



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA
T U N J A
Experiencia y Calidad



ESTIMACIÓN DE CURVAS INTENSIDAD, DURACIÓN Y FRECUENCIA (IDF) EN PUNTOS GEOGRÁFICOS SIN REGISTROS HISTÓRICOS DE PRECIPITACIÓN.

Trabajo presentado como requisito para optar por el título de Magister en Ingeniería Civil
Con Énfasis en hidroambiental

PEDRO MAURICIO ACOSTA CASTELLANOS

Universidad Santo Tomás Seccional Tunja
Maestría en Ingeniería Civil con Énfasis en hidroambiental

2017

ESTIMACIÓN DE CURVAS INTENSIDAD, DURACIÓN Y FRECUENCIA (IDF) EN PUNTOS
GEOGRÁFICOS SIN REGISTROS HISTÓRICOS DE PRECIPITACIÓN.

Autor:

PEDRO MAURICIO ACOSTA CASTELLANOS

Diretor

Carlos Andrés Caro Camargo, Ph.D.

Universidad Santo Tomás Seccional Tunja

Maestría en Ingeniería Civil con Énfasis en hidroambiental

2016



GLOSARIO

Año hidrológico: Año hidrológico sin. año hidráulico; véase también año climático; Período continuo de doce meses seleccionados de manera que los cambios globales en el almacenamiento sean mínimos, por lo que la cantidad sobrante de un año al siguiente se reduce al mínimo.

Avenida/inundación/aguas altas: Elevación, generalmente, rápida en el nivel de las aguas de un curso, hasta un máximo a partir del cual dicho nivel desciende a una velocidad menor.

Avenida anual: Punta máxima de caudal instantáneo en un año hidrológico. Crecida igualada o superada una vez cada año como media.

Avenida de proyecto/Avenida máxima posible/Caudal máximo probable: Caudal que puede esperarse de la más extrema combinación de condiciones hidrológicas y meteorológicas, que se consideren razonablemente características de la región geográfica de que se trate, excluyendo las combinaciones extremadamente improbables.

Correlación cruzada/correlación serial: Interdependencia o relación entre dos procesos estocásticos.

Curvas IDF: Las curvas intensidad, duración y 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 (Temez Peláez, 1978).



Cuenca/cuenca de drenaje: Área de drenaje de un curso de agua, río o lago.

Duración: Es un espacio de tiempo o ventana de tiempo, donde se registra la profundidad de precipitación, usualmente dada en minutos.

Dato anómalo: Número pequeño de elementos de una muestra tan diferenciados de los restantes que cabe preguntarse si no pertenecen a una población diferente o si la técnica de muestreo es defectuosa.

Datos de campo: Información obtenida sobre el terreno, como ayuda en la interpretación de datos obtenidos por teledetección.

Datos históricos: Datos hidrológicos y meteorológicos referentes a fenómenos ocurridos en el pasado.

Datos puntuales: Observaciones en un determinado emplazamiento, por ejemplo, en un pluviómetro o en una estación de aforo.

Distribución de probabilidad/distribución de frecuencia: Distribución que expresa la probabilidad de un valor de la variable en función de dicha variable.

Hidrograma: Expresión, gráfica o no, de la variación del caudal a lo largo del tiempo. Nota: El sentido es menos general que en inglés. En el caso de representar la variación de los niveles se denomina "limnigrama".



Hidrología: Ciencia que estudia las aguas superficiales y subterráneas de la Tierra, y su aparición, circulación y distribución, tanto en el tiempo como en el espacio, sus propiedades biológicas, químicas y físicas, sus reacciones con el entorno, incluyendo su relación con los seres vivos. 2) Ciencia que estudia los procesos que rigen el agotamiento y recarga de los recursos hídricos continentales, y que trata las diversas fases del ciclo hidrológico.

Hidrometeorología: Estudio de las fases atmosférica y terrestre en el ciclo hidrológico, en especial de sus interrelaciones.

Intensidad: Es definida como la tasa temporal de precipitación, es decir la profundidad de precipitación por unidad de tiempo (mm/h). Puede ser la intensidad instantánea o la intensidad promedio sobre la duración de la lluvia (Ven Te Chow, 1994).

Interpolación: Metodología matemática, que a partir de dos o más puntos en los que se encuentra información conocida, encuentra valores internos dependiendo de la distribución de dicha información.

Isolíneas: Una isolínea (también llamada, isopleta, curva de nivel, isógrama o isaritma), para una función de varias variables, es una curva que conecta los puntos en que la función tiene un mismo valor constante. Las isolíneas que se representan en un mapa son líneas, rectas o curvas, que describen la intersección de una superficie real o hipotética con uno o más planos horizontales. La configuración de estas curvas permite a los lectores del mapa inferir el gradiente relativo de la variable o parámetro y estimar un valor en un lugar determinado.



Isovalores: Corresponde al conjunto de valores de cualquier característica, determinados por técnicas de interpolación, de tal forma que al unirlos generen una curva que representa valores iguales de la característica o parámetro bajo análisis

Periodo de retorno: Es el intervalo de tiempo medio que separa dos eventos cuya intensidad alcanza o sobrepasa un límite dado (Bertrand Krajewski, 2000).

Pluviómetro: Es un instrumento que mide la cantidad de agua lluvia en un periodo de tiempo. Básicamente, es un recipiente en cuyo extremo superior tiene una entrada de 200 cm² normalmente de área por donde el agua ingresa a través de un embudo hacia un colector, quedando depositada. Posteriormente, esta precipitación es medida mediante una probeta graduada en mm, mediante la cual obtendremos la cantidad de agua caída.

Pluviógrafo: Es un instrumento de medición meteorológico manejado en el estudio y análisis de las precipitaciones. El pluviógrafo registra en un gráfico la cantidad de agua caída en un periodo de tiempo determinado, lo cual permite establecer la distribución e intensidad de las lluvias, ya que permite conocer la hora de comienzo y finalización de las precipitaciones, así como su intensidad.

Precipitación: es cualquier tipo de agua que cae sobre la superficie terrestre, las diferentes formas de precipitación incluyen llovizna, lluvia, nieve, granizo, agua, y lluvia congelada.

Serie de valores extremos: Serie hidrológica constituida por los valores máximos o mínimos, cada uno de los cuales han sido seleccionados dentro de intervalos iguales de tiempo.

Regionalización: Generalización de un comportamiento, partiendo de información real base, interpolando estos valores y generando una tendencia de los mismos.



CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	19
2.	JUSTIFICACIÓN.....	22
3.	OBJETIVOS.....	24
3.1.1.	Objetivo general.	24
3.1.2.	Objetivos específicos.....	24
4.	DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.	25
5.	ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE.	28
5.1.1.	Métodos de interpolación asistidos por sistemas de información geográfica.	28
6.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	35
6.1.	Precipitación	35
6.2.	Tormenta de diseño	35
6.3.	Medición de la precipitación	36
6.3.1.	Equipos colectores.....	37
6.3.2.	Pluviómetro.	37
6.3.3.	Pluviógrafos.....	38
6.3.4.	Registros pluviográficos.	39
6.3.5.	Pluviograma.....	39
6.4.	Curvas IDF.	40
6.4.1.	Intensidad.	41
6.4.2.	Duración.	42
6.4.3.	Frecuencia.....	42
6.4.4.	Periodo de retorno.	42
6.5.	Aplicación curvas IDF.....	43



6.6. Métodos de construcción de curvas IDF a partir de información pluviográfica.	45
6.6.1. Distribuciones de probabilidad.....	46
6.6.2. Distribución de probabilidad Valor Extremo Tipo I, EVI.....	46
6.6.4. Parámetros estadísticos.....	48
6.6.5. Estimación de parámetros por el ajuste a una distribución de probabilidad.	49
6.6.6. Método de los momentos.....	49
6.6.7. Método de máxima verosimilitud.....	50
6.6.8. Estimación de curvas IDF a partir del análisis de funciones de distribución.	51
6.7. Métodos de interpolación local.....	54
6.7.1. Distancia inversa ponderada (DIP) o Inverse Distance Weighted (IDW)....	54
7. METODOLOGÍA.....	56
7.1. Flujograma de la metodología desarrollada.	56
7.2. Consideraciones generales.....	57
7.3. Construcción de curvas IDF a partir de información pluviográfica.	58
7.4. Ejemplo de construcción de una curva IDF, mediante el ajuste a una función de densidad de probabilidad.	58
7.4.1. Máximos anuales.....	58
7.4.2. Tratamiento estadístico de la muestra de máximos anuales.	60
7.4.3. Determinación de los parámetros de la función de probabilidad Valor Extremo Tipo I.	60
7.4.4. Determinación de la curva IDF mediante la función de probabilidad EVI... ..	61
7.5. Análisis de posibilidades de interpolación y obtención de curvas IDF, en zonas sin registros de precipitación.	63
7.5.1. Interpolación de curvas IDF por intensidad media de precipitación.	64



7.5.2. Interpolación de parámetros de ajuste de la función de densidad de probabilidad de valor extremo tipo I (EVI), para la determinación de curvas IDF en lugares sin instrumentación.....	67
7.5.3. Determinación de mapas de zonificación con los datos interpolados para la construcción curvas IDF en lugares sin información.	69
8. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	70
8.1. Curvas IDF “reales” de la zona de estudio.	70
8.2. Estimación de curvas IDF mediante interpolación Intensidades.....	75
8.2.1. Obtención de las curvas IDF.	76
8.2.2. Validación cruzada de las curvas IDF.	77
8.2.3. Curvas con intensidad media interpolada con Valor extremo tipo I y máxima verosimilitud (EVI-ML).	78
8.2.4. Validación cruzada para curvas interpoladas por EVI-ML.	79
8.2.5. Obtención de curvas con intensidad media tratada con Valor extremo tipo I y momentos ordinarios (EVI-OM).	80
8.2.6. Validación cruzada para curvas interpoladas por EVI-OM.....	81
8.3. Interpolación de parámetros u y α , para la estimación de curvas IDF, en zonas sin instrumentación.	82
8.3.1. Organización de los parametros para la interpolación.....	85
8.3.2. Construcción de curvas IDF con los parámetros interpolados.	87
8.3.3. Validación cruzada de las curvas IDF obtenidas por interpolación de parámetros.....	89
8.4. Analisis comparativo de los metodos de estimación de curvas IDF propuestos para zonas sin instrumentación, frente al metodo sintetico del INVIAS.....	91
8.4.1. Generalidades del método simplificado.	91



8.4.2. Validación cruzada entre las curvas IDF sintéticas, IDF interpoladas por intensidades y por parámetros, frente a las reales.....	93
8.4.3. Construcción Curva IDF por método simplificado estación UPTC-Tunja. ..	94
8.4.4. Validación del método simplificado en relación a una curva IDF, “real” tratada con EVI-ML.....	97
9. CONCLUSIONES.....	102
10. BIBLIOGRAFÍA.....	105



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Periodo de retorno para el modelo de máximos anuales.	43
Tabla 2. Intensidades máximas (mm/h) para cada duración y periodo de retorno.	57
Tabla 3. Máximos anuales estación UPTC, Tunja.	59
Tabla 4. Media aritmética de la muestra de máximos anuales para la estación UPTC, Tunja.	60
Tabla 5. Desviación estándar de la muestra de máximos anuales para la estación UPTC, Tunja.	60
Tabla 6. Parámetro μ y α por OM, para la estación UPTC, Tunja.....	61
Tabla 7. Parámetro μ y α por ML, para la estación UPTC, Tunja.....	61
Tabla 8. Valores de Y_T para la estación UPTC, Tunja.	62
Tabla 9. Curva IDF, estación UPTC, Tunja.	63
Tabla 10. Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov	70
Tabla 11. Información curva IDF estación Potrerito-Aquitania.....	71
Tabla 12. Información curvas IDF estación Tunguavita-Paipa.....	71
Tabla 13. Información curva IDF estación Pesca-Pesca.....	72
Tabla 14. Información curva IDF estación Villa del Carmen-Samacá	73
Tabla 15. Información curva IDF estación Tota-Tota	73
Tabla 16. Información curva IDF estación UPTC-Tunja	74
Tabla 17. Información curva IDF estación Azulejos-Tuta	74
Tabla 18. Intensidades de precipitación para 2 años.	75
Tabla 19. Datos IDW por intensidades EVI-ML Estación UPTC-Tunja.	78
Tabla 20. Diferencia porcentual en las curvas IDF. Real Vs. Interpolada. IDW, EVI-ML Estación UPTC-Tunja.....	79
Tabla 21. Datos IDW por intensidades Método EVI-OM Estación UPTC-Tunja.	80
Tabla 22. Porcentajes de diferencia IDW por intensidades, con EVI-OM Estación UPTC- Tunja.	82
Tabla 23. Parametros u y α estacion Aquitania-Poterito, con EVI-ML.	83



Tabla 24. Parametros u y alfa estacion Tanguavita-Paipa, con EVI-ML.	83
Tabla 25. Parametros u y alfa estacion Pesca-Pesca, con EVI-ML.....	83
Tabla 26. Parametros u y alfa estacion Villa del Carmen-Samaca, con EVI-ML.	84
Tabla 27. Parametros u y alfa estacion Tota-Tota, con EVI-ML.	84
Tabla 28. Parametros u y alfa estacion Uptc-Tunja, con EVI-ML.	84
Tabla 29. Parametros u y alfa estacion Azulejos-Tuta, con EVI-ML.	85
Tabla 30. Parametros Alfa y U de las siete estaciones obtenidos con EVI-ML.....	86
Tabla 31. Valor de Y_T para cada periodode retorno.	88
Tabla 32. Curva IDF, UPTC, Tunja. , Metodo IDW, m=0,5, con EVI-ML.	88
Tabla 33. Porcentaje de diferencia Curva IDF UPTC, Metodo IDW, M=0,5 con EVI-ML	89
Tabla 34. Precipitación máxima anual histórica en 24 horas, estación UPTC.....	94
Tabla 35. Valores para el método simplificado. Tunja.	96
Tabla 36. Curva IDF, mediante el método simplificado, estación UPTC Tunja.	97
Tabla 37. IDF real, estación UPTC, Tunja.	98



LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Mapa de interpolación de intensidades para 2 años, 60 minutos.	77
Gráfica 2. Curva IDF Estación UPTC- Tunja.....	79
Gráfica 3. Curva IDF Estación UPTC- Tunja Método IDW, con EVI-ML.....	81
Gráfica 4. Mapa de parametro U, para una duración de 320 minutos.	87
Gráfica 5. Comportamiento de la curva IDF real vs. Las estimadas por métodos alternativos, para periodos de retorno de 2 años hasta 20 años.	99



LISTA DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 1. La precipitación anual [mm] en el período normal estándar 1961-1990	33
Ilustración 2. Pluviómetro Tipo B	37
Ilustración 3. Pluviógrafo de balancín	39
Ilustración 4. Pluviograma.	40
Ilustración 5. Ejemplo curva IDF Estación Cucaita (Boyacá).....	41
Ilustración 6. Función de densidad de probabilidad para Valor extremo tipo I.	48
Ilustración 7. Relación de variables para distribuciones de probabilidad, aplicada a valores extremos hidrológicos.	53
Ilustración 8. Flujograma metodológico.....	56
Ilustración 9. Proceso de interpolación por intensidades.....	65
Ilustración 10. Proceso de obtención de una intensidad interpolada.	66
Ilustración 11. Muestra de proceso de interpolación por parámetros.....	67
Ilustración 12. Proceso de obtención de un parámetro interpolado.....	68



LISTA DE SÍMBOLOS.

- α : Parámetro de ajuste de la función de probabilidad de valor extremo tipo i.
- U: Parámetro de ubicación de la función de probabilidad de valor extremo tipo i.
- $\bar{X}$: Media aritmética.
- S_x : Desviación estándar.
- T: Periodo de retorno.
- I: Intensidad media de precipitación.
- T_d: Duración del evento de precipitación.
- D: Duración, expresada como ventana de observación.
- P: Profundidad de precipitación o profundidad de lluvia.
- T_{am}: Periodo de retorno del modelo de máximos anuales.



RESUMEN

Las curvas o relaciones intensidad-duración-frecuencia de precipitaciones (IDF) son una de las herramientas más utilizadas en ingeniería de recursos hídricos e hidráulicos, para procesos de planificación, diseño y operación de los proyectos; así como para la protección contra inundaciones (Koutsoyiannis, 1998).

Usualmente las curvas IDF se determinan mediante análisis del mayor número posible de registros pluviográficos, pertenecientes a una estación de estudio; dado que en las cartas pluviográficas están consignados los perfiles de cada tormenta, es decir, la profundidad de precipitación acumulada en función del tiempo. Un inconveniente que se presenta con este tipo de información, puntualmente en Colombia es que ésta clase de registros es escasa pues no existe un gran número de estaciones. A pesar de que estas curvas sean una herramienta de uso continuo en la ingeniería, esta situación evidencia que por lo menos en Colombia, se tiene gran cantidad de interrogantes que no han sido resueltos satisfactoriamente; en el estudio de las precipitaciones máximas y la obtención de curvas IDF.

En razón a esto, la investigación propuesta se centra en el análisis de alternativas para la obtención de curvas IDF confiables, a partir de los registros históricos de las estaciones pluviográficas, en puntos geográficos donde no se encuentren estaciones de este tipo. Los métodos analizados se basarán específicamente en el estudio de los registros históricos pluviográficos de siete estaciones localizadas en el centro del departamento de Boyacá, Colombia. A partir de esta información, se extenderá la información mediante métodos de extrapolación de las curvas IDF; a los sitios donde éstas no se puedan determinar mediante métodos comunes.



ABSTRACT

The intensity-duration-frequency-precipitation (IDF) curves are one of the most used tools in water and hydraulic engineering for project planning, design and operation processes; As well as for flood protection (Koutsoyiannis, 1998).

Usually the IDF curves are determined by analysis of the largest possible number of rainfall records pertaining to a station of study; Since the rainfall charts show the profiles of each storm, that is, the accumulated rainfall as a function of time. One drawback that occurs with this type of information, timely in Colombia is that this type of records is scarce since there are not a large number of stations. Although these curves are a tool of continuous use in engineering, this situation evidences that at least in Colombia, there are many questions that have not been solved satisfactorily; In the study of the maximum precipitations and the obtaining of IDF curves.

For this reason, the proposed research focuses on the analysis of alternatives to obtain reliable IDF curves, based on the historical records of rainfall stations, at geographical points where no such stations are found. The methods analyzed will be based specifically on the study of the historical pluviographic records of seven stations located in the center of the department of Boyacá, Colombia. From this information, the information will be extended by methods of extrapolation of the IDF curves; to sites where they cannot be determined by common methods.



1. INTRODUCCIÓN

Las curvas o relaciones intensidad-duración-frecuencia de precipitaciones (IDF) son una de las herramientas más utilizadas en ingeniería de recursos hídricos e hidráulicos, para procesos de planificación, diseño y operación de los proyectos; así como para la protección contra inundaciones (Koutsoyiannis, 1998). Con estas curvas se obtiene la intensidad media de precipitación, para una duración y un periodo de retorno determinados, y usualmente son utilizadas como dato inicial para modelos o métodos hidrológicos, que posteriormente serán utilizados en el diseño de estructuras hidráulicas. Dichas curvas son distribuciones acumulativas esencialmente condicionales, de la intensidad media y de la duración de la precipitación; que se estiman a partir de los datos de precipitación observados y se subdividen en el récord de lluvia en intervalos de duración y relacionado a un periodo de retorno (Sivapalan & Blösch, 1998).

Usualmente las curvas IDF se determinan mediante análisis del mayor número posible de registros pluviográficos, pertenecientes a una estación de estudio; dado que en las cartas pluviográficas están consignados los perfiles de cada tormenta, es decir, la profundidad de precipitación acumulada en función del tiempo (Vélez, Poveda, Mesa, & Hoyos, 2002). Un inconveniente que se presenta con este tipo de información, puntualmente en Colombia y específicamente en el departamento de Boyacá; es que ésta clase de registros es escasa pues no existe un gran número de estaciones. Lo anterior plantea un reto para la ingeniería en la región; específicamente en la obtención de las curvas IDF en lugares donde no existe o es escasa la información pluviográfica.

A pesar de que estas curvas sean una herramienta de uso continuo en la ingeniería, la situación previamente expuesta, evidencia que por lo menos en Colombia, se tiene gran cantidad de interrogantes que no han sido resueltos satisfactoriamente; en el estudio de las precipitaciones máximas y la obtención de curvas IDF (Acevedo, 2009).



En razón a esto, la investigación propuesta se centra en el análisis de alternativas para la obtención de curvas IDF confiables, a partir de los registros históricos de las estaciones pluviográficas, en puntos geográficos donde no se encuentren estaciones de este tipo. Los métodos analizados se basarán específicamente en el estudio de los registros históricos pluviográficos de siete estaciones localizadas en el centro del departamento de Boyacá, Colombia. A partir de esta información, se extenderá la información mediante métodos de extrapolación de las curvas IDF; a los sitios donde éstas no se puedan determinar mediante métodos comunes.

