

## Un aporte a la caracterización de lluvias extremas en el Caribe Colombiano a través de la construcción de curvas intensidad- duración- frecuencia

**Laura Torres, Laura Agudelo, Federico Rincón, Isabella Mercado, Daniel Guzmán, Julián Bayona, José Cuavas, Andrés Bonilla, Nicolás Ochoa, Alexander Villamizar, Erasmo Rodríguez, Karen Velandia, Gustavo Reyes**  
Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos (GIREH), Semillero de Investigación en Hidrología Urbana,  
Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá

E-mail: lactorresto@unal.edu.co, laaagudeloma@unal.edu.co, firinconl@unal.edu.co, imercadod@unal.edu.co,  
daaguzmanco@unal.edu.co, jbayona@unal.edu.co, jncuavasg@unal.edu.co, anbonillama@unal.edu.co, nochoav@unal.edu.co,  
avillamizarh@unal.edu.co, earodriguezs@unal.edu.co, klvelandiam@unal.edu.co, gusareyesare@unal.edu.co

### RESUMEN

Las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) tienen el propósito de ser un insumo para el diseño de estructuras hidráulicas, acorde con las condiciones locales de precipitación. Actualmente el IDEAM cuenta con aproximadamente 130 estaciones con curvas IDF en el país, de las cuales solo el 12.3% corresponden a estaciones en la región Caribe. En este sentido, el presente estudio se concentra en la construcción de curvas IDF para 10 estaciones adicionales ubicadas en esta región, utilizando los registros del IDEAM entre los años 1964 y 2012; esto con el fin de asegurar significancia estadística en el análisis de lluvias extremas de corta duración. El procedimiento inició con la identificación de las cartas pluviográficas digitalizables y la selección de las 15 tormentas más intensas de cada año; posteriormente, mediante el software HIDFUN fueron procesados de manera digital los datos, para luego construir las curvas IDF a partir de las series anuales de intensidades de precipitación para duraciones de 15, 30, 60, 120 y 360 minutos, todo esto con ayuda de la librería IDFtool. Asimismo, fueron elaborados mapas de interpolación a través del método IDW para cada una de las duraciones y periodos de retorno investigados (2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años). Finalmente, se presenta en este artículo el análisis de los resultados obtenidos en cuanto a variabilidad espacio-temporal de las intensidades de lluvias extremas en el Caribe Colombiano.

Palabras clave: *Curvas IDF, precipitación, Caribe colombiano.*

### ABSTRACT

The IDF (Intensity-Duration-Frequency) curves are usually the main input for the design of hydraulic structures, according to the local precipitation conditions. Currently, IDEAM has approximately 130 stations with IDF curves in the country. Only 12.3% of those correspond to stations in the Caribbean region. In this regard, this study focuses on the construction of IDF curves for 10 additional stations located in this region based on IDEAM records between 1964 and 2012. The purpose of considering a long period of record is to ensure statistical significance in the analysis of extreme rainfall for short durations. The procedure began with the identification of pluviographic charts that can be digitized and the selection of the 15 most intense storms of each year. Afterward, the data was digitally processed using the HIDFUN software and the IDF curves were constructed from the annual series of precipitation intensities taking durations of 15, 30, 60, 120 and 360 minutes by using the IDFtool library. Likewise, interpolation maps were made using the IDW method for each of the durations, and seven return periods (2, 3, 5, 10, 25, 50 and 100 years). The article describes the analysis of the results obtained in terms of spatial-temporal variability of extreme rainfall intensities in the Colombian Caribbean region.  
*Keywords: IDF curves, precipitation, Colombian Caribbean region.*

## Introducción

La climatología de la región Caribe está influenciada por diferentes factores tales como el relieve, la ubicación geográfica, los efectos de vientos locales, la cercanía al Mar Caribe, entre otros; en particular, referente a la precipitación, accidentes topográficos como la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), las serranías presentes en la zona como la de Perijá en el departamento de Cesar y la de Macuira en la Guajira, así como la gran extensión de llanuras, juegan un papel importante en la dinámica de esta variable (Rangel & Carvajal, 2012). Por otra parte, el desplazamiento de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), que es la región de baja presión en donde convergen los vientos alisios del hemisferio norte con los del sur, origina en la región Caribe, y en términos generales, un régimen de precipitación de tipo monomodal con máximos en los meses de mayo a octubre, con un período seco intermedio a finales de junio, denominado localmente el veranillo de San Juan, y condiciones de transición y secas en los meses restantes. La precipitación promedio anual en el Caribe colombiano es del orden de 1,200 mm/año, con un gradiente positivo, consistente con el gradiente altitudinal hacia el sur de la región, con máximos en las estribaciones de la Serranía de Perijá (2,500 mm/año) y mínimos en la Guajira con valores de lluvia cercanos a los 500 mm/año. La SNSM presenta un microclima particular con precipitaciones del orden de 2,500 mm/año (IDEAM, 2021)

Los eventos de precipitación que ocurren en la región Caribe están en general caracterizados por presentarse en horas del mediodía (entre 11 am y 3 pm), por tener duraciones cortas entre 1 y 2 horas, con altas intensidades de precipitación, originando importantes cantidades de escorrentía, como las que discurren por los arroyos de la ciudad de Barranquilla en época húmeda. El dimensionamiento por ejemplo de las estructuras de drenaje urbano requeridas para la evacuación de estas aguas pluviales y la caracterización de lluvias extremas, incluyendo impactos de la variabilidad y del cambio climático requieren el conocimiento de las intensidades de precipitación para eventos extremos de corta duración, sintetizados a nivel puntual en las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF).

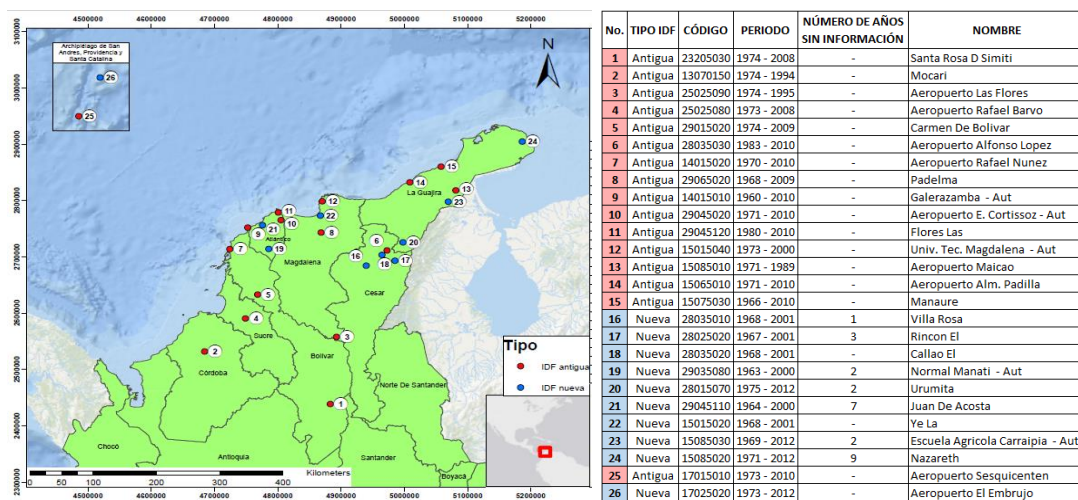
Las curvas IDF definen patrones pluviométricos registrados en una estación específica, que resultan de unir los puntos más representativos de intensidad media en intervalos de tiempo de diferente duración y que corresponden a un mismo periodo de retorno (Maldonado, Martínez, & Matajira, 2007). Estrictamente hablando las curvas IDF se construyen con información de tipo pluviográfico, que en nuestro país usualmente se encuentra en pluviogramas o cartas pluviográficas, que requieren digitalización. Existen metodologías alternas que permiten estimar las curvas IDF a partir de información pluviométrica y características de escala de las lluvias, entre las cuales pueden mencionarse los métodos de Chen (1983); Vargas & Díaz-Granados (1998); Pulgarin & Poveda (2009); UNAL (2016).

