



Actualización de las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF)
para la estación “Aeropuerto Internacional Rafael Núñez”
de la ciudad de Cartagena de Indias D.T y C.
(1970 – 2016).



**ACTUALIZACION DE LAS CURVAS DE INTENSIDAD, DURACION Y
FRECUENCIA (IDF) PARA LA ESTACION “AEROPUERTO RAFAEL NUÑEZ”
DE LA CIUDAD DE CARTAGENA DE INDIAS D.T y C. (1970 – 2016).**



INVESTIGADORES

**JOSE BERNARDO HERRERA HERRERA
ALEJANDRO DE JESUS LLAMAS CASTRO**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
CARTAGENA DE INDIAS D.T. y C.
DEL AÑO 2018**



Actualización de las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF)
para la estación “Aeropuerto Rafael Núñez” de la ciudad de Cartagena de Indias D.T y C.
(1970 – 2016).



**ACTUALIZACION DE LAS CURVAS DE INTENSIDAD, DURACION Y
FRECUENCIA (IDF) PARA LA ESTACION “AEROPUERTO RAFAEL NUÑEZ”
DE LA CIUDAD DE CARTAGENA DE INDIAS D.T y C. (1970 – 2016).**

INVESTIGADORES

**JOSE BERNARDO HERRERA HERRERA
ALEJANDRO DE JESUS LLAMAS CASTRO**

**Informe final de Trabajo de Grado como requisito
para obtener el título de Ingeniero Civil**

**DIRECTOR
ING. ALFONSO ARRIETA PASTRANA, MSc, PhD**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN HIDRÁULICA Y MANEJO COSTERO
(GIHMAC)**

**LINEA DE INVESTIGACION
MANEJO HIDRAULICO Y AMBIENTAL DE LA ZONA COSTERA Y FLUVIAL**



**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
CARTAGENA DE INDIAS D.T. y C.
DEL AÑO 2018.**



Actualización de las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF)
para la estación “Aeropuerto Rafael Núñez” de la ciudad de Cartagena de Indias D.T y C.
(1970 – 2016).



NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del director
Ing. Alfonso Arrieta Pastrana

Firma de la Evaluadora
Ing. Dalia Moreno Egel

Firma del Evaluador
Ing. Javier Mouthon Bello



DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS.

Agradezco principalmente a Dios por acompañarme a alcanzar una meta más en mi vida, por darme la oportunidad de llegar a cumplir el sueño de ser ingeniero civil de la Universidad de Cartagena. A mi madre Yesenia Lucia Herrera Bossio por su inmenso amor, constante apoyo y todos los consejos dados durante toda mi vida, a mi padre Bernardo de Jesús Herrera Díaz por su ejemplo a seguir, sustento y amor brindando en cada momento. A mi familia por esa motivación a seguir adelante para llegar a esta meta. A mis profesores por su dedicación y conocimientos impartidos en toda la carrera. A todos mis amigos y colegas que hicieron que esto fuera realidad.

Jose Bernardo Herrera Herrera.

Antes que todo, agradezco primero a Dios por hacer de esta etapa de mi vida su voluntad, a mi madre María Victoria Castro Suarez y mi padre Juan de Jesús Llamas Cano por todos sus consejos, su atención, su amor infinito, su apoyo incondicional y en especial su ardua labor en lo imposible durante todo este proceso. Al cuerpo de docentes, por todos sus conocimientos, valores y principios inculcados, que hoy en conjunto, conforman a un Ingeniero Civil graduado de la Universidad de Cartagena. A mis amigos, colegas y compañeros que en situaciones adversas siempre se mantuvieron y aportaron para hacer de este sueño una realidad.

Alejandro de Jesús Llamas Castro.

Queremos agradecer también, a nuestros maestros por todos los conocimientos impartidos, por su formación, especialmente al Ing. Alfonso Arrieta, Ing. Dalia Moreno e Ing. Javier Mouthon quienes con paciencia y dedicación tuvieron una participación directa en este trabajo de grado, gracias por cada uno de los consejos y orientaciones dadas.

Extendemos los agradecimientos al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y a cada uno de las personas que colaboraron directamente o indirectamente en cada una de nuestras solicitudes, al personal de trabajo del Área Operativa 02 del IDEAM en la ciudad de Barranquilla, muchas gracias por su colaboración.



RESUMEN

El presente estudio se realizó con el fin de actualizar las Curvas IDF para la ciudad de Cartagena, evaluar la tendencia de cambio de las precipitaciones e intensidades en la serie de estudio y realizar una comparación con estudios realizados anteriormente en la ciudad de Cartagena acerca de las curvas IDF. Estos estudios son fundamentales para la cuantificación, modelación, comprensión y análisis de las precipitaciones a lo largo de la serie histórica (1970-2016) y además nos permite dar una mejor visión para desarrollar diseños de obras hidráulicas que se adapten a las condiciones climáticas que se presentan en la ciudad de Cartagena.

Para el desarrollo de este estudio se realizó un proceso de obtención de información secundaria como el análisis de 2774 pluviogramas o bandas de registros suministradas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, (IDEAM) y adicional, información procesada por Almanza, et al (1995) y González, A y Coronado, O. (2017). Una vez analizada la información se obtuvieron las alturas máximas de precipitación y las intensidades máximas anuales, luego se aplican diferentes métodos de distribución de probabilidad usando el test de ajuste Chi-Cuadrado (R^2) como medida de bondad para demostrar y optar por el método de probabilidad más indicado a los eventos de las precipitaciones en la ciudad de Cartagena a partir del método seleccionado, se calcularon las intensidades máximas de precipitación para las duraciones y periodos escogidos y finalmente se encontraron los parámetros que modelan la ecuación de Monsalve ($k=585,028$; $m=0,166$; $n=0,5464$), para obtener la actualización de las curvas IDF del año 1970 al 2016 y realizar las comparaciones con modelos anteriormente elaborados en la ciudad de Cartagena, obteniendo como resultado de estas comparaciones que las curvas IDF del año 1995 de la Universidad de Cartagena siguen siendo vigentes para el diseño de obras hidráulicas.

Con la información de las intensidades máximas anuales, se evaluó la tendencia de cambio de las precipitaciones e intensidades a la serie de estudio (1970-2016) por medio de gráficas y análisis estadísticos, donde se obtuvo como resultado la independencia de estos fenómenos con respecto al tiempo, dando así un enfoque global del comportamiento de las precipitaciones e intensidades de la ciudad de Cartagena.



ABSTRACT

The present study was conducted for the purpose of updating the IDF curves for the city of Cartagena in order to evaluate the trend of change of rainfalls and intensities in the serie of study and to make a comparison with studies previously carried out in Cartagena about IDF curves; these estudios are essential for the quantification, modeling, understading and analysis of rainfalls throughout the historial series (1970-2016). These studies also enable us a greater understading to develop hydraulic works designs which adapt to weather conditions of the city of Cartagena.

To carry out this study a information-gathering process was made, such as the analysis of 2774 pluviograms or bands of records provided by the institue of IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) and information processed by Almanza (1995) and González, A and Coronado, O (2017). Once the information was analysed, the máximo rainfall heights and máximo anual intensities were obtained, it was applied the different probabily distribution methods by using the Chi – Square adjustment test (R^2) as a measure of goodness to demonstrate and choose the most appropriate method for rainfall intensities in Cartagena, and from the chosen method, the maximum intensities of rainfall were calculated for the durations and selected periods, finally the parameters that shape the Monsalves’s equation were found . ($k=585,028$; $m=0,166$; $n=0,5464$) all that to obtain the update of IDF curves from 1970 to 2016 and also to evaluate the comparisons with previously realized models in Cartagena, obtaining as result of these comparisons that the 1995 IDF curves of the University of Cartagena are still valid for the design of hydraulic works.

With the information of the maximum annual intensities, it was evaluated the change trend of the rainfalls and intensities to the series of study (1970-2016) by means of graphs and statistical analyses, where it was obtained as result of the independence of these phenomena regarding the time, thereby giving a global approach of the behaviour of the rainfalls and intensities of the city of Cartagena.



TABLA DE CONTENIDO

1. MARCO DE REFERENCIA	18
1.1. Marco Teórico.....	18
1.1.1. MEDICION DE LAS PRECIPITACIONES	19
1.1.2. CURVAS INTENSIDAD, DURACIÓN Y FRECUENCIA (IDF)	20
1.1.3. MÉTODOS PARA LA ELABORACIÓN DE LAS CURVAS DE INTENSIDAD, DURACIÓN Y FRECUENCIA (IDF)	20
1.1.3.1. Análisis de Frecuencias.....	20
1.1.3.2. Modelando una Ecuación para Las Curvas IDF	21
1.1.4. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD.....	22
1.2. ESTADO DEL ARTE.....	27
1.3. ANTECEDENTES.....	30
2. OBJETIVOS	32
OBJETIVO GENERAL	32
OBJETIVOS ESPECIFICOS	32
3. ALCANCE	33
3.1. UBICACION GEOGRAFICA.....	33
4. METODOLOGIA	36
4.1. METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LAS CURVAS IDF.	37
4.2. METODOLOGÍA OBTENCIÓN DE LAS TENDENCIAS DE CAMBIO..	41
4.2.1. Tendencia de cambio de las precipitaciones.	41
4.2.2. Tendencia de cambio de las intensidades.....	44
4.3. METODOLOGIA COMPARACION ENTRE CURVAS IDF DE LA CIUDAD DE CARTAGENA.	44



5. RESULTADOS Y DISCUSION	45
5.1. ANALISIS DE REGISTROS PLUVIOGRAFICO	45
5.2. SELECCIÓN DE ALTURAS MAXIMAS DE PRECIPITACION PARA LA SERIE HISTORICA 1970 – 2016.	50
5.3. OBTENCION DE INTENSIDADES MAXIMAS ANUALES PARA LA SERIE HISTORICA 1970 – 2016.	51
5.4. AJUSTES A LAS FUNCIONES DE PROBABILIDAD (GUMBEL, WEIBULL, PEARSON TIPO III Y GEV).	53
5.4.1. Parámetros de ajuste de las Distribuciones de Probabilidad.....	54
5.5. PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE CHI-CUADRADO R2	55
5.5.1. Evaluación de hipótesis para Valores Críticos de Chi-Cuadrado R2	56
5.6. AJUSTE PARA LA OBTENCION DE LAS CURVAS DE INTENSIDAD DURACION Y FRECUENCIA DE LA ESTACION AEROPUERTO RAFAEL NUÑEZ (1970 – 2016).....	57
5.7. ESTIMACION DE PARAMETROS PARA DISEÑAR ECUACION DE INTENSIDAD MODELO	58
5.8. TENDENCIA DE CAMBIO DE LAS PRECIPITACIONES.....	62
5.8.1. Precipitaciones Totales y precipitaciones Máximas- Diarias Anuales.....	62
5.9. TENDENCIA DE CAMBIO DE LAS INTENSIDADES.....	69
5.10. COMPARACIONES ENTRE LAS CURVAS IDF EN LA CIUDAD DE... CARTAGENA.	71
5.10.1. Curvas IDF Herrera, J y Llamas, A 2018 Vs Curvas IDF Almanza, Martínez y Velásquez 1995.....	72
Comparación de las ecuaciones entre UDC 2018 y UDC 1995.....	72
Comparación de las intensidades entre UDC 2018 y UDC 1995.	73
Comparación entre los estudios de UDC 2018 y UDC 1995.....	76
5.10.2. Curvas IDF Herrera, J y Llamas, A 2018 Vs Curvas IDF Barrios, L 2008	77
Comparación de las ecuaciones UDC 2018 y UDC 2008.....	77



Comparación de las intensidades UDC 2018 y UDC 2008	77
Comparación de las metodologías entre UDC 2018 y UDC 2008.....	80
5.10.3. Comparación de curvas IDF para el año 2010 de la ciudad de Cartagena .	80
Comparación de las ecuaciones entre IDEAM 2016 y UTB 2012	81
Comparación de las intensidades entre IDEAM 2016 y UTB 2012	82
5.10.4. Curvas IDF Herrera, J y Llamas, A 2018 Vs Curvas IDF Puello, S; Romero, E 2012	84
Comparación de las ecuaciones entre UDC 2018 y UTB 2012	84
Comparación de las intensidades entre UDC 2018 y UTB 2012.....	85
Comparación de las metodologías entre UDC 2018 y UTB 2012	88
5.10.5. Curvas IDF Herrera, J y Llamas, A 2018 Vs Curvas IDF GIREH 2016 ...	88
Comparación de las ecuaciones entre UDC 2018 e IDEAM 2016	88
Comparación de las intensidades entre UDC 2018 e IDEAM 2016.....	89
Comparación entre las metodologías entre UDC 2018 e IDEAM 2016.....	91
5.10.6. Curvas IDF Herrera, J y Llamas, A 2018 VS Curvas IDF Jaraba, J 2017 .	92
Comparación de las ecuaciones entre UDC 2018 y TECNAR 2017	92
5.10.6.1. Comparación de las intensidades entre UDC 2018 y TECNAR 2017	92
Comparación de las metodologías entre UDC 2018 y TECNAR 2017	94
6. CONCLUSIONES.....	97
7. RECOMENDACIONES	100
8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	101



LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ubicación geográfica de la ciudad de Cartagena de Indias.	33
Ilustración 2. Ubicación geográfica de las estaciones climatológicas en la ciudad de Cartagena de Indias.	34
Ilustración 3. Ejercicio de lectura de Pluviogramas y tabulación.	39
Ilustración 4. Banda pluviográfica tipo digitalizada.	45
Ilustración 5. Registro con traza sobre el nivel máximo de escala vertical.	46
Ilustración 6. Poca presión de aguja sobre el trazo.	46
Ilustración 7. Recuperación del pluviograma a falta de tinta y presión.	47
Ilustración 8. Registro con gotas de agua.	47
Ilustración 9. Pluviograma con reloj detenido.	48
Ilustración 10. Pluviógrafo con Sifón tapado.	48



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Desarrollo de la metodología de forma resumida y gráfica. Fuente: Elaborado Autores.	36
Figura 2. Curvas de Intensidad Duracion y Frecuencia (IDF) 1970 - 2016 Estacion: Aeropuerto Rafael Nuñez.....	61
Figura 3. Precipitación total anual en la estación Aeropuerto Rafael Núñez de Cartagena. Fuente: Elaborado autores.....	65
Figura 4. Precipitaciones máximas diarias para la serie histórica de estudio. Fuente: Elaborado autores.....	66
Figura 5. P anual y P _{MAX-D} para la estación Aeropuerto Rafael Núñez de la ciudad de Cartagena. Fuente: Elaborado autores.	68
Figura 6. Intensidades máximas para cada duración. Fuente: Elaborado Autores.....	69
Figura 7. Comparacion entre Curvas de Intensidad Duracion y Frecuencia (IDF) UDC 2018 VS UDC 1995.	74
Figura 8. Comparacion entre Curvas de Intensidad Duracion y Frecuencia (IDF) UDC 2018 VS UDC 2008.	78
Figura 9. Comparacion entre Curvas de Intensidad Duracion y Frecuencia (IDF) IDEAM 2016 VS UTB 2012.....	83
Figura 10. Comparacion entre Curvas de Intensidad Duracion y Frecuencia (IDF) UDC 2018 VS UTB 2012.....	86
Figura 11. Comparacion entre Curvas de Intensidad Duracion y Frecuencia (IDF) UDC 2018 VS IDEAM 2016.	90
Figura 12. Comparacion entre Curvas de Intensidad Duracion y Frecuencia (IDF) UDC 2018 VS UDC 1995.	93



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Bandas pluviográficas analizadas y descartadas.	38
Tabla 2. Ejemplo del análisis de los datos de precipitación para cada uno de los años de estudio, para la obtención de la tendencia de cambio de las precipitaciones.....	42
Tabla 3. Ejemplo de la elaboración de la tabla P anual y P _{MAX-D} , para cada los años de estudio.	43
Tabla 4. Tabulación de lecturas Pluviogramas.....	49
Tabla 5. Resumen multi-anual de las alturas máximas de precipitación. Año 1970 – 2016.	50
Tabla 6. Resumen multi-anual de Intensidades Máximas de Precipitación (mm/min) 1970 – 2016.....	51
Tabla 7. Cálculo de Media, Desviación Estándar y valores Máximos y Mínimos de la muestra.	53
Tabla 8. Parámetros de Ajuste calculados para cada Duración en minutos. Estacion: Aeropuerto Rafael Núñez - Cartagena	54
Tabla 9. Aplicación Test de Bondad de Ajuste Chi Cuadrado Gumbel. Duración: 10 min	55
Tabla 10. Valor estadístico - Test de Bondad Chi Cuadrado	56
Tabla 11. Valores críticos para 5 grados de Libertad.....	56
Tabla 12. Variable reducida Y_t para diferentes periodos de retorno T_r	57
Tabla 13. Intensidades para cada periodo de retorno y duración. Estación: Aeropuerto Rafael Núñez 1970 – 2016 (Cartagena).....	58
Tabla 14. Resumen regresión multi-lineal.....	59
Tabla 15. Valores de Intensidades con Ecuación propuesta por Llamas y Herrera (1970-2016).	60
Tabla 16. Datos de la precipitación anual (P anual) y datos de la precipitación estipulados por el IDEAM (P anual IDEAM).....	62
Tabla 17. datos de precipitación anual y precipitación máxima diaria.	64



Tabla 18. Porcentaje del número de años entre los intervalos de precipitación anual (P anual).....	65
Tabla 19. Año con mayor y con menor acumulación de precipitación en la serie histórica.	66
Tabla 20. Porcentaje de P _{MAX-D} entre los intervalos de precipitación.	67
Tabla 21. Día con mayor y con menor acumulación de P _{MAX-D} entre los años de la serie histórica estudiada.	67
Tabla 22. Coeficientes de correlación y determinación para la línea recta de tendencia.	69
Tabla 23. Ecuación de la recta, coeficiente r y r para cada duración.	70
Tabla 24. Investigaciones sobre las Curvas IDF en Cartagena.	71
Tabla 25. Comparación de ecuaciones que modelan las curvas IDF 2018 Vs 1995.	72
Tabla 26. Intensidades obtenidas por la ecuación de Herrera, J y Llamas, A 2018.	73
Tabla 27. Intensidades obtenidas por la ecuación de Almanza, All 1995.	73
Tabla 28. Diferencia porcentual entre las intensidades UDC 2018 y UDC 1995.	75
Tabla 29. Comparación de ecuaciones que modelan las curvas 2018 Vs 2008.	77
Tabla 30. Intensidades obtenidas por la ecuación de Herrera, J y Llamas, A 2018.	77
Tabla 31. Intensidades obtenidas por la ecuación de Barrio, L 2008.	78
Tabla 32. Diferencia porcentual entre las intensidades UDC 2018 y UDC 2008.	79
Tabla 33. Comparación de ecuaciones que modelan las curvas GIREH Vs UTB.	81
Tabla 34. Valores para la ecuación presentada por IDEAM 2016.	81
Tabla 35. Intensidades obtenidas por la ecuación de GIREH 2016.	82
Tabla 36. Intensidades obtenidas por la ecuación de Puello, S y Romero, E 2012.	82
Tabla 37. Diferencia porcentual entre las intensidades IDEAM 2016 y UTB 2012.	83
Tabla 38. Comparación de ecuaciones que modelan las curvas 2018 Vs UTB 2010. ...	84
Tabla 39. Intensidades obtenidas por la ecuación de Herrera, J y Llamas, A 2018.	85
Tabla 40. Intensidades obtenidas por la ecuación de Puello, S y Romero, E 2012.	85
Tabla 41. Diferencia porcentual entre las intensidades UDC 2018 y UTB 2012.	86
Tabla 42. Datos de las intensidades máximas en el año 1975 Puello, S y Romero, E 2012.	87
Tabla 43. Datos de las intensidades máximas año 1975, por autores.	87



Tabla 44. Comparación de ecuaciones que modelan las curvas 2018 Vs IDEAM 2010.	88
Tabla 45. Intensidades obtenidas por la ecuación de Herrera, J y Llamas, A 2018.	89
Tabla 46. Intensidades obtenidas por la ecuación de GIREH 2016.	89
Tabla 47. Diferencia porcentual entre las intensidades UDC 2018 e IDEAM 2016.	91
Tabla 48. Comparación de ecuaciones que modelan las curvas 2018 Vs TECNAR 2017.	92
Tabla 49. Intensidades obtenidas por la ecuación de Herrera, J y Llamas, A 2018.	92
Tabla 50. Intensidades obtenidas por la ecuación de Jaraba, J 2017.	93
Tabla 51. Diferencia porcentual entre las intensidades UDC 2018 y TECNAR 2017...	94
Tabla 52. Resumen de diferencias porcentuales de los valores establecidos entre los valores establecidos por autores y estudios considerados.	95



INTRODUCCION

Uno de los principales problemas que aqueja la ciudad de Cartagena de Indias son las innumerables inundaciones que ocurren en las temporadas invernales, su causalidad está ligada a la corta respuesta de los sistemas de captación, a la alteración de cuencas naturales en zonas de escorrentía, a las invasiones de terrenos aledaños a los canales o sobrepoblaciones y a la falta de cultura por vertimiento de residuos sólidos sobre dichas estructuras generando taponamientos u obstrucciones a rejillas, y canales entre otros.

Por esta razón, se hace menester un estudio en la ciudad de Cartagena sobre el factor detonante de esta problemática, es decir, las precipitaciones. Una de las metodologías empleadas para evaluar el comportamiento de las precipitaciones en relación a su intensidad, duración y frecuencia son las curvas IDF. Estas curvas son una de las herramientas utilizadas para la cuantificación, modelación y análisis de precipitaciones en el manejo de aguas lluvias y la prevención de desastres en el campo de la ingeniería. Las curvas IDF revisten una especial importancia en el control de avenidas, diseño de estructuras (acueductos, puentes), proyectos de riego y otros. (Montealegre J, 1990). El uso de esta técnica de las curvas IDF es de gran importancia en el diseño de obras de ingeniería.

En la ciudad de Cartagena se han realizado varias actualizaciones, en 1995 se desarrolló el pre diseño del alcantarillado pluvial del sector de San Vicente de Paul (Cartagena de Indias), para el cual fue necesario la obtención de las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia comprendiendo los años 1970 al 1994 Almanza, et al (1995). En el año 2007 se realizó una actualización abarcando el periodo de estudio desde el año 1970 al 2005, en el año 2012 se realizó una actualización por parte de la Universidad Tecnológica de Bolívar en el que comprenden la serie desde el año 1970 al 2010 y finalmente un estudio realizado por la Fundación Tecnológica Antonio de Arévalo publicado en el año 2016 evalúa la actualización de las curvas IDF entre los años 1970 al 2015 a partir de los datos hidrológicos procesados en el estudio realizado por Puello y Romero (2012).

En respuesta a la problemática de inundaciones, el Distrito de Cartagena busca implementar el Plan Maestro de Drenajes Pluviales del año 2007 siguiendo los lineamientos



del POT (Plan de Ordenamiento Territorial) donde se da como objetivo “Definir la política del Distrito en cuanto al manejo técnico, institucional, legal y ambiental de las estructuras que integran la red de drenaje pluvial existente, y de las que se deberían proyectar para mejorar en el área del suelo urbano y para ampliar su cobertura a la zona de expansión urbana” por lo cual es importante verificar la viabilidad de aplicar curvas IDF. Debido a las diferencias en el análisis, la extracción de los datos y en la metodología aplicada se pueden presentar irregularidades por valores en exceso o por escasos de información en la obtención de las curvas IDF más recientes en la ciudad de Cartagena.

Como resultado de las irregularidades en la obtención de las curvas IDF, los diseños ingenieriles se encuentren posiblemente sobredimensionados, generando sobrecostos e inversiones mayores, o por el contrario si el diseño se encuentre subdimensionado este será susceptible a fallas y desbordes.

Actualmente muchos de los diseños realizados en la ciudad de Cartagena se utilizaron las curvas IDF que datan del año 1995 por parte de Almanza Ester, Martínez Omar y Velásquez Rubén. Dado que han pasado más de 21 años desde que se realizó el estudio en mención y se cuenta con un extenso registro de información que posibilita la precisión de las curvas IDF, entonces, se busca dar respuesta a la pregunta ¿Será significativa la variación de las Intensidades, Precipitaciones y de las curvas IDF realizadas en el año 1995 con las curvas actualizadas al año 2016 a partir de la serie histórica de datos registrados anualmente en el Aeropuerto Rafael Núñez de la Ciudad de Cartagena? Como futuros ingenieros civiles pretendemos a través de este proyecto, dotar a la ciudad de Cartagena con la actualización de dichas Curvas IDF, para contar con una herramienta actualizada en el ejercicio profesional de la ingeniería en futuros diseños hidráulicos y para contribuir en la prevención de desastres.

Esta investigación tiene como objetivo principal la actualización de las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia de la Estación Aeropuerto Rafael Núñez en la Ciudad de Cartagena analizando toda la serie histórica de datos recopilada desde el año 1970 hasta el año 2016 utilizando el método probabilístico que mejor se ajuste a la serie entre Gumbel, Weibull, Pearson Tipo III y Valor Extremo Generalizado (GEV), además, a partir de la información extraída evaluar la tendencia de cambio en las precipitaciones que ha ocurrido a



lo largo del periodo de estudio y finalmente establecer comparaciones entre las curvas IDF obtenidas y las curvas IDF de proyectos anteriormente desarrollados en la ciudad de Cartagena. La metodología escogida para la realización de las curvas IDF, se encuentra estandarizada por parte del IDEAM, además se investigaron como soporte varias referencias de estudios a nivel nacional e internacional.

Con este trabajo de grado, se busca reabrir esta línea de investigación y evaluar su variación por efecto del paso del tiempo con el firme propósito de aplicar los conocimientos aprendidos durante el periodo de formación como ingenieros civiles.



1. MARCO DE REFERENCIA

1.1. Marco Teórico

En este capítulo se abarcarán ciertos términos necesarios para comprender la investigación en cuestión.

La precipitación se refiere a todas las maneras de humedad, que llegan a la superficie terrestre producidas en la atmósfera que son: lluvia, granizo, rocío, neblina, nieve o helada (Monsalve 2002).

La intensidad (I), es la tasa temporal de precipitación, es decir, la profundidad por unidad de tiempo (mm/hora) y se expresa como $I = P/Td$, donde P corresponde a la profundidad de lluvia en mm o pulg. Y **Td** es la duración dada usualmente en horas. Dicho de otro modo, como la cantidad de agua que cae por unidad de tiempo en el espacio (Chow et al, 1994).

La duración, Es el tiempo que tarda la lluvia precipitándose sobre un área determinada (Arrieta, 2014).

La frecuencia, la frecuencia de una lluvia es el número de veces que una precipitación de cierta magnitud es igualada o excedida, en un determinado número de años. La frecuencia está estrechamente relacionada con el tiempo de retorno (Arrieta, 2014).

Periodo de Retorno, o intervalo de recurrencia, se define como el máximo tiempo que transcurre entre dos eventos que igualan o sobrepasan un valor determinado. Así cuando se dice que una lluvia tiene una frecuencia de 1, 2,5 años, se refiere a las lluvias que se presentan cada 1,2, o 5 años en promedio (Arrieta, 2014).

El periodo de retorno se estima utilizando la siguiente expresión:

$$T = \frac{n+1}{m} \quad \text{ó} \quad T = \frac{n}{m} \quad \text{Ec. 1.0}$$

Donde T es el periodo de retorno en años, n es el número de años del registro y m el número de orden de la lluvia.



1.1.1. MEDICION DE LAS PRECIPITACIONES

Para la medición de los eventos de precipitación se utilizan instrumentos como el pluviómetro y el pluviógrafo.

El pluviómetro, es el instrumento más sencillo y más comúnmente empleado para medir la cantidad de lluvia. Consta de varios elementos, un recipiente metálico en forma cilíndrica; en su parte superior tiene una boca circular que recibe el agua lluvia la cual pasa por medio de un embudo a otro recipiente, también cilíndrico, denominado colector en el cual se almacena el agua para su posterior medición (Ver Anexo 1).

Existen dos métodos para medir la lluvia recogida en el pluviómetro, con probeta y con rejilla. El primero es más conveniente para los pluviómetros de lectura diaria, mientras que para los de lectura semanal o mensual es preferible el segundo.

Las observaciones de precipitación se realizan diariamente a las 7 de la mañana. La cantidad de lluvia caída en un día (total diario) se cuenta desde las 7 de la mañana de ese día hasta las 7 de la mañana del día siguiente. (HIMAT, 1987).

Los pluviógrafos son pluviómetros que permiten obtener un registro continuo de las caídas de lluvia. Se utilizan para determinar las horas de comienzo y terminación de la lluvia y determinar la intensidad de la lluvia en todo momento.

Existen diferentes clases de pluviógrafos, el que se usa en Colombia es de flotador (Ver Anexo 2).

En este tipo de instrumento la lluvia recogida va a parar en un recipiente que contienen un flotador liviano; el movimiento vertical del flotador, como consecuencia de la elevación del nivel del agua, se transmite por medio de un mecanismo apropiado a la pluma que traza el diagrama.