En este sentido, cuando los proyectistas o consultores plantean una obra hidráulica o un estudio sobre oferta hídrica futura utilizan generalmente la información pluviográfica disponible del lugar más próximo al sitio donde se ejecutará el proyecto y con esta información elaborar una curva IDF. En un país con una geografía muy variada y una alta pluviosidad como Colombia, utilizar la información de esta forma puede inducir a errores de análisis. Otro factor que da mayor relevancia a este inconveniente es la escasa cantidad y distribución de las estaciones hidrometeorológicas que proporcionan la información histórica de registros pluviográficos.

Por tal motivo, es importante presentar nuevas metodologías que permitan la obtención de las curvas IDF en sitios o puntos geográficos donde no exista información de registros pluviográficos, de manera que en estudios futuros se evite la utilización de información pluviográfica o de curvas IDF de forma empírica, o como único criterio, la cercanía al proyecto.

Para tal fin se buscará adaptar los métodos tradicionales de obtención de las curvas IDF que utilizan registros históricos de precipitación en su forma pluviográfica; y de esta manera, convertir la información puntual en información espacialmente distribuida; determinando

las posibilidades de determinar las curvas IDF, para zonas no instrumentadas mediante la interpolación de parámetros de ajuste de una función de probabilidad y de la intensidad de precipitación.

El determinar curvas IDF, en zonas no instrumentadas a partir de información pluviográfica, es algo poco investigado tanto en Colombia como en otros países. Generalmente se tienen aproximaciones de métodos a partir de información pluviométrica, pero son escasos los modelos o resultados de generación de curvas IDF, para zonas no instrumentadas a partir de información pluviográfica.

En el presente documento encontrarán los capítulos 3 y 4, los antecedentes investigativos y las bases teóricas que soportan la interpolación de datos hidrológicos y en especial los avances en la interpolación de curvas IDF para zonas sin instrumentación. En el capítulo 5, se evidenciará la metodología utilizada para la presente investigación, abordando desde la obtención de datos históricos, el tratamiento estadístico y las posibilidades de interpolación u obtención de las curvas IDF en puntos geográficos sin registros históricos de precipitación. En el capítulo 6, se presentan los resultados y el análisis a la luz del cumplimiento de los objetivos propuestos, se logró determinar los comportamientos de los métodos utilizados, la diferencia y relación con respecto a los métodos tradicionales.



2. JUSTIFICACIÓN

El análisis de eventos extremos o de modelos de lluvia escorrentía que utilizan las curvas Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) tienen cada vez mayor importancia, ya que una de las finalidades de profundizar y perfeccionar estas curvas es prevenir riesgos como inundaciones y desastres producto de eventos de precipitación u avenidas. Este tipo de acontecimientos tiene consecuencias tanto en costo de vidas humanas y elevados daños materiales, esto sino se tiene una infraestructura diseñada y construida adecuadamente. Por este motivo es necesario estudiar a profundidad el origen y la estimación de los caudales punta o máximo (De Salas Regalado, 2004).

En este sentido uno de los riesgos por avenidas más evidente es el que puede producirse en cuencas hidrográficas urbanas, ya que en estas zonas por la densidad poblacional representan un riesgo mayor. Desde el punto de vista hidrológico el enfoque más confiable y eficiente para la estimación de crecientes en zonas urbanas, las cuales sirven de base al diseño hidrológico de la infraestructura necesaria en los sistemas de drenaje y protección contra inundaciones, es la aplicación de los modelos hidrológicos de lluvia-escorrentía, la aplicación de estos modelos comienza con el determinación de las curvas IDF, las cuales representan las características relevantes de las tormentas que ocurren en una zona determinada (Campos Aranda, 2010).

Son varios los problemas que se asocian a las curvas IDF, no solo en cuanto a su determinación, sino más específicamente a lo relacionado a la escasa o nula información de registros históricos de precipitación en la zona de estudio, así mismo a que la mayoría de registros con los que se cuentan son del tipo pluviométrico y no pluviográfica, este último cobra mayor importancia debido a que es el registro detallado de un evento de precipitación, por ende desde el punto de vista probabilístico implica una mayor precisión

y exactitud (Maldonado Navia & Vía Guzmán, 2015). Esta investigación busca aunar en la búsqueda de soluciones para la determinación de las curvas IDF, en lugares o puntos geográficos donde no se cuentan con registros pluviográficos o donde son escasos. Se plantean alternativas para poder adquirir estas curvas donde comúnmente no es posible, sino mediante aproximaciones o producto de zonas generalizadas que inducen a errores en subvaloración o sobre valoración de las intensidades de precipitación.

Es importante mencionar que esta investigación también contribuye al espectro de exploraciones que se vienen adelantando a nivel global para estimar de manera precisa y confiable variables hidrológicas como las curvas IDF en puntos geográficos o espaciales donde la información de registros de precipitación sea escasa o nula (Hosking & Wallis, 1997). A estas técnicas comúnmente se les denomina regionalización, aunque este término abarca más variables como la climatología y la topografía, a grandes rasgos el objetivo es determinar regiones con comportamientos hidrológicamente similares (Yun & Chen, 1998). Autores como (Tucci & Bertoni, 2006) y (Ruberto, Kutnich, Depettris, & Gabazza, 2006) afirman que todo esfuerzo investigativo y técnico que se realice para mejorar o ampliar el conocimiento con el fin de determinar de manera más adecuada o precisa la intensidad de precipitación y aplicarlas en modelos de lluvia esorrentía, es valioso pues ayuda a minimizar la brecha en los limitantes de estos modelos, como lo son los registros puntuales.



3. OBJETIVOS.

3.1.1. Objetivo general.

Determinar las curvas IDF en sitios sin estaciones pluviográficas de la zona central del departamento de Boyacá, mediante la interpolación de la intensidad media de precipitación y la interpolación de los parámetros u y α de la función de probabilidad de valor extremo tipo I.

3.1.2. Objetivos específicos.

Analizar las características que permitan la interpolación de la intensidad media de precipitación, a fin de relacionarlas con una duración y un periodo de retorno, para obtener curvas IDF en sitios sin estaciones pluviográficas.

Interpolar los parámetros u y α de la función de probabilidad de valor extremo tipo I, a partir de la muestra de eventos de máximos anuales de precipitación y relacionarlos con una expresión matemática que permita la construcción de curvas IDF en sitios sin instrumentación hidrológica.

Obtener mapas de zonificación con los datos interpolados que permitan construir las curvas IDF para cualquier punto geográfico, dentro de la zona de estudio.

Determinar las curvas IDF para centros poblados, no instrumentados, en la zona centro del departamento de Boyacá.



4. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

Una de las bases que cimientan el diseño de estructuras o sistemas de carácter hidráulico en general, así como el diseño de un sistema de drenaje urbano, es la obtención del evento o los eventos de precipitación que pueden presentarse durante la vida útil de la obra. Generalmente es utilizada una tormenta de diseño, la cual es un evento crítico y representativo de la región o del sitio puntual donde se proyecta implantar la obra. A partir de las curvas IDF obtiene generalmente la tormenta de diseño, a partir de relacionar la intensidad media de precipitación y los intervalos de duración ambas variables asociadas al periodo de retorno, que se defina según el tipo o complejidad de la obra.

En el territorio nacional es posible encontrar en gran cantidad de sitios, estaciones hidrometeorológicas con pluviógrafo, las misas cuentan con curvas IDF construidas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), a partir de la información histórica de eventos de precipitación. Estas curvas no son proporcionadas de manera gratuita, el valor ronda los 300 dólares estadounidenses. El método de construcción de las curvas es por medio del ajuste de una distribución de probabilidades Gumbel con estimación de sus parámetros por el método de los momentos ordinarios, utilizando papel probabilístico.

La información que arrojan las curvas de intensidad duración y frecuencia (IDF) se presenta generalmente con la duración en el eje horizontal y la intensidad media en cada duración en el eje vertical, mostrando una serie de curvas, una para cada uno de los periodos de retorno habitualmente utilizados en diseño.

La zona de estudio es una franja de extensión de aproximadamente 2622 km², dentro de la cual se encuentran 23 centros poblados o municipios, incluida la capital de este Departamento, Tunja.

En primera instancia se adquirió la información pluviográfica de las siete estaciones con las que cuenta la zona centro del Departamento de Boyacá. Se analizaron cerca de 800 mil



datos, análisis que implicó desde el paso de los datos gráficos a datos numéricos y su sistematización. Para obtener las curvas IDF acordes a cada una de las siete estaciones seleccionadas, la construcción de éstas se realizó por medio de la distribución de probabilidad de Valores Extremos Tipo I o Gumbel, y la estimación de sus parámetros se realizó por medio del método de momentos ordinarios y máxima verosimilitud.

Asimismo, se llevó a cabo el análisis de las diferentes posibilidades de interpolación que permitieran la obtención de curvas IDF para los puntos no instrumentados dentro de la zona de estudio.

A partir de los resultados se elaboraron mapas, mediante la asistencia del software ARGIS. Estos mapas muestran isolíneas entre las estaciones seleccionadas de la zona de estudio, en el Departamento de Boyacá. Se desarrollaron dos tipos de mapas en los cuales unos muestran isolíneas representando valores de los parámetros u y α , que son los parámetros de ajuste de la distribución de probabilidad, definida como una función que representa la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria (Chow, 1994). En este caso se tomó como distribución de probabilidad de valor extremo tipo I. Con base en estos parámetros se pueden construir las curvas IDF, como se mostrará más adelante.

La otra alternativa plasma isolíneas de intensidad de precipitación, según los cuales un plano representa una intensidad de precipitación, asociada a una duración y un periodo de retorno. Para construir las curvas IDF es necesario contar con un grupo de mapas con cada duración y las características mencionadas

Mediante ambos métodos es posible realizar las curvas IDF, para cualquier punto geográfico dentro de la zona de estudio.

Se llevó a cabo un análisis de los dos métodos utilizados, con el fin de definir cuál de estos presenta una mejor representación de los valores reales de intensidad media asociada a una duración y periodo de retorno. Para esto se hicieron modelaciones a partir de ambos métodos, realizando la regionalización sin contar una de las estaciones, es decir, restando



una estación y tomando los valores de intensidad para las coordenadas geográficas de la estación, sustraída a partir de cada método de regionalización.

Se compararon los datos de intensidad media, para cada duración y periodo de retorno con los valores de la curva IDF de la estación, realizando una correlación directa a fin de determinar la variación y a su vez el porcentaje de exactitud. En los siguientes capítulos se enfatizará en las bases y procedimientos metodológicos, así como los resultados obtenidos de la correlación y su valoración conceptual.

5. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE.

5.1.1. Métodos de interpolación asistidos por sistemas de información geográfica.

Un sistema de información geográfica o SIG, es un sistema para la gestión, análisis y visualización de conocimiento geográfico que se estructura en diferentes conjuntos de información, como mapas interactivos, datos geográficos, modelos de geo-procesamiento, modelos de datos y metadatos. Los sistemas de información geográfica (SIG) convencionales suelen incorporar funciones de interpolación asociadas a diversos conjuntos de herramientas. Es habitual encontrar funciones de interpolación asociadas a las herramientas de análisis del terreno, generalmente se incluyen comandos que permiten elaborar mallas de triángulos TINs (Triangulated Irregular Network). Por otro lado, es habitual encontrar herramientas de interpolación más variadas dentro de los paquetes de herramientas de geoestadística. Además, dependiendo del software se pueden encontrar funciones de interpolación asociadas a herramientas de otro tipo. En definitiva, realizar procesos de interpolación es tan frecuente que las herramientas para ello se encuentran en múltiples menús de los programas (Almazán et al., 2009).

Los métodos de interpolación de las variables climáticas han sido ampliamente estudiados, sin embargo, en los últimos años se han ido desarrollando nuevas metodologías, encontrándose algunas específicas para cada zona dependiendo de la variable de interés. Con el avance de las tecnologías, como las herramientas computacionales y el conocimiento de técnicas geoestadísticas; se ha logrado mejorar esta representación espacial, consiguiendo en ocasiones representar el comportamiento físico de la variable (Quevedo & Sánchez, 2009).

Trabajos como el realizado por Ninyerola et al. (2000), proponen una metodología que relaciona la información geográfica con la información primaria, que para ese caso sería la información climática, dando una buena alternativa para generar información en zonas con baja densidad de estaciones. Una ventaja expuesta en este método, es que la interpolación



se corrige mediante un mapa de errores que se obtiene de una regresión lineal y que se utiliza para ajustar el mapa resultante. Se ensayaron tres algoritmos del programa ArcGis, en su módulo “*Spatial Analyst*”; que incluyen: método de “distancia inversa” (IDW), “*Spline*” y “*Kriging*”, utilizados para interpolar. Estos algoritmos fueron analizados para modelos digitales, de climatología, precipitación y relieve. En el caso del modelo de precipitación el mejor comportamiento en la interpolación fue por el método IDW (Ninyerola, et al., 2000).

El IDW se apoya en el concepto de continuidad espacial, con valores más parecidos para posiciones cercanas que se van diferenciando conforme se incrementa la distancia. El uso de este algoritmo ha sido empleado en la representación de variables con continuidad espacial, como las isócronas, los mapas de pendientes y orientaciones a partir de la altitud (García et al., 2006).

Para el estudio de García & Cebrián (2006), el método IDW fue el que mejores resultados frente a la interpolación de la precipitación. Desde el punto de vista metodológico cada valor, que tiene una correspondencia con un punto determinado influye sobre los demás de forma local y disminuye proporcionalmente su efecto con la distancia. Al ser un método exacto y ajustarse en su localización a los datos, en ocasiones genera en el mapa círculos concéntricos, denominados “*bullees*” (ojos de toro), los cuales gradúan los cambios bruscos en los valores. Este hecho se apreció dentro de la provincia de Albacete, España, en el entorno de las ciudades más populosas (Albacete, Hellín, Almansa o Villarrobledo), los cuales en algunos casos cuentan con una población significativa en sus respectivas periferias urbanas, pero que presentan de forma gradual la transición hasta otras comarcas en las que destacan los vacíos demográficos.

Por otra parte el estudio realizado por Pierini et al.(2008), compara los resultados de la interpolación obtenida con el método inverso de la distancia o IDW, a través de la estimación de una curva de error y de los datos reales. La curva se construye con base a la generación progresiva de puntos vacíos al azar hasta cubrir un 60% de los datos analizados. Posteriormente, se reconstruyen los campos con los métodos propuestos graficando el



error obtenido en función de la cantidad de huecos generados. Los resultados indicaron, que, para los dos grupos de datos obtenidos con el método basado en el análisis objetivo, siempre son menores que con la inversa a la distancia (IDW). De las estimaciones obtenidas puede inferirse que el método basado en análisis objetivo representa mejor el comportamiento frente a los datos originales.

El estudio de García & Cebrián (2006), arrojó que el método de análisis objetivo, en comparación con un método de interpolación clásico como lo es el IDW, se evidencia el incremento del error cuadrático medio al aumentar los datos a completar y al empleo de datos distribuidos en forma uniforme o no. Además, este esquema de interpolación, debido a su estructura, emplea una parte de los datos, mientras que el análisis objetivo contempla básicamente la historia de cada dato, pesado en forma espacio-temporal. El método ha sido aplicado a dos conjuntos de datos marcadamente diferentes. Los resultados obtenidos, cuando se comparan con los datos reales, describen un buen acuerdo. Una comparación del error cuadrático medio indica que el análisis objetivo presenta una distribución más suave del error en campos de datos distribuidos en forma no uniforme, ajustándose al aumento de información a rellenar. Por último, se indica que la técnica de análisis-objetivo es un método satisfactorio para analizar y extrapolar objetivamente datos oceanográficos medidos en regiones costeras, mas no concluye que sea apto para utilizar en zonas geografías sin variaciones climáticas amplias como las zonas costeras (García et al., 2006).

Determinados modelos de obtención de datos espaciales basados en variables cuantitativas requieren de métodos estadísticos de regresión múltiple combinados con técnicas de interpolación espacial y procedimientos de análisis SIG (álgebra de mapas, combinación de capas de tipo ráster y vector, transferencia de atributos cuantitativos, etc). Así mismo, algunos de estos modelos pueden beneficiarse de la incorporación de datos de teledetección, de radar meteorológico (Pesquer et al., 2006).

Adicionalmente, el resultado del trabajo realizado por Pesquer et al. (2006), proporcionaron la información que ratifica la integración en una sola aplicación de los distintos métodos



(análisis SIG, estadísticos y de interpolación espacial) requeridos para la obtención de mapas continuos de variables meteorológicas. Este método proporciona la modelación más adecuada al eliminar muchos de los obstáculos funcionales. Si la generación de estos mapas es periódica (mensual), esta integración es prácticamente imprescindible.

5.1.2. Interpolación de curvas IDF.

De forma más específica se han adelantado estudios respecto a la regionalización de las curvas IDF, por ejemplo, el estudio publicado por Awadallah et al. (2011), realizado para la región del noreste de Angola, en el que, debido a la baja cantidad de estaciones pluviométricas, no se podía garantizar un adecuado manejo de datos, ni parámetros hidrológicos. Contando con datos tomados por satélites pertenecientes a Misión de Medición de Lluvias Tropicales, se elaboraron los parámetros hidrológicos, incluyendo especialmente las curvas IDF para la región mencionada.

Lo primero que realizaron en el transcurso de dicho estudio fue una comparación estadística de los datos, en los que analizaron la diferencia entre las medias, las variancias y los máximos de los datos tomados por las pocas estaciones existentes y los datos tomados satelitalmente. Al comparar los máximos, aplicaron la prueba de Wiltshire y el diagrama de momentos ordinarios para encontrar las precipitaciones máximas diarias en diferentes periodos de retorno. Estos datos fueron nuevamente comparados con la información proveniente de las estaciones, para descartar valores que en medio del procesamiento matemático llegaron a ser incoherentes con los datos reales. El desarrollo de la investigación en mención proporcionó datos para la construcción de curvas IDF para ocho ciudades, dentro de Angola (Awadallah et al., 2011).

Estos métodos de análisis regionalizado de frecuencias se basan en el supuesto de que la variable estandarizada en cada estación, tiene la misma distribución en todos los sitios de la región que se trate, con la información de período de retorno y la media del máximo de precipitación diaria en el lugar de registro. En particular, los coeficientes de variación y

asimetría se consideran que son constantes a través de la región. Las desviaciones de esta suposición pueden llevar a estimaciones sesgadas de la información en algunos sitios. Lugares con coeficientes de variación y asimetría cercanos al promedio de la región no pueden sufrir tal sesgo, pero cuando estos coeficientes se desvían de la media, llegan a generar grandes errores. Buenos resultados pueden ser obtenidos por la regionalización, especialmente en los casos de registros cortos, siempre que el grado de la heterogeneidad no sea grande. En tales casos, el gran número de sitios que contribuyen con información para la estimación de parámetros, compensa la heterogeneidad regional (Awadallah et al., 2011).

En esta misma investigación, Awadallah y colaboradores (2011), utilizaron el método del índice de inundación para la regionalización ya que es uno de los procedimientos más simples. La clave en el método del índice de inundación se basa en que la distribución de la variable de interés en los diferentes sitios en una región es el mismo, excepto por una escala o un índice de inundación. Este parámetro refleja las precipitaciones y las características de esorrentía de cada región. El método de índice inundación puede ser la media de las precipitaciones anuales máximas, aunque cualquier parámetro de localización de la distribución de frecuencias pudo haber sido utilizado (Awadallah et al., 2011).