De acuerdo con el Catálogo Nacional de Estaciones (CNE) (IDEAM, 2019), existen alrededor de 1,300 estaciones (entre activas y suspendidas) a nivel nacional, en las cuales potencialmente se podrían llegar a construir curvas IDF. Sin embargo, un buen número de ellas, son de reciente instalación y no cuentan con series suficientemente largas ( $> 30$  años) para construir curvas IDF estadísticamente significativas. En la actualidad el IDEAM en su portal ha puesto a disposición del público curvas IDF para solo 110 estaciones en el país, actualizadas al año 2010 por el Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos (GIREH) (UNAL, 2016). De estas estaciones, solo 16 se encuentran localizadas en la región Caribe y una en la región Insular; así, la Costa Caribe cuenta con aproximadamente el 12.3% de las curvas IDF disponibles actualmente en el IDEAM. En este sentido, el propósito de la investigación aquí reportada ha sido el de continuar con el trabajo desarrollado en 2016, construyendo curvas IDF de nuevas estaciones, en este caso en la región Caribe, que cumplen criterios similares de disponibilidad de información con relación a las IDF previamente construidas. Esto con el fin de mejorar a nivel regional

la disponibilidad de información de lluvias extremas, sintetizada en curvas IDF, para apoyar el diseño hidrológico de estructuras hidráulicas de diferente tipo y la caracterización de lluvias extremas de corta duración.

### Zona de estudio

La zona de estudio corresponde a la región Caribe colombiana, que incluye siete departamentos, en la cual se han seleccionado 26 estaciones con información pluviográfica disponible, 16 que ya contaban con curvas IDF actualizadas al año 2010 (IDF antigua) y 10 nuevas estaciones para las cuales se han construido las curvas IDF como parte de esta investigación (IDF nueva) (ver Figura 1). La localización de las 26 estaciones analizadas se presenta en la Figura 1, en donde se observa que mayoritariamente estas se encuentran ubicadas en la zona plana, cercanas a la costa, y solo cinco de ellas se encuentran en la parte sur de la región, en un relieve mucho más empinado.



**Figura 1 y Tabla 1.** Localización y características de estaciones seleccionadas

### Materiales y métodos

#### Preprocesamiento de la información

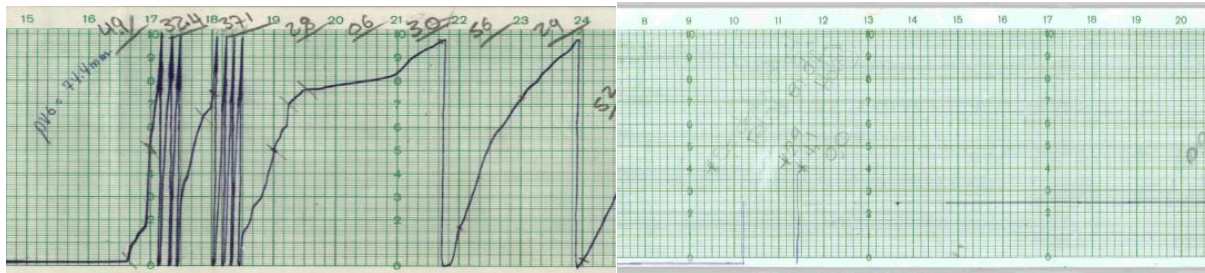
A través del portal DHIME del IDEAM se obtuvo la información pluviométrica diaria para las 10 estaciones de la Costa Caribe seleccionadas en este estudio y mostradas en la Figura 1 y en la Tabla 1. A partir de esta información se identificaron los eventos de precipitación importantes, que permitieron determinar rápidamente las fechas de las cartas pluviográficas que requerían digitalización, previamente escaneadas por el IDEAM. De acuerdo con la metodología seguida para la actualización de las curvas IDF al año 2010 (UNAL, 2016) se seleccionaron las 15 mayores tormentas (MT) de cada año para los años con información disponible. La hipótesis a este respecto, planteada con el fin reducir los recursos requeridos en actividades de digitalización, es que entre estas 15 cartas de cada año se encuentran las mayores intensidades de precipitación para duraciones dadas.

Para agilizar este proceso se desarrolló un código en el lenguaje de programación Python, automatizando el procedimiento al suministrarle los archivos de día pluviométrico descargados del DHIME. El código utiliza diferentes librerías de Python para manejar rutas de archivos, fechas y datos como tablas y/o lectura de archivos en Excel. Mediante este código, que al igual que otros desarrollados en esta investigación hace parte del material suplementario de este artículo (consúltese en [https://drive.google.com/drive/folders/1JmRNOhXIOBhij9ynvWv\\_OFP8N3cFDve9?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1JmRNOhXIOBhij9ynvWv_OFP8N3cFDve9?usp=sharing)), se

seleccionaron las 15 MT de cada año para los períodos de tiempo mostrados en la Tabla 1, obteniendo como salida una tabla en formato .xlsx, con tres columnas así: el código de la estación, la fecha y su correspondiente precipitación, de acuerdo con el registro pluviométrico.

### Identificación de cartas digitalizables

Una vez consolidada la información de las 15 MT de cada año y estación, se buscaron las cartas pluviográficas correspondientes, escaneadas previamente por IDEAM, verificando que los valores de precipitación fueran iguales o muy parecidos a los valores del registro pluviométrico del DHIME. Adicionalmente, se verificó el estado de los pluviogramas, clasificándolos en buen estado, si eran fácilmente digitalizables, y mal estado en caso contrario.



**Figura 2:** Carta pluviográfica digitalizable (izquierda) y no digitalizable (derecha).

En el caso en que la carta se encontrara en mal estado o que el valor de la precipitación obtenido del pluviómetro fuera muy diferente al dado por el pluviógrafo, se consideró como no digitalizable. Por otro lado, lo que se mencionó en los párrafos anteriores corresponde a la estrategia original de análisis; sin embargo, es posible que existan ciertas cartas que presenten tormentas importantes y que no hayan sido consideradas dentro de las 15 MT. En este caso se utilizó una metodología alternativa complementaria, en la cual para cada año se revisó visualmente si existían cartas con precipitaciones mayores a los 10 mm y que, además, fueran digitalizables.

A partir de lo anterior se creó un archivo de Excel en donde aparte de los datos de las 15 tormentas más intensas de cada año, se incluyó de forma manual el nombre, fecha de la carta y el valor de la precipitación para la estrategia alternativa de búsqueda, identificando además, si esta cumplía con los parámetros establecidos para su digitalización (ver Tabla ).

**Tabla 2:** Ejemplo formato de Excel para cartas digitalizables y no digitalizables. NE (No existe) SI\* (la carta existe, es digitalizable pero existe una diferencia importante entre el registro del pluviómetro y el del pluviógrafo para la fecha correspondiente)

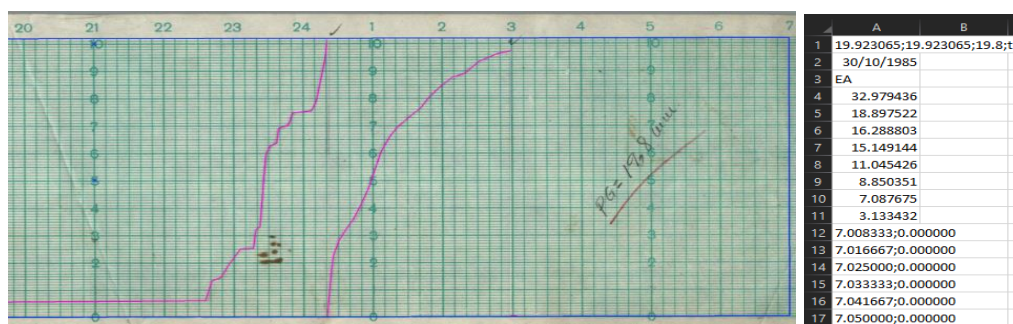
| Precipitación (mm) | Año 1995        | Nombre archivo de la carta | Digitalizable |
|--------------------|-----------------|----------------------------|---------------|
| 56                 | 15/05/1995 0:00 | 2123.jpg                   | SI            |
| 44                 | 30/05/1995 0:00 | 2132.jpg                   | SI*           |
| 83                 | 16/09/1995 0:00 | 2162.jpg                   | SI            |
| 29                 | 27/07/1995 0:00 | NE                         | NO            |

Para facilitar el proceso de digitalización de las cartas pluviográficas seleccionadas, y para la creación de las curvas IDF fue necesario archivar la información en formato .csv. La digitalización se realizó mediante la herramienta semiautomática HIDFUN (UNAL, 2016; Fuentes et al., 2018), desarrollada en la UNAL, la cual permite al usuario, mediante una interfaz gráfica, digitalizar las cartas pluviográficas seleccionadas usando los archivos de imagen de las cartas y guardando la información ya digitalizada en archivos tipo .csv con las intensidades calculadas, la fecha de la carta y los datos de la curva de masa a intervalos de un minuto, así como en imágenes modificadas en formato .jpg que sirven

como control del proceso (Figura 4). En total se digitalizaron 3303 cartas siguiendo el procedimiento que brevemente se describe a continuación. El lector interesado en conocer más detalles acerca de la herramienta de digitalización HIDFUN es remitido a las referencias originales del software.

