

Análisis de sensibilidad de cobertura espacial y resolución temporal de datos de precipitación en la modelación de inundaciones en cundinamarca, Colombia

Sensitivity analysis of spatial coverage and temporal resolution of precipitation data in flood modeling in cundinamarca, colombia.

Bryan David Niño Colmenares, Sofía Paz Vileikis, Humberto José Vergara Arrieta

Resumen

Este artículo presenta la caracterización del impacto en la modelación de inundaciones generado por la cobertura espacial y frecuencia de muestreo de precipitación, en contraste con la distribución de la red pluviométrica de estaciones de Cundinamarca. En general, las redes pluviométricas se caracterizan por tener vacíos en la medición de la precipitación, tanto a nivel espacial como temporal; por lo tanto, se quiso determinar el impacto que estos vacíos ocasionan en la simulación de inundaciones. Para esto se ejecutaron dos fases de investigación: la primera consistió en la identificación de los eventos de inundación entre los años 2014 y 2018 y la segunda en determinar el impacto de la cobertura espacial y temporal de las estimaciones de precipitación en la simulación de inundaciones, junto con los factores espaciales y temporales que influyen dicho impacto. De esta manera, el principal resultado fue que, al utilizar estimaciones de precipitación a una menor frecuencia de medición temporal y una menor cobertura espacial de medición, las simulaciones de caudales de eventos de inundaciones tienden a exhibir mayores errores. La magnitud de estos errores puede verse influenciada por factores espaciales como el área de drenaje, forma del área de drenaje, pendiente media del cauce y la precipitación climatológica de la zona.

Palabras clave: Modelamiento, Producto satelital de precipitación, inundaciones, red de estaciones pluviométricas, EF5, OSE's.

Abstract

This article presents the characterization of the impact on flood modeling generated by the spatial coverage and frequency of precipitation sampling, in contrast with the distribution of the pluviometric network of stations in Cundinamarca. In general, the pluviometric networks are characterized by having gaps in the measurement of precipitation, both spatially and temporally; therefore, we wanted to determine the impact that these gaps cause in the flood simulation. For this, two research phases were executed: the first consisted of identifying flood events between the years 2014 and 2018 and the second to determine the impact of the spatial and temporal coverage of precipitation estimates in flood simulation, along with the spatial and temporal factors that influence such impact. Thus, the main result was that, by using precipitation estimates at lower temporal measurement frequency and lower spatial measurement coverage, flood event flow simulations tend to exhibit larger errors. The magnitude of these errors may be influenced by spatial factors such as drainage area, drainage area shape, mean channel slope, and climatological precipitation in the area.

Key words: Modeling, Satellite precipitation product, floods, rainfall station network, EF5, OSE's.

Recibido / Received: 25 de Abril de 2019 Aprobado / Approved: 28 de Mayo de 2019

Tipo de artículo / Type of paper: Investigación científica y tecnológica

Afiliación Institucional de los autores / Institutional Affiliation of authors: University of Oklahoma

Autor para comunicaciones / Author communications: bnino@unbosque.edu.co, humber@ou.edu

Los autores declaran que no tienen conflicto de interés.

Introducción

La ocurrencia de eventos de inundación ocasiona grandes afectaciones. A nivel rural, afecta principalmente procesos productivos agropecuarios, y en el urbano, por la creciente concentración desordenada de población en las ciudades, ha provocado que sistemas de drenaje de aguas lluvias colapsen fácilmente (Quispe y Rojas, 2015). Lo anterior pone en riesgo el bienestar social que puede ir desde pérdidas económicas hasta de vidas humanas (Gómez, Muñoz, y Soto, 2018). Frente a esto, una alternativa directa es la realización de estudios sobre los mecanismos de medición de lluvia para la prevención o mitigación de los impactos ocasionados por las inundaciones los cuales permitan generar aportes a la gestión del riesgo (González y Jurado, 2014).

Hoy en día, el uso de productos obtenidos por satélites artificiales constituye uno de los principales insumos en la medición de la lluvia, ya que ofrecen una alta frecuencia de muestreo y de registro de datos en la mayor parte del territorio (Tian & Peters, 2010). Sin embargo, estos se encuentran sujetos a errores relacionados a características espacio-temporales de la precipitación en la zona, como por ejemplo la estacionalidad (húmeda o seca), la variabilidad impuesta por la orografía y la estructura de la precipitación (Sun et al., 2018). No obstante, los productos de satélites resultan útiles en lugares donde sistemas tradicionales de medición pluviométrica son escasos, como en países en vía de desarrollo donde la distribución de las estaciones tiende a ser dispersa y desigual (International Research Institute for Climate and Society [IRI], 2015), lo que limita la capacidad para estimar la distribución espacio-temporal de la precipitación. Lo anterior, y sumado a que poseen una frecuencia de medición mucho menor a la satelital, dificulta el uso de redes pluviométricas en el pronóstico de inundaciones a gran escala a pesar de que son instrumentos

de medición directa con niveles de exactitud superior (Ureña, Vallejos, Saavedra y Escalera, 2018).

Asimismo, la variabilidad espacial de la lluvia es otro aspecto relevante ya que tiende a aumentar en pequeñas escalas en regiones con características geográficas y climatológicas muy complejas (IRI, 2015). Estas, al sumarse con las bajas frecuencias de muestreo pueden ocasionar la omisión de intervalos cortos ($<1h$) de alta intensidad de precipitación, afectando la detección y pronóstico de amenazas hidro-meteorológicas como las inundaciones repentinas o avenidas torrenciales.

Frente a este panorama, el presente estudio planteó como hipótesis de investigación que los vacíos de información en las estimaciones de precipitación de redes pluviométricas tienen un impacto en la simulación de eventos de inundación que depende de las condiciones espaciales y temporales bajo las cuales se desarrolle dicho fenómeno, es así como se buscó dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación: ¿cuál es el impacto en la modelación de inundaciones de la cobertura espacial y frecuencia de muestreo de la precipitación en el departamento de Cundinamarca – Colombia?

Zona de estudio

El departamento de Cundinamarca se encuentra ubicado en el centro del país en la región Andina sobre la cordillera oriental. Según estadísticas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el departamento tiene una extensión de 22.779,21 km² (Gobernación de Cundinamarca, 2014). Se caracteriza por tener alturas desde los 300 m s.n.m. hasta más de 4000 m s.n.m. y pendientes que oscilan desde 5% hasta más de 70%, donde la mayor parte del territorio está entre pendientes de 20% y 60% (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2006). De acuerdo con el IGAC, Cundinamarca se encuentra dentro de los 24 departamentos del territorio nacional con suelos inundables en algunas de sus regiones (IGAC, 2016).

y así determinar un umbral de inundación. Con base en este estudio, se hizo un análisis de frecuencia el cual usualmente utiliza varias clases de distribuciones de probabilidad que requieren diferentes parámetros estadísticos de ajuste. En este caso la combinación adecuada que se escogió, fue la distribución de Log Pearson tipo 3 mediante el método de los momentos (Ecuación 1), que generalmente es recomendada para la descripción de inundaciones por el Comité Asesor Interagencial de los Estados Unidos sobre Datos del Agua (IACWD por sus siglas en inglés) (Bedient, Huber & Vieux, 2013).

Ecuación 1. Distribución Gamma de tres parámetros.

$$Q_T = Q + K(C_s, T) * S_Q$$

Dónde: Q_T es el caudal a un tiempo de retorno T , Q el caudal medio, K el factor de frecuencia, C_s el coeficiente de asimetría, T el periodo de retorno y S_Q la desviación estándar (Bedient et al., 2013).

En este sentido, los datos requeridos por la distribución se obtuvieron por medio de una simulación usando como insumo de precipitación el producto satelital 3B42RT de la Misión de Medición de Lluvias Tropicales (Tropical Rainfall Measuring Mission [TRMM], 2011) y se tuvo como resultado 18 rásters de máximos caudales anuales desde 2001 hasta 2018. Con estos, se calcularon en cada píxel los momentos de la distribución (Q , C_s y S_Q) y luego se obtuvieron los factores de frecuencia K para periodos de retorno (T) de 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años, usando la tabla de frecuencia de factores K para distribuciones Gamma y Log Pearson tipo 3, la cual se encuentra en función de C_s y T (Bedient, Huber, & Vieux, 2013, p. 195). De esta manera, aplicando la Ecuación 1 en el área estudio, se obtuvieron ocho rásters de caudales correspondientes a cada uno de los periodos de retorno, de los cuales, de acuerdo a lo discutido por Reed et al. (2007), se utilizó el ráster de periodo de retorno de 2 años para definir el umbral indicativo de ocurrencia de inundación, (los otros 7 rásters de caudal junto con este de 2 años se usaron nuevamente más adelante).

