evento Extremo Clase A. Fuente: Propia



Serie de Tiempo 1. SPI, Píxel 14067. Ubicada parte Superior. Fuente: Propia. Serie de Tiempo2. SPI, Píxel 14203. Ubicada parte Inferior. Fuente: Propia.



Dada la magnitud de la sequía mostrada por las series de tiempo, se buscó confirmar la veracidad del evento clase A comparando con aquellos reportes del IDEAM encontrados para esta fecha, dado que para octubre de 2003 esta zona contaba con 11 meses de persistencia de la condición extremadamente seca, se supuso que el evento inició desde finales de 2002 a finales de 2003, para validar o descartar este postulado, se representó el SPI para la cuenca durante este periodo de tiempo. Esto validó el supuesto y encontró una persistencia importante del evento para Tame, Jaguari, El Limbo, Puerto Rondo, Hato Corozal, Pueblo Nuevo entre otros puntos ubicados en la ZH de Casanare(36), mostrando una correspondencia positiva con los reportes del IDEAM en esta zona; no obstante en el ENA14 está reportado a manera general el Meta como extremadamente seco durante marzo-abril de 2003, lo cual no coincidió según se aprecia en la figura 4.

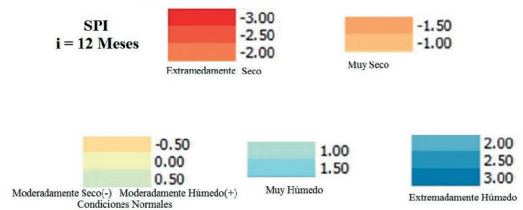
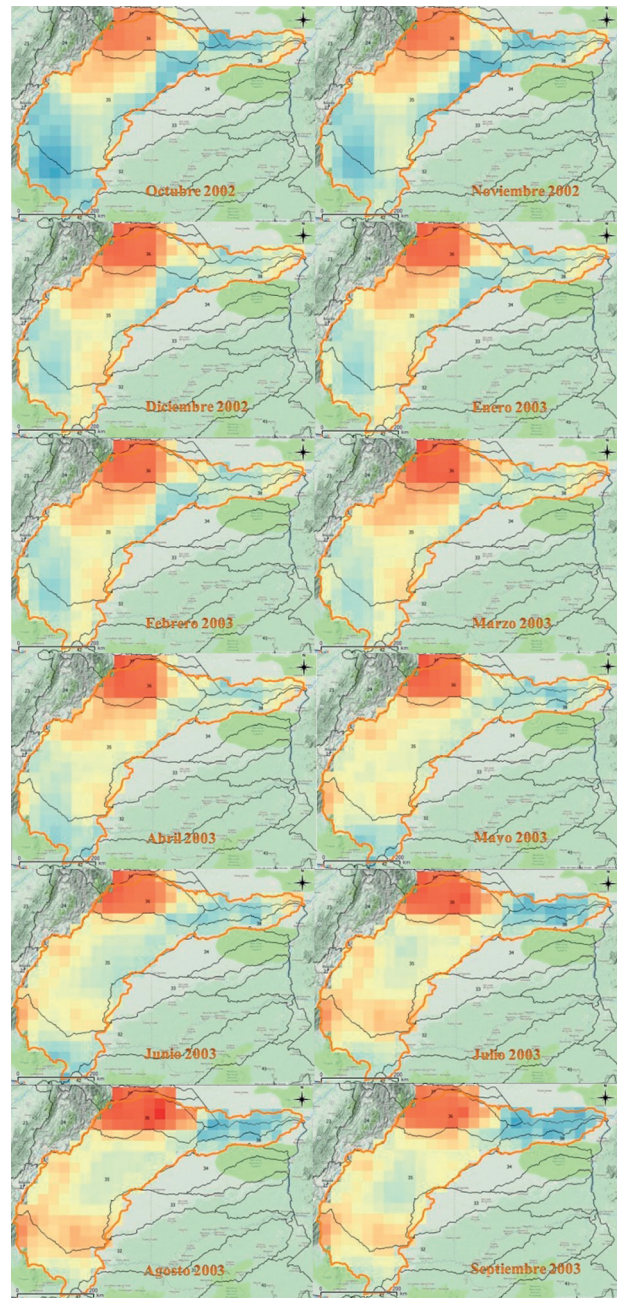
Al realizar la búsqueda del evento clase B, se encontró un evento que si bien no se podía comparar con el ENA2014, mostró una coincidencia positiva con eventos registrados por prensa, que para el periodo 2015, reportaron una de las peores temporadas secas que ha sufrido Colombia.

Los resultados ya presentados, que validados con los registros permiten afirmar que los eventos realmente sucedieron, demostrando la habilidad que tiene en la información satelital en esta zona de estudio. La siguiente figura muestra el comportamiento del fenómeno durante el periodo de sequía detectado.

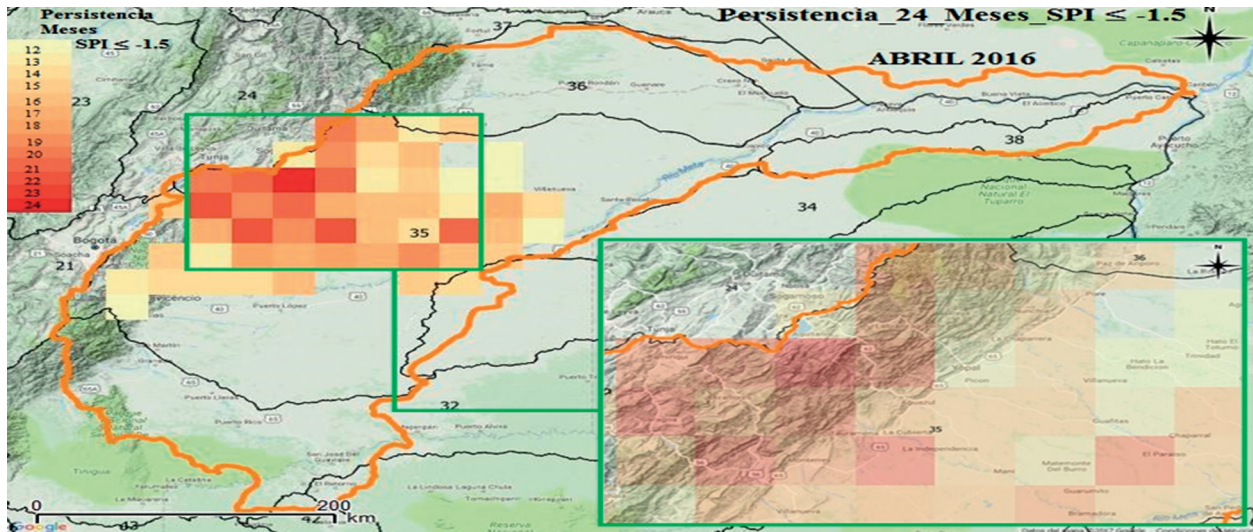
Las figuras con los mapas de SPI, son muestra que en efecto durante el periodo detectado se sufrió un fenómeno de sequía. Sin embargo, la información presentada en las series de tiempo, refleja que los criterios de eventos extremos permiten centrar la atención en los eventos más intensos y que otros eventos, aunque menores también importantes son ignorados. Por lo anterior se tomaron los criterios y eventos clase A y B como línea base, cuyas persistencias e intensidades fueron modificados para determinar en este y los demás índices otros eventos.