### Proceso de digitalización

El proceso de digitalización incluye dos fases, la primera en la que se da la escala de la carta marcando sobre la misma las cuatro esquinas de la ventana de digitalización (escala horizontal de 7 am a 7 am del día siguiente para cartas diarias y de 7 am del lunes a 7 am del lunes siguiente para cartas semanales, y para la escala vertical de precipitación acumulada los valores de 0 y 10 mm). En la segunda fase, y después de introducir manualmente el primer punto en el que inicia el registro de precipitación, un algoritmo, basado en segmentación de la señal, determina los puntos de interés en la carta (señal de precipitación) y brinda una sugerencia al digitalizador sobre el camino que sigue la línea de precipitación; si esta sugerencia es correcta simplemente se acepta oprimiendo el botón del mouse y si es errónea, se puede rectificar la sugerencia escogiendo manualmente el siguiente punto sobre la señal de precipitación, hasta terminar con la digitalización de la información de cada carta. Después de este procedimiento se escriben las salidas gráficas y tabulares y automáticamente se carga la siguiente carta del archivo .csv, a ser digitalizada durante la sesión.



**Figura 3:** Resultados del software HIDFUN. Archivo de imagen (izquierda) y archivo de datos de salida (derecha). La línea magenta muestra la digitalización realizada

Una vez realizado el proceso de digitalización de las cartas pluviográficas de una esta estación, se corrió una macro en Excel con el propósito de recopilar, en un solo archivo, los valores de intensidad calculados por la herramienta HIDFUN para cada carta y para duraciones de 5, 10, 15, 20, 30, 60, 120 y 360 minutos (ver Tabla 3).

En la Tabla 3 se puede apreciar, en primer lugar, el código de la estación correspondiente y la fecha respectiva de la carta digitalizada; de igual forma, se encuentran las intensidades, calculadas en milímetros por hora, para cada duración; y por último se encuentra el número del evento de precipitación analizado para cada año.

**Tabla 3:** Recopilación de datos de intensidad y eventos para estación 17025020 (Archivo Eventos).

| Estación | Fecha      | Hora    | Duración | Intensidad | Año  | Mes | Día | Eventos |
|----------|------------|---------|----------|------------|------|-----|-----|---------|
| 17025020 | 17/11/1973 | 0:00:00 | 5        | 36,75      | 1973 | 11  | 17  | 1       |
| 17025020 | 17/11/1973 | 0:00:00 | 10       | 26,55      | 1973 | 11  | 17  | 1       |
| 17025020 | 17/11/1973 | 0:00:00 | 15       | 24,61      | 1973 | 11  | 17  | 1       |
| 17025020 | 17/11/1973 | 0:00:00 | 30       | 13,70      | 1973 | 11  | 17  | 1       |
| 17025020 | 17/11/1973 | 0:00:00 | 60       | 7,75       | 1973 | 11  | 17  | 1       |
| 17025020 | 17/11/1973 | 0:00:00 | 120      | 4,59       | 1973 | 11  | 17  | 1       |
| 17025020 | 17/11/1973 | 0:00:00 | 360      | 1,95       | 1973 | 11  | 17  | 1       |

A partir de esta información se construyeron las series anuales de intensidades para cada duración, datos utilizados para la construcción de las curvas IDF de cada estación, procedimiento que se describe brevemente a continuación.

### Curvas IDF

Para estimar las curvas IDF de las 10 estaciones seleccionadas, se utilizó el paquete “IDFtool”, desarrollado por Zamora et al. (2016), UNAL (2016), en el lenguaje de programación R, que recibe como entrada la Tabla con la información de las series anuales de intensidades máximas de diferentes años y distintas duraciones (15, 30, 60, 120 y 360 minutos). La herramienta permite elegir entre nueve funciones de distribución de probabilidad (Exponencial, Gamma, GEV, Gumbel, Log-normal tipo 3, Normal, Log-Pearson tipo 3 y Wakeby) y escoger el método de ajuste de los parámetros para cualquier distribución (momentos ordinarios, L-momentos y función de máxima verosimilitud). Es importante aclarar que la función de distribución de probabilidad y el método de ajuste seleccionados en este proyecto son Gumbel y L-Momentos, respectivamente, ya que son los recomendados por el IDEAM en la generación de las curvas IDF, y porque fueron los métodos utilizados en el “Estudio de Actualización y Análisis Comparativo de las Curvas Intensidad, Duración y Frecuencia Disponibles en el IDEAM” (IDEAM-UNAL, 2016), que actualizó las curvas IDF de 110 estaciones al año 2010.

Como resultado de la aplicación de IDFtool se obtienen las tablas de las curvas IDF, junto con la evaluación de la bondad de ajuste entre la serie de datos ingresada y la distribución de probabilidad de Gumbel ajustada por el método de los L-Momentos. La herramienta también proporciona los valores de los coeficientes de la ecuación (1) que representa las fórmulas de las curvas IDF para cada estación, duración (D) y periodo de retorno (Tr),

$$I(D, Tr) = \frac{A}{(B+D)^C} \quad (1)$$

donde I son intensidades (mm/h) para cada período de retorno (Tr en años), D es la duración (min) y A, B y C son los coeficientes, calibrados a través del algoritmo de Levenberg-Marquardt (Moré, 1978).

### Espacialización de las intensidades por el método de interpolación IDW

A partir de las salidas del paquete IDFtool, y utilizando la herramienta “IDW” del software ArcGIS se realizó la interpolación de las intensidades por el método de la Distancia Inversa Ponderada (IDW) para siete duraciones y cinco periodos de retorno seleccionados, generando 35 combinaciones. Este método de interpolación (ver ecuación 2) permite conocer el valor de la intensidad en puntos en donde no se tiene información, basándose en los datos conocidos, bajo la suposición de que las estaciones con mayor cercanía al punto analizado tienen mayor influencia en el valor de la intensidad a determinar.

$$I_j = \sum_{i=1}^n \frac{1/r_i^2}{\sum_{i=1}^n 1/r_i^2} * I_i \quad (2)$$

Donde  $I_j$  es el valor estimado de intensidad para el punto j; n es el número de puntos usados en la interpolación;  $I_i$  el valor de intensidad conocido en el punto i-ésimo y  $r_i$  es la distancia cartesiana entre el punto i y el punto j.

Para realizar la interpolación se partió del shape file del catálogo de estaciones del IDEAM, del cual se obtuvo la ubicación exacta de las 24 estaciones continentales (excluyendo las dos estaciones en



territorio insular). Seguidamente se realizó la interpolación por IDW para las 35 combinaciones (duración /periodo de retorno), construyendo igual número de mapas.

### **Estimación del error de predicción del modelo por validación cruzada**

Para evaluar la calidad de la interpolación realizada, tanto para el modelo con las estaciones antiguas como para el modelo con las estaciones antiguas y nuevas se efectuó el procedimiento de validación cruzada (Cross Validation) para el método de IDW; para ello se utilizó la herramienta ArGis. La validación cruzada es una técnica que permite evaluar la capacidad predictiva del modelo seleccionado, y proporciona una idea de qué tan buenos son los pronósticos, por lo que brinda información acerca de cuál modelo ofrece mejores predicciones y de las mejoras en la estimación del campo por efecto de incluir un mayor número de estaciones (Melo, 2012).

En este orden de ideas, se comparó la calidad de la interpolación efectuada, con un error de predicción, que en este caso ha sido escogido como la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

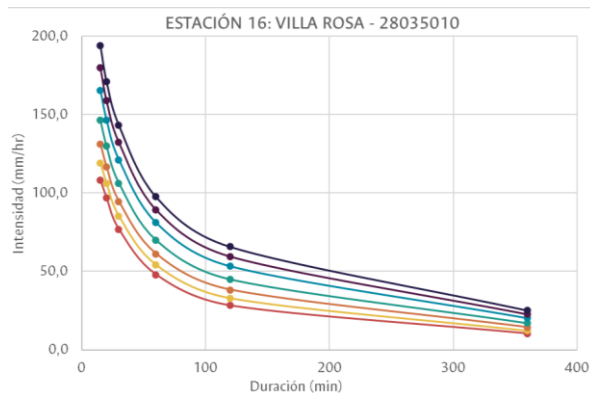
### **Análisis de Resultados y Discusión**

La Figura 4 muestra las curvas IDF para cada una de las 10 estaciones analizadas. Igualmente, la Tabla 4 presenta los valores de los parámetros A, B y C para cada estación y período de retorno. En general, con excepción de la estación 15085020 - Nazareth en la Guajira (24), las curvas IDF son bastante similares entre estaciones, con valores máximos de intensidad entre 100 y 150 mm/hr para la duración de 15 minutos.