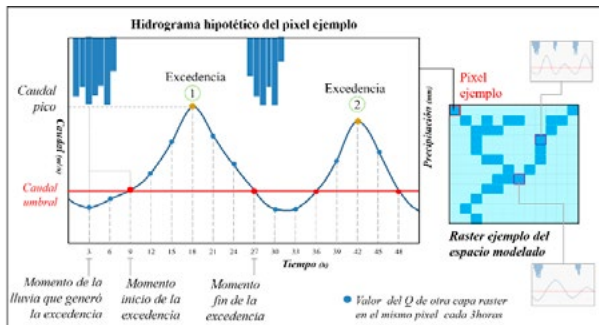
Una vez obtenido el ráster que se consideraría como umbral, se procedió a continuar con la segunda etapa y obtener los intervalos de tiempo donde el caudal de cada píxel del dominio excedía su caudal umbral (a lo largo del documento estos intervalos serán nombrados como excedencias) para esto, durante el periodo estudio (2014 – 2018), se hizo otra simulación usando el producto satelital 3B42RT, donde se obtuvieron rásters de caudal cada 3 horas (frecuencia de medición del producto). Luego, a partir de códigos computacionales, se identificaron los pixeles que tuvieron excedencias y se registraron los siguientes datos: las coordenadas; el inicio y fin de las excedencias; una fecha representativa de la tormenta causante de las excedencias, la cual se estimó basándose tanto en una aproximación del tiempo de concentración de cada drenaje como también en los factores geomorfológicos de la zona; y por último, al caudal pico de cada una de las excedencias se le calculó su periodo de retorno basándose en la metodología presentada por Jurado y Gonzales (2014) y Tavera (2018) donde, usando los ocho rásters de caudal obtenidos anteriormente con la Ecuación 1, se construyó un modelo de regresión lineal-logarítmica en cada píxel (Ecuación 2).

Ecuación 2. Modelo de regresión lineal en escala logarítmica.

$$\log_{10}(T) = b + m(\log_{10} Q)$$

Teniendo en cuenta lo anterior, a continuación se muestra un ejemplo hipotético e ilustrativo de las excedencias que se generaron en cada píxel del dominio (Figura 2). En este caso, se puede evidenciar el hidrograma formado por los caudales que obtuvo cada 3 horas el píxel ejemplo, como también su caudal umbral de inundación (línea roja), los momentos en que fue superado (excedencias) y los caudales pico causados por tormentas de lluvia. Este comportamiento se obtuvo durante los cinco años (2014-2018) en cada píxel del área estudio, pero cada uno de ellos con diferentes valores. De esta manera se obtuvo como resultado una tabla de todas las excedencias con sus datos correspondientes (mencionados anteriormente) y a partir de esta, se realizó un mapa de calor en QGIS para evidenciar cualitativamente la densidad y distribución de las mismas.

Figura 2. Ejemplo de la identificación de excedencias del caudal umbral de 2 años de periodo de retorno en cada píxel.



Fuente: Elaboración propia.

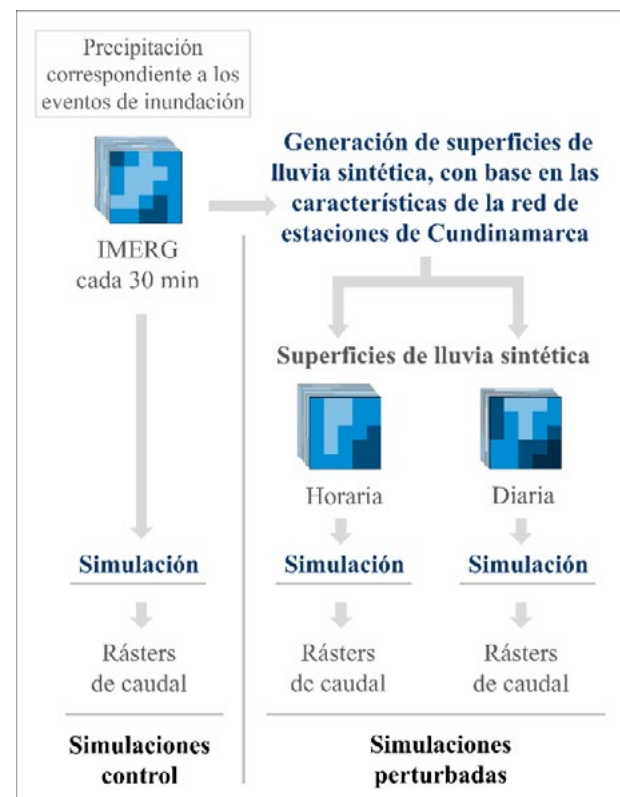
Por último, en la tercera etapa, los eventos fueron identificados de forma conjunta teniendo en cuenta la tabla de datos de las excedencias. Así, mediante un algoritmo computacional, se tomaron los momentos de las tormentas causantes de las excedencias y se agruparon las que sucedieron en días consecutivos (mayores a un día ya se consideraban un evento diferente); de esta forma, cada evento estuvo conformado por múltiples píxeles en múltiples intervalos de tiempo. Finalmente, con base en esta información, para cada evento se calculó la duración, máximo periodo de retorno con la Ecuación 2 y el área aproximada. Con estos datos se hicieron diferentes gráficas para evidenciar la variabilidad de los mismos (diagrama de barras e histogramas).

FASE 2. Determinación de factores espacio temporales que impactan la cobertura espacial y frecuencia de medición de precipitación en la modelación de inundaciones

Para poder identificar el impacto de la cobertura espacial y la frecuencia de muestreo de la precipitación en la modelación de inundaciones, fue necesario el aislamiento de fuentes de error que pudieran entorpecer la investigación. Por tal motivo, se tuvo en consideración la metodología de los experimentos de sistemas de observación (OSE's por sus siglas en inglés), los cuales valoran la habilidad de pronóstico de observaciones perturbadas en comparación con los datos

reales (ejecuciones de control) (Arnold & Dey, 1986; Masutani et al., 2010). No obstante, de esta metodología solo se tuvo en cuenta la forma de manipular intencionalmente las variables, permitiendo medir el impacto ocasionado por las mismas. De esta forma, como ejecución de control se utilizó únicamente las simulaciones de caudal con la lluvia proveniente del producto satelital Integrated Multi-satellite Retrievals for Global precipitation Measurement (IMERG) (Huffman, Stocker, Bolvin, Nelkin, Tan, 2019) que de aquí en adelante se llamarán simulaciones control; y como observaciones perturbadas, simulaciones de caudal provenientes de superficies de lluvia sintética, creadas a partir de los datos de precipitación de IMERG y las características de cobertura y frecuencia de medición de la red de estaciones pluviométricas de Cundinamarca, que como se muestra en el siguiente esquema (Figura 3), se llamarán a lo largo del documento como simulaciones perturbadas.

Figura 3. Procedencia de las simulaciones control y las simulaciones perturbadas.

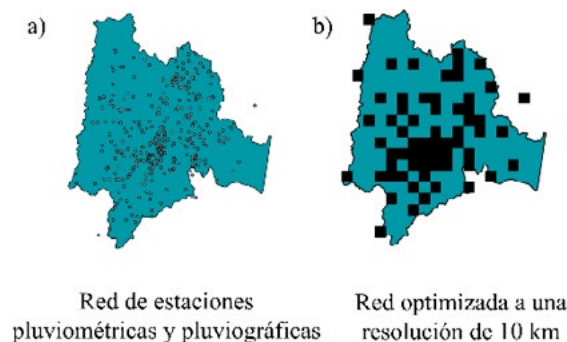


Fuente: Elaboración propia.

Como los datos de precipitación de IMERG tienen una resolución de 10 km, fue necesario adecuar los datos de la precipitación de las simulaciones perturbadas a la misma resolución, pues se debía mantener las mismas condiciones en ambos escenarios para poder evidenciar el impacto que generaba la cobertura espacial y la frecuencia de muestreo. Por lo tanto, se estimó el número de píxeles que representarían tanto la distribución de la red de estaciones como los vacíos espaciales a una resolución de 10 km. Para esto primero se hizo una rasterización de la red a una resolución de 5 km; considerando que por cada 25 km² debería haber una estación (Ratnayaka, Brandt & Johnson, 2009) archiving and dissemination of hydrological data are expensive. It is usually a government-funded activity. This funding can be vulnerable when governments try to reduce public spending as the impact is not felt immediately and the benefits of data collection are not always obvious. However, it has been demonstrated that the availability of reliable hydrological data results in benefits an order of magnitude larger than the costs of collection. To assess a potential surface water source the prime need is for long stream flow records. Similarly, for ground water sources, long records of changing aquifer water levels are required. Stream flow records need to be naturalized to eliminate the effects of any artificial influences. For this, details are required of all abstractions, effluent returns and reservoir storage changes in the catchments. Similarly, in order to interpret changes in groundwater levels correctly, details should be kept of pumped output from wells together with pumping and rest water levels.”;”container-title”:”Water Supply (Sixth Edition. Luego se calculó la densidad de píxeles en el dominio a esa resolución y con esta cifra, por medio de un mapa autoorganizado (SOM por sus siglas en inglés, un tipo de redes neuronales) realizado en MATLAB, se obtuvo la ubicación del número de puntos de estaciones (Caicedo & López, 2017).

Con base en esta nueva distribución se rasterizaron los puntos a una resolución de 10 km, obteniendo la Figura 4 mapa b, la cual correspondió a la representación de la distribución de la red de estaciones a la misma resolución del producto IMERG.

Figura 4. Distribución de la red de estaciones de Cundinamarca y la red sintética optimizada.



Fuente: Elaboración propia.