El comportamiento de los datos de los índices SSI y SRI, al igual que SPI, fueron evaluados mediante los momentos de la distribución. Sus datos como se aprecian en la figura H y la figura NH, presentaron desplazamientos en algunos pixeles. No obstante, al hacer el mismo procedimiento de transformación bajo la metodología Box Cox, se encontró

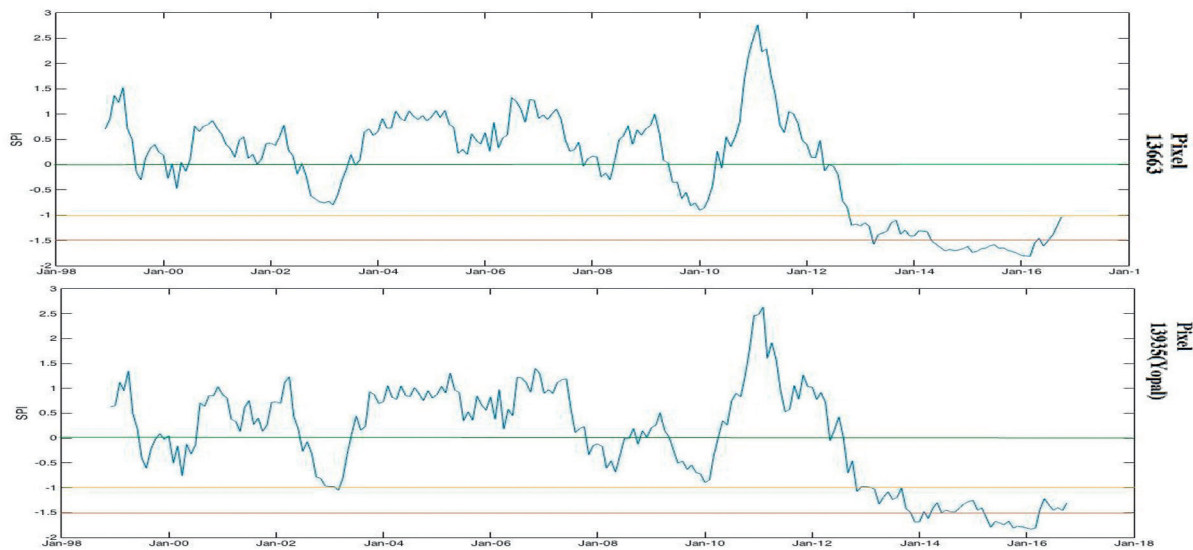
Figura 5. Mapas SPI periodo Oct2002-Sept2003. Evento Extremo Clase A. Fuente: Propia.



Mapa 6. Mapa Persistencia Evento Extremo Clase B. Fuente: Propia



Serie de Tiempo 3. SPI, Píxel 13663. Ubicada parte Superior. Fuente: Propia. Serie de Tiempo 4. SPI, Píxel 13935. Ubicada parte Inferior. Fuente: Propia.



que la asimetría aumentaba; esto sucedió también al aplicar las técnicas de Log Normal, PL3, Estándar normal, donde la asimetría aumentaba con un inclinación negativa. Al revisar estudios similares, se encontró que por ejemplo en (Kumar, Murthyb, Sailb, & Royb, 2010) al aplicar la transformación de los datos y tener la normalización de estos, sus resultados eran similares al que presentaban nuestros datos sin aplicar ningún tipo de transformación, siendo estos valores más óptimos a los obtenidos en las metodologías de transformación aplicadas. Por lo anterior se decide utilizar los datos tal como los arroja el modelo,

en la siguiente gráfica se aprecian los momentos de la distribución para la serie de datos de humedad del suelo y la escorrentía hidrológica.

El mapa mostrado en la parte superior derecha muestra un promedio de 17.74 mm de acumulación de humedad del suelo, como se muestra en el mapa el skewness muestra en algunas zonas una total asimetría hacia la derecha sobre el occidental de la cuenca, estas anomalías son necesarias considerarlas en mayor detalle para futuras investigaciones.

Figura 6. Mapas SPI periodo Oct2014-Aug2016. Evento Extremo Clase B. Fuente: Propia

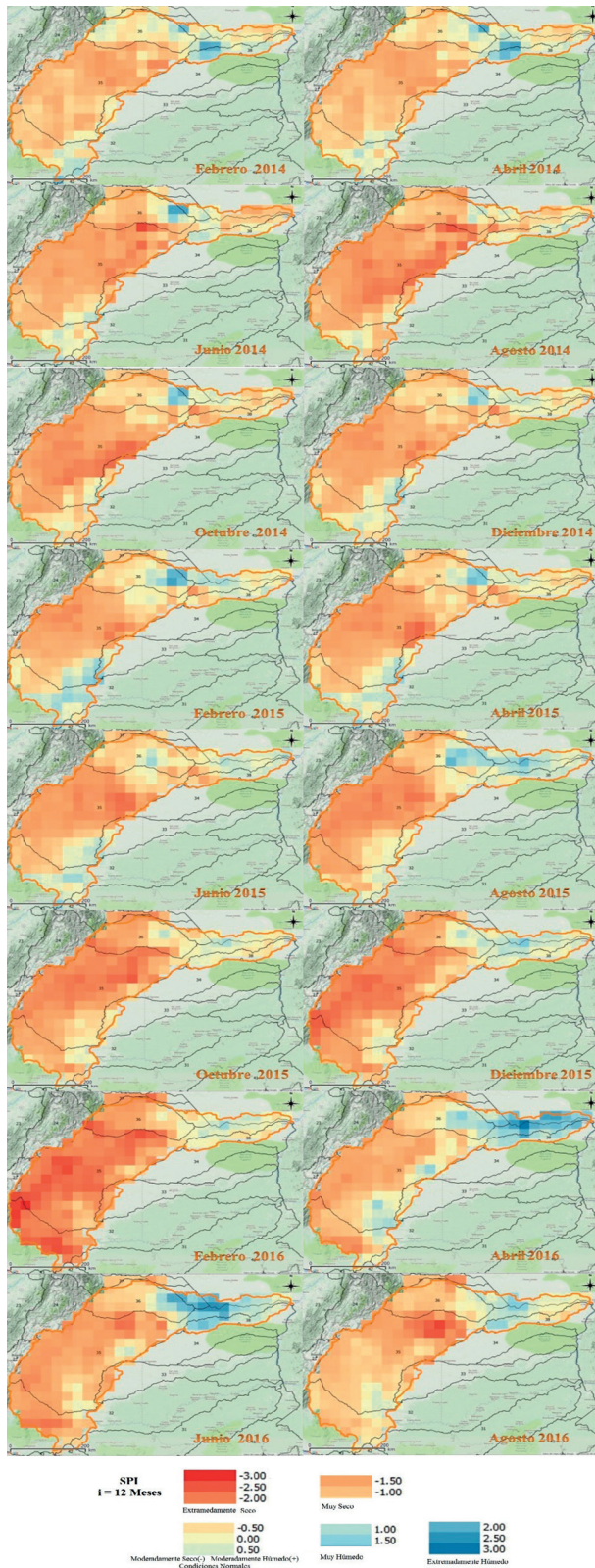


Figura 7. Mapas Momentos de la Distribución SSI. Mapa I. Promedio Mensual Humedad del Suelo (Costado Superior Izquierdo). Mapa II. Kurtosis (Costado Superior Derecho). Mapa III. Skewness (Costado Inferior Izquierdo). Mapa IV. Desviación Estándar. Fuente: Propia