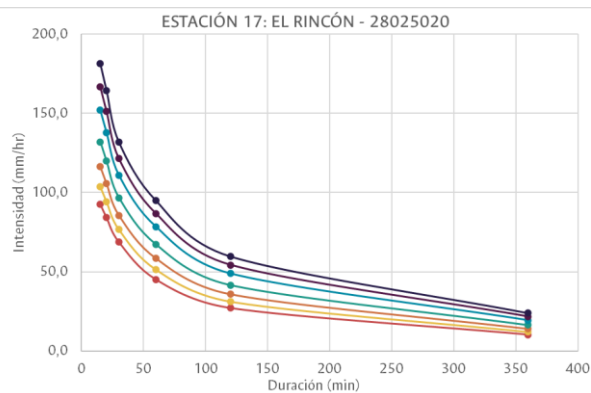
Las curvas IDF obtenidas para la estación 15085020 - Nazareth (24), ubicada al norte del departamento de La Guajira, muestran un comportamiento particular con respecto a las demás curvas analizadas. Llama la atención, específicamente, que la separación entre curvas para diferentes periodos de retorno es apreciablemente mayor en esta estación, teniendo en cuenta que todas las gráficas presentadas tienen el mismo intervalo y escala en sus ejes. A pesar de que La Guajira es la región más seca de Colombia, con un clima cálido e inhóspito caracterizado por sus largos periodos sin precipitación (CIOH, 2021), el comportamiento de las curvas IDF de esta estación puede ser explicado a través de su ubicación geográfica, dado que la Alta Guajira está expuesta directamente a tormentas tropicales y huracanes esporádicos, que generan fuertes precipitaciones e inundaciones, cuyos efectos pueden ser potenciados por el cambio climático (PDGR, 2012).

### **Variabilidad espacial del campo de intensidades para diferentes períodos de retorno**

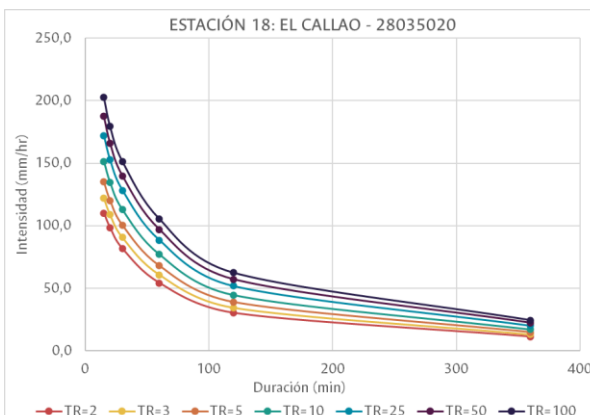
El análisis de la variabilidad espacial de las intensidades de precipitación en la zona de estudio se basa en los mapas interpolados obtenidos a partir de la aplicación del método IDW, incluyendo las estaciones nuevas y antiguas, para todas las duraciones del estudio y algunos periodos de retorno. Estos mapas, para la duración de 15 minutos y diferentes períodos de retorno se presentan en la Figura 5 y se discuten a continuación. Los mapas para otras duraciones pueden ser consultados en el material suplementario de este artículo.



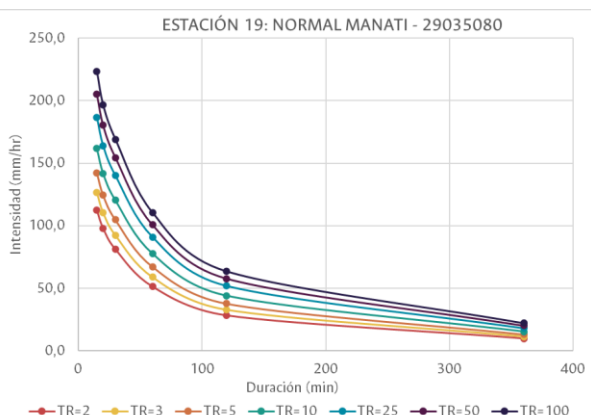
| D (min) | $I_{TR=2}$ | $I_{TR=3}$ | $I_{TR=5}$ | $I_{TR=10}$ | $I_{TR=25}$ | $I_{TR=50}$ | $I_{TR=100}$ |
|---------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 15      | 108,2      | 119,1      | 131,2      | 146,4       | 165,6       | 179,9       | 194,0        |
| 20      | 96,8       | 106,2      | 116,7      | 129,9       | 146,5       | 158,9       | 171,1        |
| 30      | 76,8       | 85,2       | 94,6       | 106,4       | 121,2       | 132,2       | 143,2        |
| 60      | 48,0       | 54,2       | 61,2       | 70,0        | 81,2        | 89,4        | 97,6         |
| 120     | 28,3       | 33,0       | 38,3       | 45,0        | 53,4        | 59,6        | 65,8         |
| 360     | 10,4       | 12,2       | 14,3       | 17,0        | 20,3        | 22,7        | 25,2         |



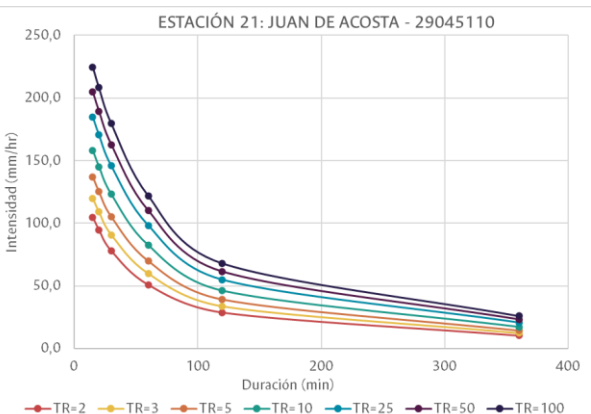
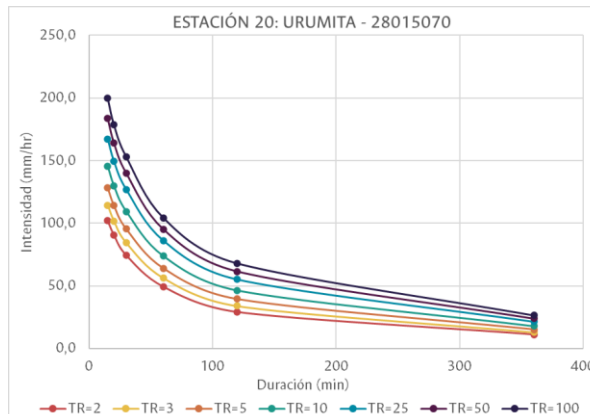
| D (min) | $I_{TR=2}$ | $I_{TR=3}$ | $I_{TR=5}$ | $I_{TR=10}$ | $I_{TR=25}$ | $I_{TR=50}$ | $I_{TR=100}$ |
|---------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 15      | 92,4       | 103,7      | 116,2      | 132,0       | 151,9       | 166,6       | 181,3        |
| 20      | 84,1       | 94,3       | 105,6      | 119,8       | 137,8       | 151,1       | 164,3        |
| 30      | 68,7       | 76,7       | 85,6       | 96,8        | 110,9       | 121,4       | 131,8        |
| 60      | 45,0       | 51,3       | 58,4       | 67,2        | 78,4        | 86,6        | 94,9         |
| 120     | 27,1       | 31,2       | 35,8       | 41,6        | 48,9        | 54,4        | 59,7         |
| 360     | 10,3       | 12,0       | 14,0       | 16,4        | 19,5        | 21,8        | 24,0         |



| D (min) | $I_{TR=2}$ | $I_{TR=3}$ | $I_{TR=5}$ | $I_{TR=10}$ | $I_{TR=25}$ | $I_{TR=50}$ | $I_{TR=100}$ |
|---------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 15      | 110,2      | 121,9      | 134,9      | 151,3       | 172,0       | 187,4       | 202,6        |
| 20      | 98,5       | 108,8      | 120,2      | 134,5       | 152,6       | 166,0       | 179,3        |
| 30      | 81,8       | 90,6       | 100,4      | 112,8       | 128,4       | 139,9       | 151,4        |
| 60      | 54,3       | 60,7       | 67,9       | 77,0        | 88,4        | 96,9        | 105,3        |
| 120     | 30,4       | 34,4       | 39,0       | 44,7        | 51,8        | 57,2        | 62,5         |
| 360     | 11,4       | 13,0       | 14,9       | 17,2        | 20,2        | 22,4        | 24,5         |