El instrumento dispone de un medio automático para desocupar rápidamente el recipiente cada vez que esté lleno y para que la pluma vuelva a la parte baja del **pluviograma**. (HIMAT, 1987).



El pluviograma, es un gráfico cronológico en el que se establece el total de lluvia precipitada desde el instante inicial y para diferentes intervalos de tiempo. Las unidades más comunes a graficar son milímetros de lluvia y tiempo en horas. El pluviograma permite establecer, además el total de precipitación, la intensidad máxima y la media, así como la duración total del aguacero. El pluviograma se valorará como la altura de la capa de agua (mm) y para expresarla en volumen basta multiplicar dicha altura por la superficie de la cuenca (Montealegre E, 1990).

1.1.2. CURVAS INTENSIDAD, DURACIÓN Y FRECUENCIA (IDF)

Las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), son curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o periodo de retorno. Según Témez, 1978, citado por Pizarro, et al. (SF). Junto con estas, surgen otros elementos a considerar, como son la intensidad de precipitación, la frecuencia o la probabilidad de excedencia de un determinado evento.

Otra definición, más completa y detallada es propuesta por Montegui y Lopez (1990) donde dicen que las curvas IDF representan a las duraciones en las abscisas y a la altura o intensidad de precipitación en las ordenadas, donde cada curva representada corresponde a una frecuencia (o período de retorno), de tal forma que las gráficas de estas curvas representan la intensidad media en intervalos de diferente duración, correspondiendo todos los puntos de una misma curva a un idéntico período de retorno.

1.1.3. MÉTODOS PARA LA ELABORACIÓN DE LAS CURVAS DE INTENSIDAD, DURACIÓN Y FRECUENCIA (IDF)

Para realizar las curvas IDF, se requiere la disposición de la información de los instrumentos de medición de las precipitaciones, sea del pluviómetro o pluviógrafo y además se requiere el cálculo de las intensidades.

1.1.3.1. Análisis de Frecuencias

Cuando la información de lluvia local está disponible, las curvas IDF pueden desarrollarse utilizando el análisis de frecuencia. Una distribución comúnmente utilizada en el análisis de



frecuencias de lluvia es la distribución de valor extremo tipo I o Gumbel. Para cada una de las duraciones seleccionadas, las profundidades de las lluvias máximas anuales se extraen de los registros históricos de lluvias y luego se aplica el análisis de frecuencia a la información anual (Chow et al, 1994).

1.1.3.2. Modelando una Ecuación para Las Curvas IDF

Las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia también pueden expresarse como ecuaciones con el fin de sistematizar la lectura de la intensidad de lluvia de diseño de una gráfica. Wenzel (1982) dedujo, para algunas ciudades de los Estados Unidos, una función con unos coeficientes regionales para utilizarse en una ecuación de la forma:

$$i = \frac{c}{T_d^e + f} \quad \text{Ec. 2.0}$$

Donde i es la intensidad de la lluvia de diseño, T_d es la duración y C , e y f son coeficientes que varían con el lugar y el periodo de retorno. También fue posible extender la ecuación anterior para incluir el periodo de retorno T utilizando la Ecuación 2.1, (Chow et al, 1994)

$$i = \frac{c * T^m}{T_d + f} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Monsalve (2002), procura analizar las relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia de las lluvias observadas, determinándose para los diferentes intervalos de duración de la lluvia el tipo de ecuación y el número de parámetros de esa ecuación que mejor caracterizan las relaciones y propone la ecuación.

$$i = \frac{c}{(t + t_0)^n} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde, i es la intensidad de precipitación máxima en mm/hr, t es la duración de la lluvia, en minutos, t_0 , C y n son constantes y parámetros por determinar.

En general, C se relaciona con el periodo de retorno T , en años, por medio de una ecuación del tipo.

$$C = KT^m \Rightarrow i = \frac{KT^m}{(t + t_0)^n} \quad \text{Ec. 2.4}$$



Siendo K y m constantes por determinar.

1.1.4. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD

Una distribución de probabilidad son todos los posibles valores que resultan de un experimento aleatorio. Estas distribuciones, son funciones representativas de la probabilidad de ocurrencia en una serie pluviográfica. Existe un sinnúmero de funciones de probabilidad que, de acuerdo a sus parámetros de ajuste, se adaptan de mejor manera a las series de precipitaciones máximas diarias. (Acosta, Sierra 2013). Para el análisis de las precipitaciones aplican las siguientes distribuciones de probabilidad seleccionadas, por ser las más recomendadas para el análisis de datos puntuales (Chow et al 1994) y para seguir algunos lineamientos utilizados por parte del IDEAM en la construcción de las curvas IDF:

Distribución de Gumbel: Es una función de probabilidades usualmente utilizadas para valores máximos aleatorios sacados de las poblaciones suficientemente grandes. Gumbel estableció que si $x_1, x_2 \dots x_n$ son los valores extremos observados en n muestras de igual tamaño N, la probabilidad de ocurrencia cuando n y N tienden a infinito, se aproxima a la expresión (Chow et al 1994):

$$F(x) = \exp \left[- \exp \left(- \frac{x - \mu}{\alpha} \right) \right] \quad - \infty \leq x \leq \infty \quad \text{Ec. 3.0}$$

Donde:

$$\alpha = \frac{\sqrt{6} * S}{\pi} \quad \text{Ec. 3.1}$$

$$\mu = \bar{x} - 0.5772 * \alpha \quad \text{Ec. 3.2}$$

El parámetro μ es la moda de la distribución (punto de máxima densidad de probabilidad) y depende de la media (\bar{x}) y la desviación estándar (S).

Una variable reducida para esta función puede definirse como:

$$y = \frac{x - \mu}{\alpha} \quad \text{Ec. 3.3}$$

Sustituyendo en la Ec. 3.0 se encuentra:



$$F(x) = \exp [- \exp(-y)] \quad \text{Ec. 3.4}$$

Resolviendo para y:

$$y = - \ln \left[\ln \left(\frac{1}{F(x)} \right) \right] \quad \text{Ec. 3.5}$$

Para diferentes periodos de retorno T:

$$F(x_T) = \frac{T}{T-1} \quad \text{Ec. 3.6}$$

Sustituyendo en la Ec. 3.5,

$$y_t = - \ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \quad \text{Ec. 3.7}$$

Finalmente, para la distribución de Gumbel, y_t relaciona la magnitud del evento máximo mediante la ecuación:

$$x_t = \mu + \alpha y_t \quad \text{Ec. 3.8}$$

Distribución de Valor Extremo Generalizada (GEV): Las distribuciones de valores extremos seleccionados de conjuntos de muestras de cualquier distribución de probabilidad convergen en una de las tres formas de *distribución de valor extremo*, llamadas (Chow et al 1994):

- Para $K = 0$ Valor Extremo Tipo I
- Para $K < 0$ Valor Extremo Tipo II $\Rightarrow \left(\mu + \frac{\alpha}{k} \right) \leq x \leq \infty$
- Para $K > 0$ Valor Extremo Tipo III $\Rightarrow -\infty \leq x \leq \left(\mu + \frac{\alpha}{k} \right)$

Para los tres casos, se supone que α es positivo.

Relacionados en una función así.

$$F(x) = \exp \left[- \left(1 - k \left(\frac{x-\mu}{\alpha} \right) \right)^{\frac{1}{k}} \right] \quad \text{Ec. 4.0}$$



Dónde, μ y α son parámetros que deben ser determinados aplicando las ecuaciones 3.1 y 3.2 respectivamente.

Distribución de Pearson Tipo III: (Chow et al 1994) Cuando la información es muy asimétrica positivamente, se utiliza una transformación Log para reducir su asimetría, expresada de la siguiente forma:

$$F(x) = \frac{1}{2\Gamma(\beta)} \int_0^x e^{-\left(\frac{x-\delta}{\delta}\right)\left(\frac{x-\delta}{\delta}\right)} dx \quad \text{Ec. 5.0}$$

Donde los parámetros de la función de distribución están relacionados con la media (\bar{x}) y la desviación estándar (S) de la muestra, como se muestra a continuación:

$$\alpha = \frac{S}{\sqrt{\beta}} \quad \text{Ec. 5.1}$$

$$\beta = \left(\frac{2}{\gamma}\right)^2 \quad \text{Ec. 5.2}$$

$$\delta = \bar{x} - \alpha\beta \quad \text{Ec. 5.3}$$

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^3}{\frac{n}{S^3}} \quad \text{Ec. 5.4}$$

Donde,

- γ es el Coeficiente de Sesgo
- e Constante de Neper
- α, β, δ son Parametros.
- S es la Desviación Estándar.
- \bar{x} es la Media Aritmética.



De igual forma, para el ajuste del Test Chi Cuadrado, la variable estandarizada de la función de probabilidad de Pearson Tipo III es:

$$y = \frac{x - \delta}{\alpha} \quad \text{Ec. 5.5}$$

Distribución de Weibull: Es un método usado para la representación de los eventos de una determinada serie en papel probabilístico que permite establecer contraste con los resultados de las distribuciones estadístico-probabilísticas. Es recomendado para las series máximas anuales (Chow et al, 1994).

Se expresa mediante:

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad \text{Ec. 6.0}$$

Donde,

$$\beta = \frac{\pi}{s\sqrt{6}} \quad \text{Ec. 6.1}$$

$$\alpha = \exp\left(x + \frac{0.5772}{\beta}\right) \quad \text{Ec. 6.2}$$

- Siendo $x \geq 0$
- Parámetro de forma $\alpha > 0$
- Parámetro de escala $\beta > 0$

Como **test de bondad Chi-Cuadrado:** La bondad del ajuste de una distribución de probabilidad puede probarse comparado los valores teóricos y muestrales de las funciones de frecuencia relativa o frecuencia acumulada. La prueba estadística X^2 esta dada por (Chow et al, 1994),

$$X_c^2 = \sum_{i=1}^m \frac{n [f_S(x_i) - P(x_i)]^2}{P(x_i)} \quad \text{Ec. 7.0}$$

$$p = 1 - \alpha \quad \text{Ec. 7.1}$$



$$k = m - v - 1 \quad \text{Ec. 7.2}$$

Dónde:

X_c^2 = Valor Estadístico Chi-Cuadrado Calculado

$f_s(x_i)$ = Frecuencia Relativa Observada

$P(x_i)$ = Probabilidad Calculada

m = Numero de Intervalos de la Muestra

p = Probabilidad acumulada

α = Percentil Chi-Cuadrado

k = Grados de libertad o Grado de probabilidad

v = Constantes de la distribución de probabilidad.



1.2.ESTADO DEL ARTE

La actualización de las curvas Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) es un ejercicio periódico. Fenómenos como la Niña y el Niño generan irregularidades en las intensidades o duraciones de las lluvias una razón más para contar con un ajuste o la actualización de las curvas IDF que expresen las condiciones ideales y para diseños ingenieriles.

Puello, S y Romero, E (2012), desarrollaron el estudio sobre la elaboración de las curvas IDF utilizando distribuciones mixtas de probabilidad y considerando el efecto de vientos ciclónicos, eventos macro climáticos y el cambio climático, utilizando las dos precipitaciones máximas en los meses escogidos en los años de estudio, adicionando los registros pluviográficas para el periodo comprendido entre 1995-2010 y generando la ecuación de las curvas de Intensidad-Duración -Frecuencia para el periodo comprendido entre 1970-2010 bajo la influencia de los vientos huracanados y el fenómeno de la niña.

La Universidad de Cartagena ha tenido participación en los estudios acerca de las curvas IDF, Cataño, N y Nieves, D (2003), generaron unas curvas IDF para el departamento de la Guajira, empleando los métodos de probabilidad de Gumbel, Weibul, Distribución de Valores Extremos y como método de ajuste el Test Chi-Cuadrado, para lograr así la obtención de dichas curvas con sus respectivas ecuaciones de diseño.

El Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos (GIREH, 2016), de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, fue contratado por parte del IDEAM para realizar las curvas IDF de la estación Rafael Núñez de la ciudad de Cartagena (1970-2010), utilizando el método de probabilidad de Gumbel y los parámetros de estimación L-momentos.

En el ámbito internacional, el Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe (PHI) y la Universidad de Talca, (PHI, UNESCO. 2007) publican un documento técnico sobre las curvas IDF para el centro sur de Chile, con el principal objetivo de conseguir un mejor conocimiento de los recursos de agua dulce de esta región utilizando las curvas IDF, que para su elaboración se utilizaron los métodos de probabilidad de Gumbel y realizando las pruebas de bondad mediante los Test de Chi – Cuadrado y



Kolmogorov – Smirnov, obteniendo mediante esta metodología la construcción de las curvas IDF para distintos periodos de retorno.

En la Universidad de El Salvador, Márquez, A y Melara, R (2014) elaboraron las curvas IDF para la zona oriental de El Salvador, teniendo como objetivo principal actualizar los registros de intensidades máximas anuales de precipitación para la generación de curvas Intensidad, Duración y Frecuencia para las estaciones meteorológicas de la zona oriental, basados en los métodos de probabilidad de Gumbel y utilizando los métodos de prueba de Chi – Cuadrado y Kolmogorov – Smirnov.

Por último, Fusek, M; Hellebrand, R y Michálek, J (2016) en la Universidad de Tecnológica Brno en Republica Checa realizaron un estudio, que implicó la recolección de los registros de seis estaciones del Instituto Hidrometeorológico Checo, que fueron analizados para cumplir con el objetivo de actualizar las curvas IDF, mediante la aplicación de los métodos de Distribución de Valores Extremos, para poder comparar las curvas actualizadas con las producidas por un procedimiento empírico en 1958, con el fin encontrar diferencias y factores entre ambos conjuntos de curvas, dando como resultado que las curvas realizadas empíricamente se encuentran fuera del intervalo de confianza, justificando una actualización de las curvas IDF.

Svensson, C y Jones, D (2010) realizaron una recopilación bibliográfica en diferentes países, sobre los diferentes métodos que se aplican para la estimación de las curvas IDF, concluyen que para la determinación de las IDF influyen características como el territorio, el relieve, la ubicación de las estaciones de estudio y la longitud de la serie de años de registros para el estudio. En Canadá se utiliza una distribución probabilística de Gumbel y el método de Momentos; en Suecia se utiliza una regresión de ajuste para el método de Gumbel y Valor Extremo Generalizado (GEV); en Francia al igual que en Suecia se utiliza el método de Valor Extremo Generalizado (GEV) para series mayores a 25 años y también se utiliza el método de Gumbel; en Alemania se utiliza el método de Gumbel con los Máximos Valores Anuales. En Estados Unidos utilizan diferentes distribuciones de probabilidad para cada región y para cada duración como el método de L-momentos o los Máximos Anuales; en Sudáfrica se utiliza GEV y L-Momentos; en Nueva Zelanda se utiliza GEV; en Australia se utiliza al igual



que en los anteriores países GEV y en el Reino Unido se utiliza el método de Gumbel con una técnica de ajuste especial. Cada país utiliza diferentes distribuciones estadísticas y métodos de ajustes que permiten estimar confiablemente las precipitaciones, pero en general, la distribución de Valor Extremo Generalizado (GEV) es la más común entre los países anteriormente mencionados. Por tanto, la utilización de los métodos probabilísticos mencionados en la metodología de este trabajo de grado, fueron escogidos por ser los más utilizados en el mundo y también a su vez para analizar de estos métodos cual es el que mejor se ajusta a los eventos de las precipitaciones que se presentan en la ciudad de Cartagena entre 1970 y 2016.



1.3.ANTECEDENTES

Los estudios propios u originarios de la ciudad de Cartagena de Indias acerca de las curvas IDF han tomado gran relevancia en los últimos años, dejando a un lado la investigación intermitente a lo largo del tiempo, por tanto, una de las tareas importantes dentro de esta investigación es la consulta y recolección del material bibliográfico de dichos estudios que se han llevado a cabo en Cartagena, para tener un punto de vista global de cómo se ha tratado el tema desde el ámbito local.

Ahora se traerán a mención los diferentes estudios encontrados que guardan relación con el objetivo de este trabajo de grado.

En 1995 se desarrolló el pre diseño del alcantarillado pluvial del Sector de San Vicente de Paul (Cartagena de Indias), para el cual fue necesario la obtención de las curvas IDF de la estación Aeropuerto Rafael Núñez. El estudio utilizó el registro del periodo comprendido entre 1970 a 1994 (25 años de registros), una característica particular del estudio fue la utilización de todos los registros y no únicamente los máximos, haciendo ajustes por procedimiento gráfico (Almanza, et al 1995).

Barrios (2007), realizó un trabajo de grado que tuvo como objetivo establecer los parámetros regionales para la función de la intensidad y además se buscó determinar el impacto producido con la utilización de la nueva o la anterior función para la IDF en la ciudad de Cartagena, con el fin de actualizar las curvas IDF para el periodo comprendido entre los años de 1970 al año 2005.

Por último, Jaraba (2017), realizó un estudio donde se comparan los resultados obtenidos por la Universidad de Cartagena en las curvas IDF del año 1995 y las curvas realizadas por la Universidad Tecnológica de Bolívar en 2012, además se tomaron los registros entre el periodo de 1970 hasta el 2015 para obtener por medio del Software HYFRAN PLUS (Hydrological Analyiys PLUS DSS) las curvas IDF para la ciudad de Cartagena y conjuntamente a esto, presentan su ecuación que modela las curvas IDF bajo los parámetros que en su momento fueron considerados para este estudio.



Al recopilar el material bibliográfico que guarda relación con los objetivos de este trabajo se traen a mención los estudios realizados por la Universidad Tecnológica de Bolívar en el año 2012 y los realizados por la Fundación Tecnológica Antonio de Arévalo TECNAR en el año 2017, siendo los últimos realizados en la ciudad de Cartagena. Al tener unas investigaciones tan recientes, se debe buscar justificaciones valederas para el desarrollo de este trabajo de grado que diferencien nuestro trabajo con los anteriormente realizados en la ciudad. Uno de los puntos interesantes en la metodología de los trabajos mencionados está en la recopilación y el análisis de los datos pluviográficos, donde se tiene que:

- La metodología aplicada en el trabajo de grado por parte de la Universidad Tecnológica de Bolívar, se basó en escoger los meses para cada año que presenten la mayor intensidad seleccionando las dos lluvias de mayor intensidad en determinados meses en un periodo de un año.
- Por parte de la Fundación Tecnológica Antonio Arévalo TECNAR, recopilaron la información mediante cartas pluviográficas, escogiendo las dos de mayor intensidad mensual por año durante el tiempo motivo del estudio.

Las metodologías anteriormente citadas llevan a no considerar la totalidad de la información pluviográfica disponible para cada periodo de estudio, lo cual influye en la construcción de las curvas IDF, dado que si solo se toman dos datos que presenten la mayor intensidad se estaría sesgando el dimensionamiento de las curvas IDF, por esta imprevisión de los datos mensuales y al momento de su utilización en el campo llevará a diseños que no representarán la realidad del modelo, por tanto, este trabajo de grado tendrá como prioridad analizar todos los datos de las precipitaciones de cada día, mes y año con igual relevancia, con el fin de reducir el margen de error al estimar las intensidades por la longitud de los años de estudio, para así obtener unas curvas IDF que se adapten a las condiciones reales a las que van a estar sometidas las estructuras hidráulicas.



2. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Elaborar las curvas IDF de la ciudad de Cartagena de 1970 a 2016 con datos de la estación Aeropuerto Rafael Núñez proporcionados por el IDEAM y utilizando los métodos probabilísticos de Valores Extremos, para comparar los resultados con las curvas IDF proporcionadas por estudios previos realizados para la ciudad de Cartagena y evaluar la tendencia de cambio de las intensidades y precipitaciones a lo largo de los años de estudio.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Elaborar unas nuevas curvas IDF utilizando los métodos probabilísticos de Gumbel, Weibull, Pearson Tipo III y GEV a partir de los registros de precipitaciones puntuales diarias de la estación aeropuerto Rafael Núñez.
- Evaluar la tendencia de cambio de las precipitaciones y de las intensidades, por medio de gráficos y análisis estadísticos, recopilando la información anual de la serie de registros del IDEAM para Cartagena.
- Comparar los resultados obtenidos de las curvas IDF graficadas con las de la Universidad de Cartagena 1995 y 2008, las del IDEAM 2016, las de la Universidad Tecnológica de Bolívar 2012 y las de TECNAR 2017 proporcionada por estudios previamente realizados en la ciudad de Cartagena.



3. ALCANCE

3.1. UBICACION GEOGRAFICA

Este proyecto de investigación se realizó para la ciudad de Cartagena de Indias D.T y C, localizada al norte de la república de Colombia, dentro de las coordenadas $10^{\circ} 25'30''$ de latitud norte y $75^{\circ} 33'55''$ de latitud oeste, limita al norte con el Mar Caribe, al sur con el municipio de San Onofre (Sucre), al este con la población de Turbaco y al oeste con el Mar Caribe, donde se manejan niveles de humedad alrededor del 80%, con una temperatura promedio de aproximadamente 30°C (CIOH 2010). Conjuntamente se tiene como dato de suma importancia que en la ciudad de Cartagena se cuenta con dos estaciones meteorológicas que recolectan datos pluviográficos, una de ellas se encuentra en el Aeropuerto Rafael Núñez de esta ciudad siendo esta la estación principal, normalmente maneja promedio de precipitaciones que oscilan entre los 29 y 244 mm/mes, además la ciudad cuenta con otra estación climatológica en la Escuela Naval de Cadetes Almirante Padilla en el sector de la isla Manzanillo.



Ilustración 1. Ubicacion geográfica de la ciudad de Cartagena de Indias. **Fuente:**

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mapa_del_%C3%A1rea_metropolitana_de_Cartagena_de_Indias.s
vg.

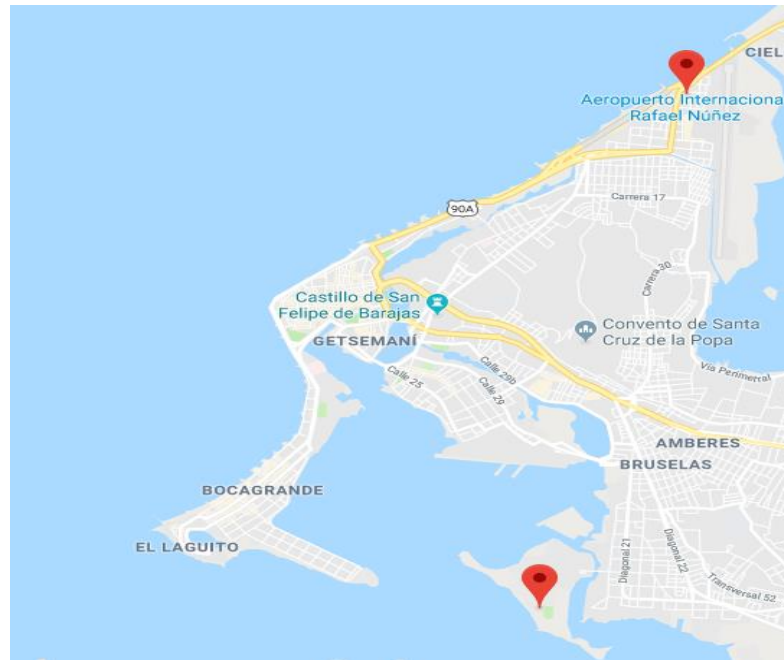


Ilustración 2.Ubicación geográfica de las estaciones climatológicas en la ciudad de Cartagena de Indias.

Fuente: <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Catalogo-Estaciones-IDEAM/n6vw-vkfe/data>

La investigación de este proyecto se desarrolló, en el primer semestre del 2018 entre los meses de Febrero a Junio de ese mismo año. En este espacio de tiempo se analizaron los registros de las precipitaciones año 1970 hasta el año 2016 comprendiendo un periodo de duración de 46 años, estudiando las características de las precipitaciones cuyas variables son la frecuencia, la duración y la más importante en este estudio la intensidad, la que de acuerdo con los métodos de Distribución para Valores Extremos escogidos se tendrán parámetros que dependerán del periodo de retorno y la región donde se va a realizar el estudio. Los métodos escogidos en este trabajo de grado son: Gumbel, Gev, Pearson III y Weibull y como medida de ajuste o de bondad el método Chi-Cuadrado; escogiendo el método probabilístico que más se ajuste a la serie de distribución, buscando como resultado la determinación y actualización de las curvas IDF de la ciudad de Cartagena para los siguientes periodos de retorno: 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Estos resultados brindan a la comunidad educativa y de ingenieros una herramienta que es usada en todos los diseños hidráulicos con énfasis en la recolección de aguas pluviales.



Además de esto, se busca ver la posible influencia en el cambio climático con respecto a las precipitaciones e intensidades, lo cual hace esperar posibles variaciones en las curvas, dejando la puerta abierta a nuevas investigaciones con respecto a la actualización de éstas, se puede dar el caso de que en un futuro se necesiten nuevos parámetros para ajustar las curvas IDF. Esto último a manera de ejemplo de posibles bases para futuras investigaciones.



4. METODOLOGIA

El desarrollo de la metodología comprendió diferentes fases las cuales se presentan de forma esquemática en la Figura 1.

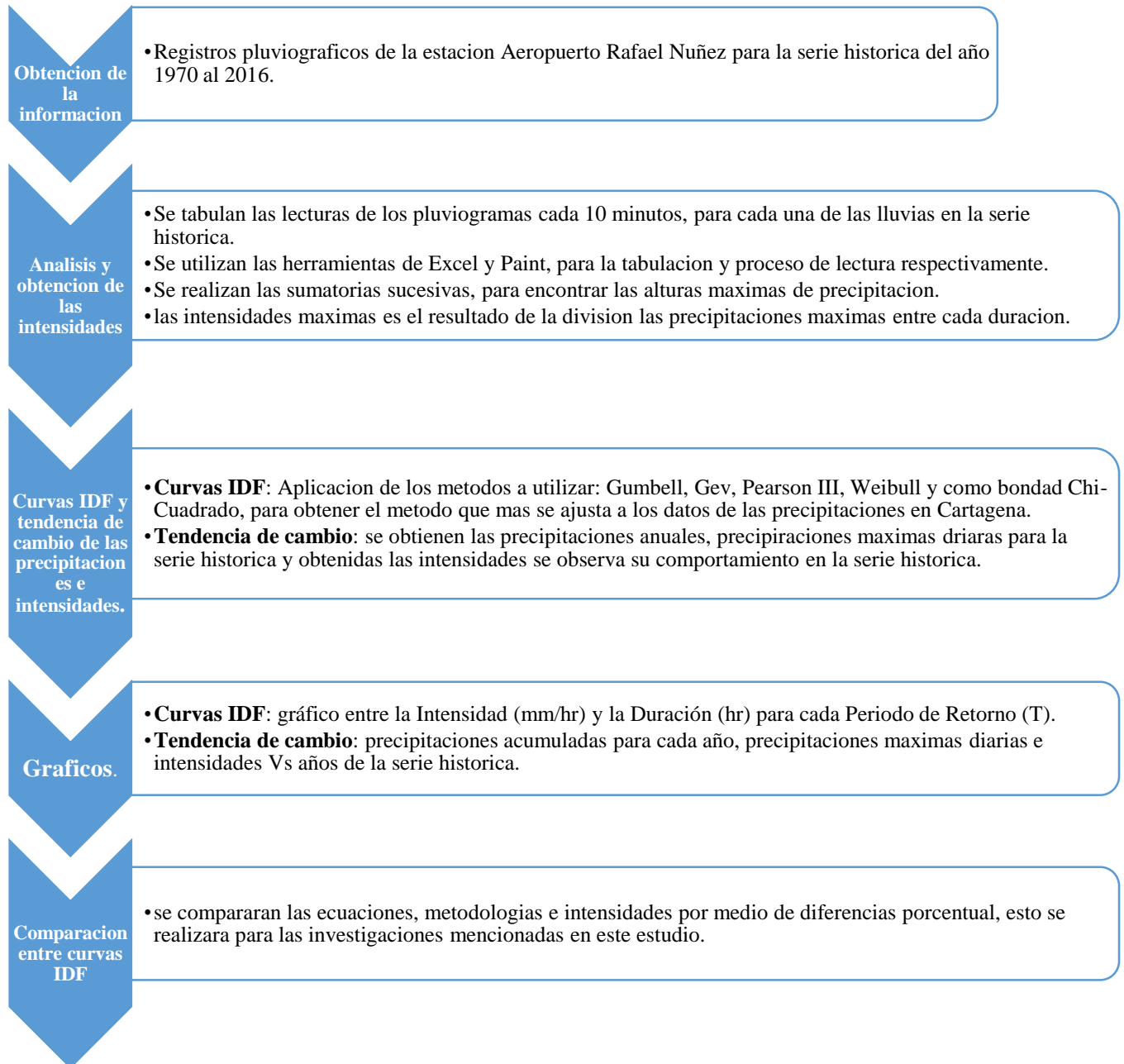


Figura 1. Desarrollo de la metodología de forma resumida y gráfica. **Fuente:** Elaborado Autores.