Una vez determinada esta distribución, se procedió a generar las superficies de lluvia sintética. Para esto se utilizaron los registros de lluvia del producto IMERG asociados a los píxeles que representan la distribución de la red (Figura 4 mapa b) y posteriormente se interpolaron con el método de ponderación de distancia inversa (IDW, por sus siglas en inglés), el cual se basa en la obtención de los valores desconocidos a partir del promedio ponderado de los puntos a interpolar (Hernández, Delgado y Espadas, 2011).

Como se observa en la Ecuación 3, la ponderación o peso está en función inversa de la distancia entre las estaciones, por lo tanto, el peso es mayor cuando las estaciones se encuentran cercanas y disminuye a medida que la distancia va aumentando entre ellas (Hernández et al., 2011).

Ecuación 3. Método de ponderación de distancia inversa.

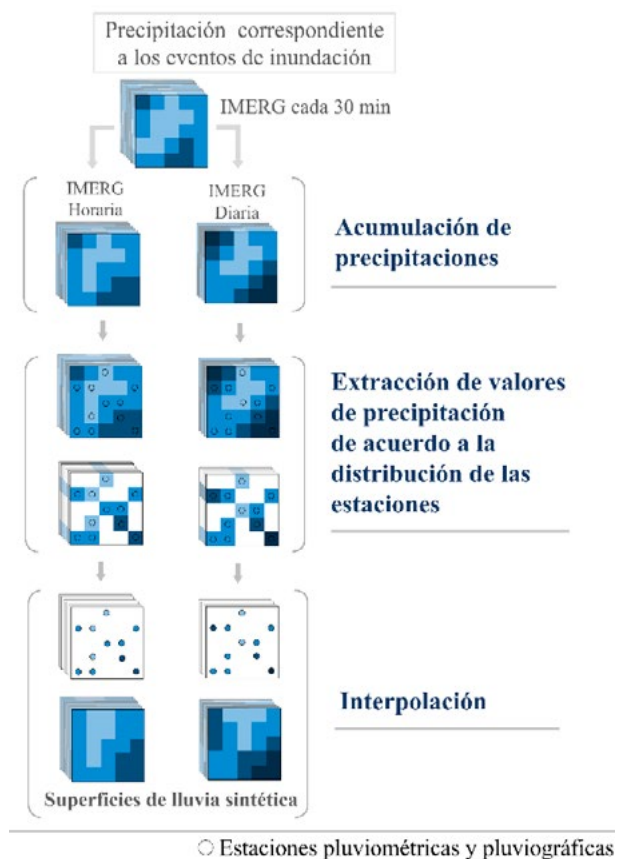
$$Z_{x,y} = \frac{\sum_p^r = 1 Z_p d_p^{-n}}{\sum_p^r = 1 d_p^{-n}}$$

Con respecto a las variables de la Ecuación 3, $Z_{x,y}$ es el valor resultante; Z_p el valor de observación en el punto p ; d_p la distancia desde el punto a estimar y el punto p ; r la cantidad total de estaciones y el exponente n es el parámetro de potencia el cual controla la manera en que el peso disminuye a medida que aumenta la distancia, este generalmente debe ser mayor a 1, pues cuando son menores, la ecuación tiende a ser similar a una media

aritmética, por lo tanto, se ha evidenciado en estudios que el valor más adecuado es 2 (Hernández et al., 2011; Vieux, 2004).

En ese sentido, el método de IDW se empleó a partir de un algoritmo basado en el lenguaje de programación de Python, utilizando la librería GDAL, la cual se usa en la realización de procesamientos geoespaciales como la interpolación (GDAL/OGR contributors, 2020). De esta manera, como se muestra en la Figura 5, para representar la frecuencia temporal de la red de estaciones se obtuvieron acumulaciones diarias y horarias de los registros de IMERG, se extrajeron los valores de los píxeles correspondientes a la nueva distribución de las estaciones (Figura 4 mapa b) y se interpolaron.

Figura 5. Esquema sobre la generación de superficies de lluvia sintética.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se identificó el impacto asociado a la cobertura espacial y la frecuencia de medición. En primer lugar, utilizando el programa de modelación EF5, se realizaron: la simulación control (con la precipitación de IMERG cada 30min) y las simulaciones perturbadas (con la lluvia sintética horaria y diaria). Posteriormente, sobre ambos tipos de simulaciones de caudal generadas, se calcularon por medio de códigos computacionales, métricas estadísticas de error tomando siempre como referencia las series de caudales generadas a partir de la precipitación del producto satelital IMERG (simulaciones control). La primera métrica correspondió al sesgo medio relativo (BIAS) el cual permite evidenciar el desfase porcentual entre las observaciones estudiadas. Se aplica usando la siguiente ecuación:

Ecuación 4. Sesgo medio relativo.

$$BIAS(\%) = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} * 100$$

Donde, S_i corresponde a las simulaciones perturbadas y O_i a las simulaciones de control. Sus resultados se encuentran entre el intervalo $(-\infty, \infty)$ (Estupiñan, 2016).

La siguiente métrica utilizada fue la raíz del error cuadrático medio (*Root Mean Square Error; RMSE*). Esta permite evidenciar las diferencias entre los valores estimados por los métodos de interpolación y los valores de referencia cuantificando la magnitud del error (Vélez y Nieto, 2016). Su ecuación es la siguiente:

Ecuación 5. Raíz del error cuadrático medio.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}}$$

Donde y_i es el valor real, \hat{y}_i es el valor estimado de la superficie sintética y N es el tamaño de la muestra (Cabrera, 2017).

Finalmente, se encuentra el coeficiente de correlación de Pearson (CC). Este mide la intensidad de la relación lineal que se encuentra en este caso entre los valores de caudal de las simulaciones control y perturbadas. Sus valores oscilan entre menos uno (-1) y uno (1) (Lahura, 2003). A continuación, se encuentra su ecuación donde sus variables corresponden a las mismas que se nombraron en el apartado de BIAS:

Ecuación 6. Coeficiente de correlación.

$$CC = \frac{N \sum_{i=1}^N S_i O_i - \sum_{i=1}^N S_i \sum_{i=1}^N O_i}{\sqrt{\left[N \sum_{i=1}^N S_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N S_i \right)^2 \right] \left[N \sum_{i=1}^N O_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N O_i \right)^2 \right]}}$$

De esta manera, se generó un mapa ráster por cada métrica tanto para las simulaciones realizadas a una frecuencia diaria como horaria.

Finalmente, se realizó la determinación de la influencia de los factores espaciales y temporales sobre el impacto asociado a la cobertura espacial y la frecuencia de muestreo, considerando varias fuentes de información. Por un lado, en el estudio de Vergara (2015) se pudieron definir algunos factores geomorfológicos, pues como menciona en su investigación dichos factores tienen relaciones entre las características de las cuencas hidrográficas y las inundaciones repentinas, estos son: área de drenaje (*basin area*) entendida como el área drenada dentro de una corriente en un determinado punto, la cual puede ser por escorrentía superficial, flujo sub superficial y flujo base (Shreve, 1974); pendiente media del cauce principal (*relief ratio*): uno de los determinantes de la velocidad de los flujos de agua en una cuenca y es directamente proporcional a la velocidad de la corriente de agua (factor característico del tiempo de respuesta de una cuenca ante una determinada precipitación) (Pike & Wilson, 1971); factor forma: está relacionado con el comportamiento de la escorrentía del agua en la cuenca y la capacidad de amortiguamiento a crecientes (Londoño, 2001). Finalmente, en el estudio de Mei, Nikolopoulos, Anagnostou, Zoccatelli, y Borga (2016) se describe que las propiedades de la precipitación regional influyen en el rendimiento de la simulación. Para tal efecto fue pertinente utilizar el promedio climatológico de precipitaciones totales anuales como una forma de observar la posible incidencia.

Las anteriores variables geofísicas se derivaron automáticamente a partir del uso de algoritmos computacionales para procesar el DEM de Cundinamarca. Para el caso de la precipitación promedio anual se obtuvo del trabajo de Hijmans, Cameron, Parra, Jones, y Jarvis (2005). Con el propósito de explicar las variaciones del desempeño y su asociación con factores espaciales, se construyeron gráficos de dispersión entre las métricas (BIAS, RMSE y CC) y los parámetros geofísicos, calculando el coeficiente de determinación (R²).

Por último, los factores temporales se definieron a partir de las épocas seca y lluviosa del departamento. Para tal efecto se usaron las fechas en las cuales ocurrieron los eventos de inundación, para posteriormente categorizarlos de acuerdo al régimen de lluvia bimodal descrito en el Atlas de Cundinamarca realizado por el IGAC (2007). De esta manera, se consideraron como época lluviosa los meses de abril-junio y septiembre-noviembre, y como época seca diciembre-marzo y julio-agosto. Con lo anterior, a partir de las superficies de lluvia sintética, nuevamente se usó el programa de modelación EF5 para generar los caudales de inundación correspondientes a cada época y así, por medio de las métricas estadísticas usadas anteriormente, comparar el posible error asociado a la temporalidad en la cual se simularon los eventos.

Resultados, análisis y discusión

FASE 1. Identificación y caracterización de los eventos de inundación entre 2014 y 2018

El primer resultado corresponde a la delimitación del área estudio, definida a partir de la intersección de la división política del departamento y la hidrología de la zona. En general, se obtuvieron un total de 23 puntos de drenaje, definidos sobre un píxel de coordenadas específicas. A partir de estos, y con el uso de los parámetros recopilados, fue posible finalizar la configuración del modelo hidrológico, y por ende obtener la delimitación espacial de la zona estudio, como se evidencia en la Figura 6.