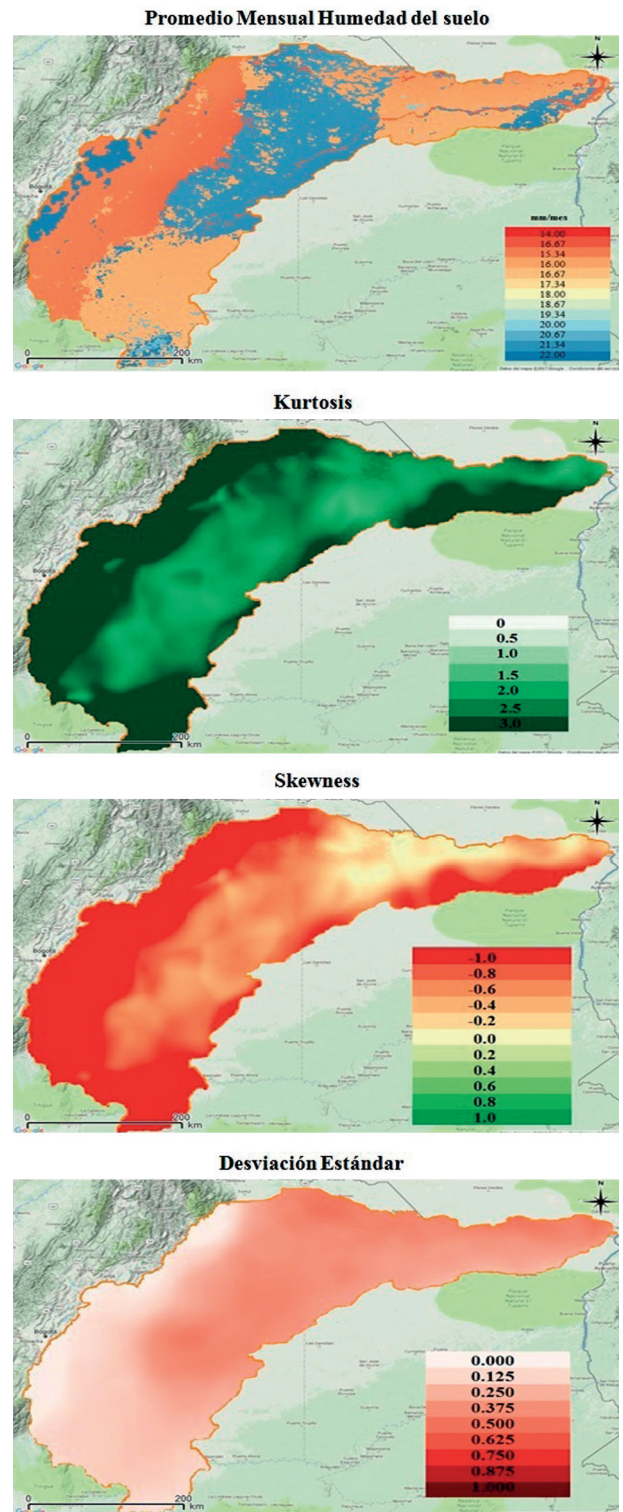
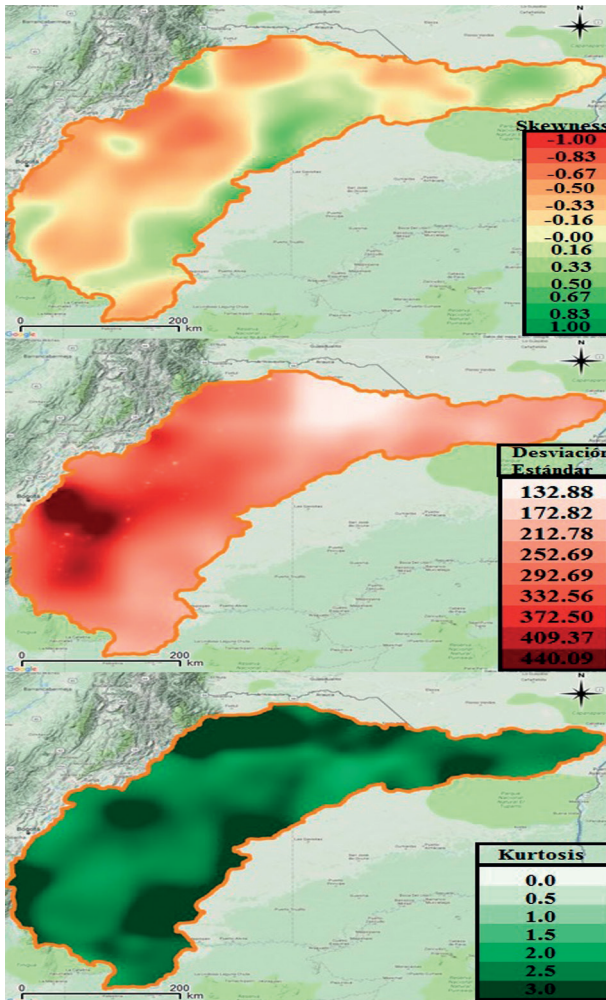


Figura 8. Momentos de la Distribución SRI. Mapa I. Skewness(Costado Superior Izquierda). Mapa II. Desviación Estándar (Costado Superior Derecho) Mapa.III. Kurtosis(Parte Inferior). Fuente: Propia.



La estimación del SRI al igual que el SPI, se realizó mediante acumulaciones i de 12 meses. Por otra parte el SSI, si bien comparte algunas propiedades con estos dos, se realizó mediante el promedio anual, ya que al utilizar las acumulaciones los resultados dan fuera de los rangos, ya que se estaría excediendo la capacidad de almacenamiento de agua del suelo y por ende sus resultados se desajustan con la realidad al utilizar acumulaciones en este índice. La detección de eventos mediante el SSI, utilizó persistencias e intensidades diferentes, para este índice la línea de 0 del eje vertical se encontraba cercana a -0.5 y las condiciones del terreno suponían una barrera desde los de valores muy húmedo(1.5); por lo anterior fue posible llegar a detectar el periodo donde el evento

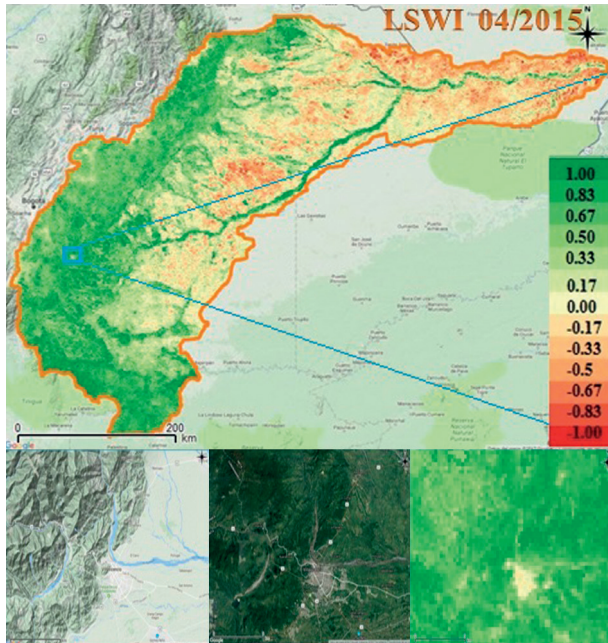
estuvo más intenso al aumentar la condición de intensidad del evento. El SRI mostró una alta semejanza a la detección obtenida con el SPI; no obstante logra reflejar a manera más detallada el alcance del evento y la extensión de las regiones más afectadas, esto en parte es justificado a que la resolución empleada en este índice y el SSI de 1Km, mucho más fina que la del SPI (25Km); adicionalmente gracias a la naturaleza hidrológica del índice nos permite identificar hasta que punto sobre un cuerpo hídrico la sequía produjo un impacto significativo.

En el caso del LSWI dado que trabaja con su fuente de datos es el sensor MODIS, es un índice completamente independiente. Fundamentado en la diferencia normalizada de las radiaciones de onda corta, su principio es distinto a los índices estandarizados trabajados previamente, por lo tanto la estimación se realizó en promedios i de 1 mes de los datos originales, como es trabajado en la mayoría de estudios que utilizan este índice, debido a la escala utilizada se utilizaron persistencias de 3 meses. La detección con este índice de este se realizó mediante búsqueda de valores $LSWI \leq -0.67$, buscando emular una equivalencia al rango de -2 utilizado en los índices estandarizados. Adicionalmente se realizó la búsqueda bajo un criterio $LSWI \leq -0.1$, este último comparado con la clasificación del servicio de monitoreo de sequías de Estados Unidos (USDM) el cual es relacionado por (Bajgain, Xiao, Wagle, Basara, & Zhou, 2015) dado el desempeño que encontraron al utilizar este criterio, para esto el autor muestra una escala de rangos con la condición seca asociada a las clasificaciones USDM que se muestra a continuación.