El **tipo de investigación** que se desarrolló para este trabajo es de tipo descriptiva, dado que se realizó una recopilación de los datos, en este caso la recolección de los pluviogramas que fueron suministrados por parte del IDEAM, para realizar la interpretación y análisis del comportamiento de las precipitaciones a lo largo del periodo de estudio (1970- 2016). Cabe resaltar que es un trabajo de oficina y que la investigación se llevó a cabo en la ciudad de Cartagena a partir del año 2017.

El **diseño de la investigación** es no experimental, y se basó en el análisis puntual de las lluvias, es decir, las variables de precipitación e intensidades máximas para la Estación Aeropuerto Rafael Núñez como estudio de la serie histórica para la actualización de las Curvas IDF considerando 47 años consecutivos (1970- 2016).

4.1.METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LAS CURVAS IDF.

Las fases metodológicas para la obtención de las curvas IDF, teniendo en cuenta la metodología y técnicas aplicadas en el manejo de datos hidrológicos por parte del IDEAM (Montealegre J, 1990) es:

La primera fase es la **Obtención de la información**, comprendió la fase de recopilación de la información correspondiente a las cartas o bandas pluviográficas de la Estación Aeropuerto Rafael Núñez. La información del año 1970 al año 1994 fue tomada de una investigación previa realizada en la Universidad de Cartagena (Almanza, Martínez, Velásquez, 1995) y del año 1995 al 2016 fue solicitada por medio digital a la sede principal del IDEAM en la ciudad de Bogotá D.C y parte extraída directamente en el Área Operativa 02 del IDEAM Sede Barranquilla.

La dificultad de la extracción de la información se encontró en que los registros pluviográficos de la Estación Aeropuerto Rafael Núñez para los años 2012 en adelante solo se hallaban en físico en el Área Operativa 02 del IDEAM en la ciudad de Barranquilla y para los años de 1995 a 2011 se encuentra disponible en formato digital en la ciudad de Bogotá en las oficinas centrales del IDEAM, por esta razón, fue necesario solicitar el envío de la información digital, donde no hubo inconveniente alguno y se solicitó la visita al Instituto



que se encuentra en la ciudad de Barranquilla para realizar el proceso de extracción y digitalización de los pluviogramas.

Para el proceso de digitalización y extracción, fue utilizado un scanner para digitalizar las bandas pluviográficas o registros pluviográficos de los años 2012 hasta el año 2016. Esta información que se extrajo, corresponde a las precipitaciones por día y sus registros por hora para cada año de estudio de la serie histórica. En este proceso el número total de bandas digitalizadas fue de 571 en el área operativa 02 del IDEAM en la ciudad de Barranquilla y 2259 bandas fueron enviadas desde las oficinas centrales del IDEAM en la ciudad de Bogotá D.C, dejando como bandas descartadas 56 debido al mal estado en que se encontraban para un total de 2774 bandas pluviográficas analizadas, como se ilustra en la Tabla 1. Bandas pluviográficas analizadas y descartadas..

Tabla 1. Bandas pluviográficas analizadas y descartadas.

FUENTE	Datos		
	#	ANALIZADOS	DESCARTADOS
Central IDEAM-Bogotá D.C	2259	2211	48
Área Operativa IDEAM 02-Barranquilla	571	563	8
TOTAL	2830	2774	56

Fuente: Elaborado Autores.

La segunda fase es el **análisis e interpretación de datos**, una vez se tuvieron las bandas pluviográficas digitalizadas, mediante un procedimiento visual se tabularon las lecturas realizadas en cada banda pluviográfica para periodos de 10 minutos en todas las lluvias registradas por día para cada año en la serie histórica. Las herramientas base utilizadas para la lectura y tabulación fueron Paint, y Microsoft Excel, como se muestra en la Ilustración 3.

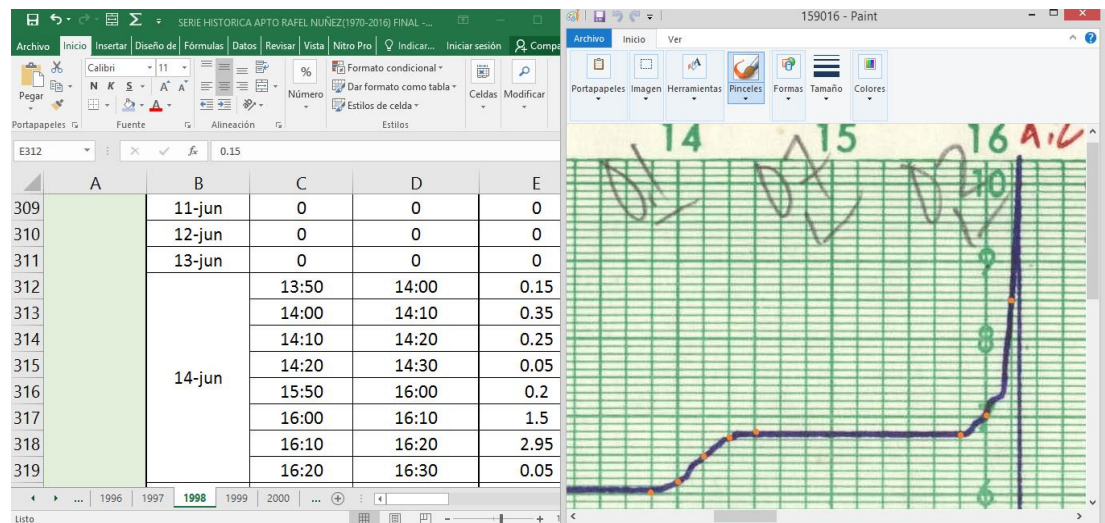


Ilustración 3. Ejercicio de lectura de Pluviogramas y tabulación. Fuente: Elaborado autores.

Para la lectura del Pluviograma se analiza el trazo cada 10 minutos tomando como puntos de corte, el intervalo de estudio. Así, para la primera lectura del ejemplo del día 14 de junio del año 1998 (Ver Ilustración 3), el punto inicial es a las 13:50 y el punto final 10 minutos más tarde es a las 14:00 tabulando la resta de acumulados $P_{\text{final}} - P_{\text{inicial}}$, es decir, $0.15\text{mm} - 0.00\text{mm}$.

Luego de completar las lecturas de todos los Pluviogramas cada 10 min, se procedió a realizar las **sumatorias sucesivas**. El procedimiento que se realizó para la obtención de las sumatorias sucesivas, se inicia con el primer valor para el intervalo de 10 min en un día de estudio, sumando el dato siguiente y se obtiene el primer valor para la sucesión de 20 min; posterior a esto se repite el procedimiento anterior, analizando los eventos de acuerdo a las duraciones de 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 hasta llegar a 100 minutos, esto corresponde al acumulado de 10 intervalos de 10 minutos, con el objetivo de encontrar las alturas máximas de precipitación para cada duración y para cada año (1970 -2016).

La tercera fase es la **Obtención de las intensidades**, se procedió a encontrar para las alturas máximas de precipitación, o precipitación máxima para cada duración, las intensidades máximas de precipitación, que resulta de dividir la precipitación máxima en “mm” entre la duración en “min”. Este proceso se aplicó para cada año de estudio obteniendo así las intensidades en mm/min.



La cuarta fase es el **ajuste de los datos a una distribución de probabilidad**, en esta fase se aplica el test de ajuste Chi-Cuadrado R^2 como medida de bondad de ajuste para demostrar y optar por el método de probabilidad que más se ajusta a los eventos de las precipitaciones que se presentan en la ciudad de Cartagena. Para esto se tiene que, a partir de las intensidades máximas de precipitación, se procedió a encontrar los parámetros de ajuste para cada método de probabilidad escogidos en este trabajo de grado, Gumbel, Weibull, Pearson Tipo III y GEV.

Para encontrar los parámetros de ajuste es necesario calcular inicialmente, el valor correspondiente a la media aritmética \bar{x} y la desviación estándar S de la muestra.

Para el método de probabilidad de **Gumbel** se calculan los parámetros “ α ” y “ μ ” que representan el punto de máxima densidad de probabilidad para la muestra y posteriormente la variable estandarizada (y).

Al igual que para el método de Gumbel, se calculan los parámetros de Ajuste a las demás funciones de probabilidad. Para la distribución de **Valor Extremo Generalizada (GEV)** se evalúan los mismos parámetros calculados para la función de Gumbel “ α ” y “ μ ”, teniendo en cuenta las limitaciones o el rango de la constante K . Para la distribución de **Pearson Tipo III** se estiman a partir de la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de sesgo los parámetros de ajuste “ α ”, “ β ”, y “ γ ”. Finalmente, para el método **Weibull** se calculan los parámetros de “ α ”, “ β ” con sus respectivas ecuaciones.

La bondad del ajuste de una distribución de probabilidad puede probarse comparando los valores teóricos y muestrales de las funciones de frecuencia relativa o de frecuencia acumulada de cada método (Gumbel, Weibull, Pearson Tipo III y GEV). (Chow et al, 1994)

Para evaluar el Test de Chi-Cuadrado se deben encontrar los valores de la distribución como la Frecuencia Acumulada Esperada y la Frecuencia Acumulada Teórica de la muestra de tal forma que estos a través del análisis estadístico puedan descartar métodos si existen diferencias significativas.



Esta prueba trae consigo hipótesis avaladas por los valores críticos del percentil Chi Cuadrado considerando un Grado de Libertad o Grado de Probabilidad del evento. Este grado de libertad, dependerá del número de parámetros y rangos que se emplean en cada método probabilístico, obteniendo que el valor estadístico Chi Cuadrado para un nivel de confianza superior al 95% y según el Grado de Libertad debe ser menor que el coeficiente de probabilidad a un valor superior o menor que los valores críticos Chi Cuadrado.

La sexta fase es **la determinación de las curvas IDF**, una vez realizada la prueba de bondad de ajuste, demostrando cual método es más adecuado, se procede a la obtención de las magnitudes de las intensidades máximas para cada duración y para los periodos de retorno escogidos. Para esta actualización se escogieron 2, 5, 10, 15, 25, 50 y 100 años que son los valores típicos acoplados a proyectos según la resolución 0330 del 08 de Junio del 2017 del manual RAS¹ y a continuación se emplean las ecuaciones descritas por el método de ajuste escogido.

Ya calculadas las magnitudes de intensidades máximas se grafican considerando en el eje (Y) las intensidades en (mm/hr) y en el eje (X) las duraciones en (min). De esta manera quedarían representadas siete curvas cada una con para un periodo de retorno en específico.

4.2. METODOLOGÍA OBTENCIÓN DE LAS TENDENCIAS DE CAMBIO.

4.2.1. Tendencia de cambio de las precipitaciones.

Al realizar la lectura y organización de los datos pluviográficos como se explica en la fase 2 análisis e interpretación de los datos, se procedió a tabular los datos de los registros pluviográficos como observa en la Tabla 2, que es la representación del manejo de los datos para cada día de la serie histórica estudiada y se muestran los procedimientos de la siguiente manera para la obtención de la tendencia de cambio de las precipitaciones, que se explicaran a continuación.

¹ Ministerio de Desarrollo Económico - RAS (2017) Reglamento Técnico Del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – Cap 4 Art. 135 Pág. 85



Tabla 2. Ejemplo del análisis de los datos de precipitación para cada uno de los años de estudio, para la obtención de la tendencia de cambio de las precipitaciones.

		Fecha	INTERVALO (cada 10 min)	Precipitación (mm)	PR-D (mm)
OCTUBRE
	9-oct
	10-oct
	11-oct	1:10	1:20	0,9	50,2
		1:20	1:30	9,3	
		1:30	1:40	13	
		1:40	1:50	6,7	
		1:50	2:00	0,5	
		2:00	2:10	3,4	
		2:10	2:20	7,5	
		2:20	2:30	2,2	
		2:30	2:40	0,8	
		2:40	2:50	0,7	
		2:50	3:00	1	
		3:00	3:10	1,1	
		3:10	3:20	1	
		3:20	3:30	1	
	3:30	3:40	0,6		
	3:40	3:50	0,3		
	3:50	4:00	0,2		
12-oct	.	.	.	.
13-oct	.	.	.	.
14-oct	.	.	.	.
.	
		PANUAL	1557,8	PMAX-D	75,3

Fuente: Elaborado Autores.

En la Tabla 2 se muestra el manejo que se le dio a cada uno de los datos de las precipitaciones para cada uno de los días que comprenden los años de estudios, a manera de ejemplo, se observa el día 11 de octubre de 1995.

- Al tener los datos de las precipitaciones organizadas por días para cada uno de los años y las precipitaciones analizadas en intervalos de 10 minutos como se muestra en la Tabla 2, se obtuvo la precipitación diaria (PR-D) para cada uno de los días en los años analizados, donde PR-D es la suma de la precipitación en mm para cada uno de los intervalos de 10 minutos de una lluvia, dando el acumulado diario



de las precipitaciones en un día, como se muestra en la Tabla 2 donde el valor de PR-D para el día 11 de octubre fue de 50,2 mm.

- Conjuntamente al realizar el procedimiento inmediatamente anterior, se obtuvo la precipitación máxima diaria (P_{MAX-D}) para el año de estudio, este paso se realizó con la función “MAX” que nos brinda la herramienta informática de EXCEL, donde se seleccionan los datos de la casilla de PR-D y se le dio esta función arrojando la P_{MAX-D} que es igual a 75,3 mm para el año de 1995.
- Para obtener la precipitación anual (P_{anual}) que es el valor total de las precipitaciones que se presentan en un año, este valor se puede obtener de 2 formas: la suma de las precipitaciones en los intervalos de 10 minutos de todos los días en el año o la suma de las precipitaciones diarias (PR-D) que se den en el año. El valor de P_{anual} que se muestra en la Tabla 2 es de es 1557,8 mm que es el acumulado que corresponde al año de 1995.

Al realizar los lineamientos anteriormente explicados para cada uno de los años de la serie histórica estudiada, se realiza un cuadro donde se muestren los valores de P_{anual} y P_{MAX-D} para cada uno de los años, como se ilustra en la Tabla 3 a continuación:

Tabla 3. Ejemplo de la elaboración de la tabla P_{anual} y P_{MAX-D}, para cada los años de estudio.

AÑO	P ANUAL (mm)	P _{MAX-D} (mm)
1990	805,6	77,8
1991	378,33	32,5
1992	1053	161,5
1993	1165,23	133,4
1994	788,5	54,8
1995	1557,8	75,3
1996	1208,8	99,05
1997	.	.
1998	.	.
1999	.	.
.	.	.

Fuente: Elaborado Autores.

Al tener los datos organizados como se muestra en la Tabla 3, mediante la herramienta de EXCEL se obtienen las gráficas de dispersión de “P_{anual} Vs años de registros” y “P_{MAX-D} Vs años de registros”, obteniendo de estas graficas el comportamiento de la línea de



tendencia a través de la opción “elementos de gráficos”, las ecuaciones de la recta y el coeficiente de correlación (r) entre las variables analizadas.

4.2.2. Tendencia de cambio de las intensidades.

Con la obtención de las intensidades para cada duración y años de estudios se muestra a continuación los procedimientos para la obtención de la tendencia de cambio de las intensidades:

Al contar con las intensidades para cada año de estudio, se procede a graficar las intensidades de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 de cada año de estudio vs los años de registro, mediante de la herramienta Excel en un gráfico de dispersión con líneas suavizadas y marcadores, extrayendo de esta grafica el comportamiento de la línea de tendencia, las ecuaciones de la recta y el coeficientes de correlación (r) de las variables analizadas.

4.3.METODOLOGIA COMPARACION ENTRE CURVAS IDF DE LA CIUDAD DE CARTAGENA.

Para las comparaciones entre las curvas IDF se tocaron los temas de las ecuaciones que modelan las curvas IDF para cada institución, las intensidades obtenidas con dichas curvas para las duraciones 15, 20, 30, 60 y 120 minutos para los periodos de retornos 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100, realizando las gráficas de las curvas IDF de acuerdo a los resultados obtenidos por medio de cada una de las ecuaciones utilizadas en cada investigación y realizando una comparación porcentual de como varían los datos en comparación. Esta diferencia porcentual se realiza por medio de la resta de un valor fijo menos el valor a comparar dividido entre el valor fijo y para obtener el porcentaje el resultado multiplica por 100.

Por último, se abordaron las metodologías empleadas por cada una de las instituciones dándole importancia a aspectos claves como la obtención de la información, análisis de la información y pasos o lineamientos que se siguieron en cada una de las investigaciones.

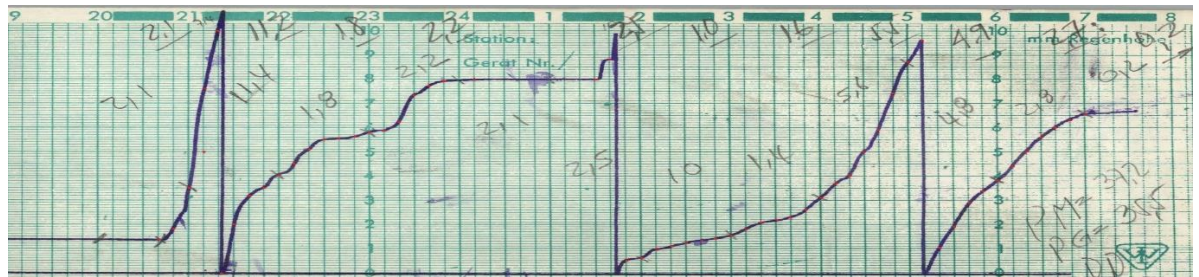


Ilustración 5. Registro con traza sobre el nivel máximo de escala vertical. **Fuente:** Registro digitalizado IDEAM.

En la Ilustración 5, se observó como el trazado de la aguja del pluviógrafo sobre pasa la escala o el nivel máximo vertical (10.2 mm) y también se puede observar como inicia por debajo del nivel mínimo de la escala vertical (0 mm), este error fue frecuente encontrarlo en los pluviogramas, pero esto no impedía realizar una buena lectura del acumulado de las lluvias.

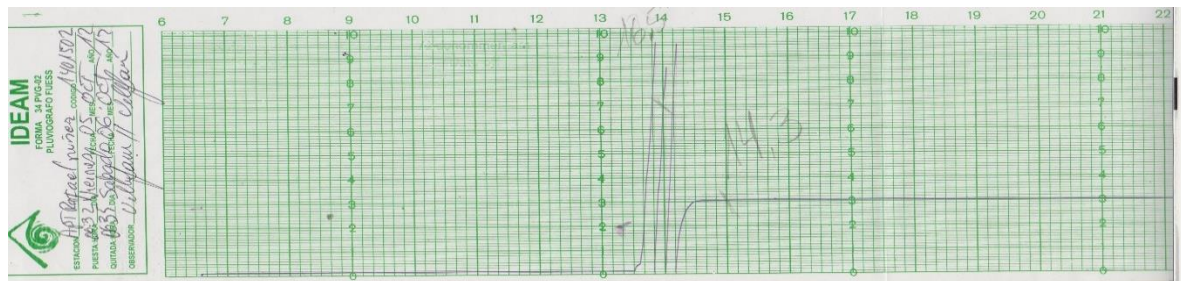


Ilustración 6 - Poca presión de aguja sobre el trazo. **Fuente:** Registro digitalizado IDEAM.

En la Ilustración 6, se evidencia otro error muy frecuente que es la poca presión de la aguja al registrar y la falta de tinta durante la inscripción del evento, este error posiblemente puede dejar trazos inconclusos que impiden la lectura precisa del pluviograma.

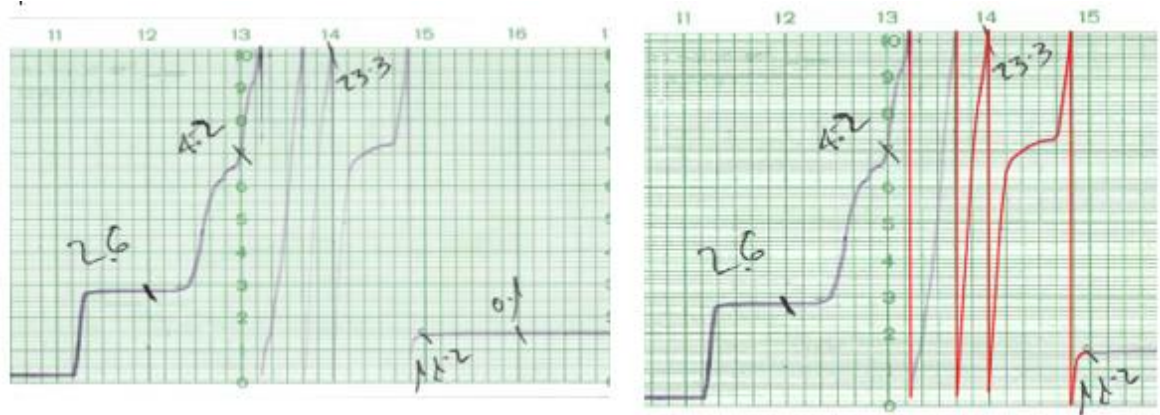


Ilustración 7. Recuperación del pluviograma a falta de tinta y presión en el pluviógrafo. **Fuente:** Elaborado autores.

En otras ocasiones se pudo predecir o intuir el movimiento que lleva el trazo del pluviógrafo como se muestra en la Ilustración 7, logrando recuperar y dar una lectura adecuada del pluviograma.

Los pluviogramas son archivados en bodegas y no siempre se encuentran en las mejores condiciones, se encontraron casos de una serie de registros defectuosos por la caída de agua, para lo cual se hizo necesario seguir el trazo que registró el pluviógrafo como se puede ver en la Ilustración 8. Cabe resaltar que en el año 2003 predominó este tipo inconvenientes, dado que su mayoría se encontraban en iguales condiciones.

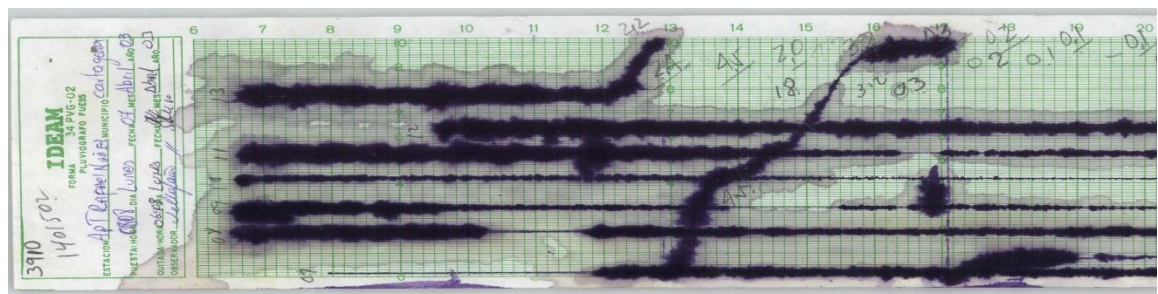


Ilustración 8. Registro con gotas de agua. **Fuente:** Registro digitalizado IDEAM.

Los pluviógrafos, son máquinas que están en funcionamiento los 365 días del año y se encontraron casos donde la maquinaria se detuvo, por tanto, el observador encargado realizó las pertinentes anotaciones (Ver Ilustración 9), donde expresa que el reloj se detuvo y no hubo más registro, esto puede llevar a pérdidas de lecturas por trazos no recuperables.

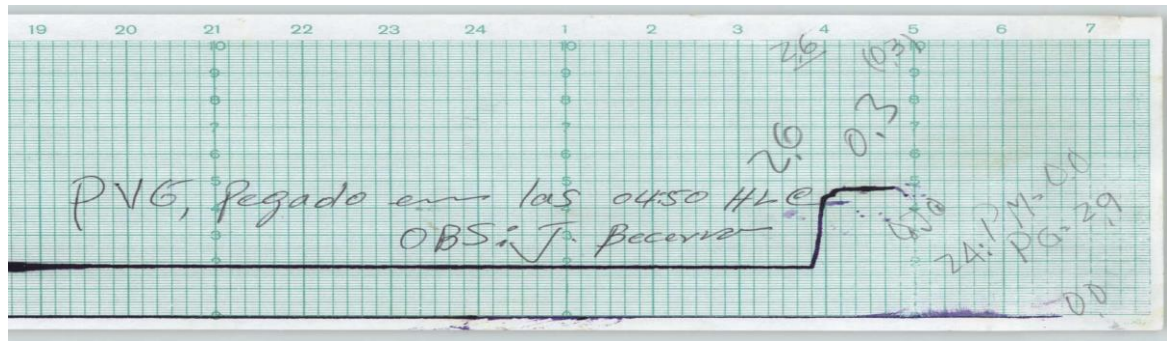


Ilustración 9. Pluviograma con reloj detenido. **Fuente:** Registro digitalizado IDEAM.

Los lugares donde se encuentran ubicados los pluviómetros suelen ser por lo general zonas apartadas, exponiendo al pluviómetro a que objetos no deseados entren en su interior. Encontramos el caso donde el observador expresa que el tanque del aparato se encontró lleno de material orgánico o el sifón se encuentra tapado por tanto el pluviómetro no pudo realizar el registro (Ver Ilustración 10).

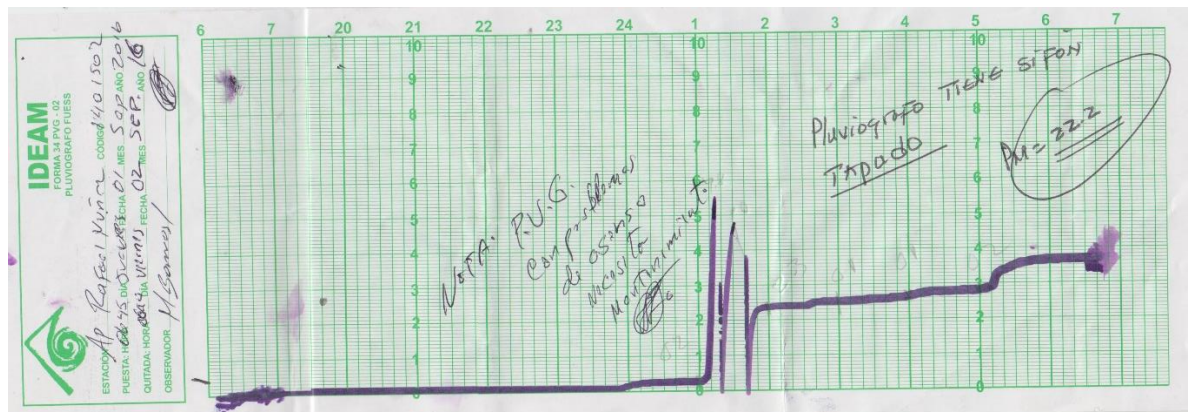


Ilustración 10. Pluviómetro con Sifón tapado. **Fuente:** Registro digitalizado IDEAM.

Resumiendo, los errores más encontrados o fallas dadas, todas se deben a des calibración del pluviómetro y de falta de mantenimiento del mismo. Este tipo de inconsistencias conllevan a la omisión de lecturas precisas por trazos poco legibles sobre el papel o incluso llega a no registrarse nada en absoluto durante el evento de la precipitación en un día. Son razones que justifican los sesgos, errores de lecturas y el descarte de los pluviogramas para el estudio.



En los peores casos, donde no hubo registro de lluvia se omitieron las lecturas del Pluviómetro; de esta manera, si se tienen en cuenta se alterarían los valores máximos de las intensidades calculadas para 10 min, considerando que la lectura del pluviómetro representa un evento en 24 horas y no para 10 min. Al tomar esta decisión, se omiten las lecturas de los pluviómetros para la obtención de las intensidades máximas, pero si se tuvieron en cuenta las lecturas de los pluviómetros para evaluar la tendencia de cambio de las precipitaciones.

Posterior al proceso de análisis y lectura de los pluviogramas, se realizaron las tabulaciones para cada banda pluviográfica registrando cada 10 minutos una lectura, esto se hizo para todas las lluvias por día en la serie histórica (Ver Tabla 4). Cumpliendo con la prioridad de analizar todas las lluvias con igual relevancia.

Tabla 4. Tabulación de lecturas Pluviogramas

Fecha	Intervalo HH:MM (10 min)		Precipitación (mm)
17- abril	12:50	13:00	4.3
	13:00	13:10	6.3
	13:10	13:20	5.8
	13:20	13:30	0.8
	13:30	13:40	0.2
	13:50	14:00	0.1
	16:00	16:10	1.8
	16:10	16:20	0.4
	18:00	18:10	0.2
	18:10	18:20	0.1
	18:20	18:30	0.1
	AcumDia	20.1	

Fuente: Elaborado autores.

En la Tabla 4, se muestra el modelo sobre el cual se realizaron las tabulaciones para todos los días y para cada año de estudio, expresando el intervalo de tiempo entre el inicio del evento hasta el punto de corte o finalización del evento y su respectiva lectura de la altura de lluvia registrada en mm.