Figura 6. Área estudio delimitada a partir del ráster de acumulación de flujo y la división política del departamento de Cundinamarca.



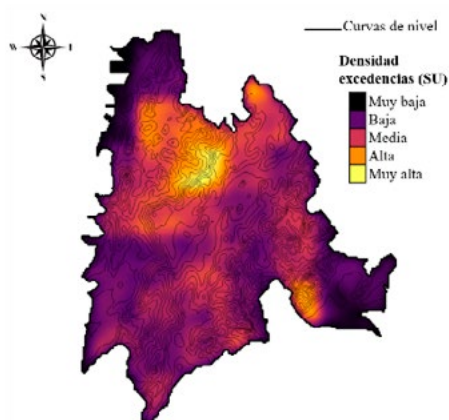
Fuente: Elaboración propia.

Al observar la anterior imagen, es evidente que el área generada por el modelo hidrológico no se ajustó exactamente en algunas zonas a los límites políticos de Cundinamarca. No obstante, esta cubrió gran parte del departamento, permitiendo contar con un entorno virtual que capturara y simulara eventos de inundaciones en la mayor parte del territorio. A partir de este punto y con el fin de obtener un análisis acorde al área estudio, los resultados expuestos más adelante se presentaron bajo esta delimitación espacial.

Una vez lo anterior, se procedió a identificar y caracterizar espacial y temporalmente los eventos hidrometeorológicos encontrados con el producto satelital 3B42RT. Esto con el fin de obtener una descripción de la diversidad de características espaciotemporales de la muestra.

Para tal efecto, se realizó el análisis de las excedencias, obteniendo la Figura 7, la cual permitió caracterizar cualitativamente la densidad relativa de las mismas. En este orden de ideas, se identificó una mayor densidad media – baja en todo el territorio. No obstante, se observó que en zonas como la parte noroccidental y suroriental del mapa, hubo una densidad de excedencias comprendidas entre categorías altas a muy altas.

Figura 7. Mapa de calor con curvas de nivel, correspondiente a las excedencias que excedieron el umbral de periodo de retorno de 2 años, entre 2014 - 2018.



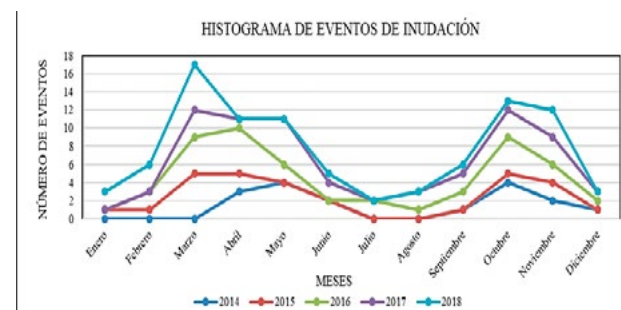
Fuente: Elaboración propia.

En este sentido, al contrastar los resultados con las curvas de nivel observadas en la anterior figura, es posible percibir que los sitios identificados con una

mayor densidad de excedencias, se dio en paisajes con topografía compleja. Este mismo efecto es posible notarlo en otras partes de la imagen, donde se visualizan coloraciones naranja-amarillo que se extienden en su gran mayoría sobre sitios montañosos. De esta forma, se evidencia que fue posible identificar una gran diversidad de excedencias a lo largo de Cundinamarca.

Posteriormente, como se describió en la metodología, el siguiente paso consistió en agrupar espacial y temporalmente las excedencias, esto con el fin de poder obtener los eventos de inundación, teniendo como resultado un total de 92. En este sentido, los anteriores fenómenos hidrometeorológicos fueron representados y ubicados temporalmente para cada mes con su respectivo año en el histograma de la Figura 8. Al observar la gráfica obtenida, es posible evidenciar que la cantidad de eventos respondieron de manera similar al régimen de precipitación bimodal que caracteriza al departamento de Cundinamarca, el cual presenta la mayor parte de sus lluvias desde el mes de abril hasta finales de junio y desde septiembre hasta finales de noviembre (IGAC, 2007).

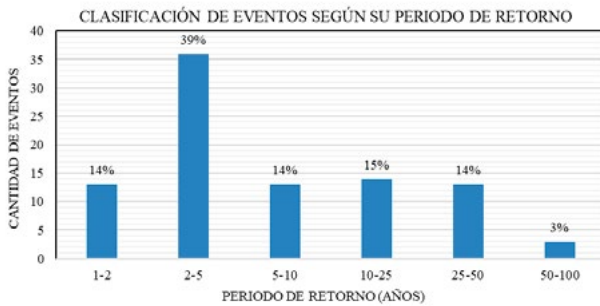
Figura 8. Histograma de los eventos de inundación identificados entre 2014 - 2018.



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, a partir del modelo de regresión lineal, fue posible usar el máximo periodo de retorno como una forma de caracterizar los eventos, el cual permite conocer la frecuencia de ocurrencia de aquellos eventos extremos o de baja intensidad (González y Jurado, 2014). En este orden de ideas, se obtuvo el histograma de la Figura 9.

Figura 9. Histograma del número de eventos de inundación de acuerdo con su máximo periodo de retorno, entre el periodo 2014 - 2018.

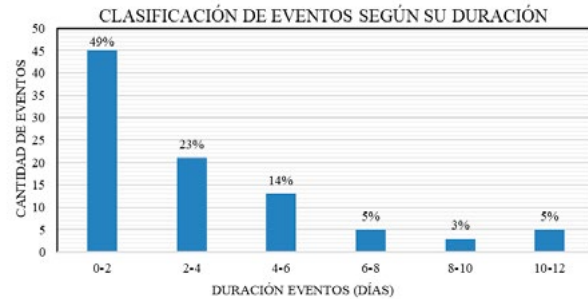


Fuente: Elaboración propia.

Como se observó anteriormente hubo una gran diversidad de eventos capturados, obteniéndose como máximo valor 65.24 años, y un valor mínimo de 1.14 años. Cabe resaltar que a pesar de que el umbral para considerar los eventos de inundación fue el caudal igual o superior al periodo de retorno de 2 años registrado en cada excedencia, fue posible registrar valores inferiores a dos años. Esto se explica debido al uso del método de regresión lineal logarítmico para simplificar el procedimiento del cálculo de los periodos de retorno a partir del máximo caudal, cuya ecuación resultante está sujeta a errores en el ajuste de curva. Sin embargo, este error en la estimación del periodo de retorno, puede ser ignorado dado que el interés fue caracterizar el nivel de “rareza” de cada evento de forma relativa.

Por otro lado, como menciona Pardo y Rodríguez (2014) al estudiar los eventos de inundación, es necesario considerar variables como el tiempo de duración y el área de la tormenta, pues la magnitud de estas puede servir para caracterizar las mismas. En general, se tuvo una amplia variación de la muestra de los eventos identificados, teniendo como valor máximo de duración 11.8 días y como valor mínimo 0.6 días. Cabe recordar que estos valores de duración correspondieron a la actividad hidrometeorológica de cada evento a lo largo del área estudio, y no a una lluvia puntual continua. En este sentido, en el histograma de la Figura 10 se evidencia la variabilidad temporal obtenida en los diferentes eventos obtenidos.

Figura 10. Histograma del número de eventos de inundación de acuerdo a su duración, entre el periodo 2014 - 2018.



Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta lo anterior, los eventos identificados con una larga magnitud temporal fueron generados por una alta actividad hidrometeorológica en distintos lugares del área estudio, caracterizada posiblemente por presentar diferentes episodios de lluvias (intensas o continuas) en pequeños intervalos de tiempo de diferencia entre unas y otras. De esta forma fueron catalogadas como pertenecientes a un mismo evento.

En este sentido, al haber considerado capturar la actividad hidrometeorológica a lo largo de todo el dominio, se dio la posibilidad de encontrarlos en diferentes dimensiones espaciales tal como se observa en el diagrama de barras de la Figura 11, donde se visualizan eventos de distintas magnitudes; las cuales corresponden a la suma de cada uno de los pixeles (área = 1 km²) asociados a dicho evento.

Figura 11. Diagrama de barras de área correspondiente a cada evento de inundación.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, como se ha observado hasta este punto, diferentes factores como la intensidad de lluvia, tiempos de duración y área de la tormenta se expresaron de manera diferente en los eventos de inundación, mostrando así

una alta variabilidad de condiciones y en consecuencia que los resultados encontrados no se relacionen únicamente a condiciones o eventos específicos de inundación.