Tabla4. Clases de Sequía para valores LSWI, Extraída de (Bajgain, Xiao, Wagle, Basara, & Zhou, 2015)

Drought Class	Description	LSWI-D values and drought class
0	non-drought	
DO	adnormally dry	$LSWI > 0.1$
D1	drought-moderate	$0 < LSWI \leq 0.1$
D2	drought-severe	$-0.1 < LSWI \leq 0$
D3	drought-extreme	
D4	drought-exceptional	$LSWI \leq -0.1$

Mapa 7. LSWI, Zoom ciudad de Villavicencio



LSWI gracias a su resolución logró mostrar un nivel de detalle muy alto, lo que permite localizar el punto específico donde la vegetación se vio más afectada, lo cual es prueba del gran potencial que este índice representa. Sin embargo, algunos puntos permanentemente se ven secos, esto debido a que pueden tener una carencia de cobertura vegetal. Para corroborar esto, se hizo un acercamiento de los resultados del LSWI al área correspondiente a la ciudad de Villavicencio, Meta. Esto en una

fecha que se detectó con presencia de sequía, el siguiente mapa muestra el resultado de este ejercicio.

El mapa anterior confirma que las zonas con menor cobertura vegetal afectan los resultados del indicador, donde se logra apreciar que a manera general presenta valores entre 0 y -0.17, una razón posible se asocia al área del pixel en la cual que puede que exista algún porcentaje de cobertura vegetal en la zona urbana; el impacto del área urbana sobre la estimación en el pixel es claro ya que la predominancia en los alrededores corresponde a valores positivos. Para futuros estudios se recomienda analizar en detalle elementos como este; así como las características de la vegetación, resistencia del organismo a periodos secos y ciclo de crecimiento, mediante herramientas como Google Earth, se puede buscar establecer el porcentaje de cobertura vegetal; este último dado que existen zonas sin vegetación o con cobertura urbana y esto afecta los resultados.

Estimados los índices, se agruparon aquellos eventos más importantes detectados por los distintos índices, en la tabla que se muestra a continuación para así comparar la habilidad de detección integrada con la individual. Para efectos de la evaluación comparativa, se analizaron temas como la espacialidad y temporalidad de los eventos; en los que mediante la tabla se permite evaluar la temporalidad, para la que una detección completa será aquella cuyo periodo de detección individual haya sido congruente al periodo de detección integrado.

Tabla 5. Evaluación Comparativa, principales eventos detectados. Fuente: Propia.

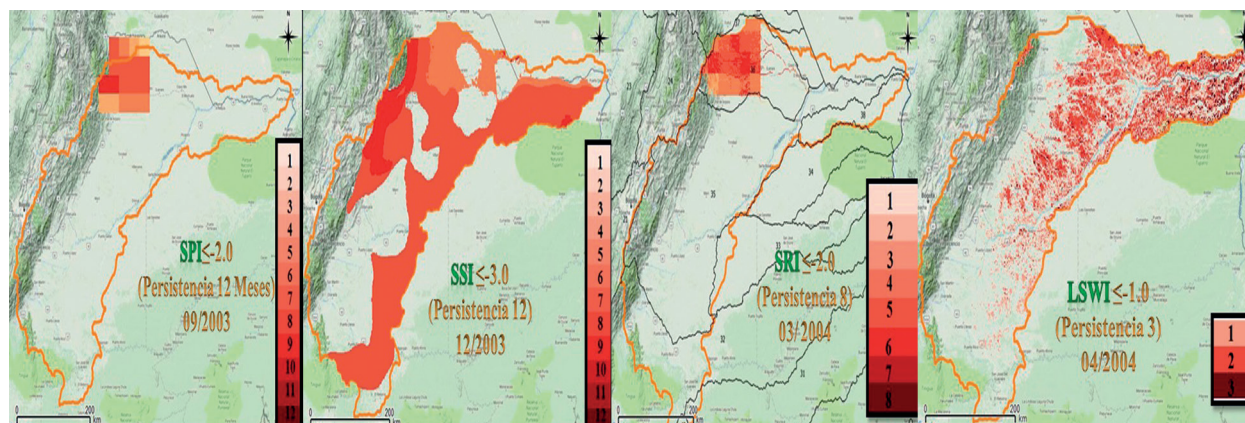
Evento Extremo	Periodo De detección Integrado	Periodo detectado de forma individual				Detección Completa (C) Parcial (P)				Intensidad ≤-2(A) ≤-1.5(B) ≤-2.5(X) ≤-3.0(Y) ≤-1.0(L) ≤-0.1(S)				Asociado con reporte	
		SPI	SSI	SRI	LSWI	SPI	SSI	SRI	LSWI	SPI	SSI	SRI	LSWI	IDEAM Periodo	Prensa
Eventos más Extremos															
Zona Casanare	11/02	11/02	12/02	12/02	12/03										
	-	-	-	-	-	P	P	P	P	A	Y	A	L	01/03	
	03/04	10/03	12/03	03/04	03/04									04/03	
Zona Meta	02/14	04/14	02/15	02/14	01/15										
	-	-	-	-	-	P	P	P	P	B	X	A	L	No Aplica	X
	10/16	04/16	10/16	10/16	03/15										

Evento Extremo	Periodo De detección Integrado	Periodo detectado de forma individual				Detección Completa (C) Parcial (P)				Intensidad ≤-2(A) ≤-1.5(B) ≤-2.5(X) ≤-3.0(Y) ≤-1.0(L) ≤-0.1(S)				Asociado con reporte	
		SPI	SSI	SRI	LSWI	SPI	SSI	SRI	LSWI	SPI	SSI	SRI	LSWI	IDEAM Periodo	Prensa
Eventos Extremos															
2000-2002	12/00 - 02/02	10/01 - 01/02	02/01 - 02/02	- - 03/01	12/00 - 03/01	P	P	P	P	B	X	-	L	01/01 - 03/01	
2012-2013	07/12 - 12/13	- - 12/13	12/12 - 12/13	07/12 - 03/13	12/12 - 03/13	-	P	C	-	-	X	A	L	-	X
2009-2010	01/09 - 12/10	10/09 - 04/10	12/09 - 12/10	- - 03/10	01/09 - 03/10	P	P	-	P	A	Y	-	S	01/10 - 04/10	
2007-2009	03/07 - 02/09	08/08 - 02/09	03/07 - 01/08	- - 03/08	03/07 - 03/08	P	-	-	P	A	X	-	I	02/08 - 03/08	
2005-2007	06/05 - 12/07	06/05 - 05/06	12/06 - 12/07	- - -	- - -	P	P	-	P	B	Y	-	-	-	X

La tabla anterior muestra una síntesis de los principales eventos detectados y permite hacer una comparación entre la detección integrada y la individual de cada índice en torno al periodo detectado; así mismo entre ellos en elementos como su persistencia e intensidad; a continuación se muestra a manera complementaria los mapas de cada índice para algunos de los eventos ya referidos, en estas figuras es posible visualizar de manera más clara el aporte específico de cada índice a la detección del fenómeno.

En este punto de la evaluación integrada mediante la comparación, se determina que para el evento muy extremo de la zona Casanare, periodo 11/2002 a 03/2004; la detección mediante el uso integrado de índices se ve mejorada; soportado en que la detección al analizar la cobertura temporal del evento bajo los parámetros utilizados entre el SPI y el índice integrado este último muestra una mejora de 4 meses; en adición la cobertura espacial del evento aumenta de forma sustancial inclu-

Figura9. Mapas Persistencia, Evento extremo detectado, Casanare (Nov2002-Abr2004) . Fuente: Propia.



yendo lugares que no fueron detectados por el SPI como extremos y si por el conjunto integrado coincidiendo con los registros. Adicionalmente brinda una visión del fenómeno más completa que permite determinar un alcance más completo del evento.