5.2. SELECCIÓN DE ALTURAS MÁXIMAS DE PRECIPITACION PARA LA SERIE HISTORICA 1970 – 2016.

A partir de los datos tabulados cada 10 minutos (Tabla 4) para todos los años, y mediante sumatorias sucesivas, se procedió a encontrar las alturas máximas de las precipitaciones para las duraciones de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 minuto. Los resultados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Resumen multi-anual de las alturas máximas de precipitación. Año 1970 – 2016.

Años	ALTURAS MÁXIMAS DE PRECIPITACION									
	PRECIPITACION EN mm									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1970	21,0	25,5	30,0	42,5	51,0	56,0	70,2	75,0	77,4	82,0
1971	16,9	30,0	40,0	53,7	60,2	61,2	61,5	62,1	63,0	63,5
1972	21,1	38,6	53,0	70,5	80,7	89,8	98,5	109,5	119,2	120,0
1973	20,4	39,4	51,6	57,9	63,7	65,3	66,0	67,7	68,4	60,2
1974	25,8	44,1	57,6	70,2	88,5	99,4	72,7	112,3	113,2	113,1
1975	23,6	36,2	48,0	60,2	70,4	74,6	76,3	77,9	80,3	82,6
1976	12,5	21,1	30,4	35,1	36,2	37,1	41,7	44,0	45,2	45,5
1977	19,5	29,3	35,3	36,7	39,2	41,0	43,2	45,4	47,1	48,0
1978	19,9	36,4	47,0	56,9	60,7	62,3	62,1	63,0	39,5	40,4
1979	24,0	41,0	53,5	61,5	67,0	72,0	76,7	78,2	82,2	83,6
1980	20,0	30,0	40,0	48,5	60,0	70,0	80,8	91,5	100,5	106,4
1981	16,3	24,9	34,1	44,8	52,5	62,7	68,8	75,3	78,2	84,5
1982	17,2	24,4	40,5	51,0	60,0	66,9	73,9	79,0	82,2	83,5
1983	18,7	32,5	38,3	45,0	53,7	52,6	58,9	60,2	60,6	33,8
1984	30,0	50,0	69,0	79,0	89,0	94,8	98,1	100,5	102,0	102,1
1985	28,7	48,5	65,1	84,9	94,8	102,8	106,7	111,2	114,4	115,1
1986	22,6	36,8	39,7	44,6	60,0	51,5	52,4	53,1	53,5	54,4
1987	17,0	30,2	41,8	55,9	62,0	68,0	71,5	72,8	73,9	77,4
1988	14,4	25,0	34,4	42,5	44,8	46,2	46,2	47,0	47,4	51,7
1989	13,0	24,6	35,0	39,9	45,9	50,3	52,0	52,4	54,0	54,0
1990	19,0	28,0	38,0	45,0	49,5	52,9	60,0	64,4	66,5	66,8
1991	10,5	13,7	15,5	21,5	25,7	27,1	27,0	26,6	27,1	27,1
1992	25,5	39,8	52,8	62,4	67,5	71,5	72,2	73,7	74,8	76,0
1993	38,9	39,6	49,7	59,3	63,9	68,3	77,3	87,4	94,3	101,8
1994	18,5	35,5	44,2	50,8	53,1	54,2	53,7	54,4	54,8	18,8
1995	20,5	36,9	46,4	52,9	53,2	55,1	59,9	64,4	72,6	75,5
1996	22,1	37,1	50,1	63,9	69,5	74,9	79,6	82,8	83,9	85,4
1997	25,5	45,0	58,0	67,0	74,4	80,3	82,6	85,6	88,6	89,6
1998	20,2	30,3	36,2	41,1	46,5	52,6	52,8	53,0	61,0	62,3
1999	17,5	27,6	38,8	45,3	50,9	57,1	61,2	64,2	67,4	69,4



Años	ALTURAS MAXIMAS DE PRECIPITACION									
	PRECIPITACION EN mm									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
2000	22,2	42,4	60,0	74,1	84,7	95,3	100,9	102,2	102,8	103,9
2001	18,3	30,2	41,5	50,0	54,3	58,5	61,8	62,3	67,1	73,1
2002	18,6	33,8	48,4	53,9	55,7	57,2	57,9	61,5	64,5	66,3
2003	19,6	38,0	56,4	65,9	81,3	97,3	106,8	112,1	117,1	120,1
2004	20,9	33,2	41,8	50,4	56,5	65,1	69,6	76,8	81,7	86,1
2005	22,3	30,1	39,7	41,7	44,0	47,7	62,4	67,7	70,6	71,0
2006	19,3	28,7	38,4	48,0	57,5	67,1	76,6	82,6	85,6	87,2
2007	28,6	37,6	52,0	65,7	82,0	94,8	100,8	110,2	115,6	120,6
2008	18,5	29,2	40,9	55,4	62,3	67,1	67,6	68,1	68,7	69,0
2009	16,8	22,9	27,3	28,1	31,2	41,2	46,2	50,2	52,8	54,2
2010	25,2	43,5	63,9	79,6	86,6	93,2	96,2	99,1	99,7	99,8
2011	33,3	52,3	69,0	75,2	77,3	80,8	84,6	86,7	88,8	90,3
2012	21,3	41,6	55,9	59,6	61,2	61,9	63,3	64,1	64,6	64,9
2013	23,4	41,3	54,4	58,4	79,4	82,7	83,9	85,2	86,4	86,9
2014	19,0	31,2	36,2	43,2	55,9	60,9	61,1	63,9	64,3	64,5
2015	10,9	19,7	27,2	28,0	29,7	36,4	37,5	38,1	38,5	38,9
2016	22,7	40,5	54,1	63,0	68,9	73,4	77,4	83,4	86,0	87,0

Fuente: Elaboración Autores.

En la Tabla 5, se observan los valores máximos de las alturas de precipitación tomados del estudio Almanza, et al (1995) desde el año 1970 al 1994 y los tabulados a partir del año 1995 por los autores.

5.3.OBTENCION DE INTENSIDADES MAXIMAS ANUALES PARA LA SERIE HISTORICA 1970 – 2016.

Una vez obtenidas las alturas máximas de precipitación (Tabla 5) se procedió a calcular las intensidades máximas anuales realizando el cociente entre la altura de precipitación (mm) y su respectiva duración (min). En la Tabla 6 se muestran los valores obtenidos.

Tabla 6. Resumen multi-anual de Intensidades Máximas de Precipitación (mm/min) 1970 – 2016.

Años	INTENSIDADES MAXIMAS DE PRECIPITACION									
	PRECIPITACION EN mm /DURACION MINUTOS									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1970	126,0	76,5	60,0	63,8	61,2	56,0	60,2	56,3	51,6	49,2
1971	101,4	90,0	80,0	80,6	72,2	61,2	52,7	46,6	42,0	38,1
1972	126,6	115,8	106,0	105,8	96,8	89,8	84,4	82,1	79,5	72,0
1973	122,4	118,2	103,2	86,9	76,4	65,3	56,6	50,8	45,6	36,1
1974	154,8	132,3	115,2	105,3	106,2	99,4	62,4	84,2	75,4	67,9



Actualización de las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF)
para la estación "Aeropuerto Rafael Núñez" de la ciudad de Cartagena de Indias D.T y C.
(1970 – 2016).



Años	INTENSIDADES MAXIMAS DE PRECIPITACION									
	PRECIPITACION EN mm /DURACION MINUTOS									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1975	141,6	108,6	96,0	90,3	84,5	74,6	65,4	58,4	53,5	49,6
1976	75,0	63,3	60,8	52,7	43,4	37,1	35,7	33,0	30,2	27,3
1977	117,0	87,9	70,6	55,1	47,0	41,0	37,1	34,1	31,4	28,8
1978	119,4	109,2	94,0	85,4	72,8	62,3	53,2	47,3	26,3	24,2
1979	144,0	123,0	107,0	92,3	80,4	72,0	65,7	58,7	54,8	50,2
1980	120,0	90,0	80,0	72,8	72,0	70,0	69,3	68,6	67,0	63,8
1981	97,8	74,7	68,2	67,2	63,0	62,7	59,0	56,5	52,1	50,7
1982	103,2	73,2	81,0	76,5	72,0	66,9	63,3	59,3	54,8	50,1
1983	112,2	97,5	76,6	67,5	64,4	52,6	50,5	45,2	40,4	20,3
1984	180,0	150,0	138,0	118,5	106,8	94,8	84,1	75,4	68,0	61,3
1985	172,2	145,5	130,2	127,4	113,8	102,8	91,5	83,4	76,3	69,1
1986	135,6	110,4	79,4	66,9	72,0	51,5	44,9	39,8	35,6	32,6
1987	102,0	90,6	83,6	83,9	74,4	68,0	61,3	54,6	49,3	46,4
1988	86,4	75,0	68,8	63,8	53,8	46,2	39,6	35,3	31,6	31,0
1989	78,0	73,8	70,0	59,9	55,1	50,3	44,5	39,3	36,0	32,4
1990	114,0	84,0	76,0	67,5	59,4	52,9	51,4	48,3	44,4	40,1
1991	63,0	41,1	31,0	32,3	30,8	27,1	23,1	20,0	18,1	16,3
1992	153,0	119,4	105,6	93,6	81,0	71,5	61,9	55,3	49,9	45,6
1993	233,4	118,8	99,4	89,0	76,7	68,3	66,2	65,6	62,9	61,1
1994	111,0	106,5	88,4	76,2	63,7	54,2	46,1	40,8	36,5	11,3
1995	123,0	110,7	92,8	79,4	63,8	55,1	51,3	48,3	48,4	45,3
1996	132,6	111,3	100,2	95,9	83,4	74,9	68,2	62,1	55,9	51,2
1997	153,0	135,0	116,0	100,5	89,3	80,3	70,8	64,2	59,1	53,8
1998	121,2	90,9	72,4	61,7	55,8	52,6	45,2	39,8	40,7	37,4
1999	105,0	82,8	77,6	68,0	61,1	57,1	52,5	48,2	44,9	41,6
2000	133,2	127,2	120,0	111,2	101,6	95,3	86,5	76,7	68,5	62,3
2001	109,8	90,6	83,0	75,0	65,2	58,5	53,0	46,7	44,7	43,9
2002	111,6	101,4	96,8	80,9	66,8	57,2	49,6	46,1	43,0	39,8
2003	117,6	114,0	112,8	98,9	97,6	97,3	91,5	84,1	78,1	72,1
2004	125,4	99,6	83,6	75,6	67,8	65,1	59,7	57,6	54,5	51,7
2005	133,8	90,3	79,4	62,6	52,8	47,7	53,5	50,8	47,1	42,6
2006	115,8	86,1	76,8	72,0	69,0	67,1	65,7	62,0	57,1	52,3
2007	171,6	112,8	104,0	98,6	98,4	94,8	86,4	82,7	77,1	72,4
2008	111,0	87,6	81,8	83,1	74,8	67,1	57,9	51,1	45,8	41,4
2009	100,8	68,7	54,6	42,2	37,4	41,2	39,6	37,7	35,2	32,5
2010	151,2	130,5	127,8	119,4	103,9	93,2	82,5	74,3	66,5	59,9
2011	199,5	156,9	138,0	112,8	92,8	80,8	72,5	65,0	59,2	54,2
2012	127,8	124,8	111,8	89,4	73,4	61,9	54,3	48,1	43,1	38,9
2013	140,4	123,9	108,8	87,6	95,3	82,7	71,9	63,9	57,6	52,1
2014	114,0	93,6	72,4	64,8	67,1	60,9	52,4	47,9	42,9	38,7
2015	65,4	59,1	54,4	42,0	35,6	36,4	32,1	28,6	25,7	23,3
2016	136,2	121,5	108,2	94,5	82,7	73,4	66,3	62,6	57,3	52,2



5.4.AJUSTES A LAS FUNCIONES DE PROBABILIDAD (GUMBEL, WEIBULL, PEARSON TIPO III Y GEV).

Para el ajuste de las distribuciones los cálculos correspondientes a la media aritmética, la desviación estándar y datos característicos como el valor máximo de la muestra y mínimo para cada 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 minutos se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Cálculo de Media, Desviación Estándar y valores Máximos y Mínimos de la muestra.

Duración	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
<u>Media</u>	125.3	102.0	90.3	80.8	73.1	65.9	59.4	55.0	50.3	45.4
<u>Desv Est</u>	32.2	24.8	23.1	21.0	19.5	18.1	15.8	15.6	14.8	15.0
<u>Max</u>	233.4	156.9	138.0	127.4	113.8	102.8	91.5	84.2	79.5	72.4
<u>Min</u>	63.0	41.1	31.0	32.3	30.8	27.1	23.1	20.0	18.1	11.3

Fuente: Elaborado Autores.

De la Tabla 7, podemos destacar para cada periodo de duración el mayor valor de la intensidad de precipitación y de la misma manera el menor valor. Para 10 minutos el año que tuvo la mayor intensidad registrada fue 1993 y la menor fue en el 1991. Para 20 minutos fueron el año 2011 la mayor intensidad y en el año 1991 para el menor. Para 30 minutos la mayor intensidad fue igual para los años 1994 y 2011 y la menor intensidad fue en el año 1991. Para 40 minutos la mayor intensidad fue en el año 1985 y la mínima en el año 1991. Para 50 minutos la intensidad mayor estuvo en el año 1985 y la mínima en el año 1991. Para 60 minutos la mayor intensidad se registró en el año 1985 y la mínima en el año 1991. Para 70 minutos la mayor intensidad se registró en el año 1985 y la mínima en el 1991. Para 80 minutos la mayor intensidad fue en el año 1974. Para 90 minutos la máxima se registró en el año 1972 y la mínima en el año 1991 y finalmente para 100 minutos la máxima se encontró en el año 2007 y la mínima en el año 1994.

Los mínimos valores de la intensidad para cada duración que se registraron ocurrieron en el año 1991 a excepción de la duración de 100 minutos que ocurrió en el año 1994,



evidenciando lo que sería el fenómeno del niño que presenció Colombia según el IDEAM en un documento expedido por José Edgar Montealegre Bocanegra en el año 2007².

5.4.1. Parámetros de ajuste de las Distribuciones de Probabilidad

Por medio de las ecuaciones 3.1 y 3.2 se calcularon los parámetros de ajustes para la distribución de Gumbel, de la misma manera aplicando las ecuaciones 5.1, 5.2, 5.4, 6.1 y 6.2 se calcularon para Weibull, Pearson Tipo III y GEV (ver Tabla 8).

Tabla 8. Parámetros de Ajuste calculados para cada Duración en minutos. Estación: Aeropuerto Rafael Núñez - Cartagena

Distribución De Probabilidad Gumbel										
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
μ	110.8	90.9	79.9	71.3	64.3	57.8	52.3	48.0	43.6	38.7
α	25.1	19.3	18.0	16.4	15.2	14.1	12.3	12.1	11.6	11.7
Distribución De Probabilidad Weibull										
α	4.8	4.5	4.1	4.2	4.1	4.1	4.1	3.9	3.7	3.0
β	134.2	110.5	98.4	87.8	79.6	71.8	64.7	60.2	55.1	50.6
Distribución De Probabilidad Pearson Tipo III										
α	50.4	230.7	238.3	208.2	201.7	139.4	160.6	163.7	155.0	213.0
β	10802.8	86481.6	83786.5	62511.4	55188.4	29185.5	31695.0	31910.6	28222.8	46823.6
Υ	-93.3	-274.5	-263.2	-220.8	-202.1	-145.0	-139.2	-141.0	-133.0	-175.5
Distribución De Probabilidad GEV										
k	-0.1	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3
σ	26.6	25.0	22.2	20.7	19.2	17.0	15.0	14.8	14.4	15.4
μ	111.8	93.2	81.4	72.9	65.8	58.5	53.2	48.8	44.5	40.4

Fuente: Elaborado autores.

² Montealegre J, (2007) Modelo Institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia. Pag 7. Ref.
<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Modelo+Institucional+El+Ni%C3%B1o+-+La+Ni%C3%B1a.pdf/232c8740-c6ee-4a73-a8f7-17e49c5edda0>.



5.5.PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE CHI-CUADRADO R^2

Una vez encontrados los parámetros para cada método de probabilidad, se procede a la validación del método más adecuado, aplicando una de las pruebas estadísticas más utilizadas como lo es el test de Chi Cuadrado. La obtención del valor estadístico Chi Cuadrado, se calculó como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Aplicación Test de Bondad de Ajuste Chi Cuadrado Gumbel. Duración: 10 min

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
i	Rango		ni	fs(xi)	Fs(xi)	Y	F(X)	p(xi)	CHI
1	62	88.86	5	0.1064	0.1064	-0.8770	0.09038	0.09038	0.1332
2	88.86	115.71	13	0.2766	0.3830	0.1942	0.43889	0.34851	0.6974
3	115.71	142.57	19	0.4043	0.7872	1.2654	0.75417	0.31529	1.1799
4	142.57	169.43	5	0.1064	0.8936	2.3366	0.90787	0.15370	0.6845
5	169.43	196.29	3	0.0638	0.9574	3.4078	0.96743	0.05956	0.0144
6	196.29	260.00	2	0.0426	1.0000	5.9491	0.99740	0.02997	0.2485
Total			47					<u>ESTADISTICO</u>	3.0

Fuente: Elaborado autores.

De la Tabla 9, la columna 1 (i) muestra el número de rangos en que se dividió la muestra considerando el número de datos de estudio. En la columna 2 y 3 (Rango) se muestra el intervalo de las clases para cada rango con su valor máximo y mínimo. La columna 4 (ni) representa el número de ocurrencias o eventos observados para cada intervalo de la muestra. En la columna 5 ($fs(xi)$) corresponde a la frecuencia relativa y se calcula como el cociente entre el número de ocurrencias observadas en cada intervalo entre el total de los datos observados. En la columna 6 ($Fs(xi)$) se calcula la frecuencia acumulada como la suma de las frecuencias relativas. En la columna 7 se aplica la función de Gumbel Ec. 3.0 que en este caso, la distribución de probabilidad de Gumbel relaciona los parámetros de ajuste μ, α y el valor máximo del intervalo. En la columna 8 ($F(x)$) se muestra el valor correspondiente a la función de probabilidad acumulada y posteriormente en la columna 9 ($P(x)$) el valor de probabilidad incremental a partir de la probabilidad acumulada. Finalmente se aplica la función de Bondad de Ajuste del Test Chi Cuadrado y se obtiene el valor estadístico.



Este proceso se aplica de igual forma para evaluar Weibull, Pearson Tipo III y GEV teniendo en cuenta que cada distribución de probabilidad compromete variables diferentes, los resultados obtenidos fueron tabulados en la Tabla 10.

Tabla 10. Valor estadístico - Test de Bondad Chi Cuadrado

DISTR. APLICADA	VALOR ESTADISTICO - TEST DE BONDAD CHI CUADRADO X^2									
	Duraciones (Minutos)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Gumbel	3.0	1.6	2.7	3.2	1.2	1.0	1.5	0.4	3.1	4.2
Pearson Tipo III	5.6	1.4	2.8	1.6	1.5	1.8	1.9	0.6	0.9	1.3
GEV	5.7	3.0	3.1	1.7	2.1	0.7	1.9	0.5	0.7	1.5
Weibull	4.9	2.9	3.8	3.0	2.8	2.0	1.9	1.0	0.9	1.2

Fuente: Elaborado Autores

Los valores resaltados son los menores para cada duración, evidentemente de la Tabla 10 se observa que la distribución de Gumbel es la que mejor se ajusta ratificando que se obtiene en su mayoría los menores valores estadísticos de la prueba de bondad de ajuste. Esto significa que se encuentran más distantes del valor crítico, dicho de otro modo, se encuentran más por debajo que los demás valores estadísticos para el valor crítico Chi Cuadrado según el Grado de Libertad.

5.5.1. Evaluación de hipótesis para Valores Críticos de Chi-Cuadrado R^2

El valor estadístico dado en la Tabla 9, columna 10 es $X_c^2 = 2.96 \cong 3.0$. Este valor se evalúa para una probabilidad acumulada del 1%, 2%, 5%, 10% y 20%, es decir, se consideró un nivel de confianza del 99%, 98%, 95%, 90% y 80% para un Grado de Libertad 5. A continuación se muestran los valores críticos para cada probabilidad acumulada (ver Tabla 11).

Tabla 11. Valores críticos para 5 grados de Libertad.

α	20%	10%	5%	2%	1%
Valor Critico	7.28928	9.23636	11.0705	13.3882	15.0863
Rechazo?	No	No	No	No	No

Fuente: Elaborado Autores



Debido a que los valores críticos para cada probabilidad acumulada son mayores al valor estadístico calculado, la hipótesis nula no puede rechazarse. El ajuste de la distribución de probabilidad de Gumbel a las precipitaciones de la Estación Aeropuerto Rafael Núñez se acepta. Esto comprueba, además, que para 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, y 100 minutos, los valores estadísticos obtenidos en la Tabla 10 por la prueba Chi cuadrado cumplirían.

5.6. AJUSTE PARA LA OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE INTENSIDAD DURACIÓN Y FRECUENCIA DE LA ESTACIÓN AEROPUERTO RAFAEL NUÑEZ (1970 – 2016)

Después de observar que método de probabilidad se ajusta más a los datos de las precipitaciones en la ciudad de Cartagena, dando como resultado el método de Gumbel, se procede a calcular las variables y parámetros como se muestra a continuación.

Se calcularon las variables reducidas (Y_t) para cada periodo de retorno, utilizando la ecuación 3.5 obteniendo como resultado lo que se observa en la Tabla 9. La variable (Y_t) relaciona la Magnitud del Evento Máximo (X_t) en la función de probabilidad de Gumbel.

Tabla 12. Variable reducida Y_t para diferentes periodos de retorno Tr

Tr	2	5	10	15	25	50	100
Y_t	0,37	1,50	2,25	2,67	3,20	3,90	4,60

Fuente: Elaborado autores.

Esta variable representa la probabilidad de ocurrencia de un evento en cierto periodo de retorno.

Para determinar la magnitud del evento máximo (X_t) se calculó utilizando la ecuación 3.8 y sustituyendo los parámetros Y_t , μ y α calculados previamente. De esta manera se obtienen las intensidades máximas para cada periodo de retorno (Tr) de acuerdo a su duración. Adicional al cálculo de la magnitud del evento máximo (X_t), se determinó la probabilidad de excedencia (P Exc) y no excedencia (P no Exc) para las intensidades máximas por periodo de retorno y por último, se encontraron los valores de las intensidades máximas como se muestran en la Tabla 13.



Tabla 13. Intensidades para cada periodo de retorno y duración.
Estación: Aeropuerto Rafael Núñez 1970 – 2016 (Cartagena)

P Exc	Pno Exc	Tr	Duración (Minutos)									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0.5	0.5	2	120	98	86	77	70	63	57	52	48	43
0.2	0.8	5	148	120	107	96	87	79	71	66	61	56
0.1	0.9	10	167	134	120	108	99	90	80	75	70	65
0.7	0.93	15	178	143	128	115	105	96	85	80	75	70
0.04	0.96	25	191	153	137	124	113	103	92	87	81	76
0.02	0.98	50	209	166	150	135	124	113	100	95	89	84
0.01	0.99	100	226	180	163	147	134	123	109	104	97	92

Fuente: Elaborado autores.

5.7. ESTIMACION DE PARAMETROS PARA DISEÑAR ECUACION DE INTENSIDAD MODELO

La ecuación que modela las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia propuesta por Monsalve (2002) relaciona tres variables simultáneamente (Ver ecuación 2.4). Para encontrar las constantes k, m, n y c de la ecuación se realizó un análisis de regresión multi-lineal aplicando logaritmos, como se muestra a continuación.

Aplicando logaritmos a la ecuación 2.4 se obtiene:

$$\Rightarrow \log I = \log k + m \log T - n \log(d + c) \quad \text{Ec. 8.0}$$

Realizando cambio de variable:

$$\Rightarrow \log I = y$$

$$\Rightarrow \log k = a_0$$

$$\Rightarrow m \log T = a_1 x_1$$

$$\Rightarrow -n \log(d + c) = a_2 x_2$$

Sustituyendo en la ecuación 8.0, resulta:

$$\Rightarrow y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 \quad \text{Ec. 8.1}$$



Teniendo en cuenta que, las variables T, d y c son conocidas se procede a realizar la regresión multi-lineal y hallar las constantes desconocidas. Utilizando la herramienta Excel, se tuvo como resultado:

Tabla 14. Resumen regresión multi-lineal.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,992176105
Coefficiente de determinación r^2	0,984413424
r^2 ajustado	0,983948153
Error típico	0,019736653
Observaciones	70

Análisis de Varianza					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	1,648346921	0,82417346	2115,785379	2,86516E-61
Residuos	67	0,026098877	0,000389535		
Total	69	1,674445798			

	Coefficientes
Intercepción	2,7672
Variable X 1	0,1659
Variable X 2	-0,5464

Fuente: Elaborado Autores.

Realizamos cambio de variable para los coeficientes obtenidos aplicando la regresión multi-lineal y sustituyendo se tuvo que:

$$\Rightarrow \text{Intercepción} = a_0 = k = 10^{2,767176625} = 585,0279632$$

$$\Rightarrow \text{Variable X1} = a_1 = m = 0,165938008$$

$$\Rightarrow \text{Variable X2} = a_2 = -n = 0,54637093$$



Reemplazando los parámetros que ajusta la ecuación 2.4, se obtiene la ecuación modelo de las curvas IDF para el Aeropuerto Rafael Núñez de la ciudad de Cartagena (1970-2016).

$$I = \frac{585,028*(Tr)^{0.165}}{(t+10)^{0.546}} \quad \text{Ec. 9.0}$$

A partir de la ecuación 9.0 se calculan los valores de intensidad que modelan la actualización de las curvas de Intensidad Duración y Frecuencia de la Estación Aeropuerto Rafael Núñez caso de estudio serie histórica (1970 – 2016) (Ver Tabla 15).

Tabla 15. Valores de Intensidades con Ecuación propuesta por Llamas y Herrera (1970-2016).

Tr	Duración (Minutos)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
2	127,7	102,3	87,5	77,4	70,1	64,4	59,9	56,2	53,0	50,3
5	148,7	119,2	101,8	90,1	81,6	75,0	69,7	65,4	61,7	58,6
10	166,8	133,7	114,2	101,1	91,5	84,1	78,2	73,3	69,2	65,7
15	178,4	143,0	122,2	108,2	97,9	90,0	83,7	78,5	74,1	70,3
25	194,2	155,6	133,0	117,7	106,6	98,0	91,1	85,4	80,6	76,5
50	217,9	174,6	149,2	132,1	119,6	109,9	102,2	95,8	90,4	85,9
100	244,5	195,9	167,4	148,2	134,1	123,3	114,6	107,5	101,5	96,3

Fuente: Elaborado Autores. 1

Con los valores de la tabla anterior, se graficaron las nuevas curvas IDF para la ciudad de Cartagena que se muestran en la Figura 2.



Actualización de las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF)
para la estación “Aeropuerto Internacional Rafael Núñez”
de la ciudad de Cartagena de Indias D.T y C.
(1970 – 2016).

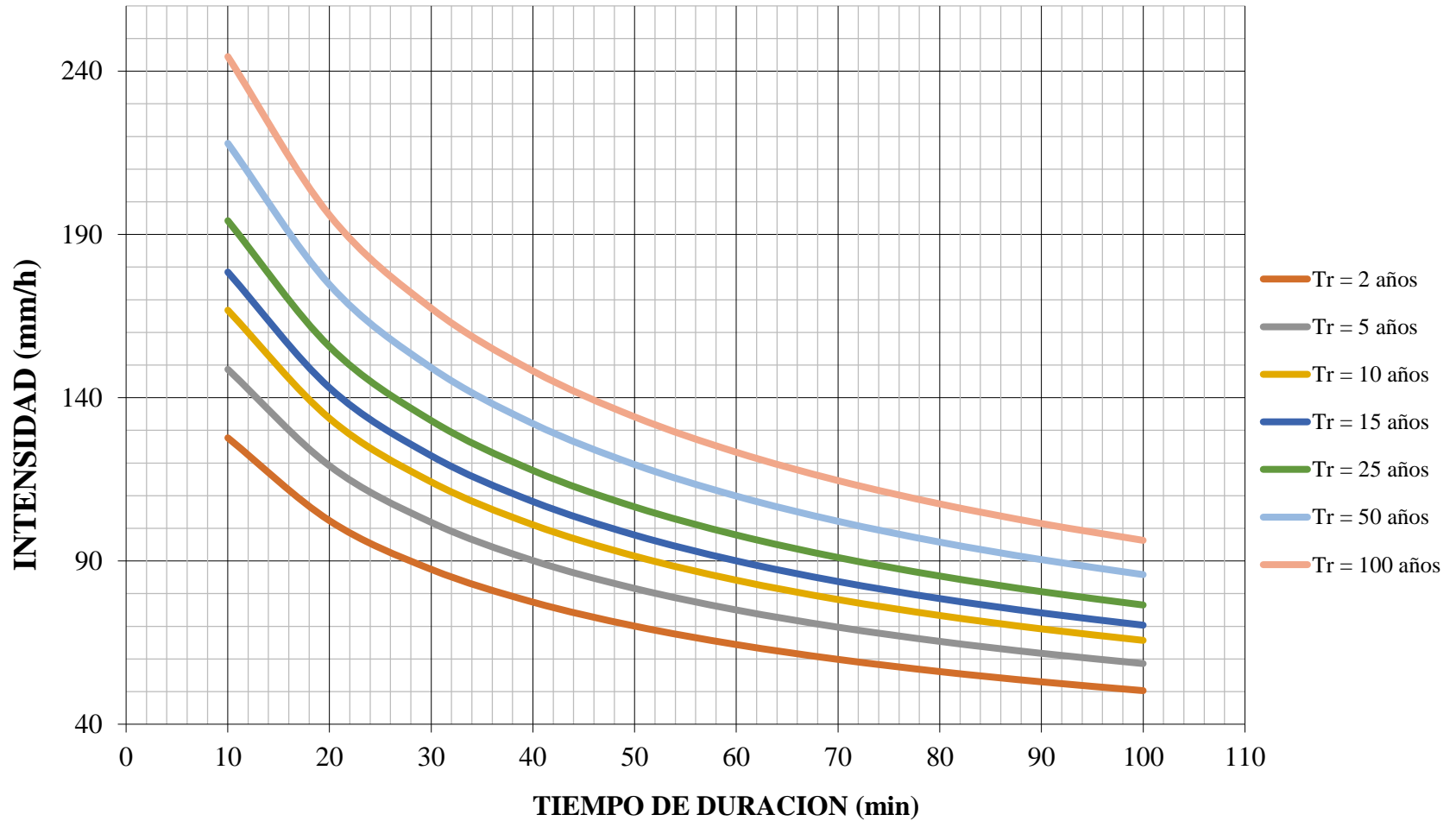


Figura 2. Curvas de Intensidad Duración y Frecuencia (IDF) 1970 - 2016 Estación: Aeropuerto Rafael Núñez





5.8.TENDENCIA DE CAMBIO DE LAS PRECIPITACIONES.