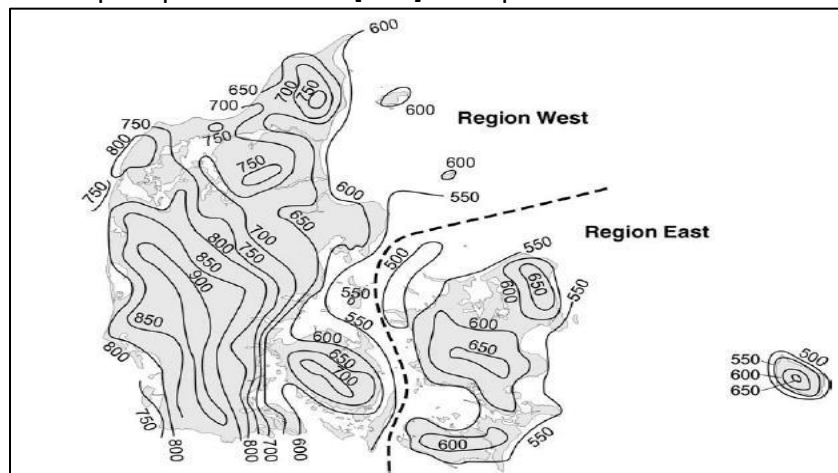
En este sentido, Madsen y colaboradores (2009), en su estudio presentaron una calibración al modelo de regionalización, para la estimación de las características de las precipitaciones extremas en Dinamarca, a partir de las variaciones y aumentos presentados en los regímenes comprendidos entre 1997 hasta el 2005. El estudio muestra que el modelo estadístico regional de valor extremo se pudo aplicar en el rango corto de años, presentando resultados satisfactorios para la regionalización de los datos de registros de precipitación. De acuerdo con el estudio, las variaciones regionales significativas de las características de las precipitaciones extremas, se pueden explicar por los patrones de precipitación media anual y una subdivisión regional de Dinamarca. En comparación con el análisis regional, muestra un aumento general de las características de las precipitaciones extremas para las duraciones de 30 minutos a 3 horas y de períodos de retorno hasta 10



años. El análisis revela que los cambios no son estadísticamente significativos en comparación con las incertidumbres del modelo de estimación regional, sin embargo, los aumentos en la intensidad de diseño son grandes y tienen consecuencias importantes en los costos de los diseños de ingeniería (Madsen et al., 2009)

El modelo de regionalización de eventos de precipitación combina mediciones de varios sitios de la región para estimación de las relaciones de las curvas IDF y otras características de las lluvias. El modelo de valor extremo se basa en las series de duración parcial (PDS), método que incluye en el análisis de todos los eventos por encima de un nivel de umbral. El modelo PDS toma en cuenta la media anual de casos de superación del umbral, el valor medio de las magnitudes de excedencia y el coeficiente de variación. Así mismo, la estimación regional está dada por variables como la función de distribución acumulada de las magnitudes de excedencia (Madsen et al., 2009)

Ilustración 1. La precipitación anual [mm] en el período normal estándar 1961-1990



Fuente: Madsen, et al., 2009.

Elsebaie (2012), en su estudio, desarrolló curvas IDF de manera empírica para estimar la intensidad de las lluvias en dos regiones de Arabia Saudita. Las curvas IDF provenientes del desarrollo del proyecto se utilizan actualmente como ayuda en el diseño de las estructuras de drenaje para cualquier proyecto de ingeniería en Arabia Saudita. Analizando las curvas



IDF realizadas en el estudio en mención, se determinó que las estimaciones de las precipitaciones aumentan con el aumento del periodo de retorno. Por su parte la disminución de la intensidad de la lluvia, se presenta con una mayor duración del evento de precipitación sin importar el periodo de retorno. Adicionalmente los resultados obtenidos mostraron que dos métodos de función de probabilidad EVI y Pearson tipo III tienen buena consistencia. Si bien se presentaron pequeñas diferencias entre los resultados obtenidos a partir de los dos métodos, se evidenció que el método de Gumbel o EVI da resultados ligeramente superiores a los resultados obtenidos por Pearson III (Elsebaie, 2012).

En la investigación realizada por Wotling y colaboradores (2000), se desarrolló un modelo digital de elevación, en el que analizaron un conjunto limitado de variables que describen el entorno topográfico en el cual se relacionó la intensidad de la distribución de las precipitaciones. De esta manera plantearon un modelo ajustado por una red regular de 300 puntos, y mediante interpolación se llegó a una aproximación del comportamiento de los eventos de precipitación en toda la isla. Los autores lograron determinar para la isla de Tahití, la relación que existe entre las distribuciones de los parámetros de precipitación y los descriptores topográficos. La calibración de los resultados y comparación con interpolación *kriging* sencilla mostro la relevancia de la metodología. Los autores hacen referencia que esta metodología puede ser útil en sitios donde la topografía tenga características montañosas ya que es esta influye en el comportamiento de la precipitación. La información de las precipitaciones la tomaron de 20 estaciones, seis de ellas con más de 10 años de observaciones, con un promedio de 6 años para el conjunto y un mínimo de 2 años; las cuales estaban distribuidas de manera heterogénea a lo largo del terreno (Wotling, 2000).

En una investigación Acosta y Sierra (2013) sobre la evaluación métodos de construcción de curvas IDF, que la mejor función de probabilidad para Colombia y específicamente para Boyacá es la de valor extremo tipo I o Gumbell ya que se ajusta mejor a los datos de registros pluviográficos de precipitación.



6. MATERIALES Y MÉTODOS.

6.1. Precipitación

Hablar de precipitación no es sólo hablar de lluvia, también incluye la nieve y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie de la tierra, como lo son el granizo y la nevisca. Para que se realice el proceso de precipitación es necesaria la elevación de gran cantidad de agua hacia la atmósfera con tal fin que cuando ésta se enfríe, parte de su humedad se condense. Los tres mecanismos principales para la elevación de masas de aire son la elevación frontal, donde el aire caliente es elevado sobre aire frío por un pasaje frontal; la elevación orográfica, mediante la cual una masa de aire se eleva para pasar por encima de una cadena montañosa, y la elevación convectiva, donde el aire se arrastra hacia arriba por una acción convectiva, como ocurre en el centro de una celda de otra tormenta eléctrica. Las celdas convectivas se originan por el calor superficial, el cual causa una inestabilidad vertical de aire húmedo, y se sostiene por el calor latente de vaporización liberado a medida que el vapor de agua sube y se condensa (Ven Te Chow, 1994).

6.2. Tormenta de diseño

Una tormenta de diseño es un patrón de precipitación definido para utilizarse en el diseño de un sistema hidrológico. Usualmente, la tormenta de diseño conforme a la entrada al sistema -y los caudales resultantes a través de éste- se calculan utilizando procedimientos de lluvia-escorrentía y tránsito de caudales. Una tormenta de diseño puede definirse mediante un valor de profundidad de precipitación, en un punto, mediante un histograma de diseño que especifique la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta o mediante un mapa de isoyetas que especifique el patrón espacial de la precipitación.

Las tormentas de diseño pueden basarse en información histórica de precipitación en un sitio o pueden construirse utilizando las características generales de la precipitación en



regiones adyacentes. Su aplicación va desde el uso de valores puntuales de precipitación en el método racional para determinar los caudales picos en alcantarillados de aguas lluvias y alcantarillas de carreteras, hasta el uso de hietogramas de tormenta como las entradas para el análisis de lluvia-escorrentía en embalses de detención de aguas urbanas o en el diseño de vertederos en proyectos que involucren grandes embalses (Ven Te Chow, 1994).

6.3. Medición de la precipitación

En este tipo de mediciones, las precipitaciones son medidas o registradas por la altura a la cual llega el agua caída sobre una superficie plana y horizontal; en dicha superficie no deben existir fenómenos tales como la infiltración y evaporación, debido a que si esto ocurre la medición sería errónea. Las mediciones de altura de precipitación se realizan en mm y presentan una tolerancia de décimas de mm (0.1mm). Es importante saber la equivalencia de 1 mm de precipitación, ya que éste es el equivalente a un litro de agua por cada metro cuadrado: $1\text{mm} = 1\text{L}/\text{m}^2$.

Así mismo, la intensidad de precipitación es medida principalmente en milímetros por hora (mm/h), es decir, precipitación por unidad de tiempo. En ocasiones, cuando se presentan precipitaciones muy elevadas, es decir muy intensas, se puede medir la intensidad de precipitación en unidades de mm por minuto (mm/min).

La precipitación puede diferenciarse según la forma en que ésta cae, dentro de las cuales la más relevante para esta investigación es la lluvia, que no es más que la precipitación atmosférica de gotas de agua en estado líquido. Generalmente, las gotas de agua suelen tener diámetros superiores o iguales a 0,5 a 1 mm aproximadamente; estas gotas caen al aire, con una velocidad superior a los 2 metros por segundo (Fornaguera, 2008).



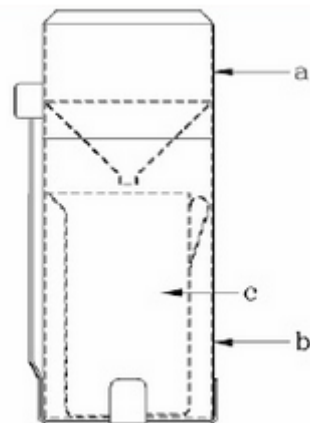
6.3.1. Equipos colectores.

Debido a que es muy difícil medir o captar toda la precipitación que llega a la tierra, la cual proviene de la atmósfera, se han adoptado instrumentos especiales de medición, los cuales son diseñados especialmente para este tipo de mediciones; dentro de los cuales, los más usados comúnmente son el pluviógrafo y el pluviómetro (Fornaguera, 2008).

6.3.2. Pluviómetro.

El pluviómetro es un instrumento concebido para la recolección y medición del agua precipitada, según la hipótesis de distribución homogénea horizontal y sin efecto de evaporación. Actualmente son conocidos dos tipos de pluviómetros, de los cuales el más utilizado en la actualidad es el denominado pluviómetro tipo B, el cual se compone de tres secciones principales, como se muestra en la ilustración 2.

Ilustración 2. Pluviómetro Tipo B



FUENTE: Fornaguera, 2008.

La sección superior (a), que es la receptora, posee un acceso circular constituida por un aro de bronce reforzado, con su arista superior afilada ya chaflanada a 45° con la cara inclinada



hacia afuera. En su parte interior posee un embudo con una abertura para la salida del agua. El borde superior de dicho embudo está soldado a las paredes del pluviómetro, a 10 cm por debajo de la boca, a fin de que las gotas que caigan sobre el mismo no puedan volver al exterior por rebote.

La sección inferior (b) destinada a retención. El recipiente (c), denominado colector, que sirve para trasvasar a la probeta el agua recogida, a fin de efectuar su medición (Fornaguera, 2008).

Vale destacar que los pluviómetros sólo realizan el registro de altura de precipitación cada día, es decir sólo se pueden realizar mediciones en mm/día y no tener una idea de cómo fue el comportamiento de la precipitación durante el mismo cada hora y/o minuto.

6.3.3. Pluviógrafos.

Los pluviógrafos, por su parte, permiten a diferencia de los pluviómetros la obtención de un registro continuo de la precipitación. Generalmente son utilizados para:

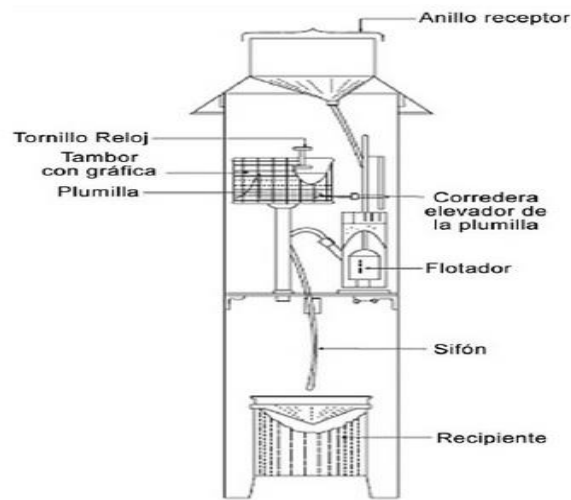
- Determinar las horas de inicio y terminación de la lluvia.
- Precisar la intensidad de la lluvia a cualquier hora del día.

No obstante, existen en el mundo diversas clases de pluviógrafos, pero el más usado en Colombia es el pluviógrafo de flotador o balancín.

En este tipo de pluviógrafo, la lluvia acumulada es vertida en un recipiente que contiene 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 (Cf. Ilustración 3.).



Ilustración 3. Pluviógrafo de balancín



Fuente: Fornaguera, 2008.

Este instrumento posee un mecanismo automatizado que permite la evacuación de manera rápida el agua, una vez el recipiente se llene por completo y el flotador y la pluma descienda rápidamente para seguir registrando en el diagrama.

6.3.4. Registros pluviográficos.

Teniendo claro que este tipo de instrumentos (pluviógrafos), realizan un registro continuo de los datos de alturas de precipitación a medida que pasa el tiempo, sus registros son los que permiten realizar un mejor análisis de las tormentas en los sitios donde esté ubicado dicho instrumento. El análisis de las precipitaciones en los pluviógrafos se basa en el estudio del pluviograma.

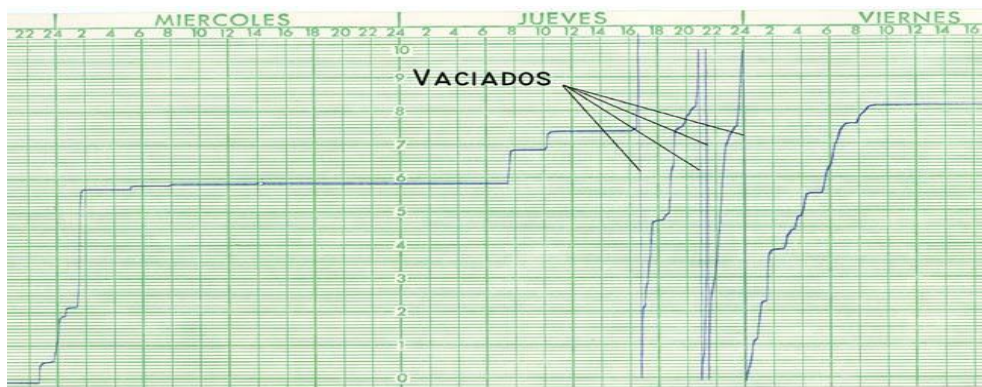
6.3.5. Pluviograma.

El pluviograma constituye la gráfica sobre la cual la plumilla del pluviógrafo registra la lluvia acumulada. La lectura en el pluviograma determina la cantidad de lluvia o precipitación que ocurrió en un lapso determinado. Los pluviogramas se registran en una hoja milimetrada,



cuyos ejes marcan el tiempo y la altura de precipitación. El eje horizontal o intervalo de tiempo puede ser de un día, una semana o un mes, de acuerdo con el mecanismo de relojería del pluviógrafo y las necesidades de precisión, mientras que el eje vertical o de la cantidad de lluvia alcanza una altura máxima de 10 cm con una precisión de 0,1 mm. En la hoja milimetrada es donde la plumilla plasma el registro continuamente; en todo el día, cuando no existe precipitación, la plumilla realiza el registro a manera de línea recta horizontal. A medida que aumenta la intensidad de la lluvia, el registro sobre el papel incrementa su inclinación y tiende a convertirse en una recta vertical, sin llegar a serlo. La limitante de este tipo de pluviógrafos es que, para la escala vertical, permite registro de 10 cm en la gráfica que equivale a 10mm de precipitación acumulada; cuando se llega a este límite se procede a realizar el vaciado del recipiente. Dicho vaciado se representa en la gráfica a manera de una línea recta vertical (Fornaguera, 2008).

Ilustración 4. Pluviograma.



Fuente: Fornaguera, 2008.

6.4. Curvas IDF.

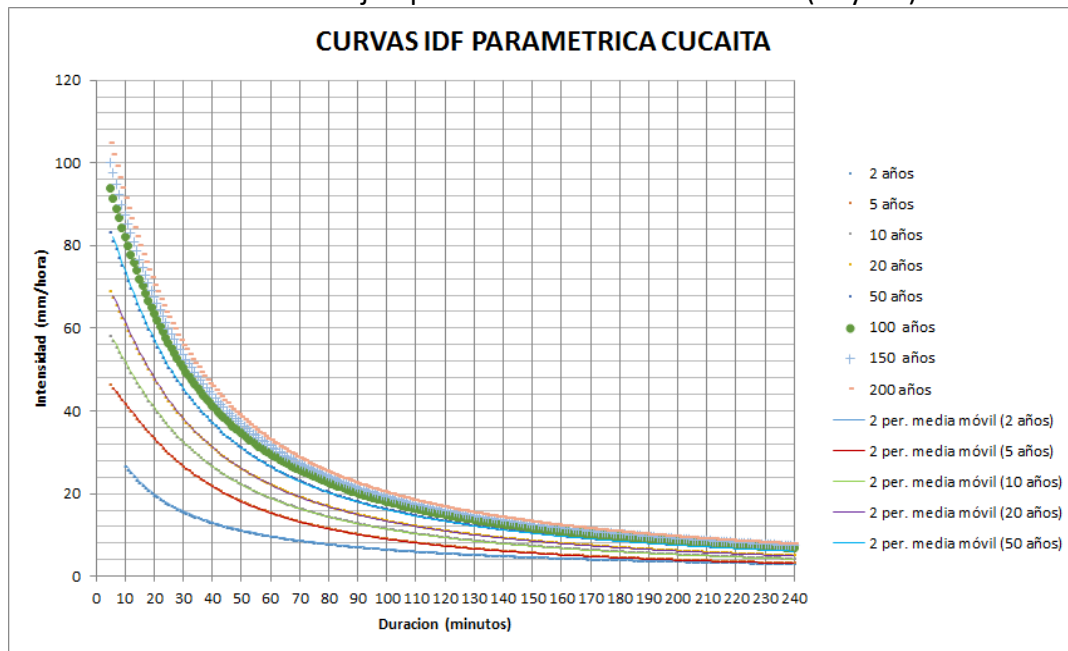
Las curvas IDF (intensidad, duración, frecuencia) son las curvas resultantes de la unión de puntos específicos de la intensidad media en intervalos de observación (duración) asociada a un periodo de retorno. Los datos se representan a manera de gráfica en un plano



cartesiano; en dicha gráfica se muestra una serie de curvas, una para cada uno de los periodos de retorno (Cabrera, 1987).

La duración se lee en el eje horizontal, y en el eje vertical se encuentra la escala de intensidades, así como se muestra en la ilustración 5.

Ilustración 5. Ejemplo curva IDF Estación Cucaita (Boyacá)



6.4.1. Intensidad.

La intensidad de precipitación es la tasa temporal de precipitación, es decir, la cantidad de precipitación presente por unidad de tiempo (mm/h o pulg/h). Se puede representar como intensidad instantánea o como intensidad promedio en el tiempo de duración de la precipitación. La intensidad promedio puede ser calculada a partir de la ecuación 1 (Cf. Ven Te Chow, 1994: pp. 465-466):

$$i = \frac{P}{T_d} \quad (1)$$

Donde:



P: Es la profundidad de lluvia expresada en mm o pulg.

Td: Es la duración, dada usualmente en horas o minutos.

La intensidad se representa en el eje de ordenadas de la gráfica de las curvas IDF, generalmente se expresa en unidades de mm/h.

6.4.2. Duración.

Es el intervalo de tiempo de observación o registro de tiempo de una intensidad de precipitación. Se representa en el eje x de la gráfica, este tiempo se representa generalmente en minutos, Y para esta investigación se trabajaron duraciones de 10 hasta 320 minutos.

6.4.3. Frecuencia.

Se denomina frecuencia a la cantidad de veces que se repite un determinado valor de una variable.

6.4.4. Periodo de retorno.

Es el intervalo de tiempo medio que separa dos eventos cuya intensidad media o altura sobrepasa un límite dado (Torres Abello, 2004). Generalmente, es expresado en años. Para este caso se “corrigieron” los periodos de retorno debido a que se utilizó un modelo de máximos anuales, en donde pueden quedar fuera de la serie de reconocimiento u observación valores diferentes al máximo. Es decir que puede existir un valor o valores de intensidad media que superen el umbral definido por la intensidad media. A fin de corregir este error se utiliza la fórmula de Langbein:

$$T_{AM} = \frac{1}{1 - e^{\frac{1}{T}}} \quad (2)$$



Donde:

T_{AM} : Periodo de retorno del modelo de máximos anuales.

T: Periodo de retorno real.

Los periodos de retorno son corregidos utilizando la expresión de Langbein, que se observan en la tabla 1.

Tabla 1. Periodo de retorno para el modelo de máximos anuales.

Periodo de retorno (años) T	Periodo de retorno del modelo TAM
2	2,54
5	5,52
10	10,51
20	20,50
50	50,50
100	100,50
150	150,50
200	200,50

6.5. Aplicación curvas IDF.

Desde hace muchos años y hasta el día de hoy, un sinnúmero de obras de ingeniería civil son diseñadas basadas en información de curvas 'Intensidad, duración y frecuencia' (IDF). Pero se ha incurrido en errores, ya que al adoptar esta información se usa casi siempre de la estación más cercana del sitio de estudio, o en ocasiones no se es tan cercano, pero se asume el mismo valor independientemente de las condiciones propias de la zona en la cual se va a realizar la investigación, generando sobredimensionamientos o llegando a generar



deficiencias en los diseños por tener valores erróneos de los regímenes de precipitación en los diseños (Sáenz, 1995).

Éste es un problema que se evidencia en la gran mayoría del territorio colombiano, incluyendo el Departamento de Boyacá, que es el sitio de análisis en que se realizó la recopilación de información histórica de pluviogramas de todas las estaciones hidrometeorológicas en el Departamento (siete estaciones en total), que tuvieran la suficiente información para la realización de las curvas IDF. Tomando como referencia esta información para la investigación, se desarrolló una metodología para determinar las curvas IDF de los municipios del Departamento de Boyacá donde no hay estaciones hidrometeorológicas con pluviogramas.

La intensidad media de precipitación se reduce a medida que aumenta la duración del evento de precipitación. Así mismo, para una duración de precipitación determinada, cuanto mayor sea la frecuencia o periodo de retorno T de la tormenta, mayor será su intensidad (Zamanillo, 2008).