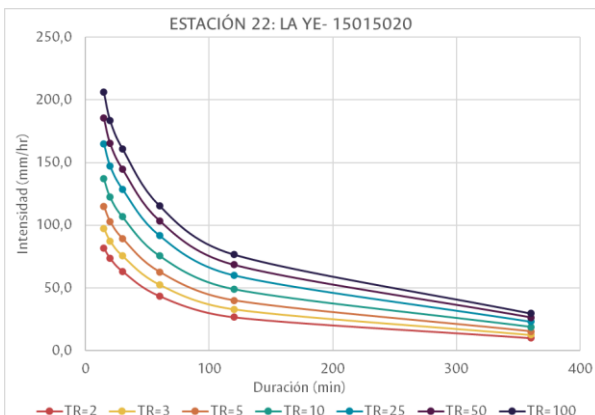
| D (min) | $I_{TR=2}$ | $I_{TR=3}$ | $I_{TR=5}$ | $I_{TR=10}$ | $I_{TR=25}$ | $I_{TR=50}$ | $I_{TR=100}$ |
|---------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 15      | 112,5      | 126,5      | 142,2      | 161,8       | 186,7       | 205,1       | 223,5        |
| 20      | 98,1       | 110,6      | 124,5      | 142,0       | 164,0       | 180,4       | 196,6        |
| 30      | 81,3       | 92,4       | 104,8      | 120,3       | 140,0       | 154,5       | 169,0        |
| 60      | 51,4       | 58,9       | 67,2       | 77,7        | 90,9        | 100,8       | 110,5        |
| 120     | 28,4       | 32,8       | 37,8       | 44,0        | 51,9        | 57,8        | 63,6         |
| 360     | 9,9        | 11,4       | 13,2       | 15,4        | 18,1        | 20,2        | 22,2         |



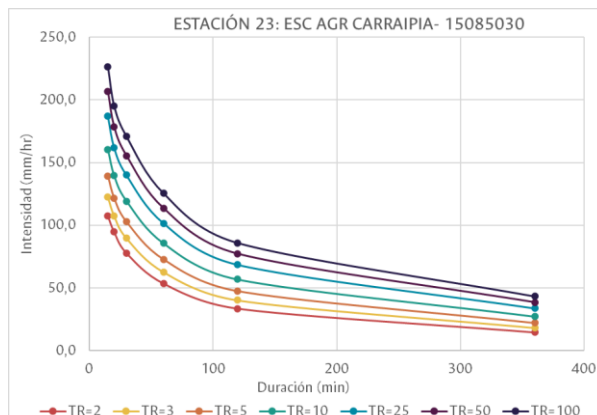


| D (min) | $I_{TR=2}$ | $I_{TR=3}$ | $I_{TR=5}$ | $I_{TR=10}$ | $I_{TR=25}$ | $I_{TR=50}$ | $I_{TR=100}$ |
|---------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 15      | 102,1      | 114,5      | 128,2      | 145,5       | 167,4       | 183,6       | 199,7        |
| 20      | 90,8       | 101,9      | 114,3      | 129,8       | 149,5       | 164,1       | 178,6        |
| 30      | 74,5       | 84,5       | 95,5       | 109,4       | 127,0       | 140,0       | 152,9        |
| 60      | 49,4       | 56,3       | 64,1       | 73,9        | 86,2        | 95,3        | 104,4        |
| 120     | 29,1       | 34,0       | 39,5       | 46,4        | 55,1        | 61,6        | 68,0         |
| 360     | 11,0       | 13,0       | 15,2       | 17,9        | 21,3        | 23,9        | 26,4         |

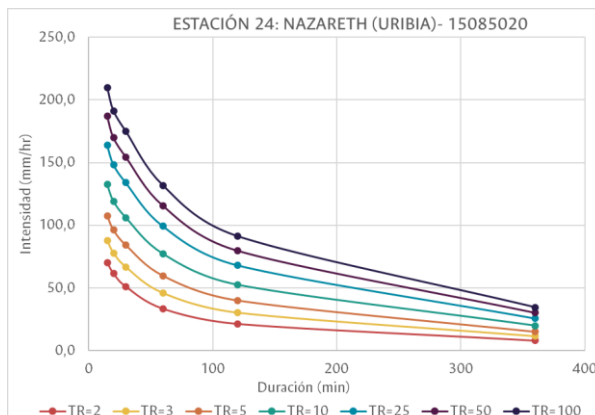
| D (min) | $I_{TR=2}$ | $I_{TR=3}$ | $I_{TR=5}$ | $I_{TR=10}$ | $I_{TR=25}$ | $I_{TR=50}$ | $I_{TR=100}$ |
|---------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 15      | 104,8      | 120,0      | 136,9      | 158,2       | 185,0       | 204,9       | 224,7        |
| 20      | 94,7       | 109,1      | 125,1      | 145,2       | 170,6       | 189,5       | 208,2        |
| 30      | 77,9       | 90,8       | 105,1      | 123,1       | 145,9       | 162,7       | 179,5        |
| 60      | 50,9       | 59,9       | 69,8       | 82,4        | 98,3        | 110,1       | 121,7        |
| 120     | 28,8       | 33,7       | 39,2       | 46,2        | 54,9        | 61,5        | 67,9         |
| 360     | 10,3       | 12,3       | 14,5       | 17,3        | 20,8        | 23,3        | 25,9         |



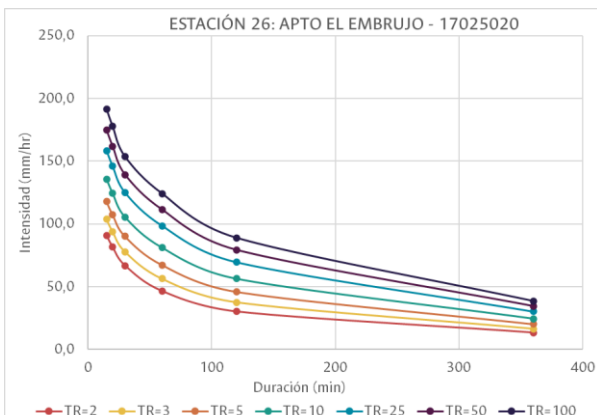
| D (min) | $I_{TR=2}$ | $I_{TR=3}$ | $I_{TR=5}$ | $I_{TR=10}$ | $I_{TR=25}$ | $I_{TR=50}$ | $I_{TR=100}$ |
|---------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 15      | 81,9       | 97,6       | 115,1      | 137,1       | 164,9       | 185,5       | 206,0        |
| 20      | 73,6       | 87,5       | 103,0      | 122,5       | 147,1       | 165,4       | 183,5        |
| 30      | 63,2       | 75,6       | 89,4       | 106,8       | 128,7       | 145,0       | 161,1        |
| 60      | 43,5       | 52,6       | 62,8       | 75,6        | 91,7        | 103,7       | 115,5        |
| 120     | 26,7       | 33,1       | 40,1       | 49,0        | 60,2        | 68,5        | 76,7         |
| 360     | 10,1       | 12,6       | 15,4       | 18,8        | 23,2        | 26,5        | 29,7         |



| D (min) | $I_{TR=2}$ | $I_{TR=3}$ | $I_{TR=5}$ | $I_{TR=10}$ | $I_{TR=25}$ | $I_{TR=50}$ | $I_{TR=100}$ |
|---------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 15      | 107,4      | 122,5      | 139,3      | 160,4       | 187,0       | 206,8       | 226,5        |
| 20      | 94,8       | 107,5      | 121,7      | 139,5       | 162,0       | 178,6       | 195,2        |
| 30      | 77,9       | 89,7       | 102,8      | 119,2       | 140,0       | 155,5       | 170,8        |
| 60      | 53,6       | 62,7       | 72,8       | 85,6        | 101,6       | 113,5       | 125,4        |
| 120     | 33,6       | 40,2       | 47,6       | 56,8        | 68,5        | 77,2        | 85,8         |
| 360     | 14,6       | 18,2       | 22,3       | 27,3        | 33,8        | 38,5        | 43,2         |



| D (min) | $I_{TR=2}$ | $I_{TR=3}$ | $I_{TR=5}$ | $I_{TR=10}$ | $I_{TR=25}$ | $I_{TR=50}$ | $I_{TR=100}$ |
|---------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 15      | 70,3       | 87,9       | 107,6      | 132,4       | 163,7       | 186,9       | 209,9        |
| 20      | 61,5       | 78,0       | 96,3       | 119,2       | 148,3       | 169,8       | 191,2        |
| 30      | 51,1       | 66,8       | 84,2       | 106,2       | 133,9       | 154,5       | 174,9        |
| 60      | 33,6       | 46,0       | 59,8       | 77,2        | 99,2        | 115,5       | 131,7        |
| 120     | 21,5       | 30,4       | 40,2       | 52,6        | 68,2        | 79,8        | 91,3         |
| 360     | 8,2        | 11,5       | 15,3       | 19,9        | 25,8        | 30,2        | 34,5         |



| D (min) | $I_{TR=2}$ | $I_{TR=3}$ | $I_{TR=5}$ | $I_{TR=10}$ | $I_{TR=25}$ | $I_{TR=50}$ | $I_{TR=100}$ |
|---------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 15      | 91,0       | 103,7      | 118,0      | 135,8       | 158,4       | 175,1       | 191,8        |
| 20      | 81,6       | 93,8       | 107,3      | 124,4       | 146,0       | 162,0       | 177,8        |
| 30      | 66,8       | 77,8       | 90,1       | 105,5       | 125,0       | 139,4       | 153,7        |
| 60      | 46,5       | 56,3       | 67,3       | 81,1        | 98,5        | 111,5       | 124,3        |
| 120     | 30,2       | 37,6       | 45,9       | 56,4        | 69,5        | 79,3        | 89,0         |
| 360     | 13,3       | 16,5       | 20,1       | 24,6        | 30,2        | 34,4        | 38,6         |