La figura 10 muestra los resultados de un evento bastante extremo 12/2013 a 10/2016; este evento si bien no se encuentra en los registros utilizados del IDEAM, es el más ampliamente referenciado por prensa; en los medios de comunicación catalogada como una de las peores sequías en la historia de Colombia. Lo anterior es comprensible dada la gran magnitud espacio temporal que muestran los resultados, los cuales al hacer un análisis integrado

permiten dar una visión más completa de aquellos lugares donde el impacto según nuestros datos pudo ser más fuerte; así mismo nos da una mejor aproximación de la cobertura temporal que tuvo este evento.

El evento mostrado en la figura 11 es un claro ejemplo de un evento intenso de sequía; sin embargo no tan extremo como los anteriores, dado que la afectación en caudales no fue tan marcada como en otros de los fenómenos detectados. Esta figura, al igual que las anteriores, contribuye en la validación de la hipótesis sobre la mejora que existe en la detección de eventos de sequía

Figura 10. Mapas Persistencia Meses, Evento extremo detectado, Meta(Dic2013-Oct2016) . Fuente: Propia.

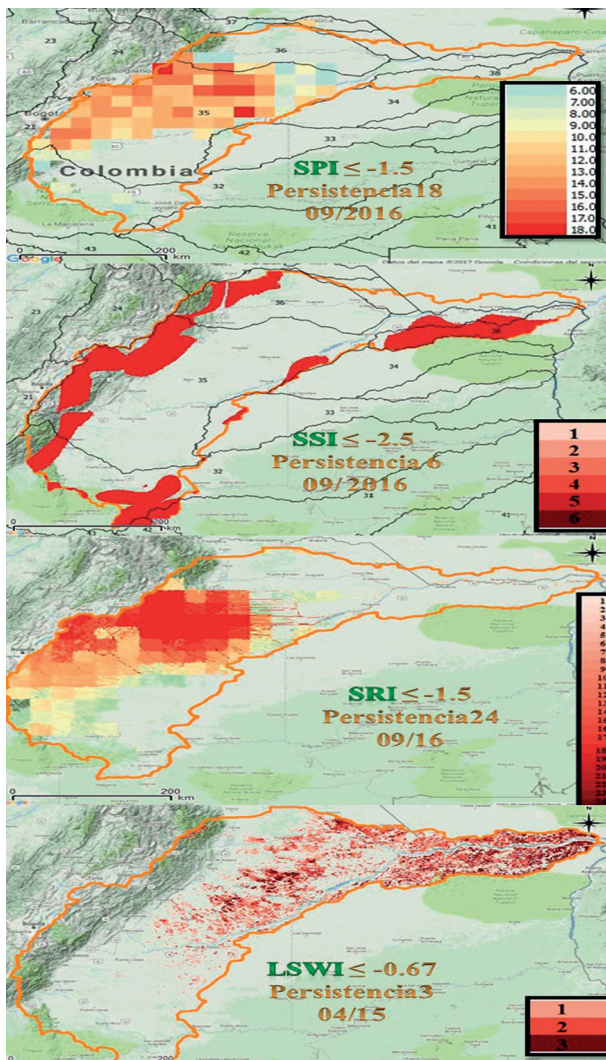


Figura 11. Mapas Persistencia, Evento intenso, (Jul2009-Dic2010). Fuente: Propia.

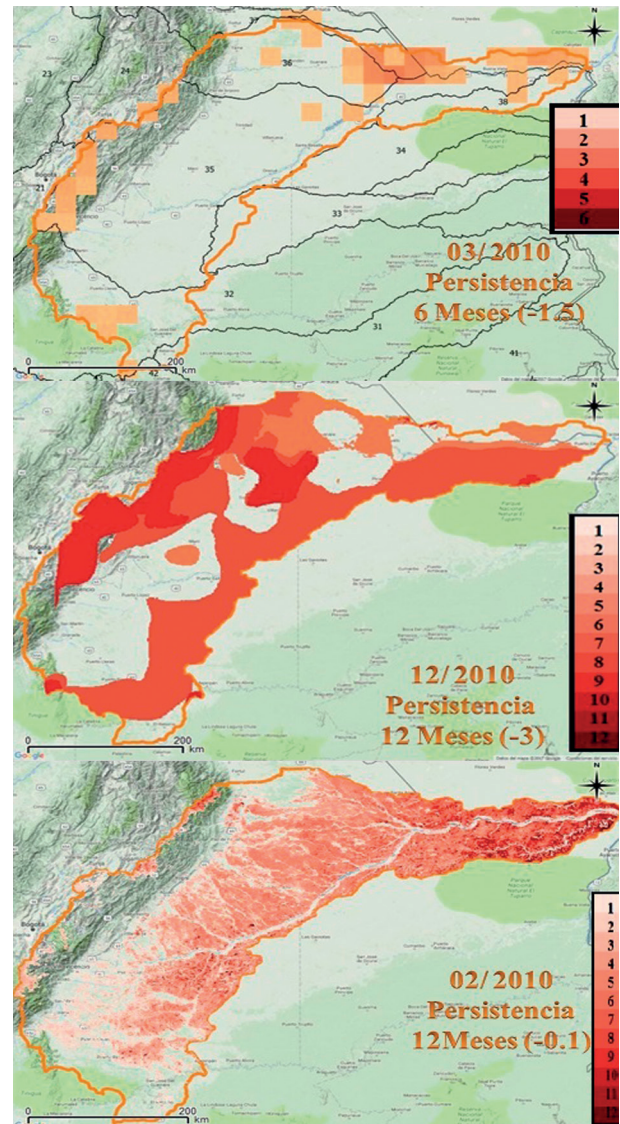
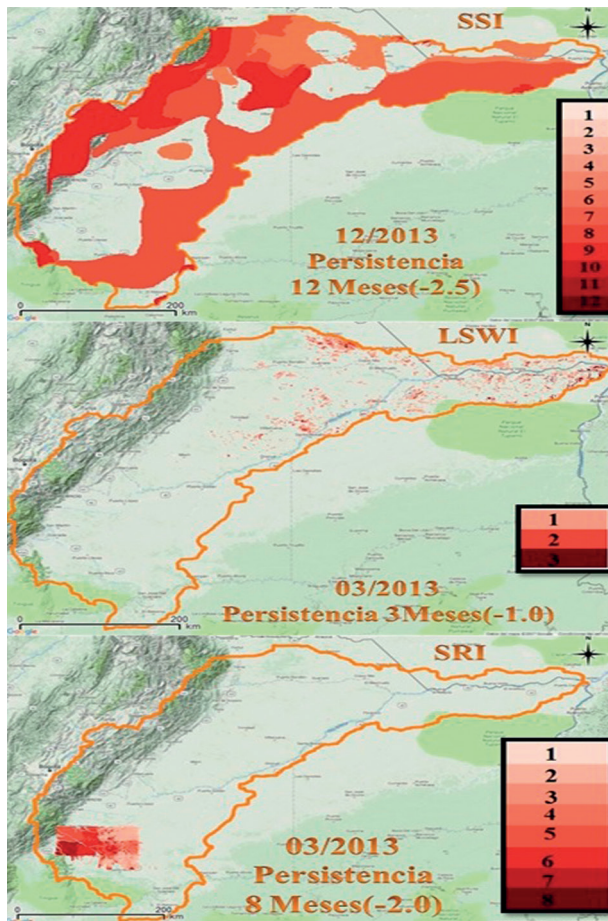


Figure 12. Mapas Persistencia, Evento intenso, (Jul2012-Dic2013). Fuente: Propia.



mediante el uso integrado de múltiples índices. La figura 12 representa un evento que fue captado por todos los índices salvo por el SPI, tampoco fue registrado en el documento presentado por el IDEAM, donde sus estimaciones se basaron en el SPI; como se aprecia en la figura los índices si bien muestran ciertas coincidencias cada uno aporta un zona adicional a los otros dos. Lo anterior brinda un argumento adicional que permite validar la hipótesis y supone automáticamente una variación positiva al mejorar el nivel de detección entre el método integrado y la habilidad individual del SPI por ejemplo, ya que los 3 índices detectaron este evento independiente a las zonas comunes que tuvieron y el SPI, el más utilizado no logró captarlo, ni con nuestros datos ni con los del IDEAM según refleja el ENA 14, se puede decir que fue un evento real ya que se puede relacionar y validar con una noticia que fue publicada el 25 de Agosto de 2012 por el diario Colombiano el Espectador en su edición digital.