La utilización de curvas IDF se enmarcan en la estimación de crecidas de cuencas hidrográficas, las cuales manejan tiempos de concentración pequeños o de baja duración, y su utilidad principal es poder estimar la intensidad, duración y frecuencia de la precipitación en un lugar que no posee aparatos pluviográficos; solamente se encuentran pluviómetros totalizadores que entregan precipitaciones diarias o lugares donde no existe información de ninguna índole. Por otra parte, es de suma importancia resaltar que uno de los primeros pasos que deben seguirse en muchos proyectos de diseño hidrológico, es la determinación del evento o eventos de precipitación, los cuales van a ser usados en un diseño específico. La forma más común de hacerlo es utilizar una tormenta de diseño o un evento que involucre una relación entre la intensidad de lluvia, la duración y las frecuencias o periodos de retorno. Esta relación se denomina curvas IDF, que son determinadas para cada sitio en particular (Tapia, 2001).



Para tener una visión de lo que podría pasar si no se diseña adecuadamente un proyecto, por pequeño y obvio que parezca, se debe hacer correctamente. El nivel de seguridad de una estructura depende, por un lado, de su costo y, por otro, del costo de las pérdidas provenientes de una falla. Por ejemplo, puede ser aceptable que un aeropuerto pequeño presente inundaciones en promedio una vez cada dos o tres años, si el costo de su sistema de drenaje se compara con el de uno que sólo permita inundaciones una vez cada 50 años en promedio, o más aún, podría resultar totalmente incosteable un sistema de drenaje con el que se pudiera extraer cualquier cantidad de precipitación por grande que fuera, aun cuando tal drenaje fuera posible de construir.

Por otra parte, sería satisfactorio -hablando en términos tanto económicos como éticos-, aceptar un riesgo elevado de falla del vertedero en una presa de grandes dimensiones situada aguas arriba en una ciudad importante, puesto que esta falla podría provocar grandes desastres, mientras que en el ejemplo anterior del aeropuerto una insuficiencia del drenaje no ocasionaría más que algunas molestias a los usuarios. Sin embargo, no se puede garantizar una seguridad de la obra al 100%, debido a que siempre habrá un grado de incertidumbre dentro de la misma; y más aún con el cambio climático, que hace que se alteren los patrones normales de precipitación y otras variables meteorológicas; sin embargo, se debe adoptar un riesgo mínimo a la hora de diseñar este tipo de obras que involucren la integridad de las vidas humanas (Mijares, 1989).

6.6. Métodos de construcción de curvas IDF a partir de información pluviográfica.

Como primera medida, para poder regionalizar las curvas IDF, es claro que se deben construir; para este caso se adquirió la información pluviográfica de las siete estaciones ubicadas en el centro del Departamento de Boyacá (Colombia). La construcción de las curvas IDF parte de la obtención de información consistente, que considere un periodo de recolección de datos amplio o suficiente que garantice una homogeneidad en los registros; en seguida se encuentran las intensidades máximas, donde se ajusta una función de



probabilidad a los datos; para este caso se utilizó valor extremo tipo I, y se realizaron las pruebas de bondad de ajuste, así como se procedió a realizar las curvas IDF.

6.6.1. Distribuciones de probabilidad.

Una distribución de probabilidad es una función que representa la probabilidad de ocurrencia de una serie pluviográfica. En estadística existen diferentes funciones de probabilidad teórica y la mayoría no es posible comprobarlas todas para un mismo caso en particular. Para esta investigación se utilizó “Valor Extremo Tipo I” o EVI, debido a su amplia utilización, estudio y validez en el territorio colombiano (Corzo Oviedo & Pinilla Mora, 2015), también para el departamento de Boyacá se estudiaron diferentes distribuciones de probabilidad observándose que la mejor se ajusta a los registros pluviográficos de esta región es precisamente EVI (Acosta Castellanos & Sierra Aponte, 2013) .

6.6.2. Distribución de probabilidad Valor Extremo Tipo I, EVI.

Esta distribución fue propuesta por Gumbel para el análisis de frecuencias de datos extremos, considerando que cada máxima anual es el valor extremo observado en una muestra de un año. Partiendo de un número infinito de muestras anuales -la probabilidad acumulada $p(x)$ (de cualquiera de los extremos máximos anuales)- se desea conocer la distribución límite del máximo de n valores x_i . Los valores extremos son los valores máximos o mínimos seleccionados de conjuntos de datos. Por ejemplo, el caudal máximo anual en cierto lugar es el mayor caudal registrado durante un año y, por ende, estos valores de caudal máximo anual para cada año que se registró, conforman un conjunto de valores extremos que puede analizarse estadísticamente (Chow, Hidrología Aplicada, 1994).

La teoría de los valores extremos se aplica a muchas ramas de la hidrología de desde caudales hasta como lo es en este caso registros de precipitación. Estas teorías se basan en



“poblaciones” y muestras, usualmente se utilizan muestras por la cantidad de datos que representa estudiar una población de datos.

En las series de datos se tienen que los datos intermedios son más frecuentes, pero los datos elevados o pequeños se presentan con menos frecuencia, esta afirmación es aplicable a todas las muestras, desde algo como la estatura de las personas o en este caso específico los registros de precipitación. Todas las distribuciones de probabilidad están definidas por la densidad de probabilidad o función de *densidad* y la integral de esta representa la función de *distribución* probabilidad.

6.6.3. Función de densidad de probabilidad EVI.

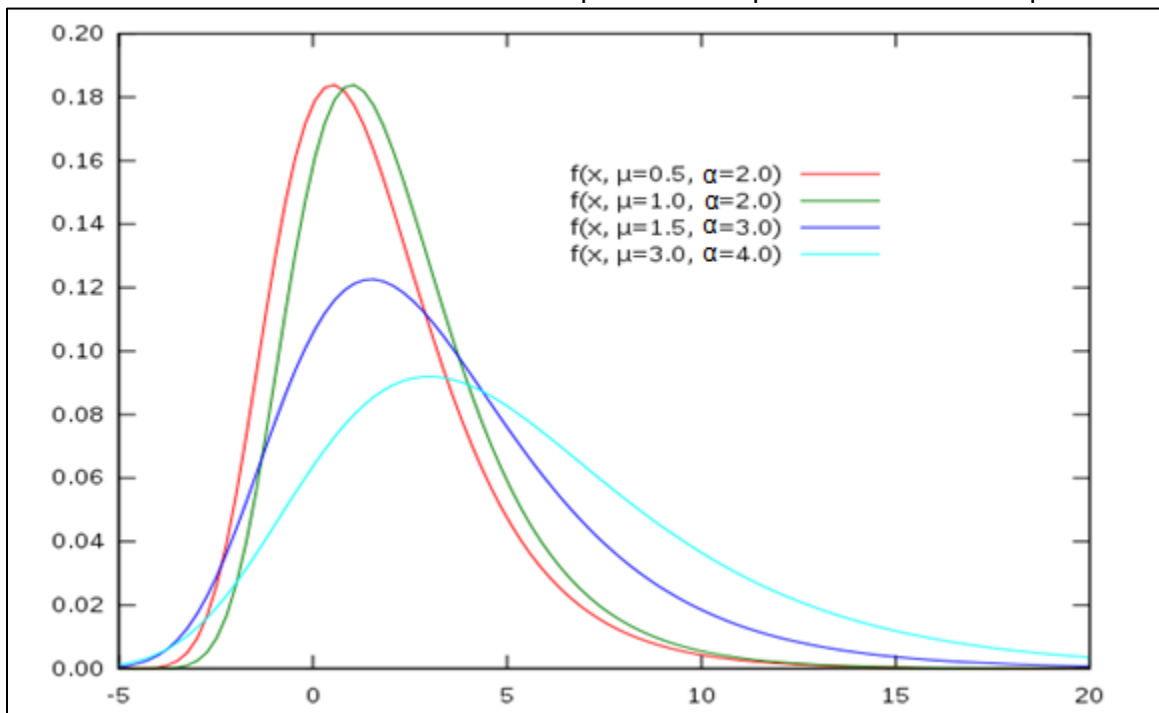
Una función de densidad probabilidad de probabilidad describe la probabilidad relativa de una variable aleatoria de tomar un determinado valor. La densidad de probabilidad está representada gráficamente por una campana, pues es el universo de los intervalos desde 0 hasta infinito, de la muestra de datos. Para la función de densidad de probabilidad de valor extremo tipo I (EVI), es una campana asimétrica positiva, esto es debido a que en ocasiones no existe una misma proporción de valores “pequeños” como de valores “grandes”. Por este último motivo esta distribución es utilizada para predecir valores extremos como sismos, inundaciones y para este caso un evento de precipitación. Como ejemplo simple de la aplicación de esta función asimétrica puede ser la distribución de salarios en un país en desarrollo, pues son pocos los ricos y muchos los pobres, lo que representa una asimetría. Algunas funciones como Gauss o normal son simétricas, pero pocas veces es utilizada en hidrología para el análisis de extremos.

La asimetría de la función de densidad para EVI, es fija e igual a 1.14, es decir que tiene la ventaja de ser asimétrica independiente de la muestra. Cada distribución o función de probabilidad cuenta con diferentes parámetros EVI, tiene el parámetro de forma o ubicación representado por la letra griega μ y el parámetro de escala generalmente representado por la letra griega α , cuando se determinan estos parámetros se dice que se



ajusta una distribución de probabilidad. Esto quiere decir que los datos hidrológicos en este caso registros de pluviográficos de máximos anuales, se resumen de manera compacta en la función (Chow, Hidrología Aplicada, 1994). En otras palabras, se llega a determinar la probabilidad de ocurrencia de la variable aleatorio.

Ilustración 6. Función de densidad de probabilidad para Valor extremo tipo I.



6.6.4. Parámetros estadísticos.

En primer lugar, se define un parámetro estadístico como el valor esperado de alguna función de una variable aleatoria. Por tanto, en una muestra de datos estadísticos de una estación hidrológica de medidas, se hace indispensable resumir la cantidad de datos en elementos o parámetros condensados que caracterizan la muestra. Por consiguiente, el objetivo de la estadística es contar con un número reducido de valores que indiquen la información esencial de un conjunto muy grande de datos. Finalmente, un parámetro



estadístico muestra alguna característica de la población; citando los parámetros más importantes encontramos: la media, la desviación estándar y el coeficiente de asimetría.

Ahora bien, partiendo de las intensidades máximas anuales, se determinaron los estadígrafos con el propósito de sintetizar la información que presenta esta serie de datos. Para el caso de los estadígrafos de posición, se halló la media aritmética con el fin de crear una idea del orden de las intensidades. Sin embargo, también interesa hallar la dispersión o variación de los datos de la muestra, lo cual se puede determinar mediante la desviación estándar.

En esta fase del proyecto se calcularon para cada una de las series de datos los parámetros principales y, desde luego, estos señalan las características principales de la muestra.

6.6.5. Estimación de parámetros por el ajuste a una distribución de probabilidad.

Una vez finalizado el análisis estadístico, se efectuó un ajuste a las distribuciones de probabilidad, teniendo en cuenta que éstas son usadas en hidrología para predecir con cierta probabilidad los valores que puede tomar una variable hidrológica.

Entre los métodos de estimación de parámetros, pueden mencionarse en orden ascendente de eficiencia: el método de los momentos ordinarios (OM), el método de los momentos ponderados por probabilidad (PWM) y el método de máxima verosimilitud (ML).

6.6.6. Método de los momentos.

Este método se basa principalmente en la relación existente entre los parámetros de la función de distribución y los momentos muestrales, los cuales se suponen iguales a los momentos de la población. Los estimadores calculados mediante el método de los momentos son asintóticamente eficientes, en particular al tratarse de distribuciones asimétricas, que son las más usuales en hidrología; esta eficiencia permite que este método



se use en muchos casos como una primera aproximación en la estimación de los parámetros.

Según el Método de los momentos, los parámetros se a partir de las ecuaciones 3 y 4.

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S_X \quad (3)$$

$$u = \tilde{X} - 0.5772 \alpha \quad (4)$$

Donde:

S_X = Desviación estándar de la muestra

$\tilde{X}$ = Media aritmética de la muestra.

6.6.7. Método de máxima verosimilitud.

El principio básico de este método consiste en estimar los parámetros de tal forma que, al utilizar el modelo, la probabilidad de obtener los resultados observados sea máxima. Desde el punto de vista estadístico, este método es más robusto que los demás métodos para la estimación de parámetros; sin embargo, para muestras de menor longitud este método puede ser menos eficiente que en los momentos, y también presenta la dificultad de ser el más demandante desde el punto de vista computacional (Dávila, 2009).

Según el Método de máxima verosimilitud, los parámetros u y α se estiman aplicando las ecuaciones 5 y 6.

$$\alpha = \tilde{X} - \frac{\sum_{i=1}^n X_i e^{-\frac{X_i}{\alpha}}}{\sum_{i=1}^n e^{-\frac{X_i}{\alpha}}} \quad (5)$$



$$u = -\alpha \cdot \ln \left[\frac{\sum_{i=1}^n e^{-\frac{X_i}{\alpha}}}{n} \right] \quad (6)$$

Se puede observar en la ecuación de alfa que tiene en sí misma propio valor buscado, es decir alfa, por lo que hace que la ecuación no se resuelva de manera directa, y necesita un proceso iterativo. Puede facilitar el cálculo tomar como guía el valor de alfa de otro método. El método de máxima verosimilitud se hace más tedioso de calcular, comparado con el de momentos ordinarios, pues en este el valor se calcula de manera directa.

6.6.8. Estimación de curvas IDF a partir del análisis de funciones de distribución.

La distribución EVI, se utiliza como una distribución de valores extremos hidrológicos en este caso para una curva IDF, se deben utilizar las observaciones máximas del registro de datos pluviográficos de las siete estaciones mencionadas en acápites anteriores. A continuación, se muestra la secuencia algebraica del proceso de obtención de una curva IDF, ajustando la función de densidad de probabilidad EVI.

En primera instancia se toma la ecuación (7) que representa la función de densidad de valor extremo tipo I (EVI) o Gumbel:

$$f_x(X) = e^{-e^{-\frac{x-u}{\alpha}}} \quad (7)$$

Donde:

X: variable aleatoria, intensidad media en duración determinada

u: Moda, parámetro de ubicación

α : parámetro de escala



Los parámetros u y α son estimados, a partir de los métodos descritos en el acápite 5.6.6 y 5.7.7.

$$y = \frac{x-u}{\alpha} \quad (8)$$

De la ecuación de la función de densidad se despeja, obteniendo la ecuación 9:

$$F(x_T) = e^{-e^{-y}} \rightarrow y_T = -\ln \left[\ln \left(\frac{1}{F(x)} \right) \right] \quad (9)$$

De la relación entre probabilidad y período de retorno se obteniendo la expresión 10:

$$T = \frac{1}{1-F(x_T)} \Rightarrow F(x_T) = \frac{T-1}{T} = e^{-e^{-\frac{x-u}{\alpha}}} \quad (10)$$

Sustituyendo con base en las expresiones anteriores se obtiene la ecuación 11, que representa Y_T o la variable reducida.

$$y_T = -\ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \quad (11)$$

Finalmente se deduce la expresión 12. que representaría la curva idf, específicamente la intensidad media de precipitación asociado al periodo de retorno real y duración, teniendo en cuenta los parámetros de la función de probabilidad u y α .

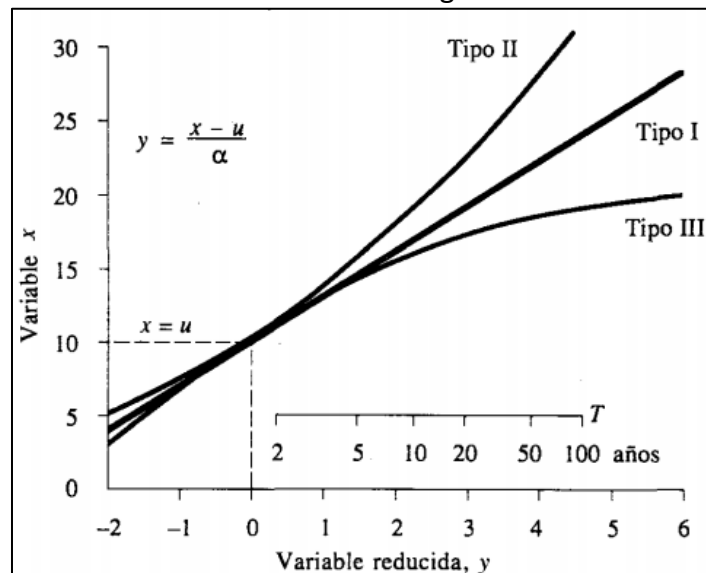
$$x(T) = u + \alpha * y_T \quad (12)$$



Para la construcción de las curvas IDF, se obtienen valores de u y α para cada una de las duraciones de precipitación; dichos valores son independientes del periodo de retorno, es decir que lo que modifica la ecuación o en sí las curvas es el periodo de retorno; es decir que las variables u y α se mantienen fijas para cualquier periodo de retorno, pero su variación se da en la ventana de duración.

El anterior proceso puede deducirse de manera sencilla mediante la ilustración 7. Donde se pueden observar los diferentes tipos de distribuciones incluyendo el tipo I, es decir EVI.

Ilustración 7. Relación de variables para distribuciones de probabilidad, aplicada a valores extremos hidrológicos.



Fuente: (Chow, Hidrologia Aplicada, 1994)

6.6.9. Interpolación de parámetros hidrológicos.

La interpolación de parámetros hidrológicos también es conocida como regionalización, y consiste en dividir un espacio o lugar, en diferentes regiones; según criterios de selección que se pretendan extender. De esta manera, los datos puntuales, se amplían a sitios donde no se tienen registros, en una zona espacialmente delimitada. Para realizar la extensión de datos se utiliza normalmente métodos de interpolación, a fin de poder obtener generalmente mapas que tienen “regiones” con comportamientos similares.



Los métodos de estimación de caudales máximos utilizados en zonas donde la información es escasa o nula, involucra el término de regionalización; que consiste en la división de la región de estudio en sub-zonas definidas por criterios que varían desde la contribución de los datos de los sitios de medición, aspectos del comportamiento de los caudales máximos que sean considerados homogéneos, incluso regiones geográficamente contiguas. Todo esto con el fin de obtener Sub-regiones estadísticamente homogéneas (Mesa, 2002).

Para el caso de la hidrología, es usual encontrar mapas de regionalización de datos de precipitación. En climatología es usual encontrar mapas con datos regionalizados de temperatura y humedad, entre otros, que ofrecen información de lo esperado en puntos geográficos donde no se tienen registros históricos, o algún dato de los parámetros que representa cada mapa. Por ejemplo, si se regionaliza en algún sitio la temperatura, pueden obtenerse mapas con contornos “colores”, que representan comportamientos de rangos de temperatura similar, en una zona geográfica. Este mapa de colores no indica que se mida en cada punto geográfico la temperatura, sino que muestra el valor de temperatura esperado en esa zona a partir de la interpolación de los datos o registros, que existen en diversas localizaciones espaciales, normalmente estaciones pluviográficas. Esto mismo aplica para datos hidrológicos y se evidenció que aplica para las curvas IDF.

6.7. Métodos de interpolación local.

Los métodos locales de estimación utilizan la interpolación empleando sólo la información de los puntos más cercanos, los cuales son apropiados para el procesamiento de los datos, y aplicables a la presente investigación, teniendo en cuenta que las siete estaciones pluviográficas se encuentran delimitadas por la zona centro del Departamento de Boyacá.

6.7.1. Distancia inversa ponderada (DIP) o Inverse Distance Weighted (IDW).

En este método de interpolación local se asume que cada punto en la nube total de puntos obtiene una influencia local que disminuye con la distancia y que, por lo tanto, los valores de los puntos más próximos al nodo que se procesa alcanzan mayor importancia o peso en

el valor que será asignado al mismo. Normalmente, la búsqueda se realiza considerando un número de puntos o un radio (círculo alrededor de la celda de interés).

Este método es apropiado cuando la variable analizada disminuye conforme aumenta la distancia desde cada punto analizado. Considerando que el IDW es un método de interpolación que utiliza los promedios de los valores de entrada (de allí su nombre 'Inversed Distance Weighted' o de la distancia inversa ponderada), el resultado de los valores de las celdas, jamás superarán los límites máximos y mínimos establecidos en los puntos de entrada del análisis. IDW estima los valores de las celdas promediando los datos obtenidos desde los puntos de entrada ingresados que están más cercanos a ella.

Los métodos locales de estimación utilizan la interpolación empleando sólo la información de los puntos más cercanos, los cuales son apropiados para el procesamiento de los datos y aplicables a la presente investigación, teniendo en cuenta que las siete estaciones pluviográficas se encuentran delimitadas por la zona centro del departamento de Boyacá.