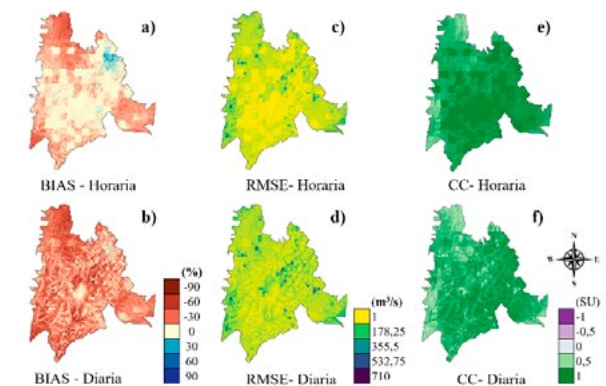
FASE 2. Determinación de factores espacio temporales que impactan la cobertura espacial y frecuencia de medición de precipitación en la modelación de inundaciones

Esta sección se divide en dos partes: por un lado, determinar el impacto de la cobertura espacial y frecuencia de muestreo en las simulaciones de eventos de inundación; y por el otro, conocer cómo este impacto es influenciado por los factores espaciales y temporales en dichas simulaciones.

Impacto de la cobertura espacial y frecuencia de muestreo en las simulaciones de eventos de inundación

A continuación, se encuentran los resultados del cálculo de las métricas estadísticas BIAS, RMSE y CC, correspondientes a la comparación de las simulaciones de caudal realizadas a partir de la precipitación interpolada, con respecto a los registros de lluvia del producto satelital IMERG, generada cada 30 minutos (ver Figura 12).

Figura 12. Mapas ráster de las métricas BIAS, RMSE y CC de las simulaciones realizadas con IDW, frecuencia horaria y diaria respecto a la cobertura de medición de 30 minutos del producto satelital IMERG.



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al BIAS se observa que ambos ráster de caudales de la Figura 12, registraron valores de subestimación y sobrestimación, variando significativamente entre las frecuencias de medición. En el raster de caudales a una frecuencia de medición horaria (*mapa a*), se observa la obtención de sobrestimaciones en una pequeña zona al noreste del departamento. Por otro lado, es posible notar la influencia de la distribución espacial de la red sintética de mediciones, donde se obtuvieron caudales con un desfase porcentual nulo. De otra forma, al estudiar el ráster de caudales de frecuencia diaria (*mapa b*) se evidencia una mayor generación de error de subestimación en gran parte del dominio, evidenciándose por un lado que la acumulación de datos a esta escala temporal de medición hace que en la parte central del departamento, se obtengan series de caudal en su gran mayoría cercanos a cero, y por el otro, los lugares donde se registraron mayores sobrestimaciones con la cobertura temporal horaria (noreste del mapa a), se registraron caudales en su gran mayoría sobrestimados. Adicionalmente, también se observa cómo en ambos mapas ráster, las corrientes hídricas con alto caudal obtuvieron un menor porcentaje de error, notándose que estas correspondieron a aquellos drenajes que en algún punto de su cauce estuvieron cerca o bajo la influencia de un píxel de la red de estaciones.

Respecto a la métrica de RMSE, es posible evidenciar que los caudales de precipitación horaria (*mapa c*) obtuvieron menores magnitudes de error en la parte central del área de estudio. Asimismo, se puede visualizar el efecto de los píxeles pertenecientes a dicha red sintética sobre la generación de superficies de caudales con un menor error. El caso es contrario con los caudales obtenidos con información de precipitación a escala diaria (*mapa d*), donde hubo un mayor error distribuido sobre todo el dominio. Para el coeficiente de correlación de los caudales de inundación horaria (*mapa e*) se puede observar que obtuvieron en su gran mayoría una alta relación lineal entre los caudales generados por IMERG y los obtenidos por IDW. En este sentido, al visualizar el *mapa f* del ráster de caudales de la misma figura se ve que, si bien la fuerza de relación no se pierde en todos los píxeles, es evidente su disminución, sobre todo en los lugares con vacíos de información.

Teniendo en cuenta lo anterior, en general se evidenció que a nivel espacial en las tres métricas de error existe un impacto positivo en los lugares donde existe una buena densidad de puntos de medición, puesto que se generaron caudales con menores errores. Caso contrario a las zonas donde no existen pixeles de la red de medición, generándose registros con mayores porcentajes de subestimación. Asimismo, en cuanto a la frecuencia temporal de medición se encontró que la habilidad del modelo hidrológico disminuye a la hora de generar las series de caudal con los registros diarios de precipitación obtenidos por el método de interpolación IDW. Esto se debe a que no logran capturar la variabilidad de la lluvia en el espacio y tiempo en un día y, por ende, los caudales generados no obtuvieron un buen rendimiento a la hora de ser estimados (Ly, Charles & Degré, 2013).

Factores espaciales y temporales que influyen el impacto de la cobertura espacial y frecuencia de muestreo de precipitación en la modelación de eventos de inundación

A continuación, se analizó el impacto generado por los factores espaciales y temporales en las series de caudales de inundación, generadas a partir de la precipitación interpolada a una frecuencia temporal de muestreo diaria y horaria. Cabe mencionar que a los valores de cada factor fue necesario aplicarles logaritmo, esto con el fin de observar una mejor distribución de los registros y facilitar el análisis.

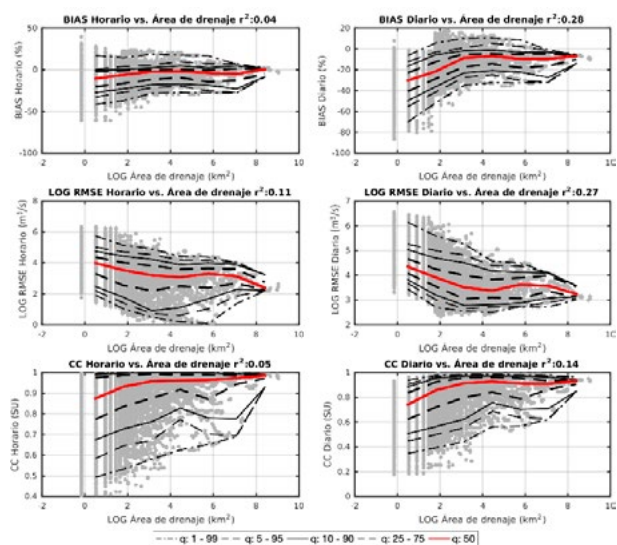
Área de drenaje

Al observar las gráficas de distribución de cada una de las métricas de error a una frecuencia horaria (Figura 13), es posible notar que a menor área de drenaje existe una mayor varianza del error en los caudales registrados. Esta misma característica se obtuvo con las otras dos métricas, RMSE y CC, donde la magnitud del error generado es alta y la correlación tiende a ser débil. Distinto, en áreas de drenaje más grandes, donde a medida que esta variable aumenta existe una menor magnitud y varianza del error, obteniéndose una correlación positiva más fuerte. En

este sentido, al comparar los anteriores resultados con las gráficas de frecuencia diaria, se evidenció que existe una tendencia similar de la distribución del error generado, aumentando este a medida que el área de drenaje disminuye. No obstante, dicho error en las métricas a esta frecuencia de medición es mayor a la horaria. Finalmente, con respecto al coeficiente de determinación, se obtiene que a una frecuencia diaria este factor espacial contribuye en mayor porcentaje a la variabilidad de las métricas estudiadas pues tiene valores de coeficiente mucho mayores a las horarias en todos los casos.

En este orden de ideas, en las tres métricas estudiadas en ambas frecuencias de medición, se observa que el error crece a medida que el área de drenaje disminuye. Teniendo en cuenta lo anterior, se encontró que estos concuerdan con el estudio realizado por Mei, Nikolopoulos, Anagnostou, & Borga (2015), quienes encontraron que en la simulación de caudales la variación del error se ve influenciada por la dependencia de la escala de la cuenca, obteniendo mejores resultados en cuencas con mayor área.

Figura 13. Gráficas de dispersión de los resultados de las métricas BIAS, RMSE y CC de las series de caudales de eventos de inundación generadas con estimaciones de lluvia a una frecuencia horaria y diaria, respecto al factor geofísico área de drenaje.



Fuente: Elaboración propia.

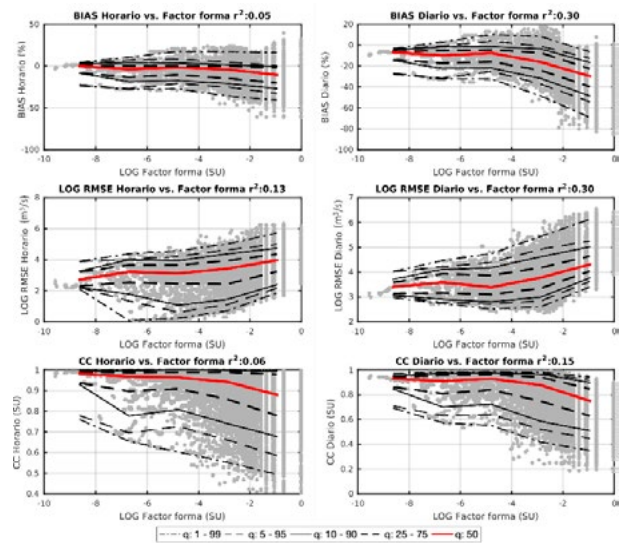
Factor forma

Por lo general cuando los valores del factor forma se acercan a uno, corresponden a cuencas con tendencia a ser circulares y cuando se acercan a cero tienden a ser alargadas (Reyes, Ulises, y Carvajal, 2010); sin embargo, como se aplicó logaritmo a todos los datos de los factores espaciales, para este caso los valores del eje x de las gráficas de distribución de la Figura 14 que se acercan a cero, tienden a ser de forma redonda y a medida que se alejan del mismo tienden a ser alargadas.