Todo el conjunto de elementos presentados permiten afirmar que con los datos utilizados en esta investigación, en la cuenca del Río Meta, mediante el uso de la metodología integrada la habilidad en la detección de sequías, se ve mejorada de manera positiva en la detección temporal y espacial del evento, con respecto a la habilidad individual de los índices que se enfocaron en aquellos eventos intensos y persistentes. Dado la complejidad que representa el estudio de un fenómeno como la sequía, el postulado de este estudio fue que no es suficiente una única variable como criterio único en la detección del fenómeno, resaltando que el punto de comparación fue el índice SPI el cual se basa en la precipitación. Es así como la hipótesis supone una mayor habilidad en la detección al incorporar variables como la hidrológica, humedad del suelo y la respuesta de la vegetación ante la disponibilidad de agua; esta metodología continua incluyendo la precipitación, la cual según coinciden la mayoría de expertos es la variable más importante; sin embargo no es la única que interactúa en el ciclo hidrológico y en algunos lugares con una alta capacidad de retención y almacenamiento hidráulico, una deficiencia de precipitación puede que no represente una sequía significativa como puede reportarse inicialmente al utilizar únicamente el SPI, esto dado que por ejemplo puede que los niveles de caudales no se hayan visto afectados significativamente o gracias a la cantidad de agua almacenada en el suelo los cultivos no sufrieron mayor impacto. Incluir variables como la humedad del suelo con un índice como el SSI capaz de detectar la cantidad de humedad del suelo por debajo de lo normal supone una visión más completa del fenómeno, así como el SRI el cual tiene la habilidad de mostrar hasta qué punto se vieron más afectados los caudales o los reservorios que reflejaron mayor disminución en su volumen. La detección de forma individual, permitió observar que cada índice detecta un elemento que no es reflejado por los otros índices; es así como si bien los 4 índices coincidieron en detectar los eventos más extremos, Casanare 2003 y Meta 2015; algo muy valioso que se encontró es que de forma combinada cada uno aportó un elemento diferente en la identificación del evento permitiendo tener una visión más completa del fenómeno, como por ejemplo hasta que punto los caudales sufrieron más y que partes sobre el territorio la disponibilidad de agua en el suelo se vió más afectada.

En elemento interesante que se identificó fue la alta correspondencia que presentó en la temporalidad de los

eventos detectados entre el LSWI y los registrados por el IDEAM, esto se podría asociar a la escala de acumulación i utilizada, donde el IDEAM principalmente utiliza 3 meses y el LSWI utilizó 1 mes; valores que se descartaron en los demás índices dado el ruido que presentan y los elementos sugeridos distintos estudios consultados. Elementos como el SSI en comparación con el SPI lograron mostrar una extensión mucho mayor en la zona afectada por los eventos particulares de sequía, esto logro incluir zonas que no habían sido captadas por nuestro SPI; sin embargo habían sido registradas por alguna de nuestras fuentes de validación. No obstante un elemento que dificulto la comparación y validación de datos, fue la presentación de la información, en nuestro caso los registros de eventos presentados por el IDEAM en el ENA14. Estos registros eran presentados de una forma demasiado ambigua, pues si bien trabajaron con una escala de acumulación i meses SPI variable (1,3,6,12) en algunos registros su detección se limitaba a mencionar Meta o Cravo Norte; dificultando la validación ya que si bien se contaban con registros en la zona hidrográfica nuestros resultados para el SPI, SSI, SRI y LSWI mostraban que la intensidad se concentraba más en unas zonas que en otras sobre esa área, por lo cual la ambigüedad de los reportes dificultó la validación. Por ejemplo, el nombre Cravo Norte se asocia a un río y también a un municipio; y si bien mencionaban un río, no especificaban sobre que sección del mismo y se encontró que su afectación asociada al evento no era extremo para la totalidad del cauce. En el caso de los ríos un elemento extremadamente valioso fue el aportado por el SRI, elemento con el que no cuentan el SPI, SSI ni LSWI utilizados de forma individual. SRI permite identificar hasta qué punto sobre el afluente se dio el mayor impacto, lo que representa un excelente complemento a nuestra metodología integrada ya que puede ser de gran beneficio para comunidades ubicadas en la rivera del río, como se encuentra de forma constante en la zona rural de esta zona de estudio, donde según cita (CORMACARENA, 2011) el sector piscícola produce más de 42.500 toneladas al año, representando un rubro importante en la región.

El análisis integrado logró mostrar que los índices se complementan entre sí, logrando aprobar la hipótesis. Lo anterior justificado en que si bien coincidían en la detección de los eventos, la metodología integrada mostró una mayor habilidad en la detección de los mismos, ya que la

sensibilidad que poseen es diferente, al utilizar menores persistencias e intensidades la cantidad de eventos comunes entre los diferentes índices tiende a disminuir, por lo cual esta metodología puede reducir la limitante asociada a la sensibilidad particular de cada índice. Al comparar la detección temporal como se aprecia en la tabla 5 ninguno de los índices mostró ser capaz de detectar la totalidad del periodo para todos los eventos, salvo el SRI que para el evento 2012-2013 mostró una detección completa, sin embargo para otros eventos no tuvo la suficiente sensibilidad para detectarlos. Otro elemento que muestra una variación alta en la detección mediante la metodología integrada en comparación con la detección individual del SPI, corresponde a la espacialidad de las zonas críticas, la cual es evidentemente superada al incluir las variables ecohidrológicas; Incluso en el evento (2012-2013) el SPI no logró detectar el evento, el cual fue detectado por los demás índices; al revisar los registros IDEAM se identifico que tampoco fue detectado por ellos, lo cual permite suponer una limitante en el índice que fue suplida mediante la integración de los demás índices. Un elemento de interés fue la similitud de las detecciones entre el SSI y el LSWI, que si bien el SSI aporta la región general que se vió más afectada y el LSWI permite enfocarse en lugares más específicos, la coincidencia en los patrones se puede relacionar a la conexión que existe entre la cantidad de agua disponible en el suelo y la salud de la planta, la cual absorbe el líquido en la gran mayoría de los casos mediante sus raíces. Según el análisis mencionado anteriormente y ya que al utilizar múltiples índices se lograron detectar la totalidad de eventos registrados por prensa e IDEAM que se utilizaron como referencia de comparación. Es posible afirmar que el uso de estos índices eco-hidrológicos obtenidos con datos satelitales presentan gran habilidad de sequía y este elemento se hace aún más valioso cuando tomamos en cuenta elementos como la detección parcial y temporal que se ve reducida al utilizar un solo índice; también que dada la cobertura espacial que presenta la red de monitoreo en tierra, es posible encontrar limitaciones de información en algunos puntos lo cual dificulta una detección detallada sobre la zona; sin embargo este estudio muestra una alta utilidad y habilidad del uso integrado de indicadores basados en teledetección lo cual supone un excelente complemento en zonas con grandes vacíos de información.

Conclusiones

El presente documento, tuvo por objetivo general evaluar la utilidad del uso de múltiples índices de sequía basados en información eco-hidrológica obtenida con satélites; para ello se basó en una serie de objetivos progresivos para alcanzar esta meta. En este proceso se logró trabajar con una zona de estudio en Colombia con existencia de registros de sequía que permitió la validación de la metodología propuesta; adicionalmente esta zona, Cuenca del Río Meta, es una zona con diversidad cultural, un importante interés económico y natural. Elementos como su ubicación en una zona con relieve principalmente homogéneo, una evidente disminución en la cobertura de estaciones hidrometeorológicas permiten concluir que una metodología como la aquí presentada puede ser de gran aporte en esta región.