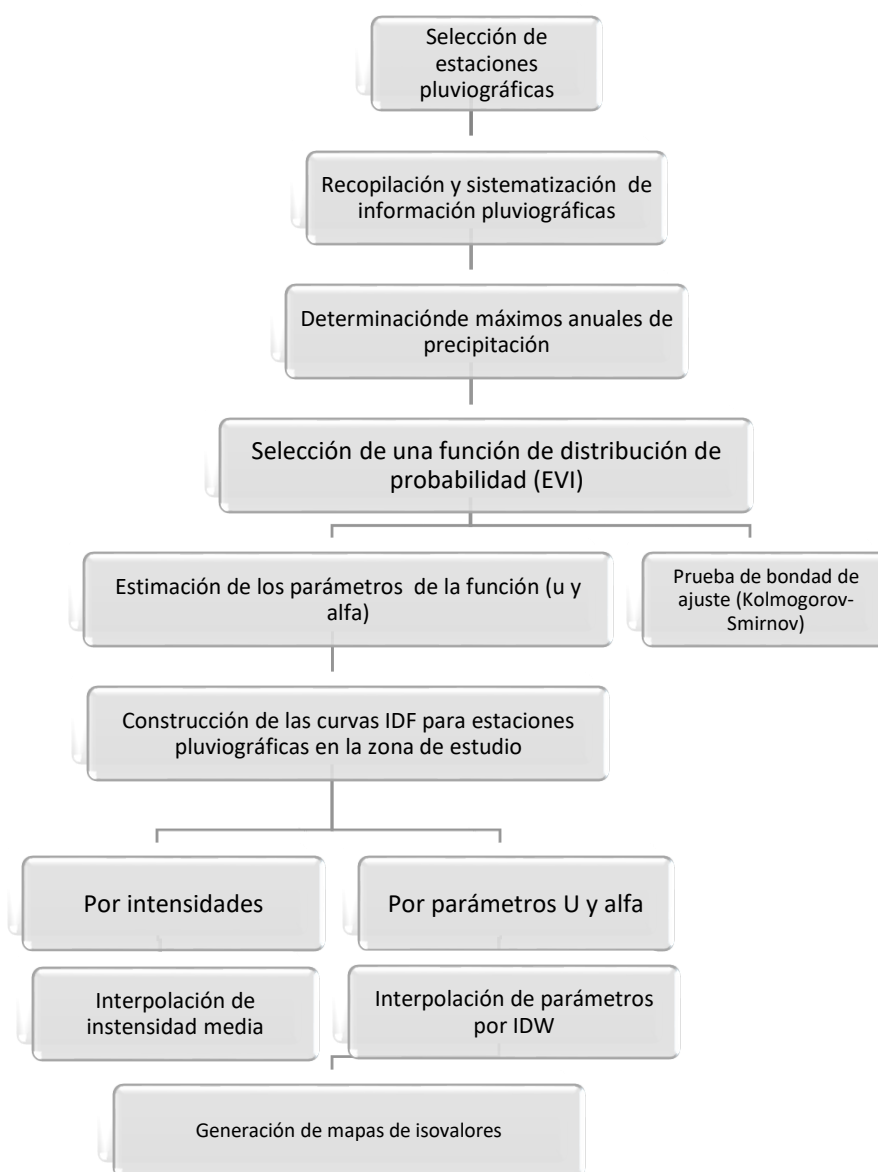


7. METODOLOGÍA.

7.1. Flujograma de la metodología desarrollada.

Con el fin de dar mayor claridad al proceso que se desarrolló en la investigación se elaboró la ilustración 6.

Ilustración 8. Flujograma metodológico.





7.2. Consideraciones generales.

Como se mencionó previamente, las curvas o relaciones IDF, se presentan en forma gráfica donde el eje x representa la duración, el eje y la intensidad media de precipitación; mientras que las curvas resultantes en el cuadrante definido corresponden a los periodos de retorno. Los datos utilizados para graficar dichas curvas serán ubicados en tablas, tal como se ejemplifica en la tabla 2.

Tabla 2. Intensidades máximas (mm/h) para cada duración y periodo de retorno.

CURVAS INTENSIDAD-DURACION-FRECUENCIA (valores en mm/h)						
Duración (min)	Periodo de Retorno (años)					
	2	5	10	20	50	100
10	147,9	174,4	197,6	223,9	264,0	299,1
20	93,6	110,4	125,1	141,7	167,1	189,3
30	71,6	84,5	95,7	108,4	127,9	144,8
60	45,3	53,5	60,6	68,6	80,9	91,7
120	28,7	33,8	38,3	43,4	51,2	58,0
130	27,2	32,1	36,4	41,2	48,6	55,0
160	23,7	28,0	31,7	35,9	42,4	48,0
180	22,0	25,9	29,3	33,2	39,2	44,4

Los valores de intensidad media de precipitación para cada duración y periodo de retorno serán obtenidos mediante el ajuste a una función de distribución de probabilidad de las intensidades máximas. Por otro lado, la variable de intensidad media, se calcula dividiendo la precipitación registrada en la ventana temporal definida, es decir la duración. Por esta razón, la intensidad determinada no es un valor real, puesto que la cifra obtenida no



implica que, durante la ventana de tiempo considerada, la intensidad real se haya mantenido constante. Las distintas duraciones de esas ventanas temporales se fijan de manera artificial, indistinto de la duración real de los episodios de precipitación, por ende, puede asegurarse que no es una variable aleatoria.

7.3. Construcción de curvas IDF a partir de información pluviográfica.

Para la construcción de las curvas IDF regionalizadas, se adquirió la información pluviográfica de las siete estaciones ubicadas en el centro del departamento de Boyacá, Colombia. La información obtenida considerará un periodo de recolección de datos amplio y suficiente, de modo que garantice homogeneidad en los registros. Posteriormente, se encontrarán las intensidades máximas, donde se ajusta una función de probabilidad a los datos, utilizando valor extremo tipo I, y se realizarán las pruebas de bondad de ajuste. Esta información permitirá la determinación de las curvas IDF.

7.4. Ejemplo de construcción de una curva IDF, mediante el ajuste a una función de densidad de probabilidad.

Con el fin de dar claridad al proceso de interpolación y obtención de curvas IDF en zonas sin instrumentación, se hace necesario ejemplificar la metodología de obtención de estas curvas mediante el ajuste de los máximos anuales de registros de precipitación pluviográfica en las estaciones seleccionadas. Es importante resaltar que solo se ejemplifica el proceso para un solo dato de la curva es decir un punto de la curva que representa un periodo de retorno que por definición será la intensidad media para una duración específica.

7.4.1. Máximos anuales.



Como se ha relacionado anteriormente al utilizarse la teoría de los valores extremos, solamente es necesario utilizar una muestra de la población de datos, en este caso los máximos anuales del registro de profundidad de precipitación de las estaciones pluviográficas. En la tabla 3 se pueden observar los máximos anuales para la estación UPTC de Tunja, estos valores son determinados a partir de la conversión de los datos gráficos de un pluviograma a datos numéricos, este mismo procedimiento y los subsiguientes se realizaron para las siete estaciones seleccionadas en la zona de estudio.

Tabla 3. Máximos anuales estación UPTC, Tunja.

AÑO	Máximos anuales de intensidad en mm/h								
	Duración min								
	10	20	30	60	120	180	220	280	320
1975	51,0	43,5	44,4	24,6	13,9	8,6	7,4	6,1	2,6
1976	48,0	37,5	33,0	19,0	10,2	7,1	5,8	5,2	2,8
1977	24,0	21,0	19,0	12,6	9,9	7,2	6,3	3,7	3,3
1978	66,0	57,0	48,6	28,1	9,6	7,2	3,7	2,9	3,0
1979	60,0	45,0	40,0	22,7	13,8	9,8	8,3	6,9	4,1
1980	96,0	72,0	58,0	33,5	7,2	5,8	4,9	1,8	2,0
1981	36,0	29,1	22,8	13,2	4,7	4,1	4,1	3,7	3,7
1982	30,0	25,5	20,4	15,2	8,9	6,5	5,4	3,1	2,8
1983	36,0	31,5	28,4	16,4	6,8	4,0	3,4	0,0	0,0
1984	36,0	33,0	27,4	16,8	10,0	5,7	5,0	1,7	1,5
1985	15,0	13,5	12,0	7,2	5,8	4,8	4,3	3,6	1,7
1986	18,6	13,5	12,6	8,4	5,4	4,2	3,9	3,3	2,8
1987	24,0	21,3	17,4	13,7	11,0	8,5	2,6	2,6	2,4
1988	21,0	16,5	15,8	10,3	5,5	4,9	4,2	2,5	0,0
1989	46,8	31,8	24,2	14,2	8,6	6,0	4,9	3,9	3,5
1990	24,0	24,0	23,0	19,0	6,7	4,0	3,6	1,7	1,6
1991	16,2	11,7	11,0	10,5	6,3	4,8	4,1	1,6	0,0
1992	22,2	18,6	16,0	10,0	6,3	5,3	4,7	1,9	1,7
1993	45,6	35,1	30,4	21,9	15,4	10,8	9,1	3,2	3,1
1994	19,8	16,8	14,6	9,8	5,9	4,6	4,7	4,7	4,3
1995	12,0	9,6	7,6	7,5	4,6	3,9	3,5	3,1	1,7
Σ	748,2	607,5	526,6	334,6	176,0	127,7	103,9	67,0	48,6



Los datos de máximos anuales y específicamente con las sumatorias de cada duración se utilizan para determinar los parámetros μ y α de la función de densidad de probabilidad EVI.

7.4.2. Tratamiento estadístico de la muestra de máximos anuales.

A la muestra de máximos anuales se determina la media aritmética y la desviación estándar con el fin de determinar los parámetros de ubicación μ y escala α de EVI, conforme a las ecuaciones 3,4, 5 y 6.

El resultado del cálculo de la media aritmética de la muestra de máximos anuales se evidencia en la tabla 4.

Tabla 4. Media aritmética de la muestra de máximos anuales para la estación UPTC, Tunja.

Duración (minutos)	10	20	30	60	120	180	220	280	320
Media Aritmética	35,63	28,93	25,08	15,93	8,38	6,08	4,95	3,19	2,31

De igual en la tabla 5, se pueden evidenciar los resultados de la desviación estándar de la muestra de máximos anuales.

Tabla 5. Desviación estándar de la muestra de máximos anuales para la estación UPTC, Tunja.

Duración (minutos)	10	20	30	60	120	180	220	280	320
Media Aritmética	20,63	15,76	13,37	7,06	3,15	2,01	1,63	1,61	1,26

7.4.3. Determinación de los parámetros de la función de probabilidad Valor Extremo Tipo I.



Los métodos que se utilizaron para la determinación de parámetros de la función de probabilidad son el de “momentos ordinarios o OM” y el de “máxima verosimilitud o ML”, se aplicaron conforme a lo mencionado en los acápites 5.6.6 y 5.6.7. A continuación, se muestran los resultados de los valores de los parámetros μ y α producto de la utilización de la media aritmética y la desviación estándar de la muestra de máximos anuales.

Tabla 6. Parámetro μ y α por OM, para la estación UPTC, Tunja.

Duración (minutos)	10	20	30	60	120	180	220	280	320
α	16,08	12,29	10,43	5,51	2,46	1,56	1,27	1,25	0,98
μ	26,35	21,84	19,06	12,75	6,96	5,18	4,21	2,46	1,75

Para determinar los parámetros μ y α por medio del método de máxima verosimilitud se utilizan las ecuaciones 5 y 6. Estas expresiones son dependientes de un parámetro referencia, para este caso se utilizaron como referencia los obtenidos en la tabla 6.

Tabla 7. Parámetro μ y α por ML, para la estación UPTC, Tunja.

Duración (minutos)	10	20	30	60	120	180	220	280	320
α	13,85	11,15	9,56	5,18	2,29	1,43	1,15	1,42	1,28
μ	26,91	22,11	19,22	12,80	6,98	5,20	4,25	2,44	1,67

7.4.4. Determinación de la curva IDF mediante la función de probabilidad EVI.

Para este paso hace solo falta aplicar la ecuación 7, que representa la función de probabilidad de valor extremo tipo 1 o EVI, la ecuación está en función de los parámetros μ y α calculados en el acápite anterior. Así mismo la ecuación 7, es dependiente no solo de estos parámetros si también de la ecuación 11, que a su vez integra el periodo de retorno, es decir la el inverso de la frecuencia.

En síntesis, se determina el valor de Y_T a partir de la ecuación 11, con base en los periodos de retorno, es importante resaltar que se utilizan los periodos de retorno corregidos que se



muestran en la tabla 1, del acápite 5.4.4. A continuación, en la tabla 8, se muestra el resultado del cálculo de Y_T para la estación UPTC su muestra de máximos anuales.

Tabla 8. Valores de Y_T para la estación UPTC, Tunja.

T	Y_T
2,54	0,69
5,52	1,61
10,51	2,30
20,50	3,00
50,50	3,91
100,50	4,61
150,50	5,01
200,50	5,30

A partir de estos datos resta únicamente aplicar la expresión 12, que para fines metodológicos se muestra nuevamente a continuación.

$$x(T) = u + \alpha * y_T \quad (12)$$

Con esta expresión se determina la variable independiente de la función de probabilidad EVI, es decir $X_{(T)}$ que en este caso es la intensidad media de precipitación, asociada a un periodo de retorno y una duración, es decir un valor de una curva IDF. Con el fin de hacer claro el proceso se explicará la obtención del valor de la curva IDF, de la estación de UPTC, Tunja, representada en la tabla 9., para una duración de 10 minutos y un periodo de retorno de dos años, cuyo valor de intensidad media es 36.50 mm/hr.

- Se toman los siguientes valores de parámetros por el método OM de la duración de 10 minutos:

$$\mu=26.35$$

$$\alpha=16.08$$

- Se toma el valor de Y_T para el periodo de retorno de 2 años, corregido por el modelo de máximos anuales sería 2,34.

$$Y_T= 0.69$$



- Se calcula el valor de $X_{(T)}$ que como se mencionó anteriormente es la variable independiente es decir la intensidad media de precipitación.

$$X_{(T)} = 26.35 + 16.08 * (0.69)$$

$$X_{(T)} = 36.50$$

Tabla 9. Curva IDF, estación UPTC, Tunja.

Periodo de retorno (años)	Duración (minutos)								
	10	20	30	60	120	180	220	280	320
	Intensidad (mm/hr)								
2	36,50	29,82	25,83	16,39	8,57	6,18	5,04	3,41	2,55
5	49,21	40,05	34,60	21,14	10,68	7,48	6,10	4,71	3,71
10	58,80	47,76	41,21	24,73	12,28	8,47	6,89	5,68	4,59
20	68,40	55,48	47,83	28,32	13,87	9,45	7,69	6,66	5,47
50	81,09	65,69	56,58	33,06	15,98	10,75	8,75	7,95	6,64
100	90,69	73,41	63,20	36,65	17,57	11,74	9,54	8,93	7,52
150	96,31	77,93	67,07	38,75	18,50	12,31	10,01	9,50	8,03
200	100,29	81,13	69,82	40,24	19,17	12,72	10,34	9,91	8,40

El procedimiento anterior representa lo realizado para las siete (7) estaciones seleccionadas para este estudio, utilizando los métodos de momentos ordinarios y máxima verosimilitud. Como se puede observar los valores de μ y α son el paso previo a la obtención de la curva IDF, por tal motivo representan una opción de interpolación para la obtención de estas curvas en zonas no instrumentadas.

7.5. Análisis de posibilidades de interpolación y obtención de curvas IDF, en zonas sin registros de precipitación.

Las posibilidades de interpolación de una curva IDF, se determinaron a partir del método de obtención de las mismas, es decir del procedimiento descrito en el acápite anterior (6.4). Para lo cual se puede partir de las siguientes afirmaciones:



- Se obtuvo siete (7) curvas IDF reales a partir del ajuste a la función de probabilidad EVI. Proceso ya estudiado y aplicado ampliamente en la hidrología.
- Los parámetros μ y α son susceptibles a interpolar ya que son independientes de los valores de periodo de retorno y representan la muestra de máximos anuales.
- La intensidad media en una curva IDF, es un valor independiente una vez calculado, por tal motivo es susceptible de interpolar.

Con estas tres premisas se puede definir que existen dos posibilidades de interpolación para obtener curvas IDF, donde no existe instrumentación o registros de precipitación, una es interpolar los valores de μ y α para posteriormente aplicar la ecuación 12 y obtener un valor de intensidad media y por otro lado existe la posibilidad de interpolar la intensidad media para obtener un valor directamente. Las curvas IDF reales se pueden utilizar como referencia para determinar si los valores interpolados con cercanos o próximos a los valores reales.

7.5.1. Interpolación de curvas IDF por intensidad media de precipitación.

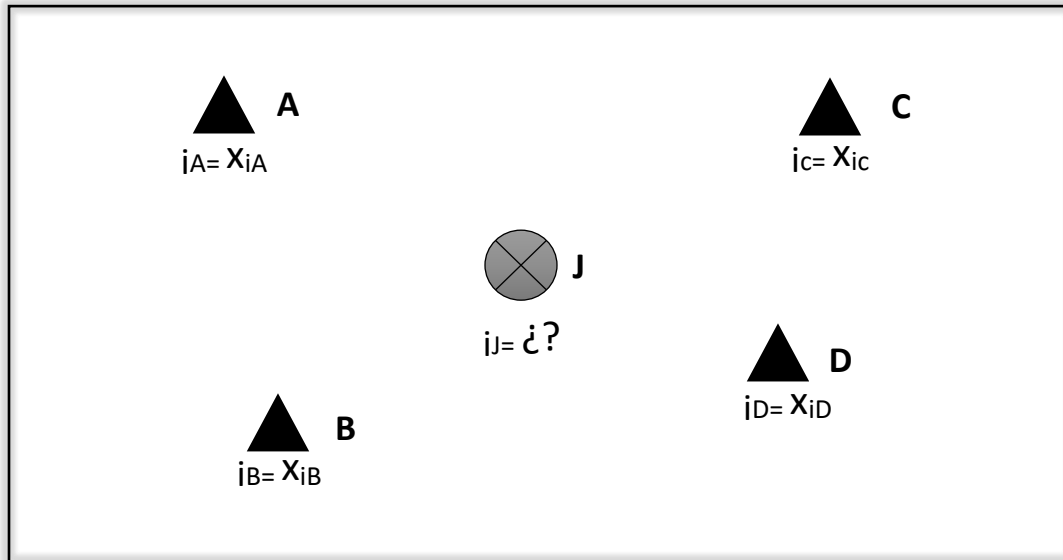
Cabe resaltar que la información suministrada en las curvas IDF corresponde a un punto geográfico específico, donde se realizó el registro de los datos pluviográficos. Para poder determinar una curva IDF, en lugar diferente y donde no exista información o un pluviógrafo, se plantea interpolar la información de intensidad media.

Es necesario contar con dos o más estaciones que proporcionen la información para poder llevar a cabo la interpolación. Como se mencionó anteriormente, se contará para esta investigación con la información de siete (7) estaciones pluviográficas, ubicadas en el centro del departamento de Boyacá, Colombia, a fin de suplir la necesidad de información para realizar la interpolación.

Se deben proyectar las variables que pueden ser susceptibles de extender espacialmente, y obtener de la manera más practica las curvas IDF, a partir de las intensidades interpoladas.



Ilustración 9. Proceso de interpolación por intensidades.



Por ejemplo, en la ilustración 9. Se explica de manera genérica el proceso de obtención de un valor de intensidad dentro de una zona de estudio. Cada estación debe tener un valor de intensidad media de precipitación, asociado a una misma duración y un mismo periodo de retorno; en este caso A, B, C, por ejemplo, representarían como variable independiente o móvil el valor de intensidad media y variables dependientes del periodo de retorno y duración. Así, una vez interpolados los valores de la variable independiente o móvil entre la estación A, B y C, se puede hallar esta misma variable en un sitio no instrumentado, es decir, fuera de las coordenadas que representarían A, B y C.