Teniendo en cuenta lo anterior, es posible notar en primera instancia el aumento del error de los caudales a medida que el área de drenaje tiende a ser redonda, siendo lo contrario en áreas de drenaje de tipo alargada, las cuales presentan un menor sesgo de datos (BIAS), menores magnitudes de error (RMSE) y coeficientes de correlación más fuertes. Adicionalmente, se visualiza una mayor generación de error en las tres métricas a una frecuencia de medición diaria; generándose una mayor subestimación de datos en formas de drenaje redondo. Por último, al observar el coeficiente de determinación, de igual forma que en el área de drenaje, se identifica que la frecuencia diaria comparada con la horaria tiene un mayor porcentaje de influencia en la variabilidad de los resultados obtenidos en las tres métricas.

En este sentido, una de las características particulares del factor forma corresponde a la influencia en el comportamiento de la escorrentía del agua, donde a medida que el terreno tiene una forma de drenaje más alargada los picos de crecidas son paulatinos, y por ende hay un mayor amortiguamiento cuando se presentan escenarios de inundaciones. En cambio cuando hay una tendencia a poseer formas redondas, los picos de crecidas son súbitos haciendo que el amortiguamiento a inundaciones sea bajo (Londoño, 2001; Reyes et al., 2010). De esta manera, al relacionar estas características con los resultados obtenidos, resulta de interés destacar que el mayor error correspondió a terrenos donde hay una mayor tendencia a generarse inundaciones.

Figura 14. Gráficas de dispersión de los resultados de las métricas BIAS, RMSE y CC de las series de caudales de eventos de inundación generadas con estimaciones de lluvia a una frecuencia horaria y diaria, respecto al factor geofísico factor forma.



Fuente: Elaboración propia.

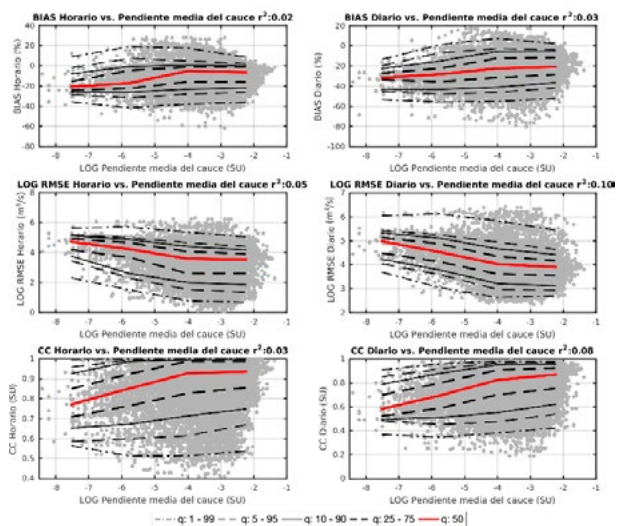
Pendiente media del cauce principal

Teniendo en cuenta la Figura 15, al observar los resultados de las métricas de error a una frecuencia de muestreo horaria, se evidencia que el error tiende a disminuir a medida que la pendiente media de los cauces es mayor, presentándose así los mayores grados de incertidumbre en los cauces con pendientes más tenuous. Por ejemplo, en el caso de BIAS hubo una mayor subestimación de caudales en pendientes más bajas, las cuales tienden a estabilizarse a medida que esta variable aumenta. Comportamiento similar se tiene al analizar RMSE y CC, donde las magnitudes de error son altas y la fuerza de correlación es menor en pendientes bajas que en su opuesto. En este sentido, al comparar los anteriores resultados con las gráficas obtenidas a una frecuencia de medición diaria, el error obtenido al estudiar las tres métricas presenta el mismo comportamiento, acompañada de una mayor incertidumbre; destacándose en BIAS una mayor subestimación de registros en todo el dominio que en la situación anterior.

Por otra parte, los coeficientes de determinación que tuvieron un mayor poder explicativo en la variación del error obtenido en la simulación de los caudales fueron a una escala diaria, sin embargo, la diferencia entre los valores obtenidos con respecto a la horaria, no son distantes entre sí como se ha observado en los otros factores. Adicionalmente, cabe destacar que los resultados de estos coeficientes no son lo suficientemente altos, lo cual permite inferir que posiblemente la incidencia de este factor en ambas frecuencias no fue lo suficientemente significativo.

Teniendo en cuenta los anteriores resultados, como se observó la mayor parte de los errores de caudales se dieron en pendientes bajas. Si bien, como menciona Lux (2016) en este tipo de lugares existe una baja tendencia a la generación de crecientes en periodos de tiempo relativamente cortos; contrario a los lugares con pendientes altas. No obstante es preciso considerar la presencia de otros factores, como la densidad de drenaje, la cual cuando es baja hace que la velocidad de respuesta del cauce a altas precipitaciones sea lenta (Londoño, 2001). Este tipo de factores pueden hacer que lugares con baja pendiente sean más susceptibles a inundaciones, las cuales por el error generado en la simulación hidrológica sus series de caudales resultan menos confiables a la hora de la toma de decisiones.

Figura 15. Gráficas de dispersión de los resultados de las métricas BIAS, RMSE y CC de las series de caudales de eventos de inundación generadas con estimaciones de lluvia a una frecuencia horaria y diaria, respecto al factor geofísico pendiente media del cauce principal.



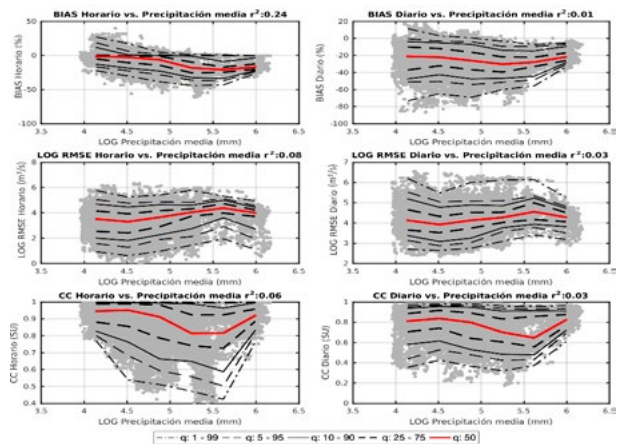
Fuente: Elaboración propia.

Precipitación climatológica media

Respecto a este factor, al observar la Figura 16 se aprecia que en ambas escalas de medición existe un comportamiento similar entre las tres métricas. En general, se evidencia una tendencia de mayor generación de error en aquellas zonas con altas precipitaciones disminuyendo a medida que el lugar tiene una menor precipitación climatológica; como se nota, a una escala de medición diaria el error generado es mayor. No obstante, al visualizar detalladamente la mediana de las gráficas de distribución de las métricas, se ve que existe un cambio en el comportamiento de la pendiente, que se traduce en la disminución del grado de subestimación de los caudales y la magnitud del error y por otro lado, un aumento en la relación lineal de los datos. Lo anterior, pudo ocasionarse por la incidencia de otro tipo de factores en ese conjunto de datos, que hicieron que el error en lugares con altas precipitaciones empezara a disminuir. Lo anterior es consistente con lo que sugiere Mei et al. (2016) al afirmar que el rendimiento de las simulación de las series de caudales depende de la interacción de otros factores como las condiciones de la cuenca y tipos de lluvia (magnitudes, patrón de espacio-tiempo).

Finalmente, respecto a los coeficientes de determinación obtenidos por las tres métricas, en los dos tipos de frecuencias temporales, se evidencia que en la escala horaria este factor obtuvo una mayor relación explicativa de la varianza del error obtenido (sobre todo en BIAS), mientras que en a una medición diaria el coeficiente fue menor.

Figura 16. Gráficas de dispersión de los resultados de las métricas BIAS, RMSE y CC de las series de caudales de eventos de inundación generadas con estimaciones de lluvia a una frecuencia horaria y diaria, respecto al factor geofísico precipitación media.

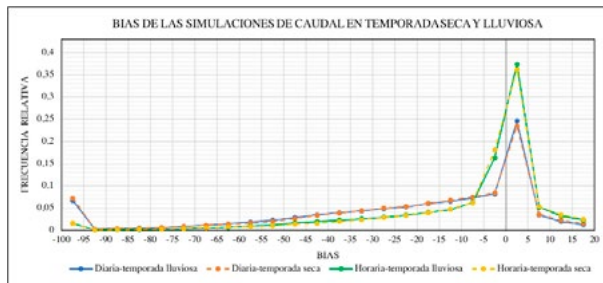


Fuente: Elaboración propia.

Estacionalidad: temporada seca y lluviosa

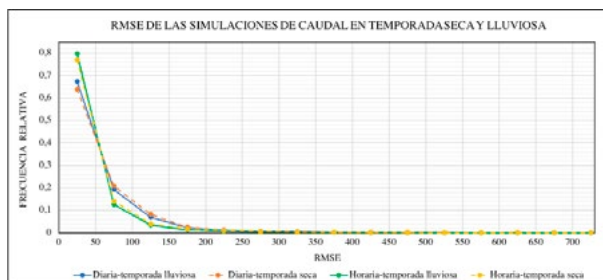
A continuación, se presentan los resultados de temporalidad obtenidos, donde se exponen las métricas de error generadas para todos los eventos correspondientes a la temporada lluviosa y seca. Cada uno de los histogramas presentados a continuación, compara la frecuencia relativa de las mismas escalas de medición a diferente temporada (seca y lluviosa).