Los resultados y discusiones que se presentan a continuación, están enfocados en el análisis de las precipitaciones acumuladas o totales y las precipitaciones máximas diarias para cada año de la serie de estudio (1970-2016). Arrojando los siguientes resultados.

5.8.1. Precipitaciones Totales y precipitaciones Máximas- Diarias Anuales.

La información que se muestra a continuación, es en parte obtenida por los autores de este trabajo de grado, recolección de información secundaria suministrada por parte del IDEAM y otros documentos respecto a la temática tratada. Para la obtención de la precipitación anual se tiene que de 1970 a 1994 los datos fueron sustraídos de la base de datos del IDEAM “valores totales mensuales” para la estación Aeropuerto Rafael Núñez (1941-2017) de la ciudad de Cartagena y de 1995 a 2016 los datos fueron obtenidos por los autores por medio de los datos pluviograficos suministrados por el IDEAM con la metodología de trabajo anteriormente descrita, realizando una revisión y complementación filtro de la información, como se ilustra en la Tabla 16.

Tabla 16. Datos de la precipitación anual (P anual) y datos de la precipitación estipulados por el IDEAM (P anual IDEAM).

AÑO	P ANUAL	P ANUAL IDEAM
1970	1574,43	1574,43
1971	926,4	926,4
1972	697,1	697,1
1973	1358,3	1358,3
1974	793,8	793,8
1975	1126,8	1126,8
1976	711,7	711,7
1977	582,2	582,2
1978	994,6	994,6
1979	1497,5	1497,5
1980	1041,43	1041,43
1981	1340,13	1340,13
1982	878,3	878,3
1983	349,1	349,1
1984	1130,9	1130,9
1985	1219,2	1219,2
1986	692,5	692,5



AÑO	P ANUAL	P ANUAL IDEAM
1987	1350,8	1350,8
1988	1433,7	1433,7
1989	1378	1378
1990	805,6	805,6
1991	378,33	378,33
1992	1053	1053
1993	1165,23	1165,23
1994	788,5	788,5
1995	1557,8	1668,6
1996	1208,8	1168,03
1997	714,1	712,7
1998	869,6	880,23
1999	1559,2	1532,93
2000	767,1	823,3
2001	892,5	922,8
2002	650,9	689,63
2003	1156,1	1178,9
2004	1256,8	1423,9
2005	1076,6	1091,33
2006	1045,15	1061,73
2007	1859,8	1895,9
2008	1025,38	1022,7
2009	487,8	660,7
2010	2550,8	2469,23
2011	2100,1	2130,23
2012	1002,15	988,53
2013	826,9	853,73
2014	621,12	627,2
2015	352,5	372,3
2016	826,35	283,83

Fuente: Elaborado Autores.

Es posible realizar una validación de la información suministrada por parte del IDEAM, al realizar una revisión entre la información que tienen registrada en su base de datos y los resultados obtenidos en las sumas de las precipitaciones anuales, se han encontrado unas discrepancias en los valores los cuales se muestran en la Tabla 16.

Se tiene que para el año 2016 en la base de datos del IDEAM “valores totales mensuales” para la estación Aeropuerto Rafael Núñez (1941-2017) de la ciudad de Cartagena aún no ha sido actualizada, donde se omiten los valores para los meses de Agosto, Septiembre, Octubre, Noviembre y Diciembre afectando así el valor acumulado de la precipitación para este año.



Conjuntamente con el análisis de las precipitaciones anuales (P anual), se extrajeron de González, A y Coronado, O. (2017) los datos correspondientes a las precipitaciones máximas diarias de los años 1970 hasta 1994 y se desarrolló el cálculo para obtener las precipitaciones máximas-diarias (P_{MAX-D}) de 1995 a 2016 por parte de los autores, según los lineamientos mencionados anteriormente en la metodología, dando como resultado lo mostrado a continuación en la Tabla 17.

Tabla 17. Datos de precipitación anual y precipitación máxima diaria.

Año	P anual (mm)	P _{MAX-D} (mm)	Año	P anual (mm)	P _{MAX-D} (mm)
1970	1574,43	157	1994	788,5	54,8
1971	926,4	104,7	1995	1557,8	75,3
1972	697,1	120	1996	1208,8	99,05
1973	1358,3	74,1	1997	714,1	99,7
1974	793,8	126,4	1998	869,6	83,9
1975	1126,8	101,6	1999	1559,2	104,2
1976	711,7	54,4	2000	767,1	109,8
1977	582,2	60,5	2001	892,5	76,7
1978	994,6	68,6	2002	650,9	69,1
1979	1497,5	120,7	2003	1156,1	159,9
1980	1041,43	135,9	2004	1256,8	148,2
1981	1340,13	124,4	2005	1076,6	74,4
1982	878,3	98	2006	1045,15	122,3
1983	349,1	63,4	2007	1859,8	183,7
1984	1130,9	102,7	2008	1025,38	95,3
1985	1219,2	164,5	2009	487,8	60,5
1986	692,5	64,9	2010	2550,8	145,1
1987	1350,8	171,3	2011	2100,1	151,9
1988	1433,7	115	2012	1002,15	87,1
1989	1378	201,8	2013	826,9	87,2
1990	805,6	77,8	2014	621,12	102,7
1991	378,33	32,5	2015	352,5	41,7
1992	1053	161,5	2016	826,35	173,9
1993	1165,23	133,4			

Fuente: Elaborado Autores.

Al realizar estos análisis del comportamiento de las precipitaciones a lo largo de la serie de estudio, se tomaron los valores de P anual y P_{MAX-D} de cada año para realizar los gráficos “P anual Vs años de registros” y “P_{MAX-D} Vs años de registros”, dando como resultado lo siguiente.

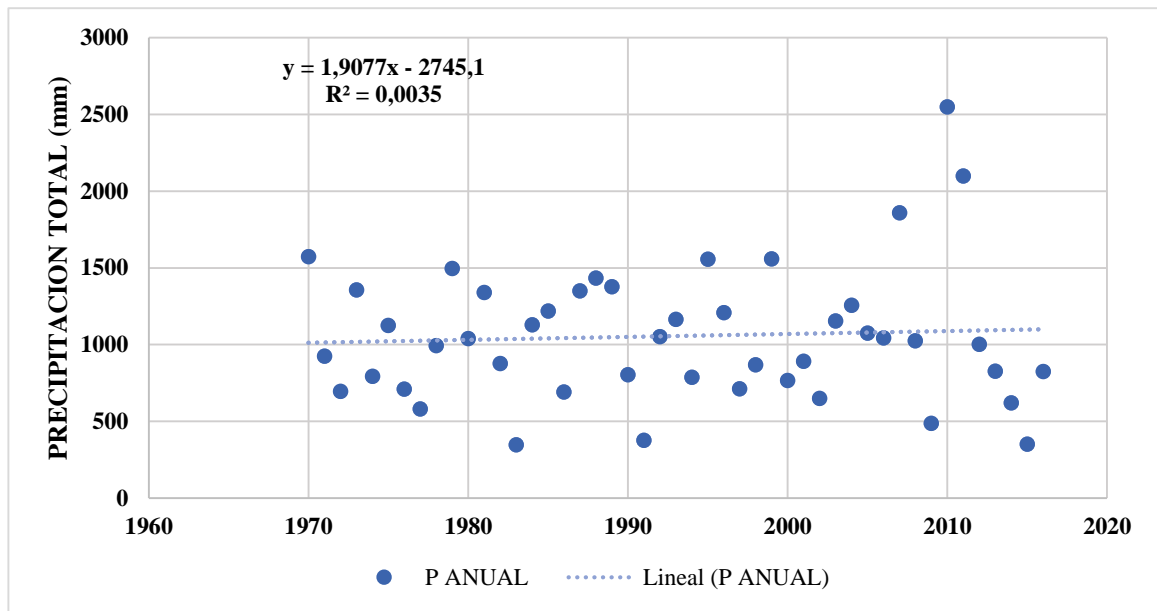


Figura 3. Precipitación total anual en la estación Aeropuerto Rafael Núñez de Cartagena. **Fuente:** Elaborado autores.

En la Figura 3 se presenta la variación de las precipitaciones anuales, la cual muestra que un 40,43% de las precipitaciones se encuentra en los valores de 1000 y 1500 mm, como se ilustra en la Tabla 18. De este gráfico también se destaca el año 2010 siendo este el año donde se presentó la mayor acumulación de lluvias con un valor de 2550,8 mm y el año de 1983 como el año de menor acumulación de lluvias con 349,1 mm lo que podría relacionarse con un año muy seco, como se observa en la Tabla 19.

Tabla 18. Porcentaje del número de años entre los intervalos de precipitación anual (P anual).

Intervalo de precipitación (mm)		Número de P anual	%
0	500	4	8,51
500	1000	18	38,30
1000	1500	19	40,43
1500	2000	4	8,51
2000	2500	2	4,26

Fuente: Elaborado Autores.



Tabla 19. Año con mayor y con menor acumulación de precipitación en la serie histórica.

P anual	Año	Vr acumulado (mm)
Año con mayor acumulación de precipitación	2010	2550,8
Año con menor acumulación de precipitación	1983	349,1

Fuente: Elaborado Autores.

De la Figura 3 también se puede evidenciar los inviernos más fuertes por los que ha pasado Colombia que son las temporadas de invierno en los años 2010 y 2011, la ola invernal que atravesó el país para estos años se manifestó con intensas lluvias, que afectaron con inundaciones, avalanchas y movimientos en masa en diferentes zonas del país. Estos eventos fueron categorizados por parte del IDEAM como un fenómeno de la niña, fuerte y anormal, puesto que se presentaron precipitaciones muy superiores a las observadas históricamente y se presentaron anomalías en las estaciones de verano e invierno en el país (CEPAL.2012). Lo que deja para la ciudad de Cartagena, en materia de estudios hidrológicos, las dos acumulaciones de lluvias anuales con mayor valor en la serie histórica de las precipitaciones.

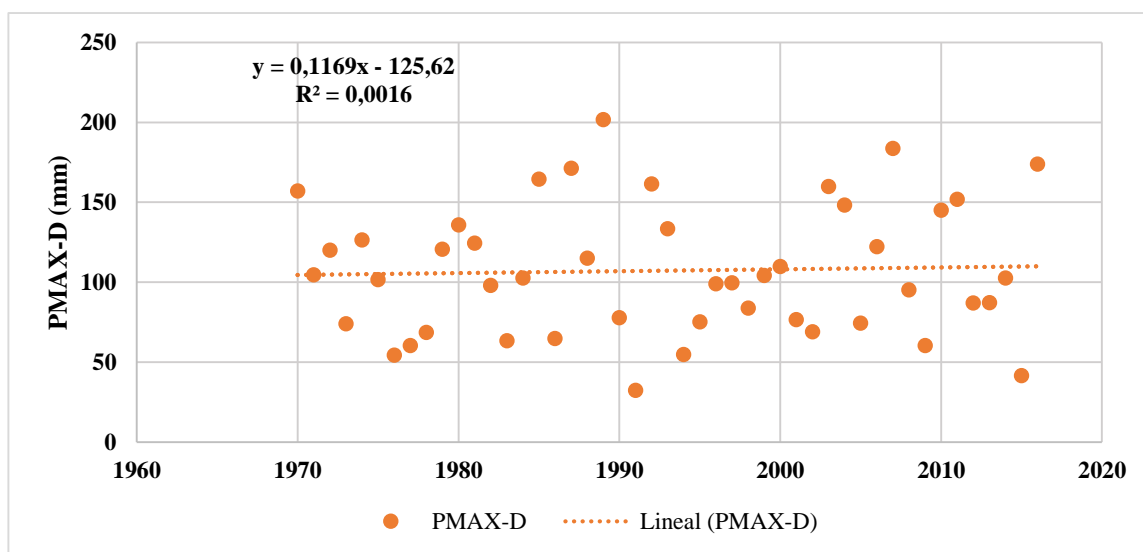


Figura 4. Precipitaciones máximas diarias para la serie histórica de estudio. Fuente: Elaborado autores.



En la Figura 4 se observa la variación de las precipitaciones máximas diarias (P_{MAX-D}) para la serie histórica de estudio, donde se muestra que el mayor número de precipitaciones máximas diarias se encuentra entre los valores de 50 y 100 mm, con un porcentaje de 42,55% como se ilustra en la Tabla 20. De esta grafica se observa que la máxima P_{MAX-D} se presenta en el año 1989 que, según González, A y Coronado, O. (2017) se dio el 11 de octubre de ese mismo año con un valor de 201,8 mm y el menor valor de P_{MAX-D} se dio en el año 1991 con un acumulado de 32,5 mm entre los años de estudio ver Tabla 21.

Tabla 20. Porcentaje de P_{MAX-D} entre los intervalos de precipitación.

Intervalo de precipitación (mm)		Número de P _{MAX-D}	%
0	50	2	4,26
50	100	20	42,55
100	150	16	34,04
150	200	8	17,02
200	250	1	2,13

Fuente: Elaborado Autores.

Tabla 21. Día con mayor y con menor acumulación de P_{MAX-D} entre los años de la serie histórica estudiada.

P _{MAX-D}	Fecha	Vr acumulado (mm)
Día con mayor acumulación de precipitación	11-oct-1989	201,8
Día con menor acumulación de precipitación	1991	32,5

Fuente: Elaborado Autores.

Con el análisis de las precipitaciones máximas diarias, se cumplió con la prioridad de analizar todos los datos de las precipitaciones de cada día, mes y año con igual relevancia para la serie de los pluviogramas obtenidos en la recolección de la información (1995-2016), lo que nos permitió de manera más clara observar el comportamiento y obtener detalles de cómo han variado las precipitaciones a lo largo del tiempo para la ciudad de Cartagena.

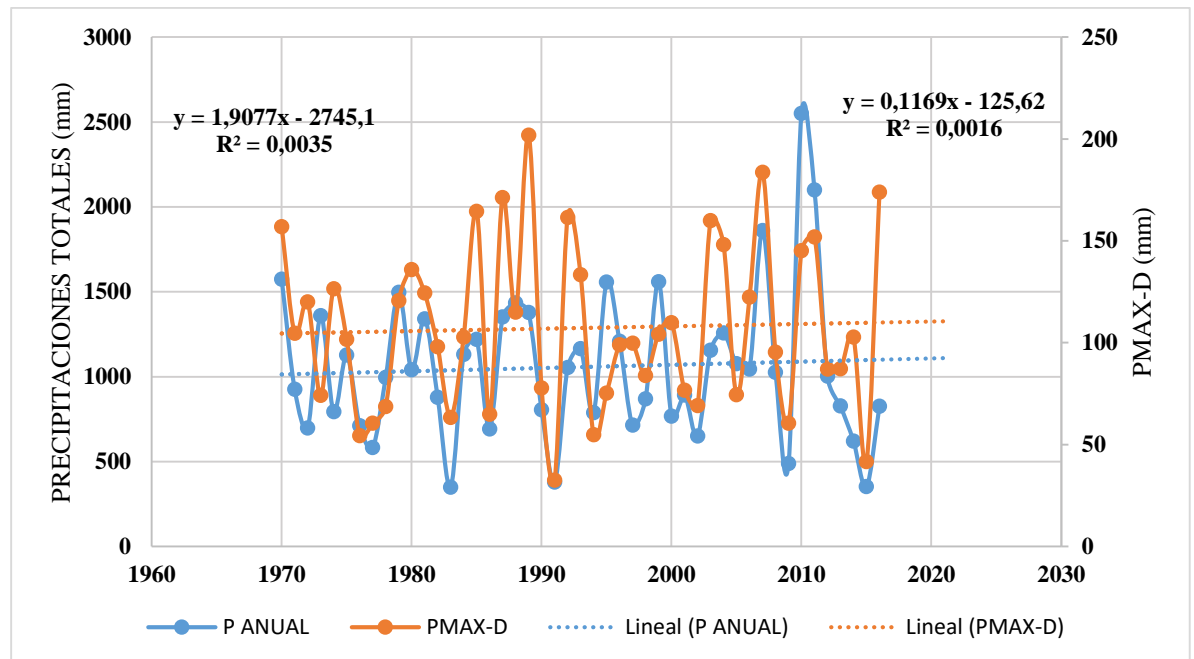


Figura 5. P anual y PMAX-D para la estación Aeropuerto Rafael Núñez de la ciudad de Cartagena. **Fuente:** Elaborado autores.

Por último, se tiene que a estas series se le han ajustado a una línea recta para evidenciar la tendencia global de los datos de las precipitaciones anuales y las precipitaciones máximas diarias (ver Figura 5), dando como resultado una línea creciente. Esta línea de tendencia nos muestra el aumento de los valores medios para las precipitaciones anuales y las máximas diarias, donde cada pendiente es interpretada como una tendencia al crecimiento de los valores registrados de las precipitaciones al pasar los años.

En la Figura 5, también se observa la ecuación de la línea recta para las precipitaciones anuales y máximas diarias. La pendiente de esta ecuación nos indica el aumento anual de los valores medios de las precipitaciones anuales y las máximas diarias, donde se tiene que para los valores medios de las precipitaciones anuales se tendrá un aumento de 1,9 mm y para los valores medios de las precipitaciones máximas diarias se tendrá un aumento de 0,11 mm anual.

Para evaluar esta tendencia al aumento y la correlación entre las variables que se analizaron, se obtuvo el coeficiente de correlación (r) y el coeficiente de determinación



(r^2), entre P anual y los años de registros junto con P_{MAX-D} y los años de registros, dando como resultado lo siguiente.

Tabla 22. Coeficientes de correlación y determinación para la línea recta de tendencia.

Precipitación	r	r^2	%
P anual	0,0594	0,0035	0,35%
P _{MAX-D}	0,0394	0,0016	0,16%

Fuente: Elaborado Autores.

En la Tabla 22 observamos que los valores del coeficiente de correlación y determinación para cada una de las precipitaciones son muy pequeños, dando como resultado que entre las variables asociadas no se encuentra una correlación directa.

5.9. TENDENCIA DE CAMBIO DE LAS INTENSIDADES.

A partir de la información obtenida respecto a las intensidades para cada duración de los años de estudios (Ver Tabla 6), es posible realizar el análisis de la variación de las intensidades a lo largo de la serie histórica estudiada en este trabajo de grado, donde se tienen los siguientes resultados.

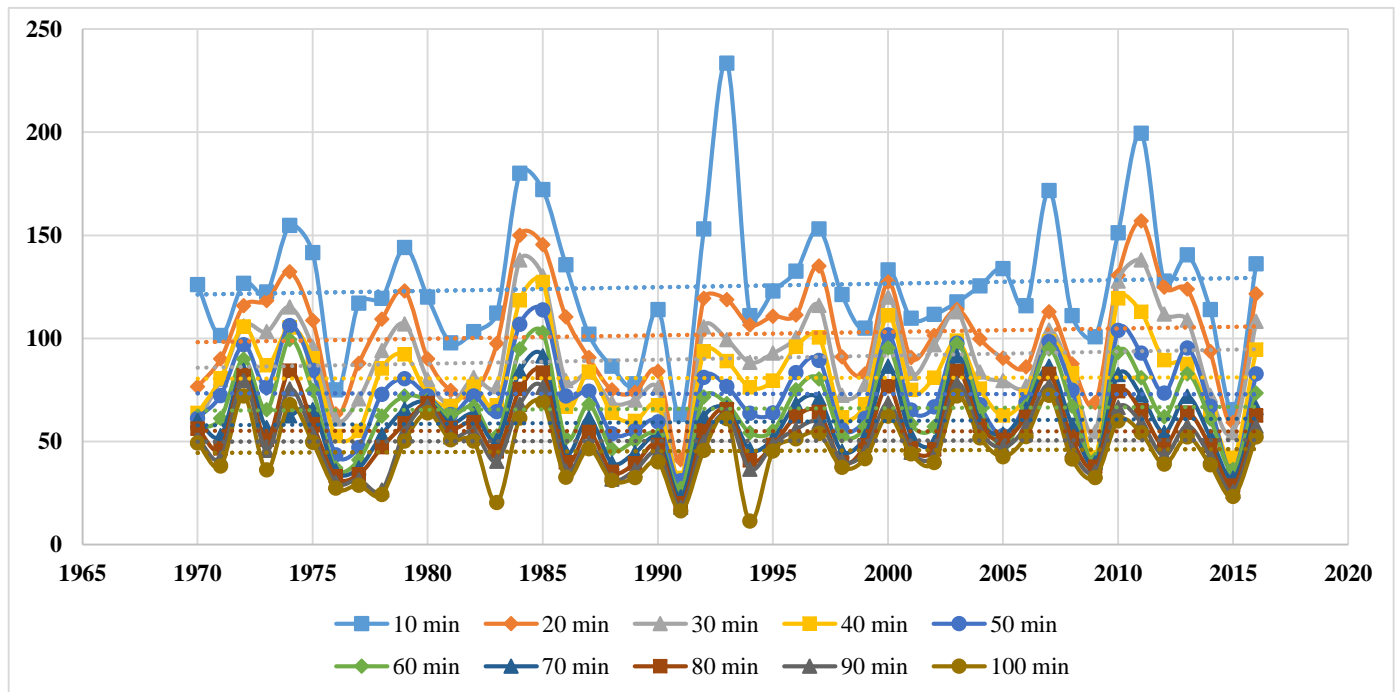


Figura 6. Intensidades máximas para cada duración. Fuente: Elaborado Autores.



En la Figura 6 se tiene que a las series de las intensidades se le han ajustado una línea de tendencia recta para evidenciar cómo han variado a lo largo del tiempo, como se aprecia las líneas tiene una pendiente muy pequeña al aumento y otras a la disminución. Estas líneas de tendencia nos muestran el aumento o la disminución de los valores medios para las intensidades de acuerdo a cada duración, donde cada pendiente es interpretada como una tendencia al crecimiento o baja de los valores registrados de las intensidades, a continuación, se muestran las ecuaciones de las líneas de tendencia para cada duración.

Tabla 23. Ecuación de la recta, coeficiente r y r^2 para cada duración.

Duración (min)	Ecuación de la Línea Recta	r	r^2	%
10	$y = 0,1773x - 228,11$	0,0756	0,0057	0,572
20	$y = 0,1638x - 224,52$	0,0906	0,0082	0,82
30	$y = 0,1926x - 293,55$	0,1145	0,0131	1,31
40	$y = 0,013x - 54,782$	0,0085	0,0001	0,007
50	$y = -0,0123x + 97,697$	-0,0087	0,0001	0,008
60	$y = 0,0413x - 16,45$	0,0313	0,001	0,098
70	$y = 0,0687x - 77,499$	0,0596	0,0036	0,356
80	$y = -0,0039x + 62,8$	-0,0034	0,000012	0,001
90	$y = 0,0168x + 16,898$	0,0155	0,0002	0,024
100	$y = 0,0378x - 29,819$	0,0346	0,0012	0,120

Fuente: Elaborado Autores.

En la Tabla 23 se observan las ecuaciones de las líneas de tendencia, dando así una mejor visión del comportamiento de las pendientes para cada una de las duraciones, podemos observar una tendencia hacia la disminución de los valores medios anuales de las intensidades para las duraciones de 50 y 80 minutos, por el contrario, las demás duraciones tienden a un aumento en los valores medio de dichas intensidades.

Para evaluar esta tendencia al aumento o disminución y la correlación entre las variables que se analizaron, se obtuvo el coeficiente de correlación (r) y el coeficiente de determinación (r^2), entre las intensidades para cada duración y los años de registros, dando como resultado lo siguiente.



La Tabla 23 muestra los valores del coeficiente de correlación y determinación para las duraciones de 50 y 80 minutos, se puede evidenciar valores negativos que nos indican una correlación inversa entre las variables analizadas, además los valores son pequeños para cada una de las duraciones, lo que nos lleva a interpretar que las intensidades no tienen una correlación directa con el tiempo o años de estudio.

5.10. COMPARACIONES ENTRE LAS CURVAS IDF EN LA CIUDAD DE CARTAGENA.

En este capítulo se presenta un análisis comparativo de las diferentes curvas IDF para el Aeropuerto Rafael Núñez de la ciudad de Cartagena, que han sido realizadas en diferentes épocas y por distintas instituciones, utilizando la información disponible hasta el momento en que fueron elaboradas.

En este análisis comparativo se traerán a mención los trabajos de grado o investigaciones que se han realizado acerca de las curvas IDF en la ciudad de Cartagena, a continuación, se presenta cronológicamente las investigaciones dadas (ver Tabla 24).

Tabla 24. Investigaciones sobre las Curvas IDF en Cartagena.

Autores	Métodos	Institución	Año de publicación	Periodo de estudio
Almanza, L; Martínez, O y Velásquez, R	Método de la gráfica Log – Log Intensidad (mm/hr) vs Duración (min)	Universidad de Cartagena	1995	1970-1994
Barrios, L	Distribución de probabilidad Gumbel	Universidad de Cartagena	2008	1970-2007
Puello, S; Romero, E	Distribución Mixta de probabilidad doble Gumbel y prueba de bondad Chi-Cuadrado	Universidad Tecnológica de Bolívar	2012	1970-2010
Grupo De Investigación En Ingeniería De Los Recursos Hídricos (GIREH), convenio con el IDEAM	Distribución de probabilidad Gumbel y prueba de bondad L- Momentos	IDEAM	2016	1970-2010
Jaraba, J	Distribución de probabilidad Gumbel y prueba de bondad Chi-Cuadrado	TECNAR	2017	1970-2015

Fuente: Elaborado Autores.



Como el objetivo de esta comparación es observar cómo influye el uso de los registros pluviográficos recientes en la construcción de las curvas IDF, para el análisis comparativo se tomará como referencia las Curvas IDF construidas por los autores de este trabajo de grado.

Una vez obtenida la ecuación que modela las curvas IDF, es posible realizar la comparación entre las ecuaciones y las intensidades que resultan de esta.

Para la obtención de las intensidades por medio de las ecuaciones que modelan las curvas IDF de cada uno de los trabajos, se evaluaron iguales duraciones y periodos de retorno, buscando observar la variación de las intensidades para cada uno de los trabajos mencionados.

Por otra parte, se realizó una comparación gráfica entre las curvas obtenidas por medio de las ecuaciones mencionadas en cada investigación. Cada figura contiene la representación para cada periodo de retorno establecido con igual color y se identifica la curva que se modela con un símbolo en específico.

5.10.1. Curvas IDF Herrera, J y Llamas, A 2018 Vs Curvas IDF Almanza, Martínez y Velásquez 1995.

Comparación de las ecuaciones entre UDC 2018 y UDC 1995.

Las ecuaciones que diseñan las curvas IDF para estos dos trabajos de grado se muestran a continuación:

Tabla 25. Comparación de ecuaciones que modelan las curvas IDF 2018 Vs 1995.

Ecu. Herrera, J y Llamas, A. 2018	Ecu. Almanza, et al. 1995
$I = \frac{585,028 * (Tr)^{0.165}}{(t + 10)^{0.546}}$	$I = \frac{616,97 * (Tr)^{0.18}}{(D + 10)^{0.561}}$

Fuente: Elaborado Autores.