**Figura 4:** Curvas IDF obtenidas para las 10 estaciones analizadas.

**Tabla 4.** Valores de los parámetros A, B y C para cada estación y período de retorno

| Estación 16: Villa Rosa - 28035010 |        |      |     | Estación 17: El Rincón - 28025020      |        |      |     | Estación 22: La Ye - 15015020    |        |      |     | Estación 23: ESC AGR Carraipia - 15085030 |       |      |     |
|------------------------------------|--------|------|-----|----------------------------------------|--------|------|-----|----------------------------------|--------|------|-----|-------------------------------------------|-------|------|-----|
| TR<br>(años)                       | A      | B    | C   | TR<br>(años)                           | A      | B    | C   | TR<br>(años)                     | A      | B    | C   | TR<br>(años)                              | A     | B    | C   |
| 2                                  | 1520.3 | 10   | 0.8 | 2                                      | 897.2  | 8.1  | 0.7 | 2                                | 471.4  | 3.8  | 0.6 | 2                                         | 573   | 2.7  | 0.6 |
| 3                                  | 1292.6 | 8    | 0.8 | 3                                      | 774.5  | 5.6  | 0.7 | 3                                | 620.7  | 5.4  | 0.6 | 3                                         | 585.6 | 2.2  | 0.6 |
| 5                                  | 1167   | 6.5  | 0.7 | 5                                      | 718.4  | 3.8  | 0.6 | 5                                | 802.8  | 7    | 0.6 | 5                                         | 610.1 | 1.8  | 0.5 |
| 10                                 | 1094.7 | 5.1  | 0.7 | 10                                     | 698.3  | 2.4  | 0.6 | 10                               | 1050.7 | 8.7  | 0.6 | 10                                        | 649.2 | 1.5  | 0.5 |
| 25                                 | 1066.8 | 4    | 0.6 | 25                                     | 708.3  | 1.3  | 0.5 | 25                               | 1387.3 | 10.4 | 0.7 | 25                                        | 705.7 | 1.2  | 0.5 |
| 50                                 | 1069.4 | 3.4  | 0.6 | 50                                     | 728.2  | 0.7  | 0.5 | 50                               | 1650.2 | 11.4 | 0.7 | 50                                        | 750.7 | 1    | 0.5 |
| 100                                | 1083.4 | 2.9  | 0.6 | 100                                    | 754    | 0.3  | 0.5 | 100                              | 1919.8 | 12.3 | 0.7 | 100                                       | 797   | 0.9  | 0.5 |
| Estación 18: El Callao - 28035020  |        |      |     | Estación 19: Normal Manatí - 29035080  |        |      |     | Estación 24: Nazareth - 15085020 |        |      |     | Estación 25: Apto El Embrujo - 17025020   |       |      |     |
| TR<br>(años)                       | A      | B    | C   | TR<br>(años)                           | A      | B    | C   | TR<br>(años)                     | A      | B    | C   | TR<br>(años)                              | A     | B    | C   |
| 2                                  | 1362.8 | 10.9 | 0.8 | 2                                      | 1536.1 | 9.9  | 0.8 | 2                                | 503.1  | 5.1  | 0.7 | 2                                         | 480.8 | 2.9  | 0.6 |
| 3                                  | 1210.6 | 8.8  | 0.7 | 3                                      | 1483.1 | 8.9  | 0.8 | 3                                | 529.1  | 5    | 0.6 | 3                                         | 443.7 | 1.6  | 0.5 |
| 5                                  | 1125.2 | 7.1  | 0.7 | 5                                      | 1469.7 | 8    | 0.7 | 5                                | 592.7  | 5.2  | 0.6 | 5                                         | 433.4 | 0.6  | 0.5 |
| 10                                 | 1079.4 | 5.7  | 0.6 | 10                                     | 1489.8 | 7.1  | 0.7 | 10                               | 694.1  | 5.7  | 0.5 | 10                                        | 440.3 | -0.2 | 0.4 |
| 25                                 | 1070.1 | 4.4  | 0.6 | 25                                     | 1546.9 | 6.4  | 0.7 | 25                               | 840.3  | 6.3  | 0.5 | 25                                        | 463.4 | -0.9 | 0.4 |
| 50                                 | 1082   | 3.8  | 0.6 | 50                                     | 1602.3 | 6    | 0.7 | 50                               | 957.1  | 6.8  | 0.5 | 50                                        | 485.8 | -1.2 | 0.4 |
| 100                                | 1103.2 | 3.2  | 0.6 | 100                                    | 1664.4 | 5.6  | 0.7 | 100                              | 1078.3 | 7.3  | 0.5 | 100                                       | 510.5 | -1.5 | 0.4 |
| Estación 20: Urumita - 28015070    |        |      |     | Estación 21: Juan de Acosta - 29045110 |        |      |     |                                  |        |      |     |                                           |       |      |     |
| TR<br>(años)                       | A      | B    | C   | TR<br>(años)                           | A      | B    | C   |                                  |        |      |     |                                           |       |      |     |
| 2                                  | 1005.5 | 7.9  | 0.7 | 2                                      | 1450.3 | 11.7 | 0.8 |                                  |        |      |     |                                           |       |      |     |
| 3                                  | 1026.8 | 7.6  | 0.7 | 3                                      | 1542   | 11.5 | 0.8 |                                  |        |      |     |                                           |       |      |     |
| 5                                  | 1065.2 | 7.4  | 0.7 | 5                                      | 1663   | 11.4 | 0.8 |                                  |        |      |     |                                           |       |      |     |
| 10                                 | 1126.3 | 7.2  | 0.7 | 10                                     | 1831.1 | 11.4 | 0.7 |                                  |        |      |     |                                           |       |      |     |
| 25                                 | 1215.2 | 7    | 0.6 | 25                                     | 2057.9 | 11.4 | 0.7 |                                  |        |      |     |                                           |       |      |     |
| 50                                 | 1286.3 | 6.9  | 0.6 | 50                                     | 2232.5 | 11.4 | 0.7 |                                  |        |      |     |                                           |       |      |     |
| 100                                | 1359.7 | 6.8  | 0.6 | 100                                    | 2409.3 | 11.4 | 0.7 |                                  |        |      |     |                                           |       |      |     |

**Periodo de retorno 5 años**

Para el período de retorno de 5 años (Figura 5a) y una duración de 15 minutos, que es la comúnmente considerada en el diseño de estructuras de drenaje pequeñas, las mayores intensidades en la región se presentan en los departamentos de Atlántico y Cesar, con valores cercanos a los 140 mm/h.

Por otro lado, las intensidades máximas encontradas en las estaciones con curvas IDF antiguas en el departamento de Bolívar tienen una precipitación cercana a los 130 mm/h, específicamente en la estación Aeropuerto Rafael Núñez, identificada con el número 7, ubicada relativamente cerca de las estaciones nuevas que presentan mayores intensidades; esta diferencia de aproximadamente 10 mm/h (con mayores variaciones en otras zonas), muestra la variabilidad de las intensidades en zonas cercanas.

**Periodo de retorno 10 años**

Para el período de retorno de 10 años y una duración de 15 minutos (Figura 5b), se observa un patrón bastante homogéneo de las intensidades a lo largo de los departamentos de Magdalena, Cesar, Atlántico y Bolívar, con valores de intensidad entre 135 mm/h y 150 mm/h. Igualmente, en estas zonas

se presentan los valores máximos encontrados en el estudio aquí descrito, particularmente para la estación Normal Manatí, identificada con el número 19, ubicada en el departamento de Atlántico con valores de intensidad que superan los 160 mm/h para esta duración.

No obstante, es importante mencionar que al comparar estos resultados con los de estaciones antiguas y cercanas se observa una importante variación en las intensidades, pues en estas estaciones las intensidades tienen magnitudes entre los 130 mm/h y los 146 mm/h para la misma duración de 15 minutos. Por otro lado, se observa que en los departamentos de Córdoba, Sucre, La Guajira y al sur del departamento de Bolívar fueron encontradas las intensidades más bajas, con valores que llegan hasta los 130 mm/h.