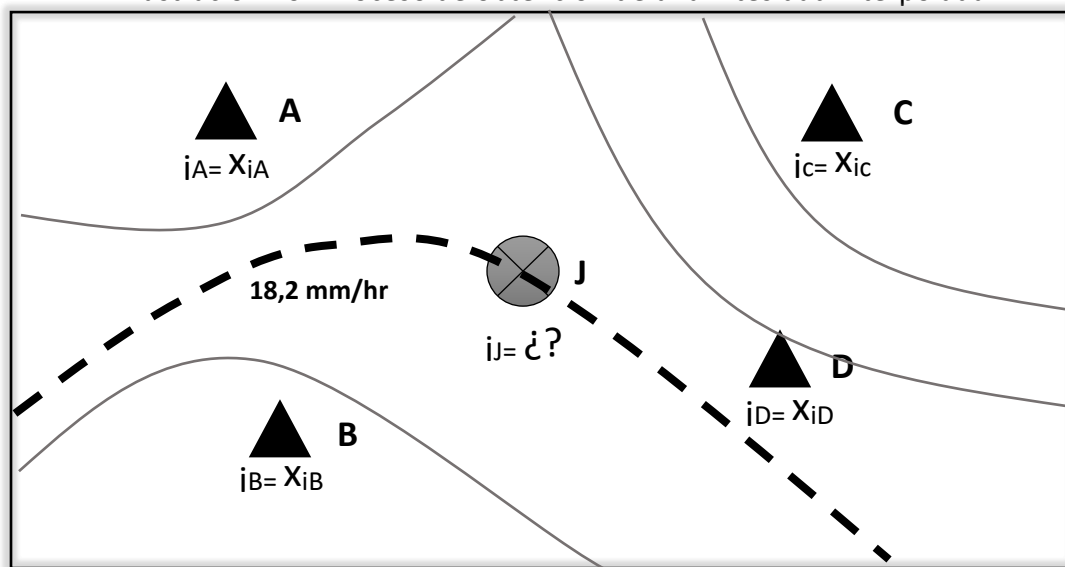
Una vez leído el valor, sólo representaría un punto dentro de la curva IDF, asociado estrictamente a una duración y un periodo de retorno. Es decir que, para completar una curva, se debe realizar la lectura de varios valores en diferentes mapas que presenten asociadas las variables dependientes, duración y periodo retorno.

A manera ilustrativa se muestra en la ilustración 10. La isolínea que resultarían del proceso de interpolación de las intensidades medias de precipitación de las estaciones A, B, C y D,



cada isolínea tendría un mismo valor de intensidad asociado a estrictamente a un periodo de retorno y una duración. Como se puede observar la línea punteada es la que representa la intensidad buscada, pues corta el punto de interés J, asumiendo que el valor es 18,2 mm/hr, para una duración de 10 minutos y un periodo de retorno de 2 años. Para construir una curva IDF, necesitaría más mapas como el de la ilustración 10, para completar una serie de intensidades que estarían asociadas a un periodo de retorno y diferentes duraciones.

Ilustración 10. Proceso de obtención de una intensidad interpolada.



En la siguiente tabla 10 se muestra el proceso de registro de la intensidad obtenida en el proceso que se muestra en la ilustración 10. Como puede observarse un mapa solo serviría para hallar un solo valor.

Tabla 10. Obtención de la intensidad mediante interpolación de intensidades.

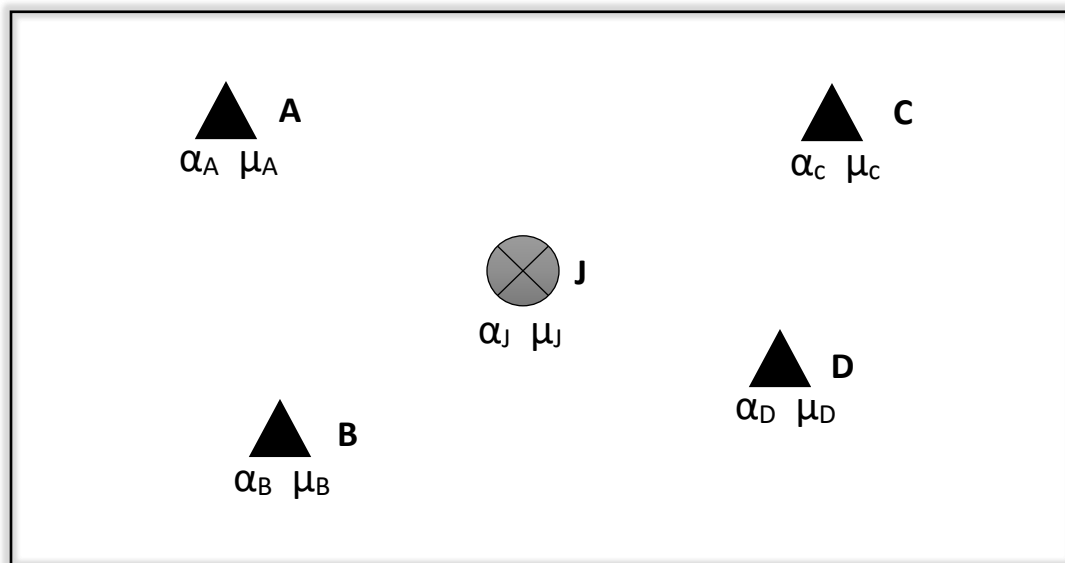
Periodo de retorno (años)	Duración (minutos)				
	10	20	30	60	120
2	18,2 mm/hr				
5					



7.5.2. Interpolación de parámetros de ajuste de la función de densidad de probabilidad de valor extremo tipo I (EVI), para la determinación de curvas IDF en lugares sin instrumentación.

Para determinar las curvas IDF, en lugares sin instrumentación o con escasos registros pluviográficos, se puede inferir que se deben relacionar espacialmente tres variables; la intensidad media de precipitación, la duración del evento y la frecuencia de ocurrencia o periodo de retorno. Los parámetros de la función de probabilidad EVI, revisados en acápites anteriores, u y α agrupan la duración y la intensidad media, por ende, se descubrió que existe la posibilidad de interpolar estos parámetros y determinar las curvas IDF en lugares sin instrumentación. Como ya se mencionó los parámetros de la función de probabilidad pueden determinarse por varios métodos, los más utilizados son momentos ordinarios o método de los momentos y máxima verosimilitud, que fueron los utilizados para esta investigación.

Ilustración 11. Muestra de proceso de interpolación por parámetros.

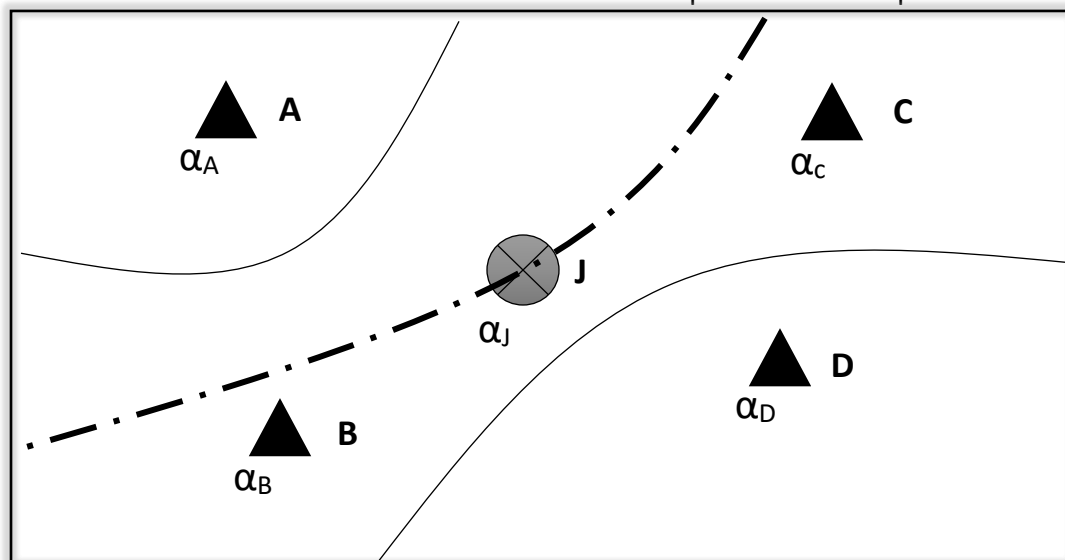




En este caso se tomarán los valores de los parámetros u y α de cada estación, siguiendo el ejemplo de la ilustración 11, a cada estación se le realiza el procedimiento del análisis de datos para obtener una curva IDF, proceso descrito en el acápite 6.2 al 6.4, de este proceso se obtienen los valores de u y α para cada estación, para el ejemplo serían de las estaciones A, B y C. Es importante recordar que los parámetros están únicamente relacionados con la duración y no con el periodo de retorno. Es decir que las variables que intervienen en este caso de interpolación por parámetros son dos, intensidad media y duración, a diferencia de las tres del caso de la interpolación por intensidades.

Por ende, retomando el ejemplo de cómo se realiza la obtención de una curva IDF, por interpolación de parámetros sería de la siguiente manera; las estaciones A, B y C, tendrían valores respectivamente X, Y y Z de parámetros μ y α . Por lo cual se procedería a interpolar cada parámetro entre las estaciones entre sí. El resultado sería una serie de isolíneas cuyo valor sería el de cada parámetro, es decir si se interpola u , las isolíneas representarían un valor de u , igualmente sería para el parámetro α . La representación gráfica está dada por la ilustración 12. Que para efectos de simplificación constituiría un valor buscado J, de un parámetro, asumiendo que la ilustración representa la interpolación del parámetro α para la duración de 30 minutos, se obtendría en J, el valor de α para esta duración.

Ilustración 12. Proceso de obtención de un parámetro interpolado.





Es importante resaltar que no se obtendría la curva IDF, directamente, para esto habría en primer lugar que hacer el mismo procedimiento en J, con el mapa de interpolaciones de la misma duración es decir 30 minutos del parámetro u . Posterior a la obtención de los parámetros debe realizarse el proceso descrito en el acápite 6.4.4.

A diferencia del proceso de obtención de una curva IDF, para un lugar no instrumentado con interpolación de intensidades donde se tienen un gran número de mapas con isovalores de intensidad media, en este caso para obtener la misma curva IDF, solo se necesitarían 8 mapas por cada parámetro, pues las variables se reducen a dos.

7.5.3. Determinación de mapas de zonificación con los datos interpolados para la construcción curvas IDF en lugares sin información.

Uno de los productos esperados de la presente investigación es el desarrollo de mapas, que permitan la identificación de los valores de intensidad media o de parámetros; para de esta manera poder determinar una curva IDF en cualquier punto dentro del área del mapa.

Para esto el primer paso es regionalizar los mapas, mediante el establecimiento de zonas o regiones con características similares, basándose en la variable de intensidad media; así como para las zonas o regiones con parámetros u y α de la función de probabilidad EVI. Posteriormente, mediante la asistencia del software ArcGIS, se generarán contornos que agrupen rangos de comportamiento numérico tanto en intensidad media, como en valores de parámetros u y α .

Los contornos en un mapa, representan características similares agrupadas por colores o tonos; así como las isolíneas representan un mismo valor a lo largo de los puntos en el mapa, donde dicha línea pase (OIRSA, 2005). En el presente estudio, las isolíneas, corresponderán a valores similares de intensidad media y de parámetros de ajuste.

Por intensidades medias es un proceso de interpolación de los valores de intensidad provenientes de cada estación. Es decir que se regionaliza cada valor de intensidad media de precipitación en relación con su duración y al periodo de retorno.

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

8.1. Curvas IDF “reales” de la zona de estudio.

Para determinar las curvas IDF, en zonas sin instrumentación en la zona de estudio, es necesario tener como información base los datos que serán interpolados, como lo son la intensidad media de precipitación, consignada en las curvas IDF de las siete estaciones.

Debido a que los datos pluviográficos representan una serie de datos y estos se ajustarán a una función de probabilidad, es necesario realizar una prueba de bondad de ajuste. Esta prueba determina si la muestra o los datos se ajustan a la distribución de probabilidad que se está utilizando, en este caso valor extremo tipo I (EVI). Este paso es fundamental para determinar si es viable utilizar una distribución determinada en una serie de datos; en este caso, para la muestra de máximos anuales se utilizó el método de Kolmogorov-Smirnov, que permite calcular la relación que existe entre una distribución de una muestra de datos y una distribución teórica (L'Ecuyer & Simard, 2011).

La prueba de bondad de ajuste requiere que el valor estadístico de prueba de la muestra (D_n) sea menor que el valor tabulado ($D_n \alpha$), a fin de que la prueba sea aceptada (Acosta Castellanos & Sierra Aponte, 2013). En la Tabla 1 se muestran los resultados de la prueba para cada una de las estaciones, con la función de distribución EVI.

Tabla 10. Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov

Estación	Nivel de significancia	D_n . Máx.	$D_n \alpha$
Tunguavita - Paipa	0,05	0,14	0,2895
Potrerito - Aquitania	0,05	0,13	0,309
Villa Carmen -Samacá	0,05	0,14	0,309
UPTC - Tunja	0,05	0,16	0,287
Tota	0,05	0,15	0,349



Pesca	0,05	0,14	0,361
Azulejos - Tuta	0,05	0,18	0,301

Sabiendo que los datos se pueden ajustar a la función de probabilidad EVI, se construyeron las curvas IDF, a partir de información pluviográfica, calculando los parámetros de la función mediante el método de máxima verosimilitud (ML) y momentos ordinarios (OM).

Debido a que el método de máxima verosimilitud (ML) presento un mejor comportamiento en el análisis se utilizó las curvas IDF de este método, como curvas reales, aun así, se construyeron las curvas por momentos ordinarios y se encuentran en el anexo A. En la tabla 3 hasta la 9. Se pueden observar los datos de cada curva, para las estaciones seleccionadas.

Tabla 11. Información curva IDF estación Potrerito-Aquitania

Periodo de retorno (años)	Duración (minutos)								
	10	20	30	60	120	180	220	280	320
2	20,42	15,48	12,45	8,96	6,31	4,96	4,11	2,79	2,51
5	32,12	23,57	18,29	11,98	7,80	6,60	5,59	4,57	4,31
10	39,86	28,93	22,16	13,98	8,79	7,68	6,58	5,75	5,50
20	47,29	34,06	25,87	15,90	9,74	8,72	7,52	6,88	6,64
50	56,91	40,71	30,67	18,39	10,97	10,07	8,74	8,35	8,12
100	64,11	45,70	34,27	20,25	11,89	11,08	9,66	9,45	9,23
150	68,32	48,60	36,37	21,33	12,43	11,67	10,19	10,09	9,88
200	71,29	50,66	37,86	22,10	12,81	12,08	10,57	10,54	10,34

Tabla 12. Información curva IDF estación Tanguavita-Paipa

	Duración (minutos)
--	--------------------



Periodo de retorno (años)	10	20	30	60	120	180	220	280	320
2	64,16	47,92	39,41	24,00	14,41	10,52	9,11	7,33	6,56
5	94,43	67,40	55,54	33,74	20,46	15,19	13,42	11,28	10,31
10	114,46	80,29	66,22	40,20	24,47	18,28	16,27	13,89	12,79
20	133,68	92,65	76,46	46,39	28,32	21,25	19,00	16,39	15,18
50	158,56	108,66	89,72	54,40	33,29	25,09	22,54	19,63	18,26
100	177,20	120,66	99,66	60,41	37,02	27,97	25,20	22,06	20,57
150	188,07	127,65	105,45	63,91	39,19	29,64	26,74	23,48	21,92
200	195,78	132,61	109,55	66,39	40,73	30,83	27,84	24,49	22,87

Tabla 13. Información curva IDF estación Pesca-Pesca

Periodo de retorno (años)	Duración (minutos)								
	10	20	30	60	120	180	220	280	320
2	22,50	18,67	16,69	12,36	7,75	4,85	3,99	3,17	1,64
5	31,04	25,87	23,19	16,74	9,90	7,30	6,01	4,93	3,00
10	36,70	31,20	27,49	19,65	11,32	8,40	7,34	6,10	3,91
20	42,13	35,78	31,61	22,43	13,94	9,56	8,63	7,23	4,77
50	49,15	41,34	36,95	26,04	15,87	12,03	10,28	8,68	5,89
100	54,42	46,17	40,95	28,74	17,45	13,47	11,53	9,77	6,73
150	57,49	48,34	43,28	30,32	18,45	14,20	12,25	10,41	7,23
200	59,66	50,05	44,94	31,43	19,45	14,72	12,77	10,86	8,01



Tabla 14. Información curva IDF estación Villa del Carmen-Samacá

Periodo de retorno (años)	Duración (minutos)								
	10	20	30	60	120	180	220	280	320
2	28,02	21,93	18,09	12,45	7,53	5,21	4,11	3,16	2,35
5	40,61	31,72	25,92	17,29	10,22	8,12	6,90	5,61	4,49
10	48,95	38,21	31,11	20,49	12,01	10,04	8,74	7,23	5,91
20	56,95	44,43	36,08	23,57	13,72	11,89	10,51	8,78	7,26
50	67,30	52,49	42,52	27,55	15,93	14,28	12,80	10,80	9,02
100	75,06	58,52	47,35	30,53	17,59	16,07	14,52	12,30	10,33
150	79,58	62,04	50,16	32,26	18,56	17,12	15,52	13,18	11,10
200	82,79	64,53	52,16	33,50	19,25	17,86	16,22	13,81	11,65

Tabla 15. Información curva IDF estación Tota-Tota

Periodo de retorno (años)	Duración (minutos)								
	10	20	30	60	120	180	220	280	320
2	30,98	25,52	22,38	15,73	9,69	6,51	4,86	3,31	2,82
5	41,20	32,00	27,71	20,06	12,29	8,86	7,26	5,87	4,99
10	47,97	36,29	31,24	22,92	14,02	11,12	9,51	7,57	6,42
20	54,46	40,41	34,62	25,67	17,68	12,90	11,67	9,19	7,80
50	62,87	45,74	39,00	29,23	19,82	14,85	13,46	11,30	9,58
100	69,17	49,73	42,28	31,90	21,43	16,78	15,47	12,88	10,91
150	72,84	52,06	44,20	33,46	23,36	18,54	16,78	13,80	11,69
200	75,44	53,71	45,55	34,56	25,03	20,48	18,64	14,45	12,24



Tabla 16. Información curva IDF estación UPTC-Tunja

Periodo de retorno (años)	Duración (minutos)								
	10	20	30	60	120	180	220	280	320
2	31,99	26,19	22,72	14,70	7,82	5,72	4,67	2,95	2,13
5	47,68	38,82	33,55	20,57	10,43	7,33	5,97	4,55	3,57
10	58,08	47,18	40,71	24,46	12,16	8,39	6,83	5,61	4,53
20	68,05	55,20	47,59	28,18	13,81	9,41	7,66	6,62	5,44
50	80,95	65,58	56,48	33,01	15,95	10,74	8,73	7,94	6,62
100	90,62	73,35	63,15	36,63	17,56	11,73	9,54	8,92	7,51
150	96,26	77,89	67,04	38,74	18,50	12,31	10,00	9,50	8,03
200	100,26	81,10	69,80	40,23	19,16	12,72	10,34	9,90	8,39

Tabla 17. Información curva IDF estación Azulejos-Tuta

Periodo de retorno (años)	Duración (minutos)								
	10	20	30	60	120	180	220	280	320
2	26,91	19,52	15,52	9,99	5,95	3,97	2,88	2,08	2,35
5	39,60	28,66	22,54	14,09	8,22	6,13	4,98	3,92	4,07
10	48,01	34,70	27,20	16,81	9,72	7,55	6,38	5,13	5,21
20	56,07	40,51	31,66	19,41	11,16	8,92	7,72	6,30	6,31
50	66,50	48,02	37,44	22,79	13,02	10,69	9,45	7,81	7,72
100	74,32	53,64	41,76	25,31	14,42	12,02	10,75	8,94	8,79
150	78,88	56,92	44,29	26,79	15,23	12,79	11,51	9,60	9,40
200	82,11	59,25	46,08	27,83	15,81	13,34	12,04	10,07	9,84



8.2. Estimación de curvas IDF mediante interpolación Intensidades.

Con los datos de intensidad media de precipitación de cada curva IDF, con el fin de interpolar estos valores se debe organizar en función de variables, en este caso se tomará como variable independiente el periodo de retorno y la duración. Debido a esta particularidad, la única manera posible de interpolar sería organizando la información de tal manera que se agrupen las intensidades en función de las duraciones y de un solo periodo de retorno. Se puede observar en la tabla 18, la manera utilizada para organizar la información a interpolar.

Tabla 18. Intensidades de precipitación para 2 años.

EVI-ML PERIODO DE RETORNO 2 AÑOS										
Estación pluviográfica	Municipio	10 min	20 min	30 min	60 min	120 min	180 min	220 min	280 min	320 min
Uptc	Tunja	31,99	26,19	22,72	14,70	7,82	5,72	4,67	2,95	2,13
Villa del Carmen	Samacá	28,02	21,93	18,09	12,45	7,53	5,21	4,11	3,16	2,35
Tunguavita	Paipa	64,16	47,92	39,41	24,00	14,41	10,52	9,11	7,33	6,56
Azulejos	Tuta	26,91	19,52	15,52	9,99	5,95	3,97	2,88	2,08	2,35
Potrerito	Aquitania	20,42	15,48	12,45	8,96	6,31	4,96	4,11	2,79	2,51
Pesca	Pesca	22,50	18,67	16,69	12,36	7,75	4,85	3,99	3,17	1,64
Tota	Tota	30,98	25,52	22,38	15,73	9,69	6,51	4,86	3,31	2,82

Solo se muestra la información de una de las tablas a manera de ejemplo (Tabla 18), para este caso un periodo de retorno de 2 años, el resto de la información organizada en tablas, se muestra en el ANEXO B.