En la Tabla 25 se muestran las respectivas ecuaciones para cada una de las investigaciones, se puede observar que los valores de la ecuación de Almanza, et al (1995) con respecto a la



ecuación presentada en este trabajo de grado tienden a disminuir, llevando a que los valores entre las intensidades varíen.

Comparación de las intensidades entre UDC 2018 y UDC 1995.

Una vez presentadas las ecuaciones de diseño para cada una de las investigaciones, se calculó por medio de estas ecuaciones las intensidades, utilizando unas duraciones de 15, 20, 30, 60 y 120 minutos, para los periodos de retorno 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 26. Intensidades obtenidas por la ecuación de Herrera, J y Llamas, A 2018.

D (min)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)
	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	113,13	120,96	131,59	147,54	171,62	192,41	215,73
30	87,52	93,58	101,81	114,14	132,77	148,86	166,90
60	64,48	68,94	75,00	84,09	97,82	109,67	122,96
120	45,99	49,17	53,49	59,97	69,76	78,22	87,69

Fuente: Elaborado Autores.

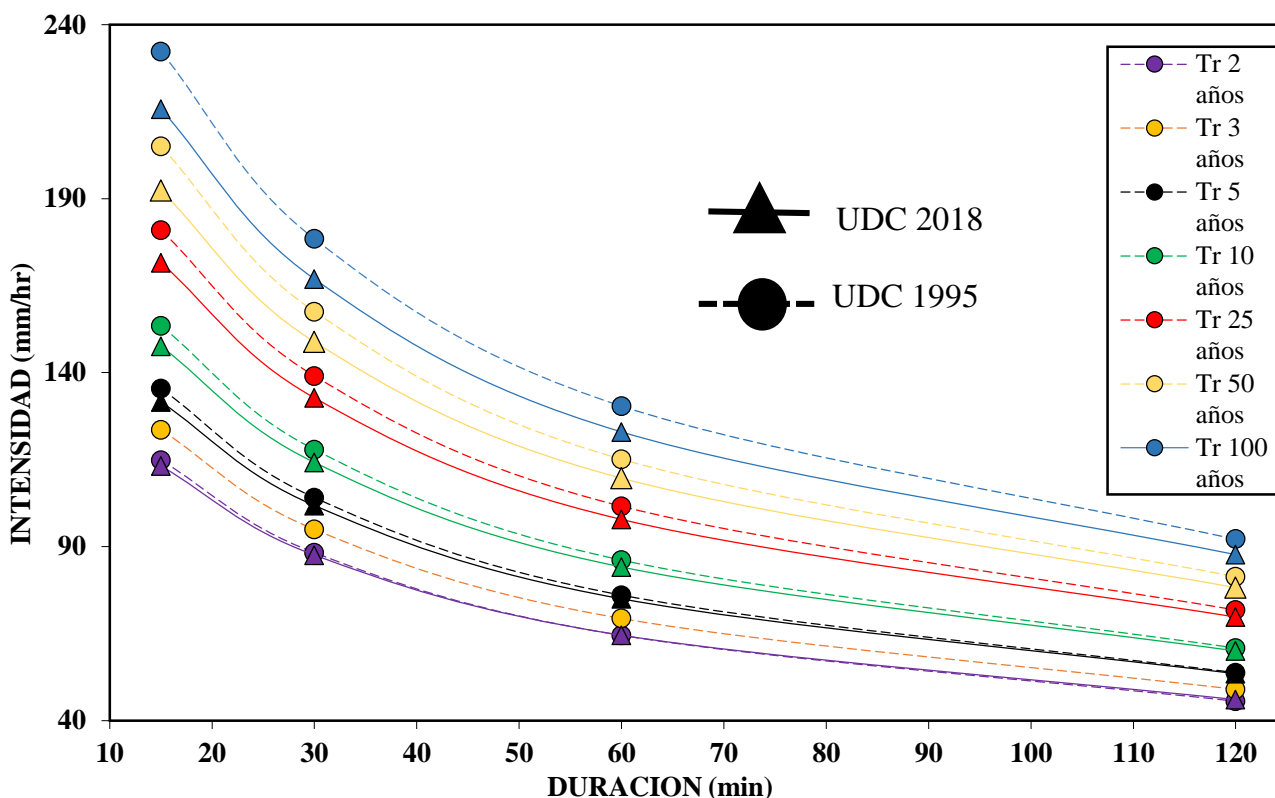
Tabla 27. Intensidades obtenidas por la ecuación de Almanza, All 1995.

D (min)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)
	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	114,87	123,57	135,47	153,47	180,99	205,04	232,28
30	88,25	94,93	104,07	117,90	139,04	157,52	178,45
60	64,47	69,35	76,03	86,13	101,58	115,07	130,37
120	45,55	49,00	53,72	60,86	71,77	81,31	92,12

Fuente: Elaborado Autores.



Figura 7. Comparación entre Curvas de Intensidad Duración y Frecuencia (IDF) UDC 2018 VS UDC 1995.



Fuente: Elaborado Autores.

Una vez calculadas las intensidades para cada una de las ecuaciones mencionadas se presentan la gráfica de las curvas IDF obtenidas para esta comparación UDC 2018 VS UDC 1995 (ver Figura 7).

Se observa en la Figura 7 que los valores de Almanza, et al (1995) son mayores que las intensidades calculadas por medio de la ecuación de los autores, a continuación, se muestran las variaciones porcentuales y para el periodo de retorno de 2 años y 3 años los valores son muy cercanos gráficamente.

Para observar esa cercanía o distorsión que hay entre los datos mostrados en la Tabla 26 y 27, se procede a realizar la metodología anteriormente descrita para obtener la variación porcentual entre las intensidades calculadas por medio de cada una de las ecuaciones, cabe resaltar que, los valores fijos serán las intensidades obtenidas por los autores de este trabajo de grado y serán comparadas contra los resultados de la ecuación de Almanza, et al (1995).



A manera de ejemplo se muestra a continuación la ecuación para la obtención de los resultados de la variación porcentual y reemplazaran los datos de las intensidades para una duración de 15 minutos y el periodo de retorno de 2 años.

$$\text{Variación \%} = \frac{\text{valor fijo} - \text{valor a comparar}}{\text{valor fijo}} * 100$$

$$\text{Variación \%} = \frac{113,13 - 114,87}{113,13} * 100 = -1,54 \%$$

Al observar este valor negativo nos dice que el valor a comparar es mayor con respecto al valor fijo o la intensidad calculada por medio de la ecuación de los autores de este trabajo de grado, es decir, el valor de la intensidad presentado por Almanza, et al (1995) para una duración de 15 minutos y un periodo de retorno de 2 años, es 1,54 % al presentado por los autores de este trabajo de grado. De aquí en adelante se procedió de igual forma para calcular cada una de las variaciones porcentuales entre cada comparación para cada duración y periodo de retorno.

A continuación, se muestran las variaciones porcentuales obtenidas:

Tabla 28. Diferencia porcentual entre las intensidades UDC 2018 y UDC 1995.

D (min)	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	-1,54%	-2,16%	-2,94%	-4,02%	-5,46%	-6,56%	-7,68%
30	-0,83%	-1,44%	-2,22%	-3,29%	-4,72%	-5,81%	-6,92%
60	0,02%	-0,59%	-1,37%	-2,43%	-3,84%	-4,93%	-6,03%
120	0,94%	0,34%	-0,43%	-1,48%	-2,88%	-3,96%	-5,05%

Fuente: Elaborado Autores.

En la Tabla 28 se observan mayor cantidad de valores porcentuales negativos, esto quiere decir que los valores de la intensidad para la ecuación de Almanza, et al (1995) son mayor en general para los periodos de retorno y las duraciones establecidas.

Los porcentajes de variación están entre los valores de 0,02 % y 7,68%, donde se presenta mayor diferencia para el periodo de retorno de 100 años y una duración de 15 minutos.



Para el periodo de retorno de 2 años y a partir de 60 min, las intensidades obtenida por la ecuación de los autores son mayores con respecto a la de Almanza, et al (1995). La mayor diferencia entre intensidades se da para el periodo de retorno de 100 años para una duración de 15 minutos, donde se da el valor de 7,68%.

Lo que nos deja en términos generales, que las curvas IDF realizada por los autores de este trabajo de grado, para duraciones de precipitación menores a 120 minutos presenta menores intensidades con respecto a las curvas IDF presentada por Almanza, Martínez y Velázquez en los años de 1995.

Comparación entre los estudios de UDC 2018 y UDC 1995.

Un punto importante para la elaboración de las curvas IDF es la metodología escogida para realizar los trabajos. Aquí se tocarán puntos importantes dejando a entre ver las posibles variaciones encontradas en el cálculo de las intensidades.

Con el análisis de las metodologías de trabajos, se tiene que:

Almanza, et al (1995), utilizaron los registros pluviograficos de la estación Aeropuerto Rafael Núñez de la ciudad de Cartagena y contaban con la serie histórica a partir del 24 de noviembre de 1970 al 30 de septiembre de 1994.

Realizaron el análisis de frecuencias de todas las lluvias por intervalos de 10, 20, 30 hasta completar 540 minutos, tomando las lluvias existentes hasta el momento, para las cuales determinaron las intensidades máximas para cada duración y realizaron el ajuste de la función utilizando un procedimiento gráfico, obteniendo la ecuación presentada en su trabajo de grado.

Aunque existan diferencias en la metodología aplicada, la diferencia entre ambos trabajos yace también, en la longitud de los años de estudio o la serie de registros estudiados, debido a que entre más años se estudien mayor será la precisión en la obtención de las intensidades y en la modelación de las curvas IDF.

Se puede decir que, para este trabajo de grado realizado por los autores, la investigación de Almanza, et al (1995) fue fundamental para su desarrollo y obtención de los datos, dado



que, al seguir la prioridad de analizar todas las lluvias existentes dentro de la serie histórica, se obtuvieron los resultados mostrados en esta investigación.

5.10.2. Curvas IDF Herrera, J y Llamas, A 2018 Vs Curvas IDF Barrios, L 2008 Comparación de las ecuaciones UDC 2018 y UDC 2008.

A continuación, se muestran las ecuaciones que modelan las curvas IDF para los dos trabajos de grado:

Tabla 29. Comparación de ecuaciones que modelan las curvas 2018 Vs 2008.

Ecu. Herrera, J y Llamas, A. 2018	Ecu. Barrios, L 2008
$I = \frac{585,028 * (Tr)^{0.165}}{(t + 10)^{0.546}}$	$I = \frac{(475.44T^{0.111})}{(t + 5)^{0.464}}$

Fuente: Elaborado Autores.

Respectivamente se muestran en la Tabla 30 las ecuaciones para la modelación de las curvas IDF de ambos trabajos. Se observa que las variables presentadas por los autores son mayores con respecto a la ecuación de Barrios, L (2008) y también se observa que, en la ecuación presentada por Barrios, L (2008) el factor que acompaña a las duraciones (t) es igual a 5, Dando como resultado una variación importante en los resultados de las intensidades.

Comparación de las intensidades UDC 2018 y UDC 2008.

Al realizar los cálculos con las ecuaciones respectivas, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

Tabla 30. Intensidades obtenidas por la ecuación de Herrera, J y Llamas, A 2018.

D (min)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)
	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	113,13	120,96	131,59	147,54	171,62	192,41	215,73
30	87,52	93,58	101,81	114,14	132,77	148,86	166,90
60	64,48	68,94	75,00	84,09	97,82	109,67	122,96
120	45,99	49,17	53,49	59,97	69,76	78,22	87,69

Fuente: Elaborado Autores.



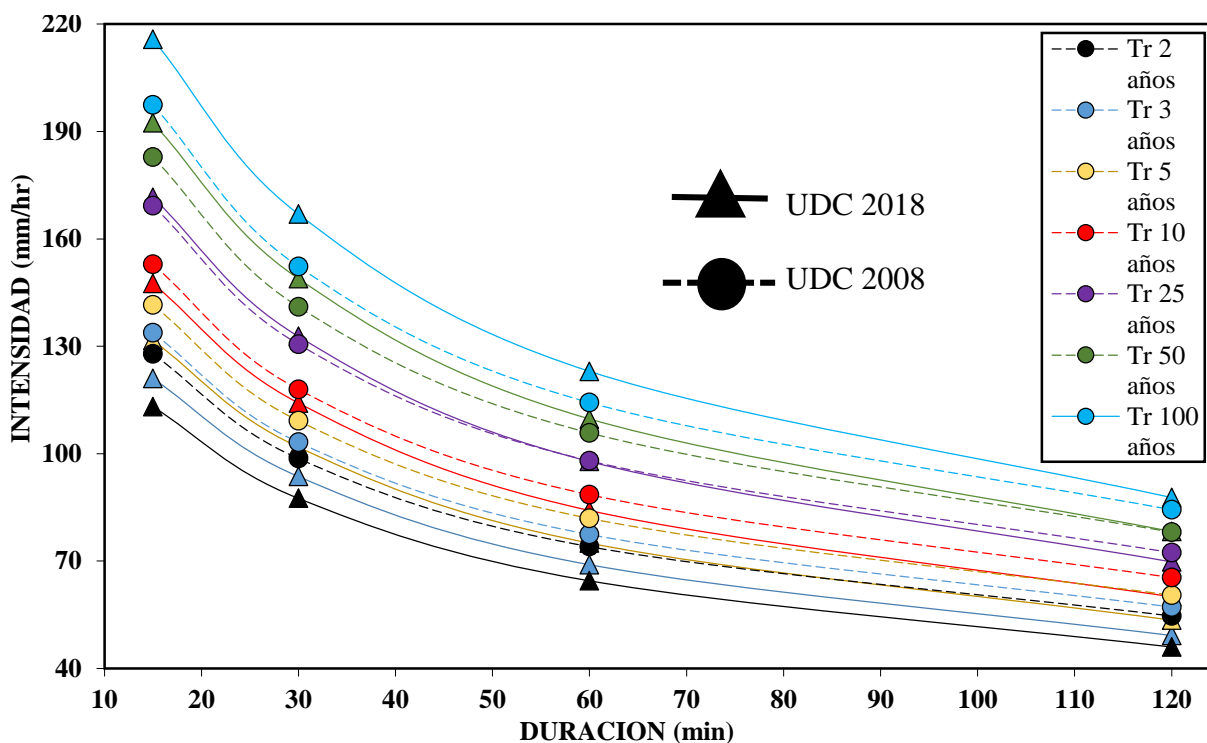
Tabla 31. Intensidades obtenidas por la ecuación de Barrio, L 2008.

D (min)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)
	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	127,89	133,78	141,58	152,90	169,27	182,81	197,43
30	98,64	103,18	109,20	117,94	130,56	141,00	152,28
60	74,01	77,42	81,94	88,49	97,97	105,80	114,26
120	54,64	57,16	60,49	65,33	72,33	78,11	84,36

Fuente: Elaborado Autores.

Al contar las intensidades calculadas por cada una de las ecuaciones mencionadas, se procede a graficar las curvas IDF en comparación UDC 2018 VS UDC 2008 (ver Figura 8).

Figura 8. Comparación entre Curvas de Intensidad Duración y Frecuencia (IDF) UDC 2018 VS UDC 2008.



Fuente: Elaborado Autores.

En la Figura 8 se observa que los valores de las intensidades calculadas por la ecuación de Barrios, L (2008) son mayores para algunos periodos de retorno estudiados con respecto a las intensidades calculadas por la ecuación de los autores, para los periodos de retorno de



5 y 100 años se da el caso opuesto, es decir, que los valores obtenidos por la ecuación de los autores son mayores a los presentados por Barrios (2007).

Para tener apreciar más esta distorsión entre los datos, se procedió a obtener la variación porcentual entre los datos de las intensidades mostrados en la Tabla 30 y 31, a continuación, se observan los resultados.

Tabla 32. Diferencia porcentual entre las intensidades UDC 2018 y UDC 2008.

D (min)	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	-13,05%	-10,60%	-7,59%	-3,64%	1,37%	4,99%	8,48%
30	-12,70%	-10,26%	-7,26%	-3,32%	1,67%	5,28%	8,76%
60	-14,79%	-12,30%	-9,25%	-5,23%	-0,15%	3,53%	7,07%
120	-18,83%	-16,25%	-13,09%	-8,93%	-3,68%	0,13%	3,80%

Fuente: Elaborado Autores.

En la Tabla 32 muestra el porcentaje de diferencia entre las intensidades calculadas por los autores y por Barrios, L (2008). Se puede observar en la tabla 32, que para el periodo de retorno de 2 años hasta los 10 años las intensidades calculadas por Barrios, L (2008) son mayores con respecto a los valores de las intensidades calculadas por la ecuación de los autores, ya que se observa que los valores son negativos.

Los porcentajes de variación están entre los valores de 0,13% hasta 18,83%, presentándose la mayor diferencia para el periodo de retorno de 2 años con una duración de 120 minutos.

Para el periodo de retorno de 25 años con las duraciones de 30 y 15 minutos, se observa que las intensidades calculadas por los autores resultan ser mayores a las de Barrios, L (2008). Esto también se observa para los periodos de retorno de 50 y 100 para las duraciones de 15 a 120 minutos.



Comparación de las metodologías entre UDC 2018 y UDC 2008.

Como la metodología del trabajo influye en los resultados obtenidos, cómo se analizan e interpretan los datos juega un papel importante en la obtención de las curvas IDF donde nos encontramos que:

Barrios, L (2008) utilizo la información existente desde el año 1970 al 2007 suministrados por parte del IDEAM y excluyendo el año de 1995 de la serie de registros. Obtuvo para cada año y duración el valor máximo de las intensidades y construyo las series que utilizo para la actualización de las curvas IDF para este periodo.

Barrios, L (2008) para el periodo comprendido entre los años de 1996 y 2007, selecciono solo las lluvias más grandes. Con esta información se obtuvo la ecuación que modela la curva IDF para la serie histórica estudiada.

Al tomar los valores máximos de las lluvias para tantos años de estudios, se lleva a la omisión de fenómenos que se pudieron haber dado a lo largo de este tiempo, además esto conlleva a minimizar el dimensionamiento de las curvas IDF.

Por este motivo en este trabajo de grado de los autores, se estudiaron una a una las lluvias para toda la serie histórica de estudio, para evitar así este tipo de sesgos.

5.10.3. Comparación de curvas IDF para el año 2010 de la ciudad de Cartagena.

Se dio el caso que Puello, S y Romero, E (2012) y GIREH (2016), analizaron la misma serie histórica comprendida entre los años de 1970 a 2010, realizar una comparación entre ambos estudios nos daría una visión de cuan alejados se encuentran los datos de las intensidades calculadas con nuestra ecuación que modela las curvas IDF (1970-2016), también nos sirve como guía para observar que tanto ha influenciado 6 años de registros en la serie histórica de datos.

Para esta comparación se tomará como referencia las curvas IDF realizadas por GIREH (2016), dado que estas curvas IDF son abaladas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), comparando ecuaciones y las intensidades obtenidas por dichas ecuaciones.



Comparación de las ecuaciones entre IDEAM 2016 y UTB 2012.

Las ecuaciones que modelan las curvas IDF para ambos trabajos son:

Tabla 33. Comparación de ecuaciones que modelan las curvas GIREH Vs UTB.

Ecu. GIREH 2016	Ecu. Puello, S; Romero, E 2012.
$I = \frac{C1}{(D + X0)^{C2}}$	$I = \frac{1255,61 * (Tr)^{0,171}}{(D + 10)^{0,703}}$

Fuente: Elaborado Autores.

Tabla 34. Valores para la ecuación presentada por IDEAM 2016.

Periodo de retorno (Tr)	C1	Xo	C2
2	19027,095	56,907	1,204
3	24275,161	62,902	1,217
5	31568,636	69,285	1,234
10	43071,436	76,793	1,257
25	61645,82	85,436	1,84
50	78546,079	91,269	1,304
100	98087,189	96,608	1,322

Fuente: Curvas Intensidad, Duración y Frecuencia IDF- Estación Aeropuerto Rafael Núñez (Cartagena de Indias) Código: 1401502, Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos (GIREH), de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá D.C.

Se observa en la Tabla 33 que ambas ecuaciones presentan distintos modelos para la obtención de las intensidades, lo que lleva a variaciones entre los resultados como se muestra a continuación.

En la Tabla 34 se presentan los valores para cada una de las variables que se observan para la ecuación GIREH 2016.



Comparación de las intensidades entre IDEAM 2016 y UTB 2012.

Al realizar el cálculo con cada una de las ecuaciones mostradas anteriormente, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 35. Intensidades obtenidas por la ecuación de GIREH 2016.

D (min)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)
	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	110,62	121,10	132,70	146,87	165,87	178,93	192,56
30	88,05	97,14	108,42	121,43	138,63	150,63	162,99
60	61,62	69,53	78,27	88,95	103,05	112,91	123,05
120	37,42	42,86	48,90	56,31	66,13	73,04	80,14

Tabla 36. Intensidades obtenidas por la ecuación de Puello, S y Romero, E 2012.

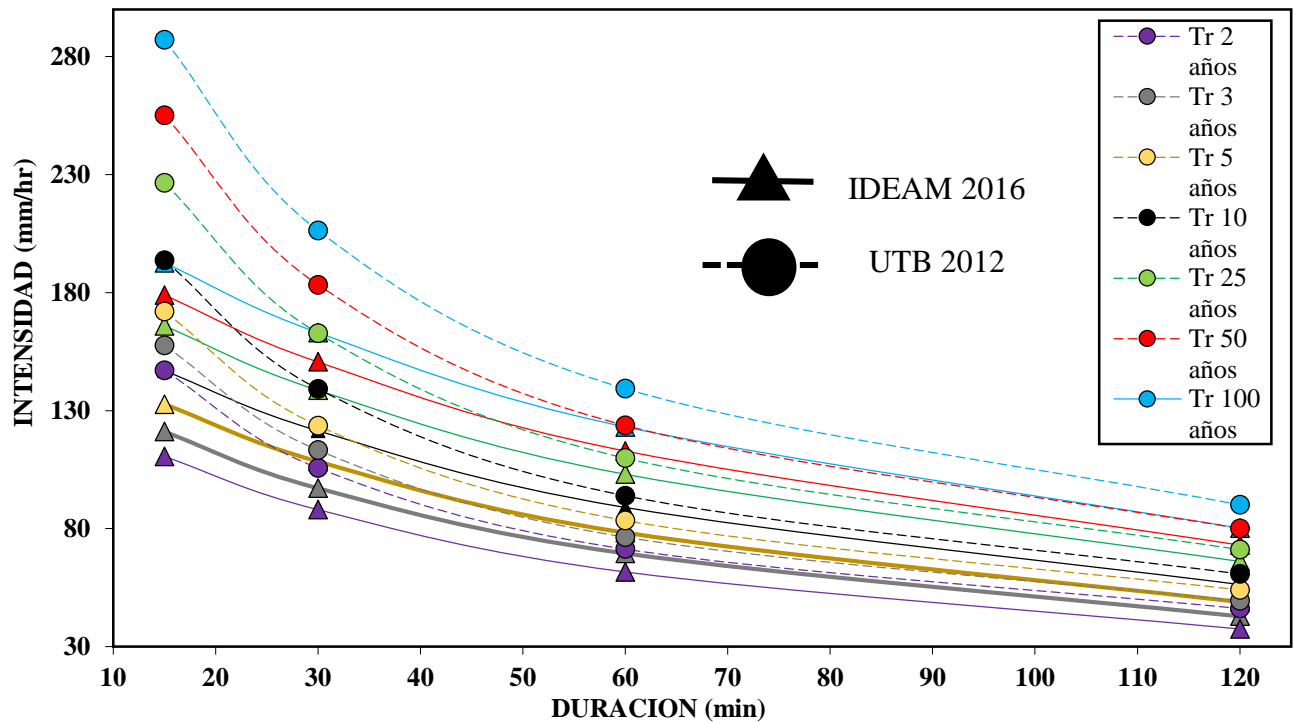
D (min)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)
	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	147,09	157,65	172,04	193,69	226,54	255,05	287,15
30	105,70	113,29	123,63	139,19	162,80	183,29	206,35
60	71,32	76,44	83,42	93,92	109,85	123,67	139,24
120	46,16	49,47	53,99	60,78	71,09	80,03	90,11

Fuente: Elaborado Autores.

Una vez obtenidos los valores de las intensidades por cada una de las ecuaciones, se procede a graficar las Curvas IDF en comparación IDEAM 2016 VS UTB 2012 (ver Figura 9).



Figura 9. Comparación entre Curvas de Intensidad Duración y Frecuencia (IDF) IDEAM 2016 VS UTB 2012.



Fuente: Elaborado Autores.

En la Figura 9, se observa que los resultados obtenidos por la ecuación de Puello, S y Romero (2012) son mayores con respecto a los resultados obtenidos por medio de la ecuación de GIREH (2016), gráficamente la diferencia es notable. Para tener precisión en esta diferencia se procede a realizar la variación porcentual entre los valores de las intensidades mostrados en la tabla 35 y 36, cabe resaltar que para este caso se tomarán como valores fijos los presentados por IDEAM 2016 y como valor a comparar serán los presentados por UTB 2012. A continuación, se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 37. Diferencia porcentual entre las intensidades IDEAM 2016 y UTB 2012.

D (min)	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	-32,97%	-30,18%	-29,64%	-31,88%	-36,67%	-42,54%	-49,12%
30	-20,04%	-15,91%	-14,03%	-14,63%	-17,43%	-21,68%	-26,60%
60	-15,75%	-9,94%	-6,58%	-5,58%	-6,60%	-9,53%	-13,16%
120	-23,35%	-15,42%	-10,40%	-7,93%	-7,49%	-9,58%	-12,44%

Fuente: Elaborado Autores.



Se puede observar en la Tabla 37 que todos los valores de las intensidades calculadas por la ecuación de Puello, S y Romero (2012) son mayores a los presentados por GIREH (2016), los porcentajes de variación se encuentran entre los valores de 5,58% y 49,12%, porcentajes muy altos, lo que deja ver una desviación entre ambos resultados. Cabe resaltar que los mayores porcentajes se encuentran para las duraciones de 120 y 15 minutos.

Cabe resaltar que ambas instituciones analizaron la misma serie histórica con 41 años de registros, es decir ambos contaban con la misma información, por ende, el único factor que pudo haber influido en la diferencia entre los valores, es la metodología de cómo se analizaron y como se obtuvieron los resultados. Para esta comparación no se tocará las diferencias metodológicas debido a que no concierne con nuestro trabajo, más adelante se describirán las diferencias entre las metodologías aplicadas por cada estudio y nuestro trabajo de grado.

5.10.4. Curvas IDF Herrera, J y Llamas, A 2018 Vs Curvas IDF Puello, S; Romero, E 2012.

Comparación de las ecuaciones entre UDC 2018 y UTB 2012.

A continuación, se muestran las ecuaciones que modelan las curvas IDF para los dos trabajos de grado:

Tabla 38. Comparación de ecuaciones que modelan las curvas 2018 Vs UTB 2012.

Ecu. Herrera, J y Llamas, A. 2018	Ecu. Puello, S; Romero, E 2012.
$I = \frac{585,028 * (Tr)^{0,165}}{(t + 10)^{0,546}}$	$I = \frac{1255,61 * (Tr)^{0,171}}{(D + 10)^{0,703}}$

Fuente: Elaborado Autores.

Como se observa en la Tabla 38 las ecuaciones respectivas para ambos trabajos, se observa que los parámetros presentados por Puello, S y Romero (2012) son mayores con respecto a los presentados por los autores. Lo que lleva a una variación considerable en el cálculo de las intensidades.



Comparación de las intensidades entre UDC 2018 y UTB 2012.

Al realizar el cálculo con cada una de las ecuaciones mostradas anteriormente, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 39. Intensidades obtenidas por la ecuación de Herrera, J y Llamas, A 2018.

D (min)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)
	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	113,13	120,96	131,59	147,54	171,62	192,41	215,73
30	87,52	93,58	101,81	114,14	132,77	148,86	166,90
60	64,48	68,94	75,00	84,09	97,82	109,67	122,96
120	45,99	49,17	53,49	59,97	69,76	78,22	87,69

Fuente: Elaborado Autores.

Tabla 40. Intensidades obtenidas por la ecuación de Puello, S y Romero, E 2012.