La evaluación del sesgo, determinó que las estimaciones de precipitación 3B42-V7 obtenidas con el algoritmo TMPA de la misión TRMM, tienen el mejor desempeño en el borde oriental de la Cuenca sobre el cauce principal del Río Meta donde las estimaciones presentan una relación de linealidad alta con las observaciones y presenta en promedio valores de sesgo del 10% señal de ligeras sobreestimaciones. Adicionalmente se corrobora un elemento presente en la gran mayoría de estudios sobre monitoreo remoto, la complejidad del terreno representa un impacto en el desempeño del producto satelital, en nuestro caso se encontró que esto es realmente severo en el área del pie de monte. Los caudales medios evaluados en este estudio, pese a la sobre estimación generada en parte a un error asociado a los datos geoespaciales, mostraron un desempeño mejor de lo esperado por lo cual estimaciones satelitales como TRMM en esta zona en conjunto con software como EF5, pueden brindar un elemento valioso al fortalecimiento de una red de monitoreo y sus simulaciones representan de forma muy apropiada el comportamiento de caudales sobre la cuenca; también se logra coincidir con lo indicado por (DINKU, RUIZ, STEPHEN J, & CECCATO, 2010) sobre el excelente desempeño de la precipitación TRMM en esta parte del territorio colombiano.

La búsqueda de eventos SPI bajo acumulaciones i de 12 meses bajo condiciones extremas de persistencia e intensidad tiene una excelente habilidad de detección

en nuestro estudio, logrando identificar los eventos más importantes en la zona de estudio durante el periodo de tiempo trabajado (1999-2016), permitiendo tener un enfoque en aquellos eventos más extremos. Adicionalmente el elemento gráfico de la persistencia en meses de la condición extremadamente seca es un elemento que en este estudio mostró gran valor ya que permite priorizar e identificar de forma rápida las zonas más afectadas tras un evento de sequía.

Establecer una línea base como lo fueron los lineamientos propuestos en el SPI; fue de gran aporte ya que brindó una guía importante para la detección mediante los demás índices, los cuales en su mayoría lograron detectar los principales eventos mediante estas condiciones iniciales y aquellos que no lo lograron mediante ligeros ajustes a los criterios siguiendo los mismos principios propuestos en la línea base. Por lo anterior es posible afirmar que se cumplió con el objetivo de construir la línea base de la detección de sequías con el índice SPI, en este estudio basado en estimaciones de lluvia satelital TRMM.

El uso combinado de múltiples índices de sequía basados en información eco-hidrológica obtenida con satélites, demuestra una mejora en la detección de sequía lograda con un solo índice; debido a que muestra una variación en la cobertura temporal y espacial del evento logrando una mejora en la detección. Adicionalmente su habilidad es mayor dado que, si bien cada índice se asocia a una variable hidrológica, el uso combinado permite suplir limitantes particulares de cada índice logrando detectar un número de eventos más completo. Por otra parte la confirmación de los eventos detectados con la información de registros demuestra la habilidad que tienen este tipo de metodologías basadas en teledetección, las cuales pueden ser de gran aporte en zonas como la de este estudio que busquen fortalecer su red de información. Soportado en lo mencionado anteriormente y a lo largo del documento, es posible aprobar la hipótesis que indica *si se usan múltiples índices de sequía, se puede mejorar la detección de sequía lograda con un solo índice de sequía*; también es posible afirmar que se cumplió con el objetivo de establecer la variación en la habilidad de detección que se puede alcanzar con el uso combinado del SPI, SSI, SRI y LSWI y el objetivo general de evaluar la utilidad del uso de múltiples índices de sequía basados en información eco-hidrológica obtenida con satélites.

Herramientas como EF5 para desarrollar simulaciones y estimaciones satelitales son elementos que a pesar de mostrar algún grado de error, brindan datos que muestran comportamientos bastante cercanos a la realidad; por lo cual es importante siempre contar con un elemento de referencia que nos permita analizar el porqué de las variaciones, para así buscar ajustarlo a la estimación o interpretación de los datos. De esta forma las series de datos provistas de este tipo de fuentes pueden llegar a cumplir con su objetivo de complementar nuestra información o facilitárnosla para aquellos puntos o lugares donde es difícil acceder a la misma; herramientas que muchas veces ofrecidas de forma gratuita constituyen una valiosa solución ante limitantes, carencia o duda producto de otras fuentes de información.

Bibliografía

- [1] Centro de Estudios y Prevención de Desastres (PREDES). (2008). *Metodología para el análisis de vulnerabilidad y riesgo ante inundaciones y sismos, de las edificaciones en centros urbanos*. Perú.
- [2] AghaKouchak, A. (2014). A baseline probabilistic drought forecasting framework using standardized soil moisture index: application to the 2012 United States drought. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 2485–2492, 2014.
- [3] AghaKouchak, A. (2014). A baseline probabilistic drought forecasting framework using standardized soil moisture index: application to the 2012 United States drought. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, .
- [4] Alarcón, G. (2015, 12 2). MinHacienda anunció entrega de 500 mil bultos de fertilizante para caficultores afectados por sequía. Radio Santa Fé .
- [5] Andres felipe hurtado montoya, i. (2009, 12). *Estimación de los campos mensuales históricos de precipitación en el territorio colombiano*.
- [6] Bajgain, R., Xiao, X., Wagle, P., Basara, J., & Zhou, Y. (2015). Sensitivity Analysis of Vegetation indices to drought over two tallgrass prairie. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.
- [7] Bedient, P. B., Huber, W. C., & Vieux, B. E. (2012). *Hydrology and Floodplain Analysis* (5th Edition ed.). PEARSON.
- [8] Carvajal-Chitty, H. I. (1993). Some notes about the Intermediate Disturbance Hypothesis and its effects on the phytoplankton of the middle Orinoco river . *Hydrobiologia* 249, 117-124.
- [9] Comisión Nacional del Agua. (2005, Junio). *Percepción Remota “Fundamentos de Teledetección Espacial”*. México.
- [10] CORMACARENA. (2011). *Plan de Acción 2012 - 2015 (Documento Preliminar)*.
- [11] Corporación Autónoma Regional de la Orinoquia CORPORINOQUIA. (05/2007). *Plan de Acción Trienal 2007 – 2009*. Yopal.
- [12] Desprez-Loustao, M.-L., b, B. M., Nageleisen, L.-M., Piou, D., & Vannini, A. (2006). Interactive effects of drought and pathogens in forest trees. *INRA, EDP Sciences* (DOI: 10.1051/forest:2006040), 597-612.
- [13] DINKU, T., RUIZ, F., CONNOR, S. J., & CECCATO, P. (2010). Validation and Intercomparison of Satellite Rainfall Estimates over Colombia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*.
- [14] DINKU, T., RUIZ, F., STEPHEN J, C., & CECCATO, P. (2010). Validation and Intercomparison of Satellite Rainfall Estimates over Colombia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*.
- [15] El Tiempo. (2016, 02 01). ¿Por qué este es el enero más caluroso en cinco años? *El Tiempo*.
- [16] FAO. (2011). Drought related food insecurity. *Emergency Ministerial- Level Meeting*. Rome.
- [17] Gonzalez, J. P., & Jurado, M. C. (2014). Evaluación de la Utilidad de estimaciones satelitales de precipitación para la modelación de inundaciones en sistemas de alerta temprana de cuencas de relieve complejo. Bogotá.
- [18] H.Swain, P., & M.Davis, S. (1978). *Remote Sensing The Quantitative Approach*. West Lafayette, Ind., U.S.A.: McGraw-Hill, Inc.
- [19] HAO, Z., & AGHAKOUCHAK, A. (2014). A Nonparametric Multivariate Multi-Index Drought Monitoring Framework. *American Meteorological Society* (DOI: 10.1175/JHM-D-12-0160.1).