8.2.1. Obtención de las curvas IDF.

Inicialmente, lo que se realizó para este proyecto una vez obtenida y organizada la información primaria fue, demostrar que la metodología de regionalización por intensidades fuera válida y bajo qué condiciones se podía trabajar con estas; esto nos remite a la utilización y manejo del factor de ponderación (m), utilizando para este factor un valor de dos.

Para realizar esta comprobación fue necesaria la validación del método para una estación con información real conocida, para así poder establecer un comportamiento del método y decidir si es o no posible trabajar con dicha metodología.

La estación UPTC del municipio de Tunja, por presentar una ubicación medianamente central dentro de la zona de estudio fue ideal para aplicar esta validación.

Si se tomaban las estaciones de Aquitania, Paipa o Samacá; no se podría realizar la interpolación debido a que están en el límite de la zona de estudio.

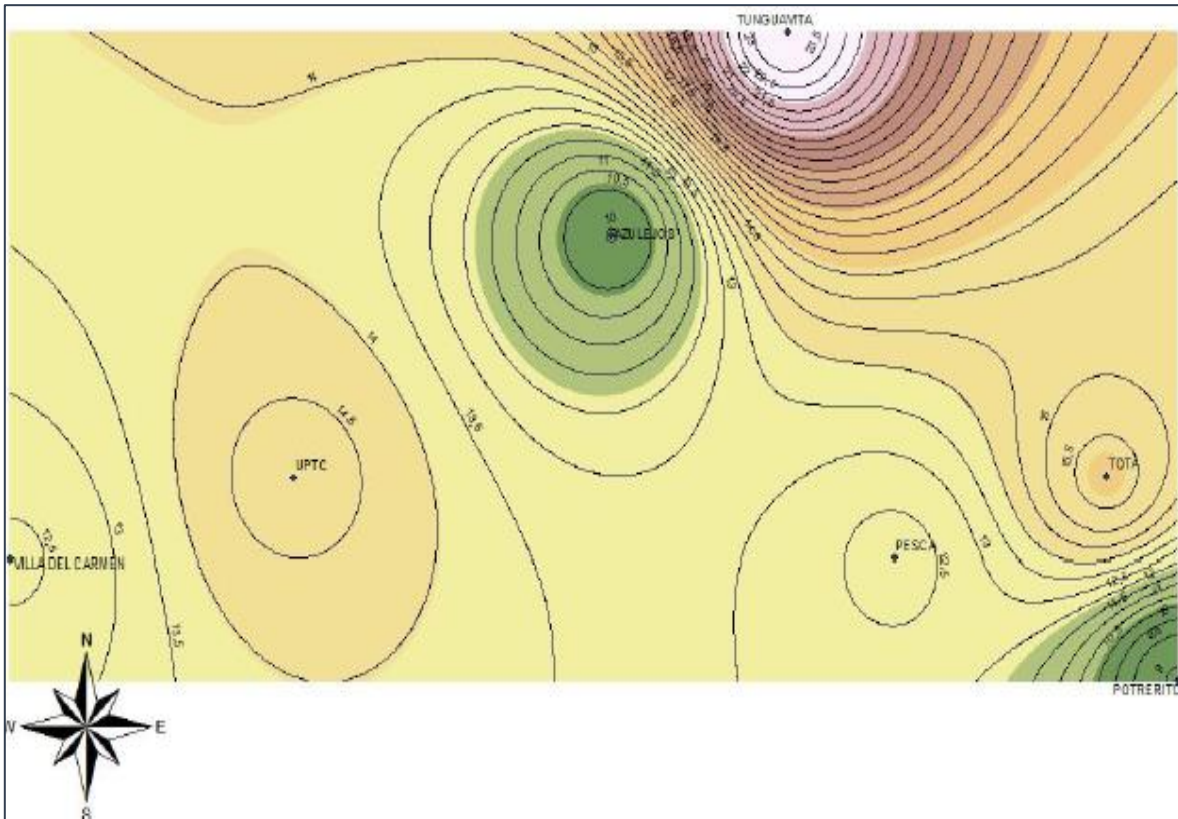
A fin de validar la información se procedió a suprimir de las tablas anteriores, la información de intensidad de precipitación de la estación de la UPTC- Tunja, y subir la información al software ArcGis, para proceder a realizar la validación. En resumen, lo que se pretende al suprimir la estación es comprobar la curva IDF que posee esta estación, con la que se logre construir a partir de la interpolación.

Para hacer la lectura de la intensidad de precipitación en los mapas de isolíneas, es necesario ingresar las coordenadas de la estación o el punto en el cual se va a realizar la lectura, una vez asignadas las coordenadas, se muestra en forma de punto.

Se generaron mapas de isolíneas, para cada periodo de retorno y sus respectivas duraciones, generando en total para la construcción de la curva IDF de la estación de Tunja, por el método IDW, para un total de 72 mapas de isolíneas. Como ejemplo de los mapas generados se muestra la gráfica 1.



Gráfica 1. Mapa de interpolación de intensidades para 2 años, 60 minutos.



Luego de realizar los 72 mapas de isolíneas correspondientes, se procede a realizar la tabulación de los datos, y con esta información poder generar la correspondiente curva IDF, y ver la variación de los datos obtenidos con los que originalmente se tenían.

8.2.2. Validación cruzada de las curvas IDF.

Con el fin de determinar la diferencia entre la información de las curvas IDF, obtenidas mediante interpolación y los métodos comunes que para este caso se llamara IDF “real” se utilizó validación cruzada, expresando la diferencia en términos porcentuales.



8.2.3. Curvas con intensidad media interpolada con Valor extremo tipo I y máxima verosimilitud (EVI-ML).

Así, la información obtenida por medio de regionalización por intensidades utilizando la información del método EVI-ML o de la máxima verosimilitud queda de la siguiente forma:

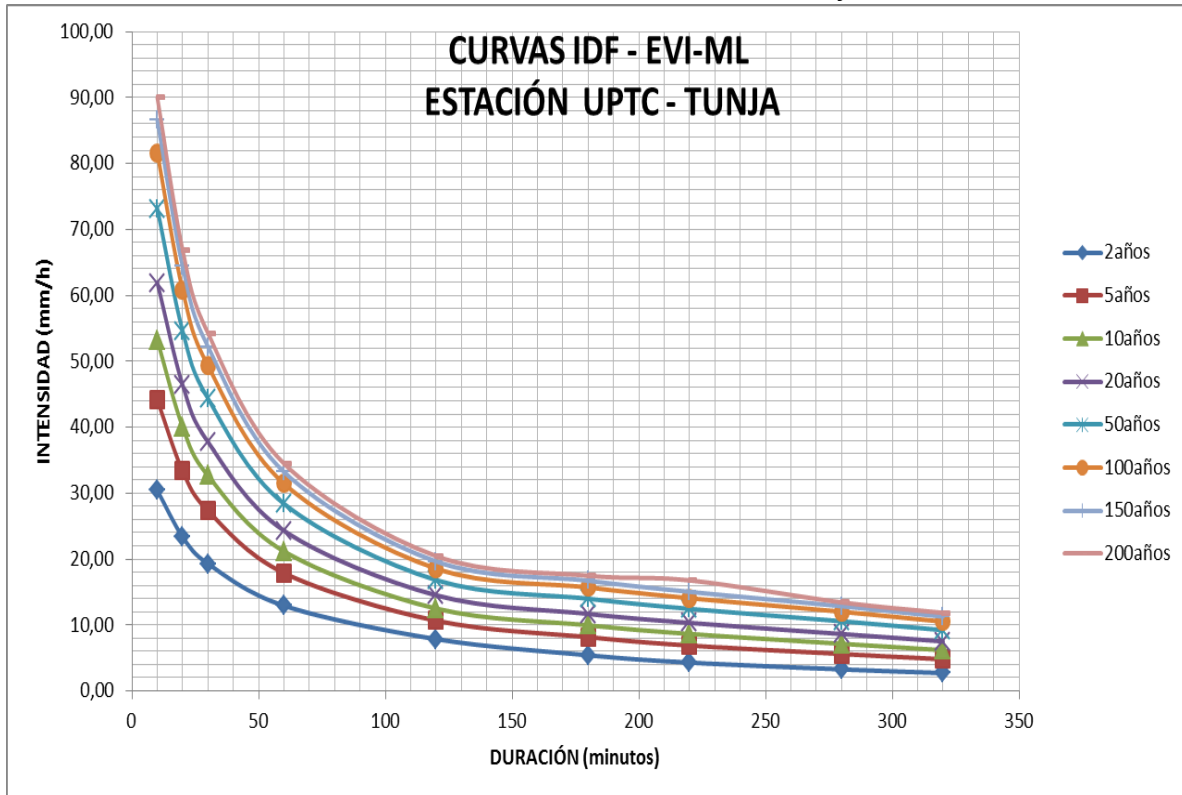
Tabla 19. Datos IDW por intensidades EVI-ML Estación UPTC-Tunja.

METODO EVI-ML UPTC - TUNJA IDW									
Periodo de retorno (años)	Duración (minutos)								
	10	20	30	60	120	180	220	280	320
2	30,42	23,35	19,30	12,93	7,86	5,42	4,30	3,27	2,71
5	44,12	33,36	27,33	17,88	10,66	8,17	6,89	5,61	4,80
10	53,19	40,05	32,66	21,17	12,50	9,97	8,65	7,16	6,19
20	61,90	46,41	37,77	24,31	14,51	11,69	10,33	8,64	7,52
50	73,16	54,60	44,37	28,39	16,82	13,99	12,46	10,57	9,23
100	81,57	60,81	49,33	31,44	18,56	15,70	14,08	12,01	10,52
150	86,53	64,36	52,22	33,22	19,64	16,72	15,04	12,85	11,27
200	90,02	66,89	54,27	34,48	20,46	17,49	16,77	13,44	11,85

Con la información se diagrama la curva IDF, representada en la gráfica 2.



Gráfica 2. Curva IDF Estación UPTC- Tunja.



8.2.4. Validación cruzada para curvas interpoladas por EVI-ML.

Utilizando los datos de la curva IDF por el método EVI-ML, se puede observar que se presenta un valor medio de diferencia de 21%. El mejor comportamiento con este método es para un periodo de retorno de 2 años y una duración de 120 minutos, con una diferencia de 0,5%. La diferencia máxima encontrada es de 62,2%, para un periodo de retorno de 200 años y duración de 220 minutos.

Tabla 20. Diferencia porcentual en las curvas IDF. Real Vs. Interpolada. IDW, EVI-ML
Estación UPTC-Tunja.

% DIFERENCIA									
Periodo de	Duración (minutos)								
	10	20	30	60	120	180	220	280	320



retorno (años)									
2	4,9	10,9	15,1	12,0	0,5	5,2	7,9	10,7	27,0
5	7,5	14,1	18,5	13,1	2,2	11,5	15,4	23,3	34,3
10	8,4	15,1	19,8	13,4	2,8	18,8	26,6	27,6	36,8
20	9,0	15,9	20,6	13,7	5,1	24,2	34,8	30,4	38,2
50	9,6	16,7	21,4	14,0	5,4	30,3	42,7	33,2	39,3
100	10,0	17,1	21,9	14,2	5,7	33,9	47,6	34,6	40,1
150	10,1	17,4	22,1	14,2	6,2	35,9	50,3	35,3	40,4
200	10,2	17,5	22,2	14,3	6,8	37,5	62,2	35,7	41,2

Fuente: (Acosta, Hernández, Campos, 2013)

8.2.5. Obtención de curvas con intensidad media tratada con Valor extremo tipo I y momentos ordinarios (EVI-OM).

Esto además se realizó a su vez para el método EVI-OM o de los momentos, para la misma estación de la UPTC, arrojando sus correspondientes valores de la siguiente manera:

Tabla 21. Datos IDW por intensidades Método EVI-OM Estación UPTC-Tunja.

METODO EVI-OM UPTC – TUNJA. IDW									
Periodo de retorno (años)	Duración (minutos)								
	10	20	30	60	120	180	220	280	320
2	30,28	23,35	19,20	12,84	7,83	5,38	4,25	3,22	2,57
5	43,96	33,10	27,31	17,74	11,10	8,33	7,27	6,19	5,43
10	53,00	39,64	32,66	20,98	13,26	10,26	9,22	8,16	7,21
20	61,70	45,93	37,81	24,09	15,34	12,14	11,10	10,06	8,98
50	72,95	54,04	44,46	28,12	18,03	14,56	13,52	12,50	11,30
100	81,43	59,98	49,44	31,13	20,70	16,47	15,38	14,34	13,06

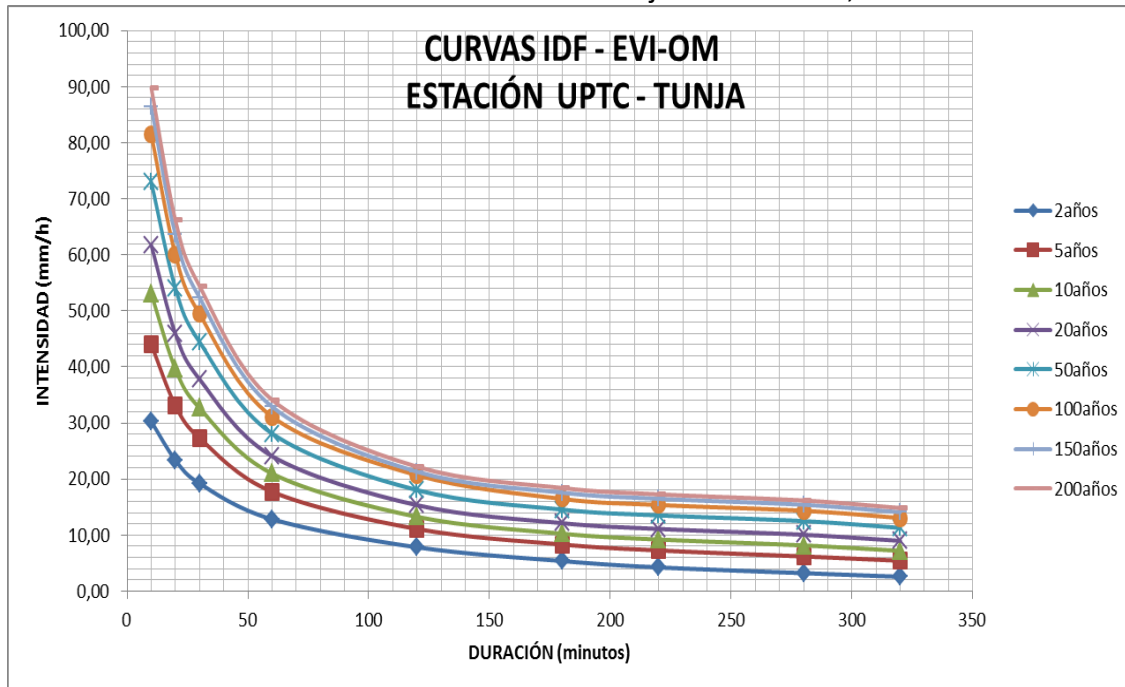


150	86,30	63,58	52,35	32,89	21,30	17,58	16,48	15,41	14,10
200	89,78	66,19	54,41	34,13	22,20	18,42	17,27	16,18	14,85

Fuente: (Acosta, Hernández, Campos, 2013)

De tabla anterior se diagrama la curva IDF, representada en la gráfica 3.

Gráfica 3. Curva IDF Estación UPTC- Tunja Método IDW, con EVI-ML



8.2.6. Validación cruzada para curvas interpoladas por EVI-OM.

Al utilizar los datos por el método EVI-OM, se obtiene un valor medio de diferencia de 32,7%, presentando el mejor comportamiento para un periodo de retorno de 2 años y una duración de 120 minutos, con una diferencia de 0,5%. El comportamiento más desfavorable para este caso se presenta con una diferencia de 113,7% para un periodo de retorno de 200 años y una duración de 320 minutos (Hernández, Campos, Acosta, 2013).



Tabla 22. Porcentajes de diferencia IDW por intensidades, con EVI-OM Estación UPTC-Tunja.

% DIFERENCIA									
Periodo de retorno (años)	Duración (minutos)								
	10	20	30	60	120	180	220	280	320
2	6,1	11,3	16,1	13,1	0,5	6,5	9,2	10,1	22,0
5	12,9	17,8	21,3	15,6	4,3	10,7	18,8	42,4	68,6
10	15,2	19,9	23,2	16,6	6,2	17,9	30,3	54,3	82,2
20	16,7	21,3	24,4	17,3	7,6	23,5	38,8	62,5	92,5
50	18,1	22,6	25,6	17,9	9,0	29,0	47,2	69,9	102,5
100	18,8	23,5	26,2	18,3	13,4	33,1	52,7	74,2	108,5
150	19,3	23,7	26,5	18,5	10,6	35,1	55,6	76,2	111,6
200	19,5	23,8	26,8	18,6	11,2	36,8	57,6	77,7	113,7

Fuente: (Hernández, Campos, Acosta, 2013)

8.3. Interpolación de parámetros u y α , para la estimación de curvas IDF, en zonas sin instrumentación.

Como se evidencio en acápite anteriores los parámetros U y α son los valores que se obtienen de la aplicación de metodologías de ajuste a la función de valor extremo tipo I (EVI). Para las siete estaciones pluviográfica contempladas en la investigación se obtuvo estos parámetros mediante los métodos de máxima verosimilitud (EVI-ML) y momentos ordinarios (EVI-OM). Se decidió para esta investigación no tomar los valores de los parámetros obtenidos por momentos ordinarios (OM), debido a que como se muestra en a investigaciones previas donde se evidencia las diferencias con respecto a máxima verosimilitud son mayores, realizando la validación cruzada (Hernández, Campos, Acosta, 2013).



Tabla 23. Parametros u y alfa estacion Aquitania-Poterito, con EVI-ML.

Parámetro alfa								
10 min	20 min	30 min	60 min	120 min	180 min	220 min	280 min	320 min
10,32	7,14	5,15	2,67	1,32	1,45	1,31	1,57	1,59
Parámetro U								
10 min	20 min	30 min	60 min	120 min	180 min	220 min	280 min	320 min
16,64	12,87	10,56	7,99	5,83	4,43	3,63	2,21	1,92

Tabla 24. Parametros u y alfa estacion Tunguavita-Paipa, con EVI-ML.

Parámetro alfa								
10 min	20 min	30 min	60 min	120 min	180 min	220 min	280 min	320 min
26,59	17,16	14,24	8,64	5,37	4,12	3,80	3,47	3,30
Parámetro U								
10 min	20 min	30 min	60 min	120 min	180 min	220 min	280 min	320 min
54,38	41,63	34,20	20,85	12,45	9,01	7,72	6,06	5,35

Tabla 25. Parametros u y alfa estacion Pesca-Pesca, con EVI-ML.

Parámetro alfa								
10 min	20 min	30 min	60 min	120 min	180 min	220 min	280 min	320 min
7,54	5,95	4,56	2,57	1,59	0,77	2,31	1,66	2,01
Parámetro U								
10 min	20 min	30 min	60 min	120 min	180 min	220 min	280 min	320 min



19,73	16,49	14,59	10,94	7,05	5,19	3,34	2,59	1,20
-------	-------	-------	-------	------	------	------	------	------

Tabla 26. Parametros u y alfa estacion Villa del Carmen-Samaca, con EVI-ML.

Parámetro alfa								
10 min	20 min	30 min	60 min	120 min	180 min	220 min	280 min	320 min
11,11	8,64	6,91	4,27	2,38	2,57	2,46	2,16	1,88
Parámetro U								
10 min	20 min	30 min	60 min	120 min	180 min	220 min	280 min	320 min
23,95	18,76	15,56	10,89	6,65	4,27	3,21	2,37	1,66

Tabla 27. Parametros u y alfa estacion Tota-Tota, con EVI-ML.

Parámetro alfa								
10 min	20 min	30 min	60 min	120 min	180 min	220 min	280 min	320 min
9,08	5,72	4,68	3,83	2,29	3,23	3,01	2,26	1,91
Parámetro U								
10 min	20 min	30 min	60 min	120 min	180 min	220 min	280 min	320 min
27,67	23,42	20,66	14,33	8,84	5,32	3,76	2,48	2,12

Tabla 28. Parametros u y alfa estacion Uptc-Tunja, con EVI-ML.

Parámetro alfa								
10 min	20 min	30 min	60 min	120 min	180 min	220 min	280 min	320 min
13,85	11,15	9,56	5,18	2,29	1,43	1,15	1,42	1,28
Parámetro U								



10 min	20 min	30 min	60 min	120 min	180 min	220 min	280 min	320 min
26,91	22,11	19,22	12,80	6,98	5,20	4,25	2,44	1,67

Tabla 29. Parametros u y alfa estacion Azulejos-Tuta, con EVI-ML.