### **Periodo de retorno 50 años**

En la Figura 5c se puede apreciar que para una duración de 15 minutos y un periodo de retorno de 50 años, las intensidades de lluvia encontradas en las estaciones nuevas, identificadas con los números 21 y 19, ubicadas en el Departamento del Atlántico tienen valores de aproximadamente 205 mm/h. En las estaciones antiguas cercanas (11 y 10) las intensidades tienen valores mucho más bajos, de alrededor de 159 mm/h, y en la estación antigua número 9, perteneciente al departamento de Bolívar y la más cercana a la estación 21, se presenta una intensidad de 179.1 mm/h, con lo cual, queda bastante clara la importante variabilidad del campo de intensidades, aún entre estaciones muy cercanas.

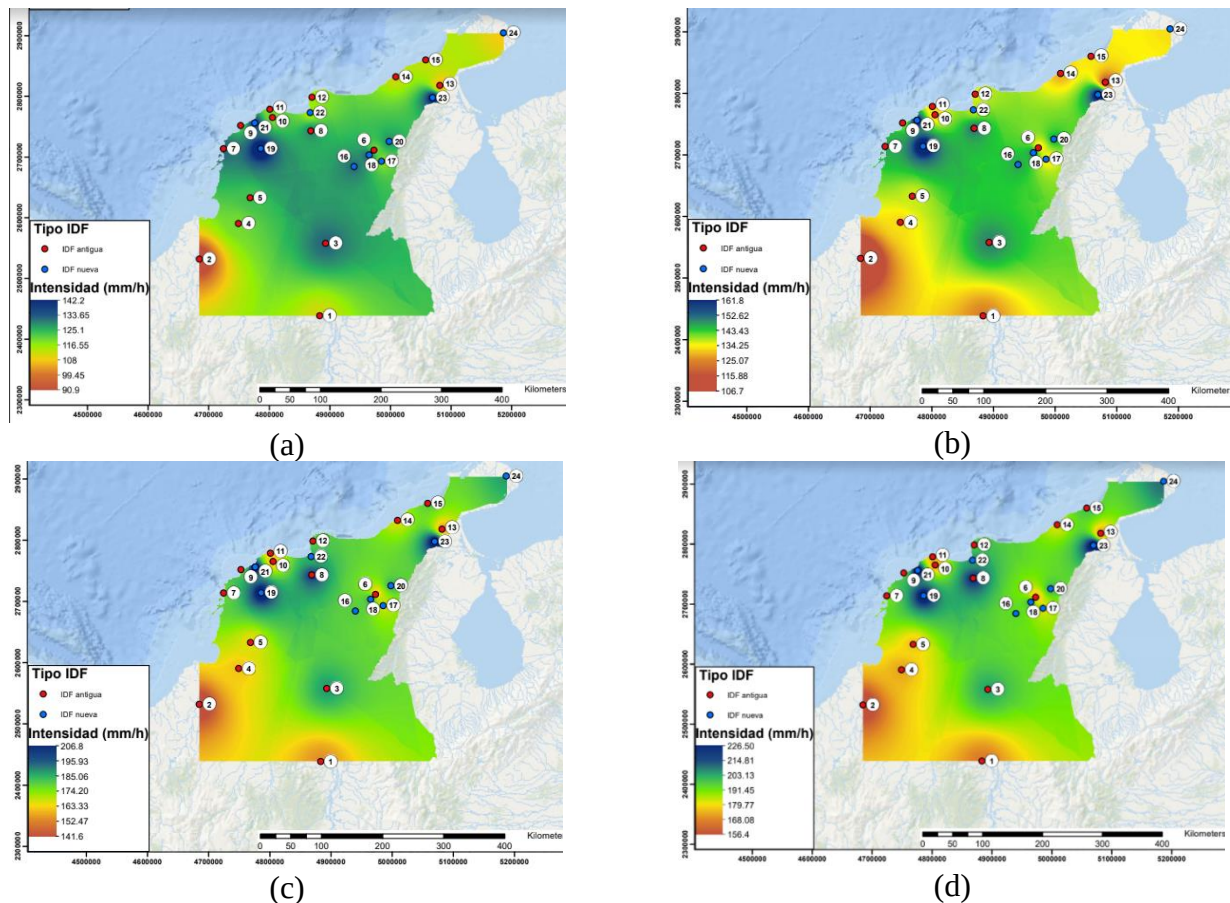
Lo anterior puede ser explicado considerando que, a pesar de la proximidad entre las estaciones, estas tienen diferentes características climáticas. Por ejemplo, las estaciones 21 y 9 se encuentran dentro de la SubZona Hidrográfica (SZH) denominada Arroyos Directos al Caribe; las estaciones 10 y 11 se encuentran en la SZH de los ríos directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura; y la estación 19 en la SZH de Canal del Dique margen derecho. Adicionalmente, es importante mencionar que las altitudes de las estaciones varían entre 8 y 20 m.s.n.m. Cabe aclarar que al indagar en las estaciones 21 (nueva) y 9 (antigua), pertenecientes a la misma SZH, las cuales tienen la misma altitud (20 m.s.n.m) y el mismo número de años empleado para la construcción de las curvas IDF (36 años), las diferencias pueden ser explicadas debido a este último punto, ya que para la estación 9 se excluyeron 14 años de los 50 posibles (1960 - 2010), existiendo la posibilidad de obtener curvas IDF ligeramente diferentes.

Asimismo, en el departamento de la Guajira (centro-oriental), se presenta un comportamiento similar al arriba discutido, en donde la estación 23 (nueva) tiene como valor máximo una intensidad de 206,8 mm/hr, mientras que la estación 13, que es vecina y antigua, reporta un valor de 154,9 mm/h, perteneciendo a la misma SZH del río Carraipia - Paraguachón, Directos al Golfo Maracaibo; aun así, la diferencia entre las magnitudes puede estar influenciada por el relieve, identificando que la primera estación está a una altura de 118 m.s.n.m y la segunda a 53 m.s.n.m, destacando que la orografía de la zona puede estar influyendo en las mayores intensidades para la primera estación.

### **Periodo de retorno 100 años**

En la Figura 5d se presenta la espacialización de las intensidades para la duración de 15 min y el período de retorno de 100 años, notando una tendencia similar a la observada en la Figura 5c con incrementos en las intensidades de 20 mm/h, aproximadamente.

Para otras duraciones y períodos de retorno (ver material suplementario) se observa que a medida que aumenta la duración las intensidades se hacen más homogéneas.



**Figura 5:** Interpolación con el método IDW de intensidades de precipitación (mm/h) considerando las estaciones nuevas y antiguas, para una duración de 15 minutos y periodo de retorno de: a) 5 años, b) 10 años, c) 50 años d) 100 años

### Validación cruzada

La validación cruzada por el método IDW se realizó en el software de información geográfica ArcGIS, ingresando como datos de entrada el conjunto de las intensidades de 60 min para el periodo de retorno de 25 años, para cada estación. Se tienen en consideración dos tipos de modelos: 1) con valores de intensidades de las estaciones antiguas y 2) con valores de intensidades de las estaciones nuevas y antiguas.

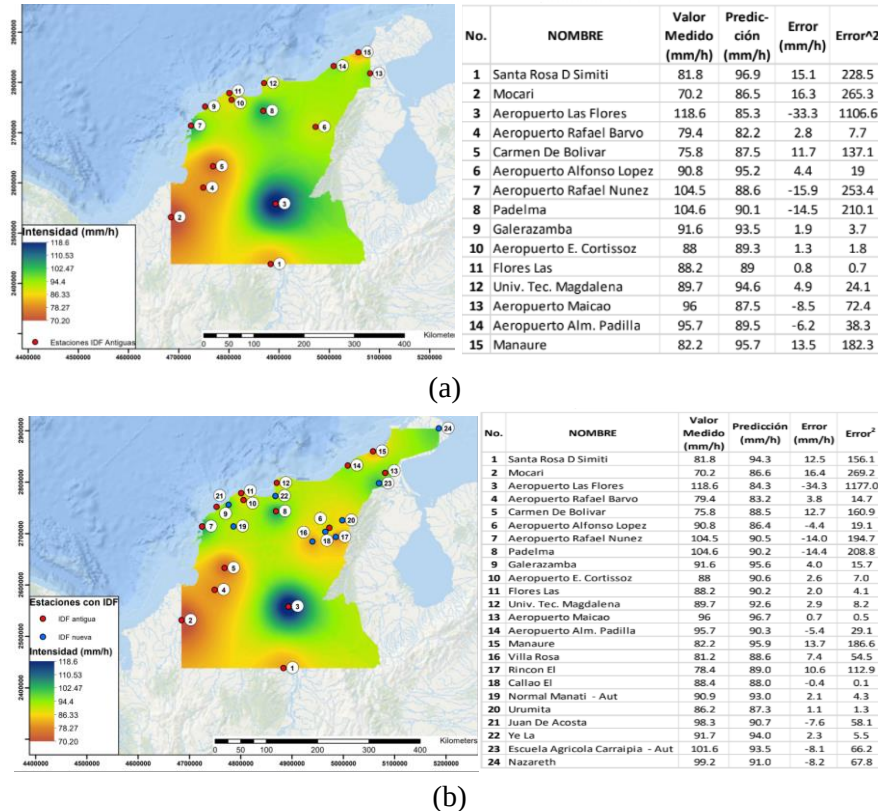
Al realizar la validación cruzada (Tabla 5), se aprecia que la inclusión de las 9 estaciones nuevas disminuye el error de predicción en 2,2 mm/hr con respecto al modelo antiguo, indicando que las intensidades que se pueden obtener con la interpolación del modelo nuevo logran estimar de mejor forma y con mayor aproximación el valor esperado, y por ende existe una mejor estimación del campo analizado