Figura 17. Histograma del error, calculado por medio de la métrica BIAS, de las simulaciones de caudal de los eventos de inundación en temporada seca y lluviosa.



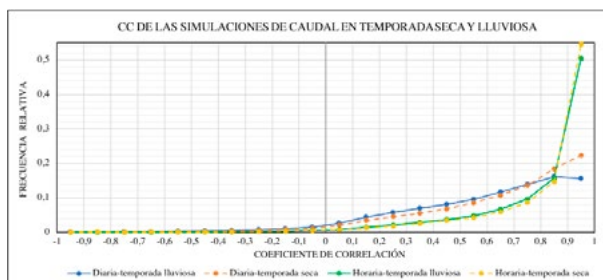
Fuente: Elaboración propia.

Figura 18. Histograma del error, calculado por medio de la métrica RMSE, de las simulaciones de caudal de los eventos de inundación en temporada seca y lluviosa.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 19. Histograma del error, calculado por medio de la métrica CC, de las simulaciones de caudal de los eventos de inundación en temporada seca y lluviosa.



Fuente: Elaboración propia.

En general, como se observó en los diferentes histogramas, no fue posible apreciar diferencias significativas entre los errores obtenidos de las simulaciones de caudal realizadas en época lluviosa o seca, a la misma frecuencia de medición de precipitación. Teniendo en cuenta esto, no pudo evidenciarse la incidencia de este factor en la variación del error obtenido a la hora de realizar simulaciones de eventos de inundación.

Conclusiones

El presente documento tuvo como objetivo caracterizar el impacto de la cobertura espacial y la frecuencia de muestreo de estimaciones satelitales de precipitación, en contraste con la de redes pluviométricas durante la modelación de inundaciones, para así describir los factores espaciales y temporales asociados al mismo en Cundinamarca, Colombia.

Para su cumplimiento, la metodología fue diseñada de tal forma que se pudiera cumplir dicho objetivo. De esta manera la metodología de los OSF's, permitió aislar el error de otras fuentes de información, dando la posibilidad de centrar el estudio solamente en el impacto de la cobertura espacial y temporal de las mediciones de precipitaciones en la modelación de inundaciones, y los factores que contribuyen a la variación de dichos errores.

Asimismo, fue posible identificar que las simulaciones de caudal de los eventos de inundación obtuvieron mejores resultados con la precipitación estimada a una menor frecuencia de medición (horaria), observándose especialmente en esta escala temporal, la influencia positiva de la presencia de estaciones de la red sintética; pues como se evidenció a lo largo de los mapas obtenidos para cada una de las tres métricas, los lugares donde menor error y mayor relación de linealidad hubo con los caudales de referencia de la capa de IMERG correspondieron a aquellas zonas del territorio caracterizadas por una alta densidad de estaciones o por la presencia de al menos un punto de medición. En este orden de ideas, también fue posible identificar el efecto negativo al aumentarse la escala temporal de medición de la precipitación, pues como se demostró a lo largo del dominio la frecuencia de error en las series de caudal simuladas tiende a aumentar.

De igual forma, se pudo evidenciar que en aquellas zonas tendientes a caracterizarse por tener áreas de drenaje

grandes, forma de tipo alargada, con una pendiente de drenaje alta o por ser un lugar de baja precipitación, tienen una mayor capacidad de amortiguar el error generado por la cobertura de medición espacial y temporal de medición de precipitación de la modelación de inundaciones. Por otro lado, el factor de la temporalidad no fue posible relacionarlo entre el error generado y la época (lluviosa o seca) en la cual se realicen la simulación de los eventos de inundación. Por último, como se observó los coeficientes de determinación lograron explicar en la mayoría de los casos solo un pequeño porcentaje de la varianza del error obtenido de los caudales simulados. Lo anterior debido a que hay que tener en cuenta que se realizó un análisis unidimensional de la influencia de cada uno de estos factores sobre los errores encontrados en la modelación, y no un análisis multidimensional, donde se tuvieran en cuenta la confluencia de diferentes factores en un mismo escenario para explicar mejor el error obtenido.

Finalmente, al tener en cuenta que Colombia basa la mayor parte de sus registros de precipitación en aquellos obtenidos por estaciones pluviométricas, en su gran mayoría dispersas y a una escala de medición diaria, los resultados de este estudio ponen en evidencia la importancia de contar con instrumentos de medición de precipitación que cuenten con una buena cobertura espacial y una frecuencia de medición continua. Esta información al ser utilizada en campos como la modelación de inundaciones es susceptible a una mayor generación de error, pues puede aumentar dependiendo de las condiciones del lugar donde se genere, entorpeciendo así la toma de decisiones en campos como la gestión del riesgo.

Agradecimientos

Queremos dar gracias al Dr. Yang Hong quién fue una de las principales personas que permitió realizar este estudio en el laboratorio HYDROS de la Universidad de Oklahoma (Norman - Estados Unidos), donde puso a nuestro alcance todos los recursos y espacios necesarios para culminar este proyecto. De igual forma, agradecemos al programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad El Bosque por apoyar todo este proceso.

Referencias

- [1] Arnold, C. P., & Dey, C. H. (1986). Observing-Systems Simulation Experiments: Past, Present, and Future. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 67(6), 687-695. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1986\)067<0687:OSSEPP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1986)067<0687:OSSEPP>2.0.CO;2)
- [2] Bedient, P. B., Huber, W. C., & Vieux, B. E. (2013). *Hydrology and floodplain analysis* (5th ed). Pearson.
- [3] Cabrera, J. (2017). Calibración de modelos hidrológicos. Universidad Nacional de ingeniería civil. http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf
- [4] Caicedo, E. F., y López, J. A. (2017). Una aproximación práctica a las redes neuronales. Programa Editorial Universidad del Valle. <http://revistas.univalle.edu.co/omp/index.php/programaeditorial/catalog/view/64/28/298-1>
- [5] Caicedo, F. M. (2008). Asimilación de precipitación estimada por imágenes de satélite en modelos hidrológicos aglutinados y distribuidos, caso de estudio afluencias al embalse de Betania (Huila, Colombia). <http://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/3807>
- [6] Clark, R. A., Flamig, Z. L., Vergara, H., Hong, Y., Gourley, J. J., Mandl, D. J., Frye, S., Handy, M., & Patterson, M. (2016). Hydrological Modeling and Capacity Building in the Republic of Namibia. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8), 1697-1715. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00130.1>
- [7] Estupiñan, R. (2016). Estudio de la variabilidad espacio temporal de la precipitación en Colombia [Tesis de maestría, Universidad Nacionales]. <http://bdigital.unal.edu.co/54014/1/1110490004.2016.pdf>
- [8] GDAL/OGR contributors, (2020). GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library. Open Source Geospatial Foundation. [Librería de software] Recuperado de: <https://gdal.org>
- [9] Gobernación de Cundinamarca. (2014). Estadísticas de Cundinamarca 2011—2013. Panamericana

- Formas e impresos S.A. <http://www.cundinamarca.gov.co/wcm/connect/04aecefa-79d0-4a3c-be08-9440023c225a/TACO+estadisticas+cundinamarca+Publicaci%C3%B3n+WEB.compressed.pdf?MOD=AJPERES&CVID=kOr1dPa>
- [10] Gómez, L. C., Muñoz, M. N., y Soto, L. F. (2018). Sistema de Alerta Temprana Ambiental y Efectos en Salud – SATAES: una herramienta para la acción. Informe Quincenal Epidemiológico Nacional, 23(2), 24.
- [11] González, J. P., y Jurado, M. C. (2014). Evaluación de la utilidad de estimaciones satelitales de precipitación para la modelación de inundaciones en sistemas de la alerta temprana de cuencas de relieve complejo: Caso de estudio en la cuenca del río Bogotá [Tesis de pregrado]. Universidad El Bosque.
- [12] Hernández, J. L., Delgado, M. C., y Espadas, C. (2011). Capítulo 24 Métodos de Interpolación espacial y geoestadística. En Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales (segunda, pp. 705-734). Universidad Nacional Autónoma de México. https://www.researchgate.net/profile/Ileana_Ortegon-Aznar/publication/323202595_Ortegon-Aznar_I_L_Collado-Vides_G_Montejano_Zurita_e_I_Sanchez-Molina-_2011_Algas_cap_11_293-330_pp_en_Bautista-Zuniga_F_2011Técnicas_de_Muestreo_para_manejadores_de_recursos_naturales/links/5a85e04c0f7e9b1a9548647b/Ortegon-Aznar-I-L-Collado-Vides-G-Montejano-Zurita-e-I-Sanchez-Molina-2011-Algas-cap-11-293-330-pp-en-Bautista-Zuniga-F-2011Técnicas-de-Muestreo-para-manejadores-de-recursos-naturales.pdf#page=723
- [13] Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces of global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965-1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- [14] Huffman, G.J., E.F. Stocker, D.T. Bolvin, E.J. Nelkin, Jackson Tan. (2019). GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V06, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) [Conjunto de datos de precipitación]. Recuperado de 10.5067/GPM/IMERG/3B-HH/06
- [15] Hurtado, A. F., & Mesa, Ó. J. (2014). Reanalysis of monthly precipitation fields in Colombian territory. *DYNA*, 81(186), 251-258. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n186.40419>
- [16] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2018). Integración de la red pública y privada de estaciones hidrometeorológicas. https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/27295/Protocolo_integraci%C3%B3n_redp%C3%BAblica_privada.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- [17] Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2007). Atlas de Cundinamarca. Imprenta Nacional de Colombia.
- [18] Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2016). 2,5% del país es “blanco fácil” para las inundaciones. <https://igac.gov.co/noticias/25-del-pais-es-blanco-facil-para-las-inundaciones>
- [19] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2019). Catalogo Nacional de Estaciones. <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Cat-logo-Nacional-de-Estaciones-del-IDEAM/hp9r-jxuu>
- [20] International Research Institute for Climate and Society. (2015). Factibilidad del uso de bases de datos climáticos para seguros de índice en América Latina (pp. 3-8). IRI, Earth Institute, Columbia University. https://iri.columbia.edu/wp-content/uploads/2016/10/Latam_data_feas_es.pdf
- [21] Lahura. (2003). El coeficiente de correlación y correlaciones espúreas. http://recursos.salonesvirtuales.com/assets/bloques/Lahura_Erick.pdf
- [22] Londoño, C. H. (2001). Cuencas hidrográficas: Bases conceptuales-caracterización-planificación-administración. Universidad del Tolima. http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwff/mdez/~edisp/inea_013115.pdf
- [23] López, V. L., Rojas, M. A., y Pérez, K. G. (2019). Propuesta para el mejoramiento de la red agrome-