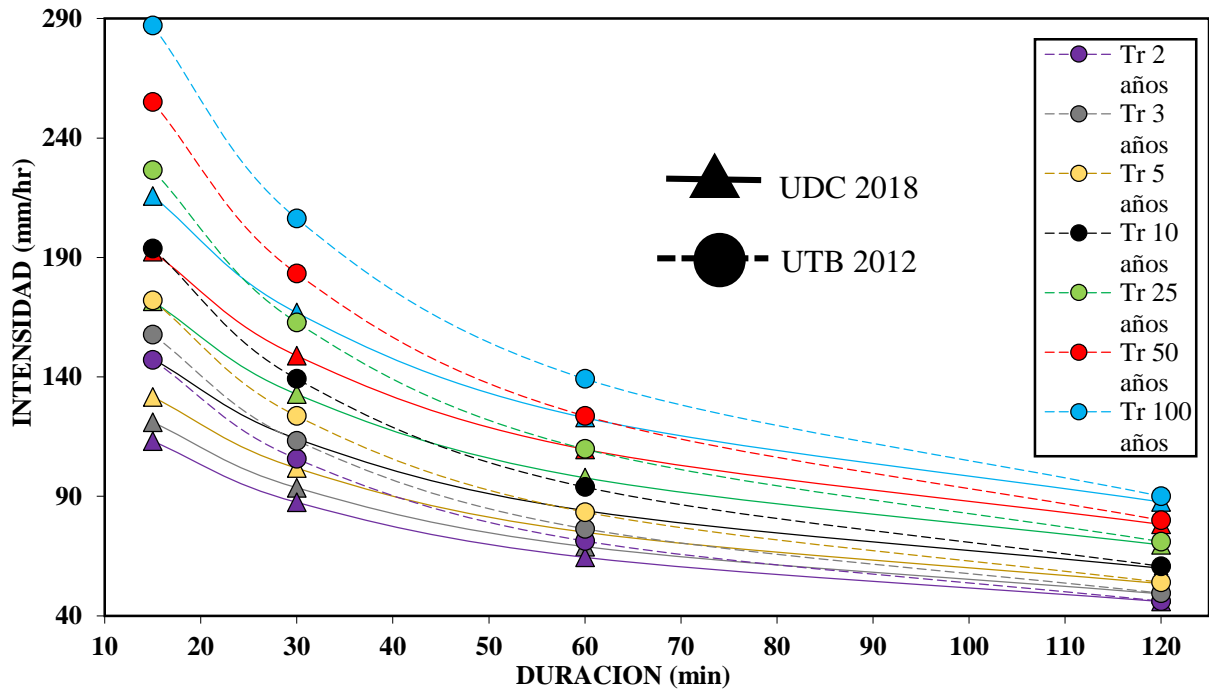
D (min)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)
	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	147,09	157,65	172,04	193,69	226,54	255,05	287,15
30	105,70	113,29	123,63	139,19	162,80	183,29	206,35
60	71,32	76,44	83,42	93,92	109,85	123,67	139,24
120	46,16	49,47	53,99	60,78	71,09	80,03	90,11

Fuente: Elaborado Autores.

Al obtener los valores de las intensidades por medio de cada una de las ecuaciones mencionadas, se procede a graficar las Curvas IDF en comparación UDC 2018 VS UTB 2012 (ver Figura10).



Figura 10. Comparación entre Curvas de Intensidad Duración y Frecuencia (IDF) UDC 2018 VS UTB 2012.



Fuente: Elaborado Autores.

Se observa claramente en la Figura 10 que los valores presentados por Puello, S y Romero, E. (2012) son mayores para todas las duraciones con respecto a los valores presentados por los autores, ahora se muestran las diferencias porcentuales.

Para apreciar mejor esta distorsión entre los datos se procede a obtener la variación porcentual entre las intensidades mostradas de las tablas 39 y 40. A continuación se muestran los resultados:

Tabla 41. Diferencia porcentual entre las intensidades UDC 2018 y UTB 2012.

D (min)	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	-30,02%	-30,34%	-30,74%	-31,28%	-32,00%	-32,55%	-33,11%
30	-20,77%	-21,06%	-21,44%	-21,94%	-22,61%	-23,13%	-23,64%
60	-10,61%	-10,88%	-11,22%	-11,69%	-12,30%	-12,77%	-13,24%
120	-0,37%	-0,61%	-0,92%	-1,34%	-1,90%	-2,33%	-2,75%

Fuente: Elaborado Autores.



En la Tabla 41 se muestran los porcentajes de variación, como se mencionó anteriormente los porcentajes negativos indican que los valores de Puello, S y Romero, E. (2012) son mayores con respecto a los valores dados por los autores. Los porcentajes de variación se encuentran entre los valores de 0,37% y 33,11%, presentándose la mayor diferencia para el periodo de retorno de 50 años y una duración de 15 minutos.

Analizando el comportamiento de las intensidades a lo largo de la serie histórica de estudio, se observó un comportamiento anormal para el año de 1975. Cabe resaltar que la diferencia encontrada entre ambos trabajos para las intensidades máximas del año de 1975 es muy elevada, como se muestra a continuación:

Tabla 42. Datos de las intensidades máximas en el año 1975
Puello, S y Romero, E 2012.

Duración (min)	Intensidad Máxima (mm)
10	481
20	286
30	230
60	148

Fuente: Trabajo de grado “Propuesta metodológica para la elaboración de curvas intensidad-duración-frecuencia, utilizando distribuciones mixtas de probabilidad. Caso de estudio, estación sinóptica principal aeropuerto Rafael Núñez” pág. 63 figura 7.3.

Tabla 43. Datos de las intensidades máximas año 1975, por autores.

Duración (min)	Intensidad Máxima (mm)
10	141,6
20	108,6
30	96
60	74,6

Fuente: Elaborado Autores.

En la Tabla 42 se tienen los valores extraídos del trabajo Puello, S y Romero, E. (2012), estos presentan para el año de 1975 unos valores picos que se pueden considerar anormales para la serie histórica.



Comparación de las metodologías entre UDC 2018 y UTB 2012.

La metodología aplicada para la elaboración de las curvas IDF cumple un papel importante, la selección de cuál información es la que se va a analizar es una labor directamente ligada con la obtención de los resultados, donde se encontró que:

Puello, S y Romero, E. (2012), para la elaboración de las curvas IDF seleccionaron de los registros pluviográficos las mayores intensidades de cada mes para cada año, escogiendo solo las dos de mayor intensidad en determinados meses en un periodo de un año. Lo que lleva a omisión de los datos pluviográficos lo cual influye en la construcción de las curvas IDF, dado que si solo se toman dos datos que presenten la mayor intensidad se estaría minimizando el dimensionamiento de las curvas IDF por esta imprecisión de los datos mensuales y al momento de su utilización en el campo llevará a diseños que no representarán la realidad del modelo.

Por este motivo en general los autores de este trabajo de grado realizaron las lecturas de todos los pluviogramas con igual grado de importancia, dando como resultados un análisis completo para cada uno de ellos.

5.10.5. Curvas IDF Herrera, J y Llamas, A 2018 Vs Curvas IDF GIREH 2016.

Comparación de las ecuaciones entre UDC 2018 e IDEAM 2016.

Se muestra a continuación las ecuaciones que modelan las curvas IDF para ambos trabajos

Tabla 44. Comparación de ecuaciones que modelan las curvas 2018 Vs IDEAM 2016.

Ecu. Herrera, J y Llamas, A. 2018	Ecu. GIREH. 2016
$I = \frac{585,028 * (Tr)^{0.165}}{(t + 10)^{0.546}}$	$I = \frac{C1}{(D + X0)^{C2}}$

Fuente: Elaborado Autores.

Para la ecuación GIREH 2016, se tienen en cuenta los valores presentados anteriormente en la Tabla 34.



Es notorio observar que el modelo de la ecuación cambia para ambos trabajos, lo que da como resultado las variaciones de las intensidades que se muestran a continuación.

Comparación de las intensidades entre UDC 2018 e IDEAM 2016.

A continuación, se muestran los resultados de las intensidades obtenidas:

Tabla 45. Intensidades obtenidas por la ecuación de Herrera, J y Llamas, A 2018.

D (min)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)
	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	113,13	120,96	131,59	147,54	171,62	192,41	215,73
30	87,52	93,58	101,81	114,14	132,77	148,86	166,90
60	64,48	68,94	75,00	84,09	97,82	109,67	122,96
120	45,99	49,17	53,49	59,97	69,76	78,22	87,69

Fuente: Elaborado Autores

Tabla 46. Intensidades obtenidas por la ecuación de GIREH 2016.

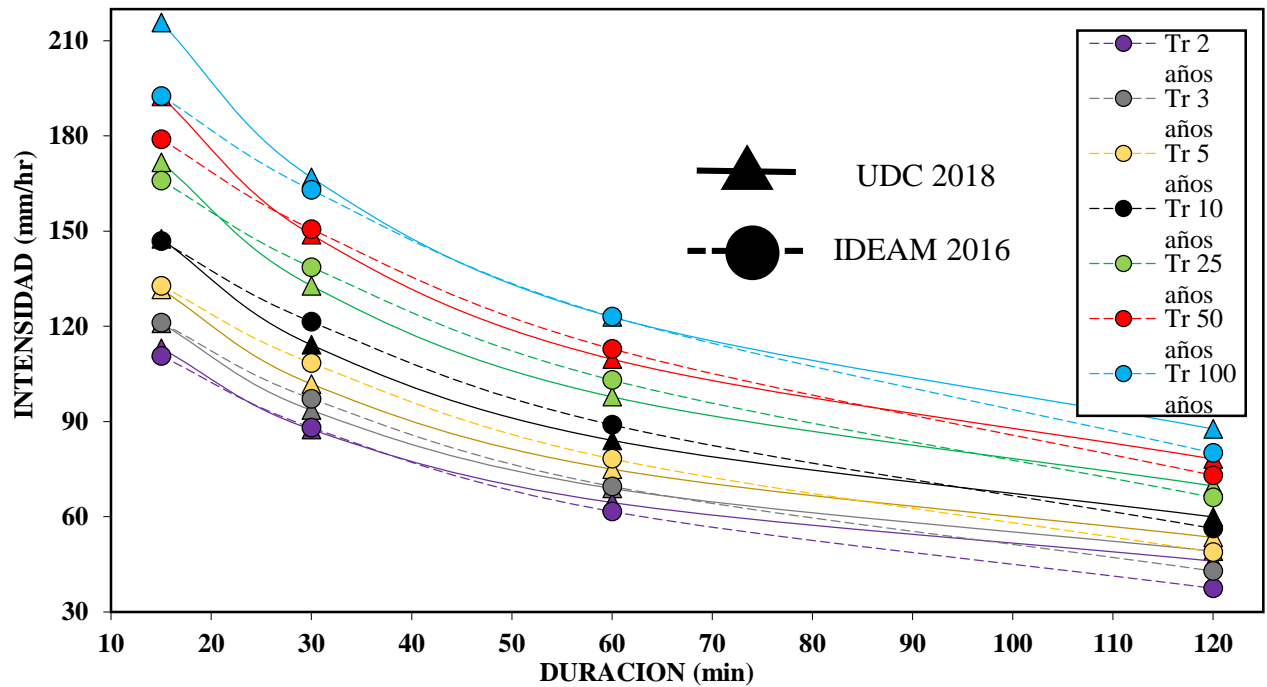
D (min)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)
	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	110,62	121,10	132,70	146,87	165,87	178,93	192,56
30	88,05	97,14	108,42	121,43	138,63	150,63	162,99
60	61,62	69,53	78,27	88,95	103,05	112,91	123,05
120	37,42	42,86	48,90	56,31	66,13	73,04	80,14

Fuente: Elaborado Autores.

Una vez calculadas las intensidades por medio de cada una de las ecuaciones mencionadas, se procede a realizar las Curvas IDF en comparación UDC 2018 VS IDEAM 2016 (ver Figura 11).



Figura 11. Comparación entre Curvas de Intensidad Duración y Frecuencia (IDF) UDC 2018 VS IDEAM 2016.



Fuente: Elaborado Autores.

En la Figura 11 se puede apreciar que los valores presentados por los autores son mayores a los obtenidos por GIREH (2016), en algunos periodos de retorno. Cabe resaltar que las curvas IDF presentadas por GIREH (2016), se realizaron en convenio con IDEAM, dejando como resultado que las curvas hechas por esta institución están abaladas por el IDEAM.

Para poder apreciar en que periodos de retorno los valores obtenidos por la ecuación de los autores de este trabajo de grado son mayor a los establecidos por IDEAM 2016, se procede a obtener la variación porcentual entre los valores de las intensidades mostradas en la tabla 45 y 46.



A continuación, se muestran los resultados:

Tabla 47. Diferencia porcentual entre las intensidades UDC 2018 e IDEAM 2016.

D (min)	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	2,22%	-0,12%	-0,84%	0,45%	3,41%	7,01%	10,74%
30	-0,61%	-0,45%	-6,49%	-6,38%	-4,41%	-1,19%	2,34%
60	4,44%	-0,85%	-4,36%	-5,78%	-5,35%	-2,95%	-0,07%
120	18,63%	12,83%	8,59%	6,10%	5,20%	6,62%	8,61%

Fuente: Elaborado Autores.

Se observa en la Tabla 47 que los porcentajes varían entre 0,12% a 18,63%, presentándose la mayor diferencia para el periodo de retorno de 2 años para una duración de 120 minutos.

En busca de una posible explicación a estas variaciones de las intensidades, se puede alegar que las precipitaciones atípicas presentadas en el año 2011 son una de las de mayor intensidad registradas a lo largo de la serie histórica para la ciudad de Cartagena y que además se consideran seis años más de registros en la serie analizada para este estudio elaborado por los autores, haciendo que esto pueda alterar de manera considerable los resultados para la serie histórica, dado que puede tender a alejar o distorsionar la serie de datos como se está presentando en esta comparación.

Comparación entre las metodologías entre UDC 2018 e IDEAM 2016.

Para esta comparación no se realizó un análisis detallado debido a que no se pudo obtener la información completa con respecto al trabajo realizado por GIREH (2016), sin embargo cabe resaltar que ambos trabajos emplean el método de probabilidad de Gumbel para la obtención de las curvas con la diferencia de que utilizan diferentes métodos de ajustes de bondad para los datos, también ambos trabajos utilizaron toda la información disponible de los registros y ambos trabajos siguieron metodologías abaladas por parte del IDEAM.

Cuando mencionamos que nosotros seguimos una metodología abalada por parte del IDEAM, hacemos referencia que nuestra metodología sigue los lineamientos establecidos por (Montealegre J, 1990), que son metodologías y técnicas para el manejo de los datos de las series históricas abaladas por parte del IDEAM.



5.10.6. Curvas IDF Herrera, J y Llamas, A 2018 VS Curvas IDF Jaraba, J 2017.

Comparación de las ecuaciones entre UDC 2018 y TECNAR 2017.

Las ecuaciones que modelan las curvas IDF para ambos trabajos son:

Tabla 48. Comparación de ecuaciones que modelan las curvas 2018 Vs TECNAR 2017.

Ecu. Herrera, J y Llamas, A. 2018	Ecu. Jaraba, J 2017
$I = \frac{585,028 * (Tr)^{0,165}}{(t + 10)^{0,546}}$	$I = \frac{1364,25 * T_r^{0,174}}{(D + 10)^{0,714}}$

Fuente: Elaborado Autores.

Se observa en la Tabla 48 que los parámetros propuestos por los autores de este trabajo de grado son menores a los establecidos por Jaraba, J (2017), dando como resultados una variación significativa para las intensidades.

5.10.6.1. Comparación de las intensidades entre UDC 2018 y TECNAR 2017.

Los resultados de los cálculos realizados por las dos ecuaciones son los mostrados en la Tabla 49 y 50:

Tabla 49. Intensidades obtenidas por la ecuación de Herrera, J y Llamas, A 2018.

D (min)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)
	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	113,13	120,96	131,59	147,54	171,62	192,41	215,73
30	87,52	93,58	101,81	114,14	132,77	148,86	166,90
60	64,48	68,94	75,00	84,09	97,82	109,67	122,96
120	45,99	49,17	53,49	59,97	69,76	78,22	87,69

Fuente: Elaborado Autores.



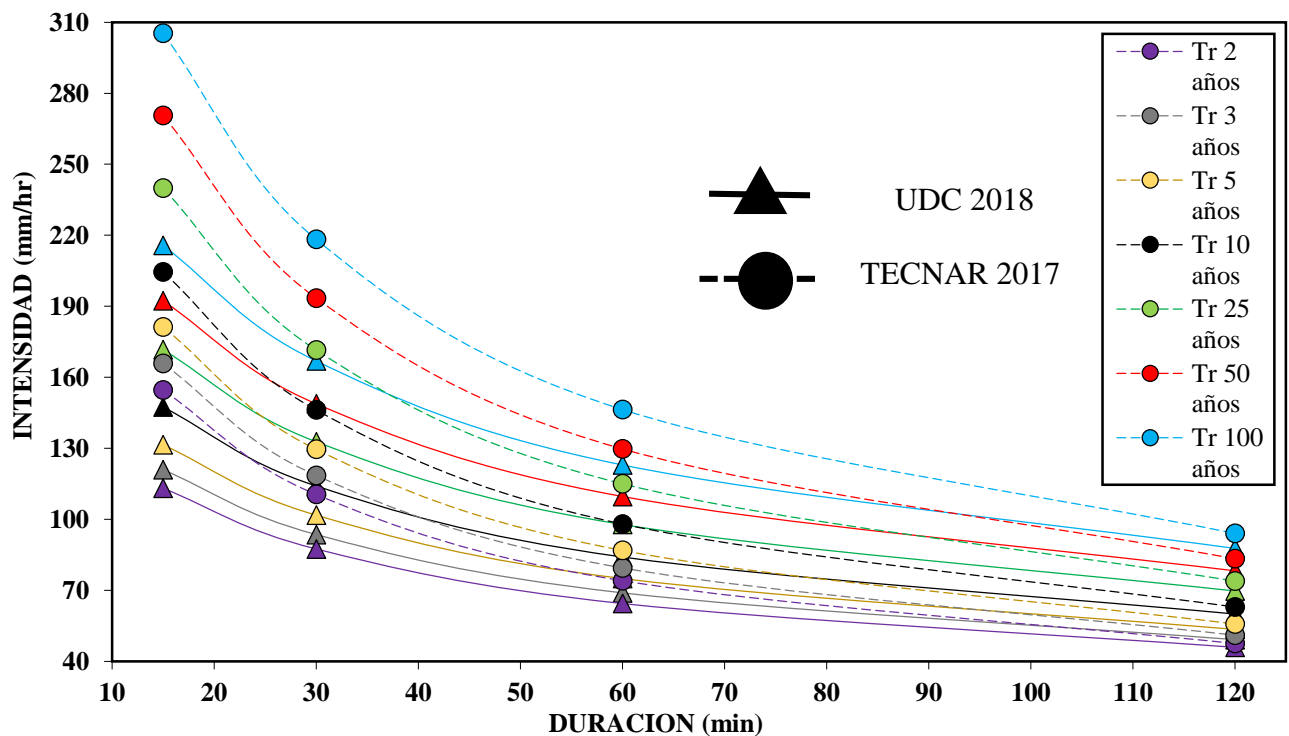
Tabla 50. Intensidades obtenidas por la ecuación de Jaraba, J 2017.

D (min)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)
	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	154,58	165,88	181,29	204,53	239,89	270,64	305,33
30	110,51	118,59	129,61	146,23	171,50	193,48	218,28
60	74,11	79,53	86,92	98,06	115,01	129,75	146,38
120	47,63	51,12	55,87	63,03	73,92	83,40	94,09

Fuente: Elaborado Autores.

Una vez obtenidas las intensidades por medio de cada una de las ecuaciones mencionadas, se procede a graficar las Curvas IDF en comparación UDC 2018 VS TECNAR 2017 (ver Figura 12).

Figura 12. Comparación entre Curvas de Intensidad Duración y Frecuencia (IDF) UDC 2018 VS TECNAR 2017.



Fuente: Elaborado Autores.

En la Figura 12 se observa que los valores de Jaraba, J (2017) son mayores a los presentados por los autores de este trabajo de grado, para cada una de las duraciones establecidas.



Ahora se procede a realizar la variación porcentual para poder apreciar mejor esta distorsión entre los datos mostrados en las tablas 49 y 50. A continuación se muestran los resultados:

Tabla 51. Diferencia porcentual entre las intensidades UDC 2018 y TECNAR 2017.

D (min)	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	-36,64%	-37,14%	-37,77%	-38,63%	-39,78%	-40,65%	-41,53%
30	-26,26%	-26,73%	-27,31%	-28,11%	-29,17%	-29,98%	-30,79%
60	-14,93%	-15,35%	-15,89%	-16,61%	-17,58%	-18,31%	-19,05%
120	-3,58%	-3,96%	-4,44%	-5,09%	-5,96%	-6,63%	-7,29%

Fuente: Elaborado Autores.

En la Tabla 51 se observan que los porcentajes de variación están entre 3,58% y 41,53%, presentándose la mayor diferencia para el periodo de retorno de 100 años con una duración de 15 minutos.

Estas diferencias se pueden aludir al parámetro (k) que es igual a 1364,25 para la ecuación presentada por TECNAR 2017 lo que distorsiona para las intensidades como se observa en la tabla 51.

Comparación de las metodologías entre UDC 2018 y TECNAR 2017.

Las diferencias entre las metodologías para ambos trabajos recaen en cómo se analizó la serie histórica, se tiene que:

Jaraba, J (2017) realizó una recopilación de información mediante cartas pluviográficas para los años de estudios propuestos (1970-2015), escogiendo las dos de mayor intensidad mensual por año durante el tiempo motivo de estudio.

Realizar este tipo de selección altera directamente la elaboración de las curvas IDF, ya que esta selección de datos lleva a la omisión de información pluviográfica, haciendo caso omiso de las temporadas de pocas lluvias o las lluvias de una duración considerable, pero con bajas intensidades, lo que lleva a la alteración de los resultados de las curvas IDF.



Ahora se mostrará una tabla resumida con los porcentajes de variación con respecto a los valores obtenidos por parte de nuestra ecuación presentada en este trabajo de grado.

Tabla 52. Resumen de diferencias porcentuales de los valores establecidos entre los valores establecidos por autores y estudios considerados.

Institución	D (min)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)
		Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
UDC 2018	15	113,13	120,96	131,59	147,54	171,62	192,41	215,73
	30	87,52	93,58	101,81	114,14	132,77	148,86	166,9
	60	64,48	68,94	75	84,09	97,82	109,67	122,96
	120	45,99	49,17	53,49	59,97	69,76	78,22	87,69
Diferencia porcentual %								
UDC 1995	D (min)	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
	15	-1,54%	-2,16%	-2,94%	-4,02%	-5,46%	-6,56%	-7,68%
	30	-0,83%	-1,44%	-2,22%	-3,29%	-4,72%	-5,81%	-6,92%
	60	0,02%	-0,59%	-1,37%	-2,43%	-3,84%	-4,93%	-6,03%
UDC 2008	D (min)	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
	15	-13,05%	-10,60%	-7,59%	-3,64%	1,37%	4,99%	8,48%
	30	-12,70%	-10,26%	-7,26%	-3,32%	1,67%	5,28%	8,76%
	60	-14,79%	-12,30%	-9,25%	-5,23%	-0,15%	3,53%	7,07%
UTB 2012	D (min)	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
	15	-30,02%	-30,34%	-30,74%	-31,28%	-32,00%	-32,55%	-33,11%
	30	-20,77%	-21,06%	-21,44%	-21,94%	-22,61%	-23,13%	-23,64%
	60	-10,61%	-10,88%	-11,22%	-11,69%	-12,30%	-12,77%	-13,24%
IDEAM 2016	D (min)	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
	15	2,22%	-0,12%	-0,84%	0,45%	3,41%	7,01%	10,74%
	30	-0,61%	-0,45%	-6,49%	-6,38%	-4,41%	-1,19%	2,34%
	60	4,44%	-0,85%	-4,36%	-5,78%	-5,35%	-2,95%	-0,07%
TECNAR 2017	D (min)	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
	15	-36,64%	-37,14%	-37,77%	-38,63%	-39,78%	-40,65%	-41,53%
	30	-26,26%	-26,73%	-27,31%	-28,11%	-29,17%	-29,98%	-30,79%
	60	-14,93%	-15,35%	-15,89%	-16,61%	-17,58%	-18,31%	-19,05%
TECNAR 2017	D (min)	Tr = 2 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
	120	-3,58%	-3,96%	-4,44%	-5,09%	-5,96%	-6,63%	-7,29%

Fuente: Elaborado Autores



Es importante tener en cuenta que los valores porcentuales negativos indican que los valores propuestos por otras ecuaciones resultan ser mayores a los propuestos por los autores de este trabajo de grado, dado el caso opuesto, es decir, para valores porcentuales positivos indica que los valores de las intensidades presentadas por los autores son mayores a los presentados por las ecuaciones de los trabajos en mención.

Estas comparaciones se hacen sobre los puntos más importantes abordados en cada trabajo mencionado, no busca desprestigiar o señalar el trabajo de colegas en el área de la ingeniería, sino de contribuir y precisar una mejor elaboración de las curvas IDF para la ciudad de Cartagena, motivando a futuras investigaciones sobre esta temática abordada.



6. CONCLUSIONES

Se concluye que la actualización de las curvas IDF propuestas son aptas para el diseño de obras hidráulicas en la Ciudad de Cartagena, estas cuentan con un ajuste de datos a través del método probabilístico de Valores Extremos Tipo I o Gumbel, determinado como el más adecuado a la serie histórica estudiada según el test de bondad de Chi Cuadrado con un porcentaje de confianza entre el 90% y 99%.

Se evidenció al aplicar el test de Bondad de Chi Cuadrado que el método de Gumbel en comparación con los métodos de Weibull, Pearson Tipo III y GEV, presentó mayor cantidad de valores mínimos, aceptado como el método probabilístico más adecuado para el estudio y ajuste de los eventos máximos de la Estación Aeropuerto Rafael Núñez en la ciudad de Cartagena.

Los parámetros de ajuste que modelan la ecuación matemática propuesta por Monsalve para esta actualización de las curvas IDF son: $k= 585,028$ $m= 0,166$ $n= 0,5464$, y que estos parámetros variarán según la cantidad de años de estudio y según las intensidades máximas calculadas.

Las intensidades calculadas presentan una correlación directa expresada en el aumento para cada duración en un periodo de retorno, es decir, se tiene mayor intensidad a mayor periodo de retorno para las curvas IDF.

Las variaciones de las intensidades y precipitaciones no están ligadas a un orden lógico, y que debido a la longitud del registro los márgenes de error para las estimaciones de intensidades se reducen, esta extensión de la serie utilizada a 47 años con 2830 datos analizados, permite inferir que la aplicación de estos resultados es confiable.

Los valores medios de las precipitaciones anuales tenderán a un aumento de 1,9 mm/año, y se estima que dentro de 100 años se tendrá un valor de 190 mm, lo que representa para los valores promedios anuales de precipitación en la ciudad de Cartagena que están entre 1000 y 1500 mm al año según IDEAM, un 19% y un 12,66% respectivamente.



Los valores promedios de las precipitaciones máximas diarias tienden al aumento de 0,116 mm/año, para dentro de 100 años se estima un aumento del 11,6 mm en la ciudad de Cartagena.

Las intensidades, las precipitaciones anuales totales y las precipitaciones máximas diarias son independientes del tiempo o años de estudio, sus coeficientes de correlación se encuentran en el orden de -0,0034 a 0,1145 para las intensidades, 0,0594 para las precipitaciones anuales y 0,0394 para las precipitaciones máximas diarias. Estos bajos coeficientes de correlación, no son valores suficientes para decir que existe una correlación directa entre las variables analizadas.

Al realizar las comparaciones con estudios previos en la ciudad de Cartagena se concluye que:

Las curvas IDF de Almanza, et al (1995) siguen siendo vigentes para el diseño de obras hidráulicas en la ciudad de Cartagena, puesto que los resultados obtenidos presentan diferencias del orden de 0,02 % a 7,68% con respecto a los resultados presentados por los autores de este trabajo, donde los valores obtenidos en el estudio realizado por Almanza, et al (1995) resultan más conservadores, sin embargo se recomienda el uso de las Curvas IDF del año 2018 por su extensión de registro analizado dando así una mayor precisión en las intensidades a menores tiempos de duración.

Con respecto a los trabajos presentados por Barrios, L (2008), Romero, S & Puello (2012) y Jaraba, J (2017), los resultados por medio de sus ecuaciones arrojan una diferencia porcentual entre 0,15% y 41,53%. Estas diferencias se deben a que sus metodologías se basan en la selección de uno o dos de los eventos máximos de las intensidades para cada mes dentro de un año de registro, omitiendo factores importantes o analizando menores datos para la precisión y contribuyendo al sesgo de los datos para la serie de registros.

Al comparar con el estudio realizado por GIREH (2016) en convenio con el IDEAM, resulta una diferencia del orden de 0,12% a 18,63%, presentando la mayor diferencia en la duración de 120 minutos, dando que las intensidades presentadas por los autores son más conservadoras con variaciones mínimas respecto a los datos calculados por parte del IDEAM.



Las curvas IDF actualizadas son importantes y útiles para todos los profesionales del campo de la ingeniería civil e incluso para la Universidad de Cartagena en sus estudios y diseños. Estas curvas actualizadas proveerán una de las herramientas necesarias en el gremio de la ingeniería para la planificación y diseño de infraestructuras hidráulicas, como para la actualización del Plan Maestro de Drenajes Pluviales 2007.



7. RECOMENDACIONES

El estudio se enfocó en realizar una actualización de las curvas IDF, comparar dicha actualización con estudios ya realizados en la ciudad y realizar un análisis del comportamiento de las precipitaciones e intensidades a lo largo de la serie histórica, con el fin brindar nuevas herramientas al campo de la ingeniería y aportar material para posible base bibliográfica acerca de temas hidrológicos para la ciudad de Cartagena.