- [20] Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N., & Widhalm, M. (2011). The Lincoln Declaration on Drought Indices: Universal Meteorological Drought Index Recommended. *A Merican Meteorological Society*.
- [21] Hong, Y., & Gourley, J. (2015). *Radar Hydrology, principles, models and applications*.
- [22] Hong, Y., Li, L., Wang, J., Adler, R. F., Policelli, F. S., Habib, S., et al. (2009). Evaluation of the real-time TRMM-based multi-satellite precipitation analysis for an operational flood prediction system in Nzoia Basin, Lake Victoria, Africa. *Nat Hazards* (DOI 10.1007/s11069-008-9324-5), 50:109–123.
- [23] HyDROS; NASA, The University of Oklahoma. (2014). EF5 Overview. E.E.U.U.A.
- [24] IDEAM. (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá, D. C.
- [25] IDEAM. (2006). *IDEAM–METEO/004-2006 nota técnica del IDEAM*. Técnico.
- [26] IDEAM. (S.D.). *La sequía en Colombia*.
- [27] IDEAM. (2007). *Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia*. Bogotá,D.C.: José Edgar Montealegre Bocanegra Actividades desarrolladas en el marco del contrato de prestación de servicios No IDEAM 063-2007 .
- [28] Kumar, M. N., Murthyb, C., Saib, M. S., & Royb, P. (2010). On the use of Standardized Precipitation Index (SPI) for drought intensity assessment. *National Remote Sensing Centre, Hyderabad 500 625, India*.
- [29] León, G. S. (2005). The Orinoco River basin: hydrographic view and its hydrological balance. *Revista Geográfica Venezolana* , 46(1), 75-108.
- [30] Liu, L., Hong, Y., Bednarczyk, C. N., Yong, B., Shafer, M. A., Riley, R., et al. (2012). Hydro-Climatological Drought Analyses and Projections Using Meteorological and Hydrological Drought Indices: A Case Study in Blue River Basin, Oklahoma. *Water Resour Manage* , 26, 2761-2779.
- [31] Liu, L., Hong, Y., Bednarczyk, C. N., Yong, B., Shafer, M. A., Riley, R., et al. (2012). Hydro-Climatological Drought Analyses and Projections Using Meteorological and Hydrological Drought Indices: A Case Study in Blue River Basin, Oklahoma. *Water Resour Manage* (2012) 26:2761–2779 (DOI 10.1007/s11269-012-0044-y).
- [32] Liu, Liliang, R., Yang, H., Ye, Z., Xiaoli, Y., Fei, Y., et al. (2016). *Sensitivity analysis of standardization procedures in drought indices to varied input data selections* (538), 817-830.
- [33] Liu, Y., Ren, L., Hong, Y., Zhu, Y., Yang, X., Yuan, F., et al. (2016). *Journal of Hydrology*, 817-830.
- [34] Liu, Yi; Ren, Liliang; Hong, Yang; Zhu, Ye; Yang, Xiaoli; Yuan, Fei; ShanhumJiang. (2016). Sensitivity analysis of standardization procedures in drought indices to varied input data selections. *Journal of Hydrology*.
- [35] Llano 7 días. (2014, Marzo 19). Fuerte sequía afecta animales de Casanare. *El Tiempo*.
- [36] Luna, D. C. (2016). The Meta River and Projects for the Integration of the Colombian Eastern Plains, from Colonial Times to the 21st Century. *Anuario de Historia Regional y de las Fronteras* , 21 (2).
- [37] McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eighth Conference on Applied Climatology, Am. Meteorol. Soc. Anaheim, CA, U.S.A.*
- [38] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; IDEAM. (Noviembre 2012). *Propuesta para la gestión integral ambiental del recurso suelo (GIARS)*. Convenio Interadministrativo de Asociación entre El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (No. 160/2011) y El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (No.015 A/2011), Bogotá D.C.
- [39] National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2015). *Re-entry and Risk Assessment for the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)*.
- [40] National Drought Mitigation Center. (2016). *National Drought Mitigation Center*. Retrieved from

- <http://drought.unl.edu/DroughtBasics/Whatis-Drought.aspx>
- [41] National Institute of Standards and Technology (NIST). (S.D.). *Engineering Statistics Handbook*. (U. D. commerce, Producer) Retrieved from Measures of Skewness and Kurtosis: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda35b.htm>
- [42] Organización de Las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación - FAO. (2010). *Gestión del riesgo de sequía y otros eventos climáticos extremos en Chile*. Chile.
- [43] UC Davis Center for Watershed Sciences; ERA Economics; UC Agricultural Issues Center. (2015). *Economic Analysis of the 2015 Drought For California Agriculture*.
- [44] University of Oklahoma. All Rights Reserved. (2016). EF5.
- [45] Vanegas, Diana Ximena. (2011). Detecting Grassland Vegetation Drought in Oklahoma Using MODIS Imagery and Oklahoma Mesonet Data.
- [46] Vanegas, Diana Ximena. (2011). Detecting Grassland Vegetation Drought in Oklahoma Using MODIS Imagery and Oklahoma Mesonet Data.
- [47] Vergara, H., Hong, Y., Gourley, J. J., Emmanouil N. Anagnostou, V. M., & Kirstetter, P.-E. (2013). Effects of Resolution of Satellite-based Rainfall Estimates on Hydrologic Modeling Skill at Different Scales. *Journal of Hydrometeorology*.
- [48] Xiao, X., Boles, S., Liu, J., Zhuang, D., & Liu, M. (2002). Characterization of forest types in Northeastern China, using multi-temporal SPOT-4 VEGETATION sensor data. *Remote Sensing of Environment*, 335-348.

Los Autores



Jorge Andrés Celis Rodríguez

En 2012 inicia sus estudios como Ingeniero Ambiental en la Universidad El Bosque y participa en diferentes proyectos enfocados en el mejoramiento de la calidad de vida de las personas y el desarrollo sostenible. El más destacado de estos, es su proyecto sobre teledetección de sequías, el cual inicia como proyecto de grado en el 2015 y concluye a mediados de 2017. El desarrollo de este proyecto le permitió especializarse en temas como la modelación hidrológica y adentrarse en otros como el monitoreo satelital en la Universidad de Oklahoma; lo cual además de permitirle trabajar e interactuar de primera mano con expertos de talla global en el tema, le permitió obtener tan excelentes resultados que se espera se puedan seguir trabajando para en un futuro cercano, ser partícipe de ese grupo de personas que buscando mejorar la calidad de vida de las personas, en especial de los Colombianos, pretende ofrecer una herramienta abierta a las personas para la predicción de sequías.



Diana Ximena Vanegas Beltrán

Ingeniera Ambiental, Universidad El Bosque (2006), Magister en Geoinformática, Universidad de Oklahoma, USA (2011). Experiencia laboral como Ingeniera Ambiental de una Alcaldía Local en Bogotá D.C. (2006-2008); asistente profesional de investigación “Earth Observation and Modeling Facility” (<http://eomf.ou.edu/>), Universidad de Oklahoma (2009-2012) y docente virtual del programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad del Bosque (2012-actual).



Humberto José Vergara Arrieta

Humberto J. Vergara received his B.Sc. degree in Environmental Engineering from El Bosque University, Colombia, and his M.Sc. and PhD degrees in Water Resources Engineering from the University of Oklahoma, Norman, OK, USA. He is currently a Post-Doctoral Research Associate at the Cooperative Institute for Mesoscale Meteorological Studies (CIMMS) of the University of Oklahoma and an Instructor at El Bosque University. His primary field of study is hydrological modeling for flood forecasting using observations from remote sensing platforms. He focuses on model development, probabilistic forecasting and data assimilation.