- teorológica en el departamento de Cundinamarca. *Publicaciones e Investigación*, 1(0). <https://doi.org/10.22490/25394088.3266>
- [24] Lux, B. (2016). Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas. Universidad de San Carlos de Guatemala. <http://biblioteca.ingenieria.usac.edu.gt/>
- [25] Ly, S., Charles, C., & Degré, A. (2013). Different methods for spatial interpolation of rainfall data for operational hydrology and hydrological modeling at watershed scale: A review. *BASE*, 3-12.
- [26] Masutani, M., Schlatter, T. W., Errico, R. M., Stoffelen, A., Andersson, E., Lahoz, W., Woollen, J. S., Emmitt, G. D., Riishøjgaard, L.-P., & Lord, S. J. (2010). Observing System Simulation Experiments. En *Data Assimilation: Making Sense of Observations* (pp. 647-679). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74703-1_24
- [27] Mei, Y., Nikolopoulos, E., Anagnostou, E., & Borga, M. (2015). Evaluating Satellite Precipitation Error Propagation in Runoff Simulations of Mountainous Basins. *Journal of Hydrometeorology*, 17(5), 1407-1423. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0081.1>
- [28] Mei, Y., Nikolopoulos, E. I., Anagnostou, E. N., Zoccatelli, D., & Borga, M. (2016). Error Analysis of Satellite Precipitation-Driven Modeling of Flood Events in Complex Alpine Terrain. *Remote Sensing*, 8(4), 293. <https://doi.org/10.3390/rs8040293>
- [29] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2006). Desarrollo de la Fruticultura en Cundinamarca. http://www.asohofrucol.com.co/archivos/biblioteca/biblioteca_106_Plan%20Nal%20frucundinamarca.pdf
- [30] Pardo, R., y Rodríguez, Y. (2014). Clasificación de tormentas tropicales según lluvias asociadas: (2) resultados. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 35(2), 35-51. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382014000200003
- [31] Pike, R., & Wilson, S. (1971). Elevation-Relief Ratio, Hypsometric Integral, and Geomorphic Area-Altitude Analysis. *GSA Bulletin*, 82(4), 1079-1084. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1971\)82\[1079:ERHIAG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1971)82[1079:ERHIAG]2.0.CO;2)
- [32] Quispe, J. C., y Rojas, E. (2015). Diseño del sistema de drenaje pluvial de la comunidad 3 de mayo depucarumi del Distrito de Ascensión—Huancavelica. Universidad Nacional de Huancavelica. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/268>
- [33] Ratnayaka, D. D., Brandt, M. J., & Johnson, K. M. (2009). CHAPTER 3—Hydrology and Surface Supplies. En *Water Supply (Sixth Edition)* (pp. 63-107). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-6843-9.00011-1>
- [34] Reed, S., Schaake, J., & Zhang, Z. (2007). A distributed hydrologic model and threshold frequency-based method for flash flood forecasting at ungauged locations. *Journal of Hydrology*, 337(3), 402-420. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.02.015>
- [35] Reyes, A., Ulises, F., y Carvajal, Y. (2010). Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas. Programa Editorial Universidad del Valle.
- [36] Shreve, R. (1974). Variation of mainstream length with basin area in river networks. *Water Resources Research*. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR010i006p01167>
- [37] Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Ashouri, H., Sorooshian, S., & Hsu, K.-L. (2018). A Review of Global Precipitation Data Sets: Data Sources, Estimation, and Intercomparisons. *Reviews of Geophysics*, 56(1), 79-107. <https://doi.org/10.1002/2017RG000574>
- [38] Tavera, A. C. (2018). Evaluación del impacto de la resolución de modelado en la simulación del evento de inundación de Mocoa en abril de 2017 [Tesis de pregrado]. Universidad El Bosque.
- [39] Tian, Y., & Peters, C. D. (2010). A global map of uncertainties in satellite-based precipitation measurements. *Geophysical Research Letters*, 37(24). <https://doi.org/10.1029/2010GL046008>
- [40] Tropical Rainfall Measuring Mission. (2011). TRMM (TMPA) Rainfall Estimate L3 3 hour 0.25 degree x 0.25 degree V7, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) [Conjunto de datos de precipitación]. Recuperado de [10.5067/TRMM/TMPA/3H/7](https://doi.org/10.5067/TRMM/TMPA/3H/7)

- [41] Ureña, J. E., Vallejos, A. G., Saavedra, O. C., y Escalera, A. C. (2018). Evaluación de la precipitación distribuida en la cuenca Katari basado en tecnología satelital y productos derivados. *Investigación & Desarrollo*, 18(1), 35-51.
- [42] Vélez, J., y Nieto, P. (2016). Validación de medidas de evaluación para el pronóstico de la tasa de cambio en Colombia [Tesis de maestría, Colegio de Estudios Superiores de Administración CESA]. <https://repository.cesa.edu/bitstream/handle/10726/1577/MFC00491.pdf?sequenc>
- [43] Vergara, H. (2015). Characterizing uncertainty of a hydrologic modeling system for operational flood forecasting over the conterminous United States [Disertación, University of Oklahoma]. <https://shareok.org/handle/11244/15505>
- [44] Vieux, B. E. (2004). Distributed hydrologic modeling using GIS (Second, Vol. 48). Kluwer Academic Publishers.

Los Autores



Bryan David Niño Colmenares

En el año 2020 se graduó como Ingeniero Ambiental de la Universidad El Bosque. Durante su formación profesional fue voluntario en la Rama Estudiantil IEEE, donde participó en proyectos de investigación e impacto social, lideró la logística de eventos académicos y llegó a ocupar el cargo de vicepresidente en dicho grupo. De igual forma, fue miembro del semillero de investigación de Agricultura Rural Sostenible donde formó parte del proyecto de seguridad alimentaria PECOLO, desarrollado entre Universidad El Bosque, la Universidad de Turku (Finlandia) y la Universidad Nacional Agraria de La Molina (Perú). Dentro de sus expectativas profesionales espera poder especializarse en el área de derecho ambiental, y paralelamente continuar con la investigación de nuevas tecnologías o estrategias que permitan fortalecer la gestión del riesgo ante la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos en Colombia.



Sofia Paz Vileikis

Ingeniera Ambiental de la Universidad El Bosque graduada en 2020. Durante su trayectoria académica fue miembro de la Rama Estudiantil IEEE de la universidad y participó en diferentes proyectos como gestión de residuos sólidos en una institución educativa y capacitación sobre la seguridad alimentaria en el proyecto PECOLO mencionado anteriormente.



Humberto Vergara, PhD

Investigador del Instituto Cooperativo para Estudios Meteorológicos de Mesoescala (CIMMS por sus siglas en inglés) de la Universidad de Oklahoma y del Laboratorio Nacional de Tormentas Severas (NSSL por sus siglas en inglés) de la NOAA. También es docente investigador de la Universidad El Bosque en Bogotá, Colombia. Su logro más notable es la transición exitosa de software que rápidamente mejoró las herramientas para pronosticar inundaciones repentinas en el Servicio Nacional de Meteorología de los Estados Unidos. El Dr. Vergara continúa siendo el arquitecto de software del sistema FLASH implementado en operaciones en noviembre del 2016. Desde el 2017, ha liderado desarrollos de la siguiente generación de productos de pronósticos de inundación basada en impactos e inteligencia artificial. También desde el 2013, lidera actividades de transferencia de capacidades y tecnología con la Universidad El Bosque en el uso de información de satélites para aplicaciones en hidrología en Colombia a través de investigación con estudiantes de pre-grado de Ingeniería Ambiental.