Este estudio no se enfatiza en dar un veredicto acerca de la problemática del cambio climático, no obstante, se propone continuar con estudios que permitan evaluar la idea de un cambio climático para la ciudad de Cartagena, incluyendo además de la evaluación del comportamiento de las intensidades y precipitaciones, el análisis de las temperaturas, el brillo solar, el aumento del nivel marítimo en las zonas costeras y el análisis de los fenómenos del niño y de la niña para la serie histórica de datos.

Se recomienda realizar estudios que incluyan análisis estadísticos por medias móviles y análisis residuales.

En el análisis e interpretación de los datos para la obtención de las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) se recomienda para futuras extensiones de la serie histórica, la extracción de la información de las bandas o cartas pluviográficas de la estación y el análisis puntual de los eventos cada 10 minutos.

Se recomienda volver a realizar el estudio dentro de un periodo mínimo de 7 años para garantizar que el modelo utilizado sea más confiable.

Es indispensable que la institución encargada de la recolección, almacenamiento y suministro de los datos pluviográficos IDEAM, continúe garantizando las operaciones de mantenimiento y calibración en las estaciones pluviográficas con el fin de hacer los registros más completos y representativos.

Es conveniente realizar el ajuste de los eventos máximos registrados en la serie de estudio para la estación Aeropuerto Rafael Núñez, a través del método de probabilidad de Gumbel o Valores Extremos Tipo I.



8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- ACOSTA P, SIERRA L . 2013. Evaluación de Métodos de Construcción de Curvas IDF a partir de Distribuciones de Probabilidad y parámetros de Ajuste. Ref. <http://www.scielo.org.co/pdf/rfing/v22n35/v22n35a03.pdf>
- ALCALDÍA DE CARTAGENA DE INDIAS, IHSA, UNIVERSIDAD DE CARTAGENA. (2007). Estudios y Diseños del Plan Maestro de Drenajes Pluviales del Distrito de Cartagena de Indias.
- ALCALDÍA DE CARTAGENA DE INDIAS, MADS, INVEMAR, CDKN Y CÁMARA DE COMERCIO DE CARTAGENA. (2014). Plan 4C: Cartagena de Indias Competitiva y Compatible con el Clima. (A. P. Zamora Bornachera, A. López Rodríguez, V. Trujillo Gedeón, C. Martínez Zuleta, & G. y. Llinás, Edits.) Serie de Publicaciones Generales del INVEMAR No. 63.
- Almanza, L; Martínez, O; Velásquez, R. 1995. Pre diseño del alcantarillo pluvial del sector de San Vicente de Paul Cartagena de Indias. Universidad de Cartagena Biblioteca Campus Piedra de Bolívar.
- Arrieta, A, IHSA.2017. análisis de las precipitaciones en la estación aeropuerto Rafael Núñez. Documento suministrado por el director del trabajo de grado, Alfonso Arrieta Pastrana. (NO PUBLICADO)
- ARRIETA, A. Hidrología Practica Para Ingenieros. Universidad de Cartagena Facultad de Ingeniería. Ref (Pdf). (NO PUBLICADO)
- BARRIOS, L 2008. Actualización de Las Curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF) de La Estación del Aeropuerto Rafael Núñez de La Ciudad de Cartagena Universidad de Cartagena Biblioteca Campus Piedra de Bolívar.
- Brown, O; Gallardo, Y; Correa, A; Barrios, S. 2015. El cambio climático y sus evidencias en las precipitaciones. Fuente: <http://eds.b.ebscohost.com/eds/detail/detail?vid=2&sid=7c8f5ed4-186d-4719-83064a2903036e78%40sessionmgr104&bdata=Jmxhbmc9ZXMmc2l0ZT1lZHMtbGl2ZQ%3d%3d#AN=111093203&db=a9h>. base de datos Universidad de Cartagena.



- CARCIENTE, J. 1980. Carreteras estudio y proyectos. Caracas, Venezuela. Ediciones Vega s.r.l.
- CATAÑO, J; NIEVES, D. 2003. Elaboración de Las Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia de Las Lluvias en Las Estaciones Pluviográficas Almirante Padilla (Riohacha), Urumita y Roche (Barranca), Localizadas en El Departamento de La Guajira. Ref. Universidad de Cartagena Biblioteca Campus Piedra de Bolívar.
- CENTRO DE INVESTIGACIONES OCEANOGRÁFICAS E HIDROGRÁFICAS CIOH. 2010. Climatología de los Principales Puertos Del Caribe Colombiano. Ref. (PDF):
<https://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/Climatologia%20Cartagena.pdf>
- CHOW, V.; MAIDMENT, D.; MAYS, L. 1994. *Manual de Hidrología Aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: Mc Graw-Hill.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal). 2012. Valoración de daños y pérdidas. Ola invernal en Colombia, 2010-2011 Bogotá: Misión BID - Cepal.
- CORZO, F; PINILLA, C. 2015. Comparación de Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) Reales y Sintéticas. Caso de Estudio Municipio de Anapoima (Cundinamarca). Ref. (Web):
<http://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2360/1/Informe%20Final%20Trabajo%20Grado%20-Junio%202015.pdf>.
- FUSEK, M; HELLEBRAND, R Y MICHÁLEK, J.2016. Modelling precipitation extremes in the Czech Republic: update of intensity–duration–frequency curves. Ref: <http://basesdedatos.unicartagena.edu.co:2219/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=3&sid=6c6278af-cf5c-4f14-af80-8229a3a5033d%40pdc-v-sessmgr01>.
- González, A y Coronado, O. 2017. Análisis de frecuencia estacionario y no estacionario de lluvias máximas en 24 horas para la estación aeropuerto Rafael Núñez- Cartagena de indias. Fuente: sociedad de ingenieros de bolívar, documento suministrado por el director del trabajo de grado, Alfonso Arrieta Pastrana.
- GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS (GIREH), de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de



Colombia sede Bogotá. 2016. CURVAS INTENSIDAD DURACION FRECUENCIA - IDF ESTACIÓN: APTO RAFAEL NUÑEZ (CARTAGENA DE INDIAS). Fuente:

http://www.ideam.gov.co/documents/10182/24541172/IDF_14015020_APTO_RAFAEL_NUNEZ.pdf/39e540c6-e799-4e4e-8271-a248932740cd?version=1.0.

- GUTIERREZ J, PÉREZ F, ANGULO G, CHIRRIBOGA G, Valdez L. 2015. Análisis de la Variación en Precipitaciones de Cartagena de Indias Colombia.
- HIMAT (1987) INSTITUTO DE HIDROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM), Manual del Observador Meteorológico Estación Climatológica.
- I. MESTRE; M.J. CASADO; E. RODRÍGUEZ.2015. Tendencias observadas y proyecciones de cambio climático sobre España. Ref.: http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/cap2-tendenciasobservadasyproyeccionesdecambioclimaticosobreespana_tcm7-403925.pdf
- IDEAM. 2010. Atlas climatológico de Colombia 1981-2010. Ref.: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>.
- Jaraba, J, TECNAR. (2017). Determinación de curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) para Cartagena de Indias en Colombia. Periodo (1970-2015). Ref.: <https://www.researchgate.net/publication/318574137>
- MARQUEZ, A; MELARA, R. 2014. Propuesta de actualización de curvas Intensidad – Duración – Frecuencia en la zona oriental de El Salvador. Ref.: <http://ri.ues.edu.sv/7547/>
- MERCADO, G 2009. Análisis de Frecuencia de la Precipitación Máxima. Cartagena, Colombia. Ref. Universidad de Cartagena Biblioteca Campus Piedra de Bolívar.
- MINTEGUI, J.; LÓPEZ, F. 1990. La ordenación agro-hidrológica en la planificación. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Vitoria – Gasteiz. España. 306 p.



- MONSALVE SAENZ, G. Hidrología en la Ingeniería. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. 2ª. Edición. Santafé de Bogotá. 2002.
- MONTEALEGRE J, (2007) Modelo Institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia. Pag 7. Ref. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Modelo+Institucional+El+Ni%C3%B1o+-+La+Ni%C3%B1a.pdf/232c8740-c6ee-4a73-a8f7-17e49c5edda0>.
- MONTEALEGRE, J. (1990) Técnicas Estadísticas Aplicadas en el Manejo de Datos Hidrológicos y Meteorológicos. Bogotá. HIMAT, 1990. 45 p.
- PHI, PIZARRO, R; ARAVENA, D; MACAYA, K; ABARZA, A; CORNEJO, M; LABRA, M; PAVEZ, M; ROMAN, L, UNESCO. 2007. Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia para la zona centro sur de Chile. Ref.: <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002281/228195S.pdf>
- PIZARRO, R; FLORES, J; SANGUESA, C; MARTINEZ, E. Módulo 2 Curvas de Intensidad Duración Frecuencia IDF. Sociedad estándares de ingeniería para aguas y suelos. Recuperado de la Ref.: http://eias.utralca.cl/Docs/pdf/Publicaciones/manuales/b_modulo_IDF.pdf
- POBOČÍKOVA, SEDLIAČKOVA, MICHALKOVA. 2017. Application of Four Probability Distributions for Wind Speed Modeling. Ref (Web): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817326693>.
- PUELLO, S; ROMERO, E. 2012. Propuesta Metodológica Para La Elaboración De Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia, Utilizando Distribuciones Mixtas de Probabilidad: Caso de estudio, Estación Sinóptica Principal Aeropuerto Rafael Núñez. Ref. Universidad Tecnológica de Bolívar Biblioteca Virtual.
- SILVEIRA, L; USERA, G; ALONSO J; SCAVONE, M; CHRETIES, C. 2014. Nuevas Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia De Precipitación Para El Departamento de Montevideo, Uruguay. Ref. (Web): http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482014000100012.



- SVENSSON, C Y JONES, D.2010. Review of rainfall frequency estimation methods. Ref: <https://basesdedatos.unicartagena.edu.co:2607/doi/abs/10.1111/j.1753-318X.2010.01079.x>.
- V.T. CHOW, 2000 “Estadística hidrológica”, Hidrología aplicada, Bogotá: McGraw Hill.
- VILLARREAL, M. 2015. Aproximación Metodológica Para Determinar Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia, Utilizando La Distribución Mixta de Probabilidad Doble Gumbel. Ref. Universidad Tecnológica de Bolívar Biblioteca Virtual.



Actualización de las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF)
para la estación “Aeropuerto Rafael Núñez” de la ciudad de Cartagena de Indias D.T y C.
(1970 – 2016).



ANEXOS



**ANEXO I – FOTOGRAFIA PLUVIOMETRO ESTACION AREA OPERATIVA
IDEAM 02 SEDE BARRANQUILLA**





ANEXO II – FOTOGRAFIA PLUVIOGRAFO ESTACION AREA OPERATIVA IDEAM SEDE BARRANQUILLA





ANEXO III – TABLA DE VALORES CRITICOS TEST CHI – CUADRADO.

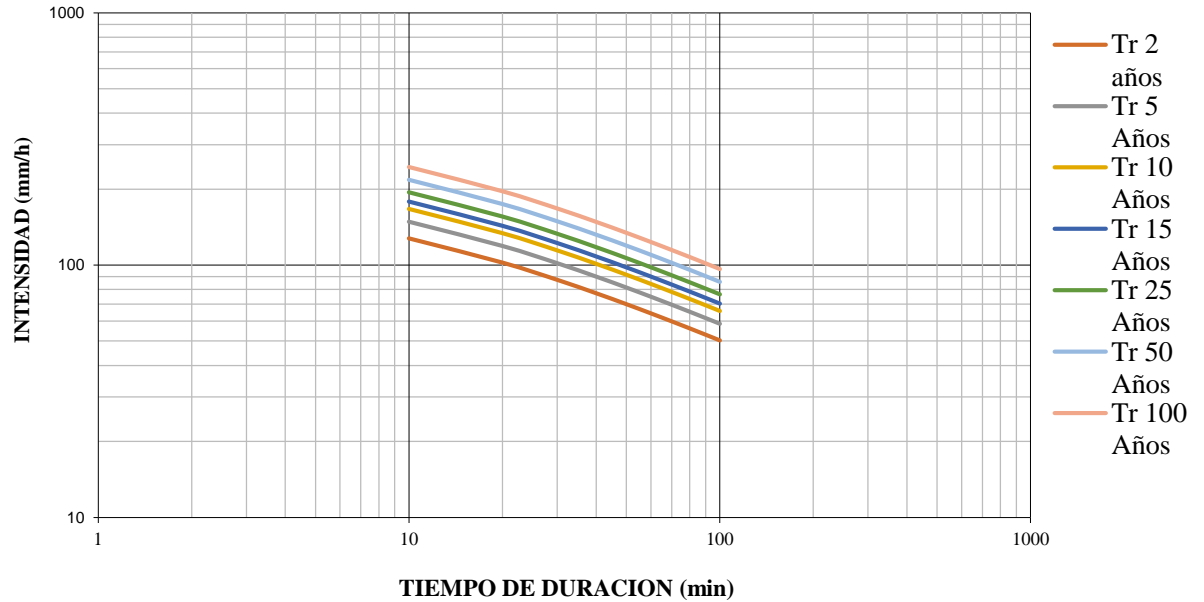
VALORES CRITICOS CHI CUADRADO						
	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	
g.d.l						g.d.l
1	6.635	5.412	3.841	2.706	1.642	1
2	9.21	7.824	5.991	4.605	3.219	2
3	11.345	9.837	7.815	6.251	4.642	3
4	13.277	11.668	9.488	7.779	5.989	4
5	15.086	13.388	11.07	9.236	7.289	5
6	16.812	15.033	12.592	10.645	8.558	6
7	18.475	16.622	14.067	12.017	9.803	7
8	20.09	18.168	15.507	13.362	11.03	8
9	21.666	19.679	16.919	14.684	12.242	9
10	23.209	21.161	18.307	15.987	13.442	10

Fuente: Elaborado Autores



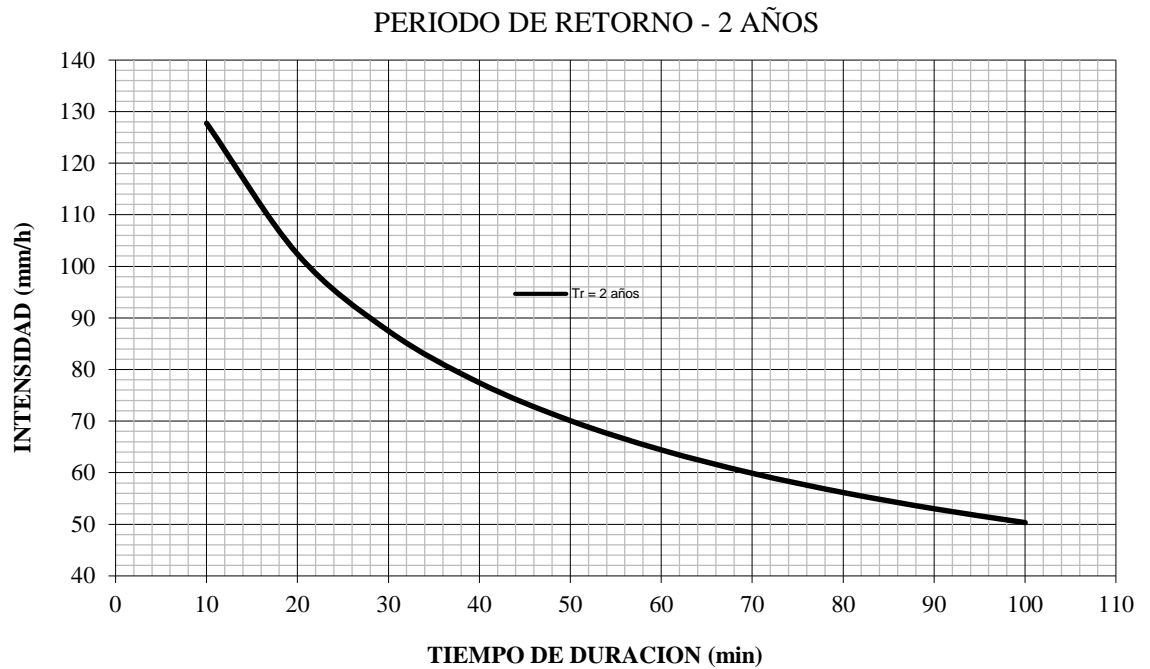
ANEXO IV – CURVA DE INTENSIDAD DURACION Y FRECUENCIA ESTACION AEROPUERTO RAFAEL NUÑEZ ESCALA LOGARITMICA.

Curvas de Intensidad Duracion y Frecuencia (IDF) 1970 - 2016
Estacion: Aeropuerto Internacional Rafael Nuñez



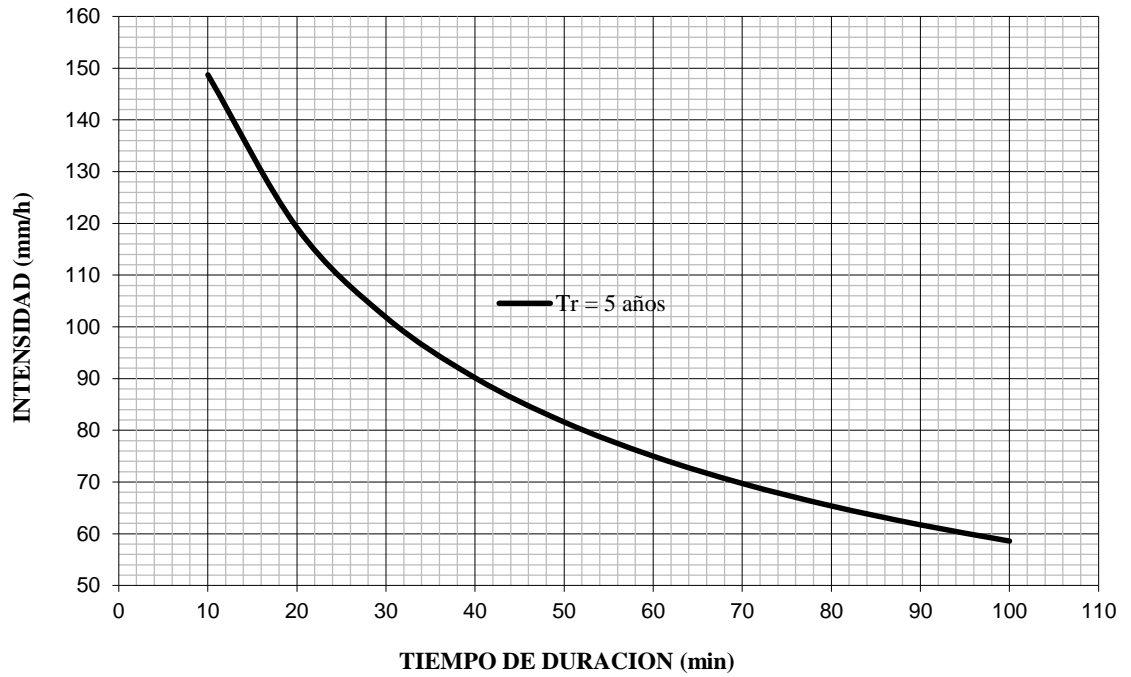


**ANEXO V – VALORES Y GRAFICAS PARA CADA PERIODO DE RETORNO.
CURVA INTENSIDAD DURACION Y FRECUENCIA ESTACION. AEROPUERTO
RAFAEL NUÑEZ 1970 - 2016.**

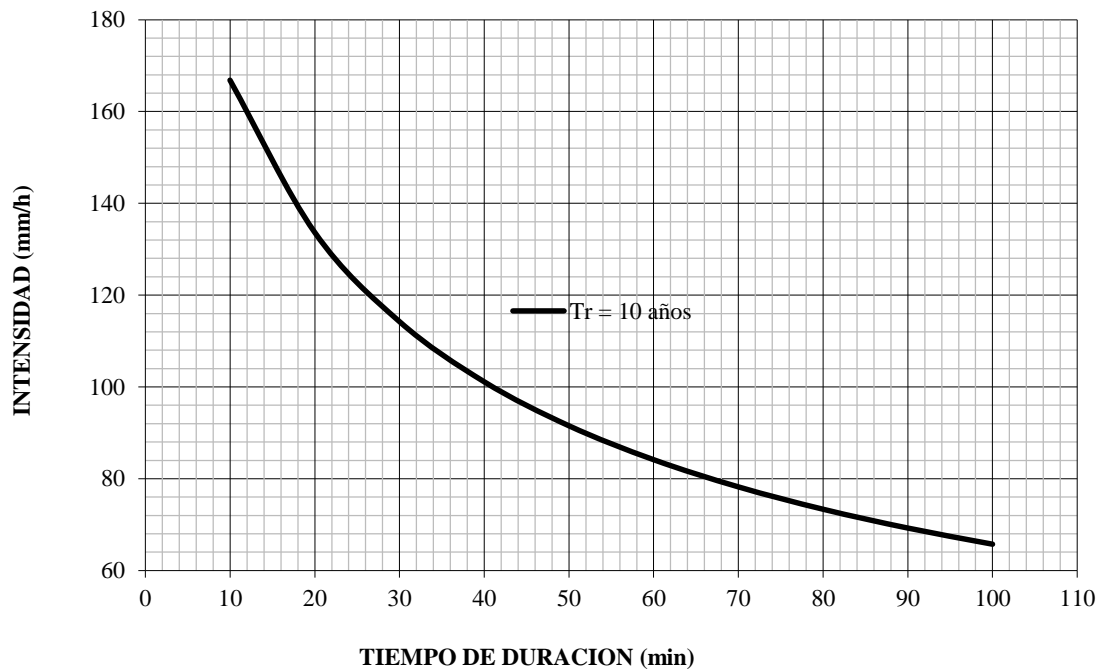




PERIODO DE RETORNO - 5 AÑOS

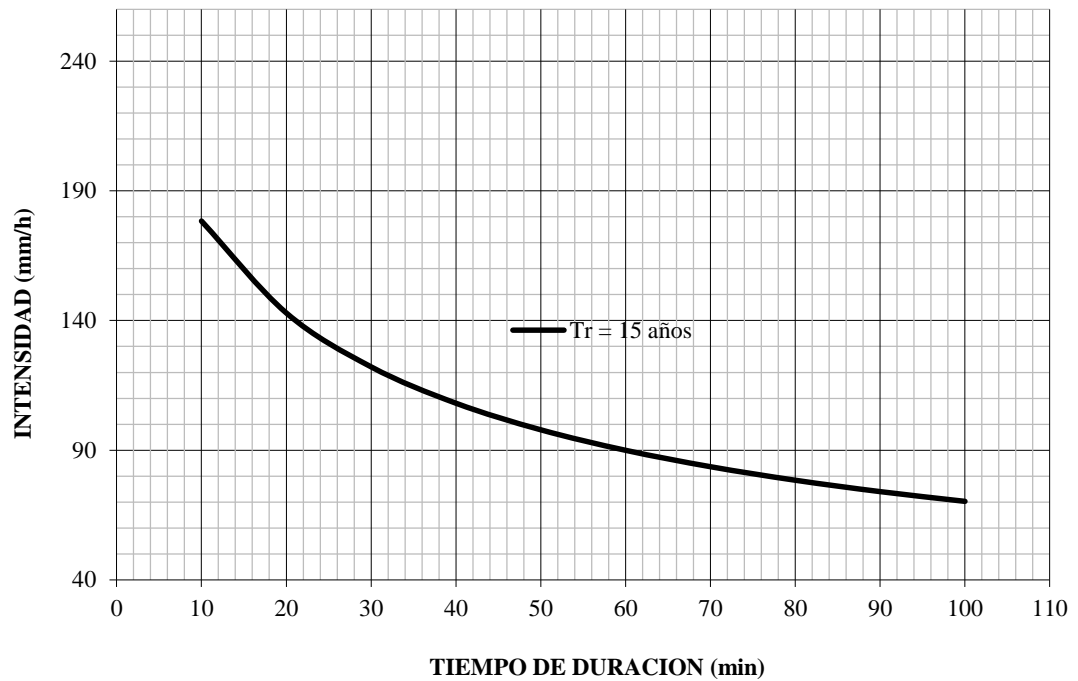


PERIODO DE RETORNO - 10 AÑOS

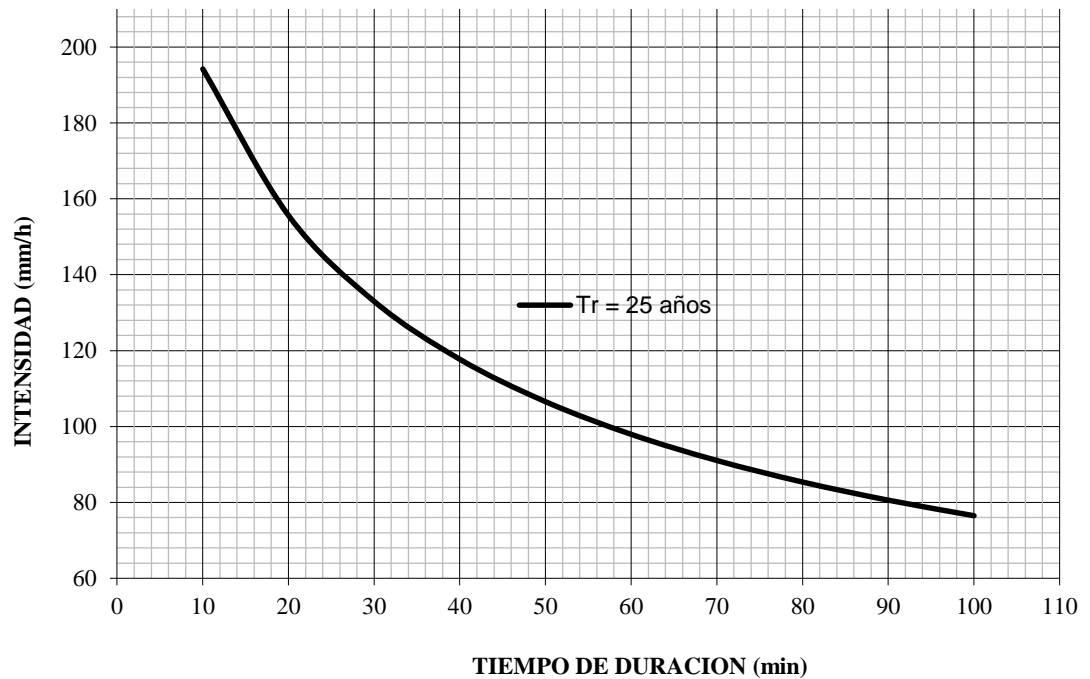




PERIODO DE RETORNO - 15 AÑOS

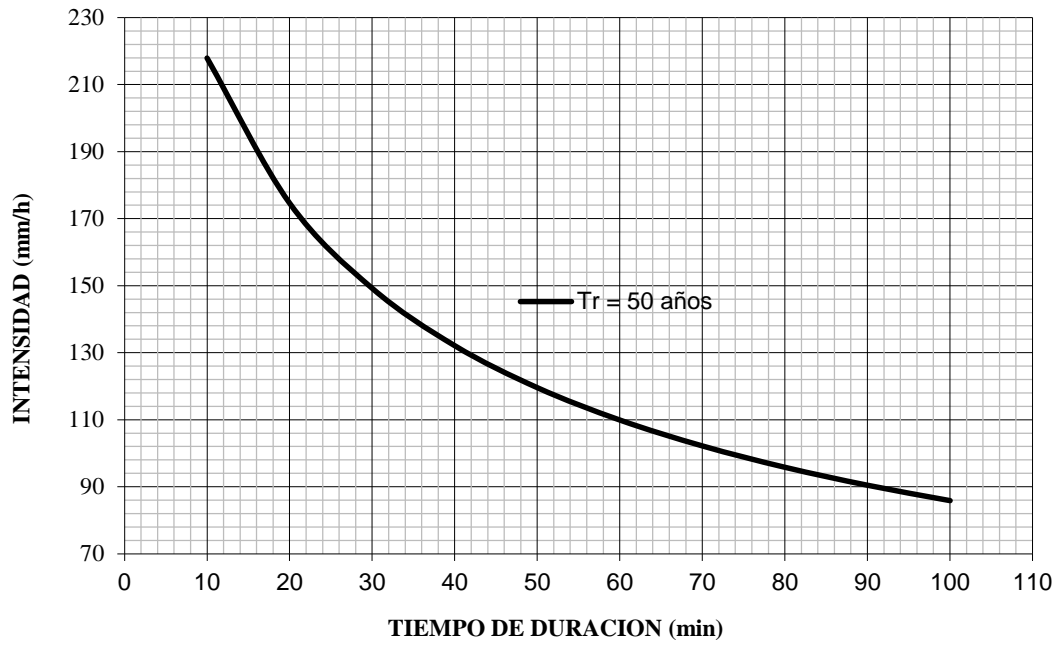


PERIODO DE RETORNO - 25 AÑOS





PERIODO DE RETORNO - 50 AÑOS



PERIODO DE RETORNO - 100 AÑOS