**Tabla 5.** Resultados de la validación cruzada

| Modelo Antiguo |       | Modelo Nuevo |       |
|----------------|-------|--------------|-------|
| Muestras       | 15    | Muestras     | 24    |
| RMSE           | 13,04 | RMSE         | 10,84 |

Cabe señalar que, con el método de interpolación seleccionado, las estaciones antiguas 2, 3, 4, 5 y 15, no disminuyen el error con el modelo nuevo, ya que en las zonas en donde se ubicadas dichas

estaciones, no hay presencia de nuevas estaciones. Adicionalmente, las estaciones antiguas 9 y 11 también tienen errores mayores con el modelo nuevo, lo cual se puede atribuir al relieve que presenta las zonas donde se localizan. Esto se puede observar en la Figura 6.



**Figura 6.** Resultado de la validación Cruzada para una duración de 60 min y periodo de retorno de 25 años a) Modelo solo con estaciones antiguas b) Modelo con estaciones antiguas y nuevas

## Conclusiones

En esta investigación, utilizando cartas pluviográficas escaneadas por el IDEAM y diversas herramientas computacionales, se han construido las curvas IDF para 10 estaciones en la región Caribe colombiana, que complementan las curvas existentes en 16 estaciones en esta misma región. Se incluyen como parte de este proyecto las curvas IDF de estas nuevas 10 estaciones para duraciones de 15, 30, 60, 120 y 360 minutos, las tablas correspondientes, así como los mapas con la espacialización de los campos de intensidad con la nueva información.

Dentro de las herramientas utilizadas con este propósito, se usó el software HIDFUN, desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia, fundamental en el proceso de digitalización de 3303 cartas pluviográficas y en el cálculo de las intensidades de los eventos de lluvia. Así mismo para la construcción de las curvas IDF y su ajuste mediante una ecuación para cada período de retorno, se utilizó el paquete IDFTool de R ajustando la distribución de probabilidad Gumbel mediante el método de L-Momentos.

Las curvas IDF presentan en su mayoría tendencias similares entre los diferentes periodos de retorno 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años y diferentes intensidades de 15, 30, 60, 120 y 360 min, con excepción de la estación 24 (15085020 – Nazareth), la cual, debido a su ubicación en La Alta Guajira y su climatología asociada, presenta un patrón diferente en las curvas IDF.

Para un periodo de retorno de 10 años se presentan intensidades similares a lo largo de los departamentos de Magdalena, Cesar, Atlántico y Bolívar. Por otra parte, para los departamentos de Córdoba, Sucre, La Guajira y el sur del departamento de Bolívar fueron encontradas las intensidades más bajas de la región.

En cuanto al análisis de los periodos de retorno de 50 y 100 años, fueron identificadas algunas diferencias significativas en las intensidades de precipitación para estaciones nuevas y antiguas cercanas entre sí. Esto se puede presentar, por un lado, debido a diferencias en los años y periodos de tiempo utilizados en la construcción de las curvas IDF en cada caso. Por otro lado, a pesar de la cercanía entre estaciones, otros factores, como la altitud sobre el nivel del mar y la subzona hidrográfica en la que se encuentra la estación, pueden ocasionar variaciones en la intensidad de precipitación.

Este ejercicio muestra por una parte la posibilidad de realizar de forma continua la actualización de las curvas IDF y por otra parte motiva, a través de la implementación de la metodología aquí descrita, a la incorporación de nuevas estaciones con curvas IDF en el catálogo del IDEAM. Lo anterior, podría mejorar la calidad del modelo de interpolación al reducir el RMSE (raíz del error medio cuadrático) aplicando la técnica de validación cruzada. Se reitera la invitación al IDEAM para apoyar estas iniciativas.

Todo el material producto de esta investigación (curvas IDF, ecuaciones de ajuste, mapas de intensidades para diferentes duraciones y periodos de retorno y códigos y scripts desarrollados) pueden consultarse en: [https://drive.google.com/drive/folders/1JmRNOhXIOBhij9ynvWv\\_OFP8N3cFDve9?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1JmRNOhXIOBhij9ynvWv_OFP8N3cFDve9?usp=sharing)

## Referencias

- Chen, C-l. (1983). Rainfall intensity-duration-frequency formulas. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(12): 1603-1621
- CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David y WAYS, Larry. Hidrología Aplicada. Ed. Mac Graw Hill, Interamericana. Santa Fé de Bogotá, Colombia 1994
- CIOH. Climatología del Caribe. Riohacha. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. Recuperado de: <https://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/ResumenRiohacha2.php>
- Davison, A., & Hinkley, D. (1997). Bootstrap Methods and their Application (Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511802843
- Fuentes, C., Rodríguez, E., & Villareal, E. (2018). HIDFUN una herramienta para la extracción y análisis de pluviogramas.: XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018.
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2021). Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos. Recuperado de <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>



IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2021). Curvas IDF. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/curvas-idf>

IDEAM . (12 de Mayo de 2021). *ATLAS CLIMATOLÓGICO*. Obtenido de ATLAS CLIMATOLÓGICO : <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2019). Catálogo Nacional de Estaciones (CNE) [Archivo Excel]. Bogotá, C

IDEAM-UNAL. (2016). Estudio de Actualización y Análisis Comparativo de las Curvas Intensidad, Duración y Frecuencia Disponibles en el IDEAM. Convenio Interadministrativo No. 113 de 2016. Bogotá D.C.

Jaramillo, A., & Chaves, B. (2000). Distribución de la precipitación en Colombia analizada mediante conglomeración estadística. *Cenicafé*, 51(2), pp. 102-113. Recuperado de <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc051%2802%29102-113.pdf>

Maldonado, J., Martínez, A., & Matajira, F. (2007). ELABORACIÓN CURVAS IDF ESTACIONES: CINERA VILLA OLGA T SANTA ISABEL- MUNICIPIO DE CÚCUTA, Colombia. *Revista Ambiental*, 80-94.

Melo, C. E. (2012). Análisis Geoestadístico Espacio Tiempo Basado en Distancia y Splines con Aplicaciones. Universidad de Barcelona, 37-40.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). Resolución 330 de 2017. Obtenido de <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/0330-2017.pdf>

Moré J.J. (1978) The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory. In: Watson G.A. (eds) Numerical Analysis. Lecture Notes in Mathematics, vol 630. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/BFb0067700>

PDGR. (2012). Plan Departamental de Gestión del Riesgo de La Guajira. Tomado de: <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/381>

Pulgarín Dávila, E. G., & Poveda Jaramillo, G. (2009). Fórmulas regionales para la estimación de curvas intensidad-frecuencia-duración basadas en las propiedades de escala de la lluvia (Región Andina Colombiana). Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

Rangel, J.O., & Carvajal. J.E. (2012). Clima de la Región Caribe Colombiana. En Rangel, J.O. (Editores). Colombia Diversidad Biótica XII: La región Caribe de Colombia, pp. 67–129. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Universidad Nacional de Colombia (UNAL) (2016). Estudio de actualización y análisis comparativo de las curvas IDF disponibles en el IDEAM. Informe Final

Vargas M, R. Díaz-Granados O., M. (1998) Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia. In: *XIII Seminario de Hidráulica e Hidrología*, Sociedad Colombiana de Ingenieros. Cali, Agosto 1998.

Zamora A., D. A., Figueroa O., C. Albeiro., Rodríguez s., E. A. & Piña F., A. P. (2016). dazamora/IDFtool. GitHub. Plataforma R. <https://github.com/dazamora/IDFtool>