Parámetro alfa								
10 min	20 min	30 min	60 min	120 min	180 min	220 min	280 min	320 min
11,20	8,08	6,18	3,62	2,00	1,89	1,87	1,63	1,52
Parámetro U								
10 min	20 min	30 min	60 min	120 min	180 min	220 min	280 min	320 min
22,80	16,57	13,24	8,66	5,22	3,28	2,19	1,49	1,79

8.3.1. Organización de los parametros para la interpolación.

Una condición obligatoria para interpolar valores es organizarlos de manera coherente, en este caso es necesario ordenar los parametros que son adimensionales con la duración a la que pertenecen, por ejemplo todos los parametros U de 10 minutos seran los interpolados y ese mismo procedimiento se realizará con todas las duraciones. Con base en lo anterior se definio una tabla tipo, donde pueden ordenarse los valores de los parametros en relación a la duración y a la estación, en la tabla 23 y 24 se pueden evidenciar los parametros alfa y U tratados mediante EVI-ML.



Tabla 30. Parametros Alfa y U de las siete estaciones obtenidos con EVI-ML.

Parámetro alfa										
Nombre	Municipio	10 min	20 min	30 min	60 min	120 min	180 min	220 min	280 min	320 min
Uptc	Tunja	13,85	11,15	9,56	5,18	2,29	1,43	1,15	1,42	1,28
Villa del Carmen	Samacá	11,11	8,64	6,91	4,27	2,38	2,57	2,46	2,16	1,88
Tunguavita	Paipa	26,59	17,16	14,24	8,64	5,37	4,12	3,80	3,47	3,30
Azulejos	Tuta	11,20	8,08	6,18	3,62	2,00	1,89	1,87	1,63	1,52
Potrerito	Aquitania	10,32	7,14	5,15	2,67	1,32	1,45	1,31	1,57	1,59
Pesca	Pesca	7,54	5,95	4,56	2,57	1,59	0,77	2,31	1,66	2,01
Tota	Tota	9,08	5,72	4,68	3,83	2,29	3,23	3,01	2,26	1,91

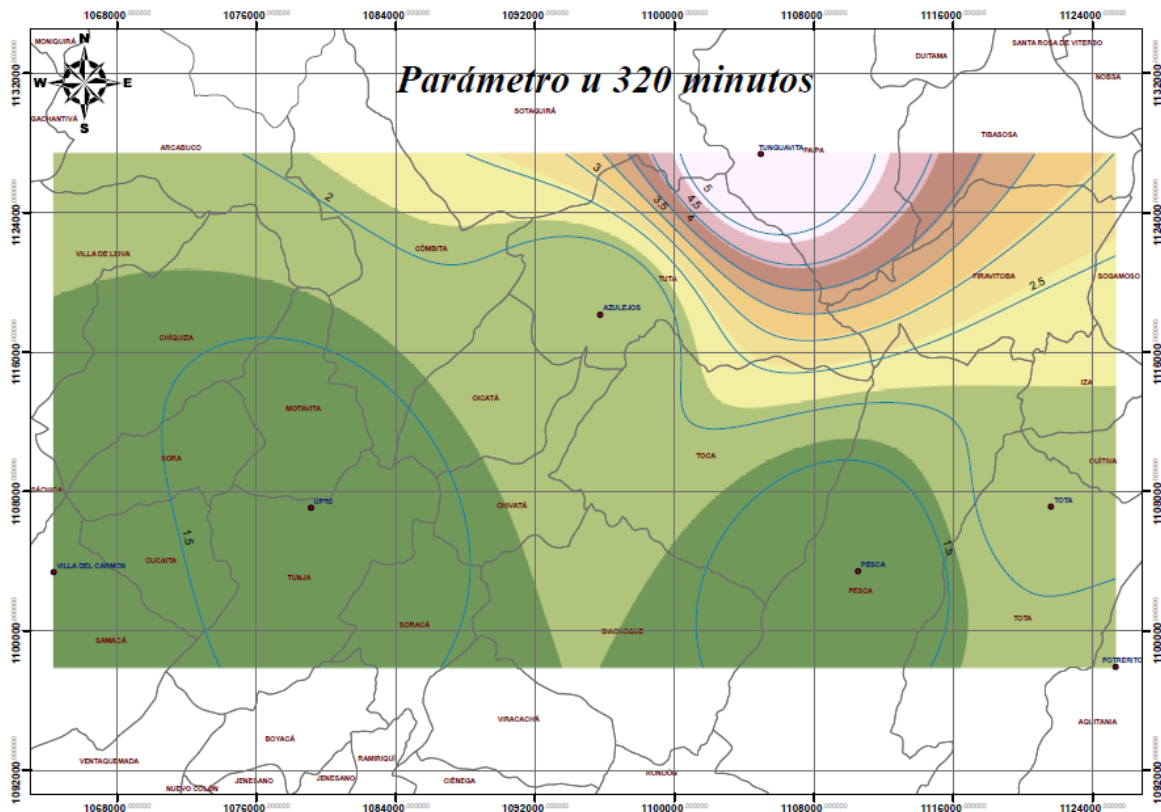
Parámetro U										
Nombre	Municipio	10 min	20 min	30 min	60 min	120 min	180 min	220 min	280 min	320 min
Uptc	Tunja	26,91	22,11	19,22	12,80	6,98	5,20	4,25	2,44	1,67
Villa del Carmen	Samacá	23,95	18,76	15,56	10,89	6,65	4,27	3,21	2,37	1,66
Tunguavita	Paipa	54,38	41,63	34,20	20,85	12,45	9,01	7,72	6,06	5,35
Azulejos	Tuta	22,80	16,57	13,24	8,66	5,22	3,28	2,19	1,49	1,79
Potrerito	Aquitania	16,64	12,87	10,56	7,99	5,83	4,43	3,63	2,21	1,92
Pesca	Pesca	19,73	16,49	14,59	10,94	7,05	5,19	3,34	2,59	1,20
Tota	Tota	27,67	23,42	20,66	14,33	8,84	5,32	3,76	2,48	2,12



8.3.2. Construcción de curvas IDF con los parámetros interpolados.

Como resultado de interpolar los valores u y α , la resultante será un valor equivalente a estos parámetros, pero que indicaría el valor estimado. Con base en lo expuesto, se puede utilizar la variable reducida que involucra periodo de retorno y las demás variables implícitas en la teoría de Valor extremo tipo I (EVI). Los mapas resultantes de la interpolación son de isocurvas que representan valores de los parámetros U y α , de la función de probabilidad de EVI, la gráfica 4, representa un ejemplo de los mapas de interpolación.

Gráfica 4. Mapa de parámetro U , para una duración de 320 minutos.



como se muestra en la ecuación (12) y (13), se debe ingresar los valores obtenidos de u y α y definir el periodo de retorno, para construir la curva IDF. Este método resulta más sencillo de aplicar puesto que implica únicamente la lectura de un valor según cada parámetro asociado a una duración y es independiente el periodo de retorno.



De acuerdo a lo expresado se muestra en la tabla 31, los cálculos de Y_T , asociados a diferentes periodos de retorno, para un punto geográfico sin instrumentación dentro de la zona de estudio.

Tabla 31. Valor de Y_T para cada periodo de retorno.

T	Y_t
2	0,37
5	1,50
10	2,25
20	2,97
50	3,90
100	4,60
150	5,01
200	5,30

Con los valores de Y_T , se ingresan en la ecuación (13), junto con los valores de u y α , con el fin de obtener una curva IDF. En la tabla 32, se observan los valores obtenidos de la aplicación de la metodología propuesta.

Tabla 32. Curva IDF, UPTC, Tunja. , Metodo IDW, $m=0,5$, con EVI-ML.

Relación entre Periodo de retorno (T) e Intensidad $XT = u + a \cdot Y_t$ IDW									
Periodo de retorno (años)	Duración (minutos)								
	10	20	30	60	120	180	220	280	320
2	30,27	23,35	19,22	12,84	7,86	5,37	4,25	3,21	2,57
5	43,94	33,06	27,31	17,74	11,24	8,35	7,27	6,19	5,43
10	52,99	39,50	32,67	20,98	13,48	10,33	9,28	8,17	7,32
20	61,67	45,66	37,81	24,09	15,62	12,22	11,20	10,06	9,13



50	72,91	53,65	44,46	28,12	18,40	14,67	13,69	12,51	11,48
100	81,33	59,63	49,45	31,13	20,48	16,51	15,55	14,35	13,24
150	86,24	63,12	52,35	32,89	21,69	17,58	16,64	15,42	14,27
200	89,72	65,60	54,41	34,14	22,55	18,34	17,41	16,18	15,00

Fuente: (Hernández, Campos, Acosta, 2013)

8.3.3. Validación cruzada de las curvas IDF obtenidas por interpolación de parámetros.

Al igual que con la metodología de interpolación de intensidades se utilizó la validación cruzada con el fin de obtener el porcentaje de diferencia entre la información interpolada y la información real. En la tabla 33, se observa el valor de diferencia.

Tabla 33. Porcentaje de diferencia Curva IDF UPTC, Metodo IDW, con EVI-ML

DIFERENCIA %									
Periodo de retorno (años)	Duración (minutos)								
	10	20	30	60	120	180	220	280	320
2	6,11	11,35	16,01	13,06	0,02	6,59	9,16	9,89	22,18
5	12,94	17,89	21,29	15,59	5,57	11,01	18,84	42,55	68,64
10	15,27	20,20	23,18	16,57	7,89	18,71	31,09	54,50	85,02
20	16,79	21,72	24,43	17,25	9,56	24,37	40,08	62,56	95,87
50	18,17	23,12	25,59	17,90	11,19	30,02	49,06	70,05	105,83
100	18,94	23,91	26,23	18,27	12,14	33,38	54,40	74,27	111,38
150	19,31	24,29	26,55	18,46	12,62	35,08	57,10	76,34	114,09
200	19,55	24,53	26,75	18,57	12,93	36,19	58,85	77,67	115,82

Fuente: (Hernández, Campos, Acosta, 2013)



Se evidenciaron las siguientes características en la interpolación por parámetros, se modificó el factor de ponderación del método IDW, en 0.5, 1, 2, y 3, con el fin de verificar si existen diferencias significativas:

A. Con factor de ponderación, $m = 0,5$:

Se encontró un valor medio de 23,61% de diferencia. El mejor comportamiento se presentó para un periodo de retorno de 2 años y una duración de 10 minutos, con un valor de diferencia de 0,21%.

El comportamiento más desfavorable se encontró en un periodo de retorno de 200 años para una duración de 220 minutos, con un valor de 62,80% de diferencia.

B. Con factor de ponderación, $m = 1$:

Se obtuvo un valor medio de diferencia de 22,56%, el mejor comportamiento se encontró para un periodo de retorno de 2 años y una duración de 10 minutos con un valor de diferencia de 1,48%, y el comportamiento más desfavorable para un periodo de retorno de 200 años para una duración de 220 minutos, con un valor de diferencia de 58,06%.

C. Con factor de ponderación, $m = 2$:

Al utilizar un $m=2$, se observó un valor medio de diferencia de 21,57%, obteniendo el mejor comportamiento en un periodo de retorno de 10 años y una duración de 120 minutos, con un valor de diferencia de 0,03%, y el peor comportamiento en un periodo de retorno de 200 años y una duración de 220 minutos con un valor de 55,73% de diferencia.

D. Con factor de ponderación, $m = 3$:

Finalmente, al utilizar un $m=3$ se obtuvo un valor medio de diferencia de 20,95%, encontrando el mejor comportamiento para un periodo de retorno de 50 años y una



duración de 120 minutos con un valor de diferencia de 0,11%, y el peor comportamiento para un periodo de retorno de 200 años y una duración de 220 minutos con valor de diferencia de 52,52% (Acosta, Hernández, Campos, 2013).

8.4. Análisis comparativo de los métodos de estimación de curvas IDF propuestos para zonas sin instrumentación, frente al método sintético del INVIAS.

8.5.

8.5.1. Generalidades del método simplificado.

El Instituto Nacional de Vías, recomienda la utilización del método simplificado de construcción de curvas IDF cuando no se posee suficiente información pluviográfica. Esto debido a que en el país este tipo de registros es relativamente escaso, pero la información pluviométrica (diaria acumulada) es de mayor disponibilidad y mejor distribución espacial.

Como resultado adicional de esta investigación se comparó el método de construcción de curvas IDF sintético, frente a los dos métodos de construcción de curvas IDF, por interpolación de intensidades y parámetros de ajuste.

El método de estimación sintético para Colombia fue propuesto por Vargas y Granados, 2008, en el trabajo "Curvas Sintéticas regionalizadas de intensidad-duración-frecuencia para Colombia" en este trabajo se buscó una alternativa en la construcción de curvas IDF, para Colombia, teniendo en cuenta el escaso nivel espacial y de registro pluviográfico que se tiene. Pero por el contrario se aprovecha la mayor cobertura de estaciones pluviométricas con la que sí cuenta el país, pero con el reto de no poder realizar un análisis de frecuencia tradicional, puesto que este tipo de estaciones registra los eventos de precipitación de manera diaria. La alternativa que proponen es la adaptación de métodos de construcción de curvas IDF, con información pluviométrica, teniendo en cuenta las condiciones de precipitación del país y basándose en curvas IDF "reales" es decir provenientes de un tratamiento con análisis de frecuencia tradicional. El resultado es la división geográfica o espacial del país en cinco regiones (Vargas M & Díaz-Granados, 1998).



La adaptación de las ecuaciones se realizaron a partir de las expresiones propuestas para el tratamiento y construcción de curvas IDF, con información diaria, primando las ecuaciones realizadas por (Bell , 1969) y (Kothyari & Garde, 1992). En resumen se modificaron las expresiones para al final tener para Colombia tres ecuaciones (14), (15) y (16), según la cantidad de parametros disponibles en cada region o según la información disponible de registros (Vargas M & Diaz-Granados, 1998).

$$i = a \frac{T^b}{t^c} M^d \quad (14)$$

$$i = a \frac{T^b}{t^c} M^d N^e \quad (15)$$

$$i = a \frac{T^b}{t^c} M^d N^e PT^F \quad (16)$$

Los parametros a, b, c, d, e y f, dependeran de la zona o region donde se pretenda contruir la curva IDF y los valores M, N, PT, son calculados con base en la información pluviometrica disponible.

Sin duda este metodo otorga una alternativa que en la actualidad es bastante utilizada en el pais para obtención de las curvas IDF y los subsecuentes derivados de estas, como caudales, que a su vez son utilizados en el dimensionamiento de estructuras hidraulicas. Su utilización generalizada se puede deber en gran medida a que es el metodo recomendado por el Manual de drenajes para carreteras, (Instituto Nacional de Vías , 2009), para la estimación de las curvas. Pero en este no se mencionan algunas recomendaciones que



deberían tenerse en cuenta con base en el trabajo original de (Vargas M & Diaz-Granados, 1998).

Entre las cuales se puede mencionar:

- *“El nivel de confiabilidad de las curvas sintéticas está directamente relacionado con la cantidad de información disponible para calibrar las ecuaciones correspondientes a cada región climatológica. El error esperado al estimar una intensidad de lluvia en la Región Orinoquia (R4) es mayor que en las Regiones 1, 2 y 3. Esto no es sorprendente si se tiene en cuenta que para esta zona del país solo se recopiló 4 curvas IDF “reales” (Vargas M & Diaz-Granados, 1998).*
- *“Es necesario disponer de un mayor número de curvas “reales” para aquellas zonas del país como la Orinoquia y la Amazonia. En esta última no se consiguió ninguna curva por lo cual no se pudo obtener ninguna ecuación regionalizada” (Vargas M & Diaz-Granados, 1998).*

Teniendo en cuenta lo anterior y específicamente la incertidumbre que puede generar la utilización del método simplificado, se optó en esta investigación extender la comparación de la estimación de curvas IDF interpoladas por intensidades y por parámetros y compararla con el método simplificado. Cabe resaltar que solo se comparan a nivel general con base en las IDF reales, mediante validación cruzada. El resultado de la comparación busca incentivar la investigación en este campo y ampliar a un más el rango de estudio para la obtención de curvas IDF en el país.

8.5.2. Validación cruzada entre las curvas IDF sintéticas, IDF interpoladas por intensidades y por parámetros, frente a las reales.

Se utilizó la curva IDF, real con mayor número de registro de las siete estaciones seleccionadas en la zona de estudio, la cual fue la estación UPTC de la ciudad de Tunja. En esta estación pueden aplicarse los métodos con mayor confiabilidad.



8.5.3. Construcción Curva IDF por método simplificado estación UPTC-Tunja.

Para la construcción de las curvas IDF, por método simplificado, se debe contar con información pluviométrica de precipitación máxima en 24 horas a nivel anual. De los datos de la estación UPTC se obtuvo el análisis de precipitación máxima en 24 horas a nivel anual, que se evidencia en la tabla 34.

Tabla 34. Precipitación máxima anual histórica en 24 horas, estación UPTC.

Estación climatológica ordinaria mesetas precipitación máxima anual histórica en 24 horas	
Año	Precipitación (mm)
1962	126
1963	124,2
1964	110,4
1965	123
1966	80,4
1967	117,1
1968	177,1
1969	107,7
1970	112,4
1971	166,9
1972	136,6
1973	141,3
1974	125,9
1975	129,1
1976	132,4
1977	106,8



1978	131,2
1979	161
1980	100,9
1981	187,5
1982	120,2
1983	85,6
1984	100,4
1985	113,4
1986	168,7
1987	100,9
1988	96,2
1989	142,7
1990	136,2
1991	89,8
1992	107
1993	121,6
1994	183
1995	104,2
1996	86,8
1997	76,8
1998	160
1999	107,7
2000	80,2
2001	87,9
2002	131
2003	136,8
2004	140,8



2005	120
2006	148,5
2007	142,8
2008	154,5
2009	100,7
2010	174
2011	269,5
Numero de datos	50
Media	127,72
Desviación típica	34,89
Coefficiente de asimetría	1,46

La estación UPTC, del municipio de Tunja, está situada en la región Andina (R1), para la cual se toman los siguientes valores de coeficientes de la tabla 35.

Tabla 35. Valores para el método simplificado. Tunja.

A	0,94
B	0,18
C	0,66
D	0,83

Con esta información, se procede a la construcción de las curvas IDF para esta estación, utilizando la ecuación 14. Con la información resultante se procede a construir la curva IDF, cuyos datos están representados en la tabla 36.



Tabla 36. Curva IDF, mediante el método simplificado, estación UPTC Tunja.

CURVAS INTENSIDAD-DURACION-FRECUENCIA, ESTACION UPTC, TUNJA (valores en mm/h)									
Periodo de retorno (años)	Duración (minutos)								
	10	20	30	60	120	180	220	280	320
2	194,57	123,14	94,23	59,63	37,74	28,88	25,30	21,58	19,76
5	229,46	145,22	111,12	70,33	44,51	34,06	29,83	25,44	23,30
10	259,95	164,52	125,89	79,67	50,42	38,58	33,80	28,82	26,39
20	294,49	186,38	142,62	90,26	57,12	43,71	38,29	32,66	29,90
50	347,30	219,80	168,19	106,45	67,37	51,55	45,16	38,51	35,26
100	393,45	249,01	190,54	120,59	76,32	58,40	51,16	43,63	39,95
150	423,24	267,86	204,97	129,72	82,10	62,82	55,03	46,93	42,97
200	445,73	282,10	215,86	136,61	86,46	66,16	57,95	49,43	45,26

8.5.4. Validación del método simplificado en relación a una curva IDF, “real” tratada con EVI-ML.

En primera instancia se tomó como información base una curva IDF, “real” es decir que es susceptible de construirse analizando la información pluviográfica, mediante una función de probabilidad. Como se mencionó anteriormente se utilizó la estación UPTC, de la ciudad de Tunja, con el fin de validar los métodos, es decir como IDF “real”.

La función de probabilidad utilizada fue la de Valor Extremo Tipo I (EVI), también conocida como Gumbell, y se ajustó mediante máxima verosimilitud. Se utilizó este método ya que concuerda con la investigación realizada y plasmada en este texto. En la tabla 37 se observa la curva IDF “real” de la estación UPTC.



Tabla 37. IDF real, estación UPTC, Tunja.

Periodo de retorno	Duración (minutos)								
	10	20	30	60	120	180	220	280	320
2 años	31,99	26,19	22,72	14,7	7,82	5,72	4,67	2,95	2,13
5 años	47,68	38,82	33,55	20,57	10,43	7,33	5,97	4,55	3,57
10 años	58,08	47,18	40,71	24,46	12,16	8,39	6,83	5,61	4,53
20 años	68,05	55,2	47,59	28,18	13,81	9,41	7,66	6,62	5,44
50 años	80,95	65,58	56,48	33,01	15,95	10,74	8,73	7,94	6,62
100 años	90,62	73,35	63,15	36,63	17,56	11,73	9,54	8,92	7,51
150 años	96,26	77,89	67,04	38,74	18,5	12,31	10	9,5	8,03
200 años	100,26	81,1	69,8	40,23	19,16	12,72	10,34	9,9	8,39

Con base a la curva IDF “real” de la estación UPTC, se procedió a comparar los resultados con las metodologías aplicadas en esta investigación y el método sintético propuesto por (Vargas M & Diaz-Granados, 1998). Se compraron de la siguiente manera:

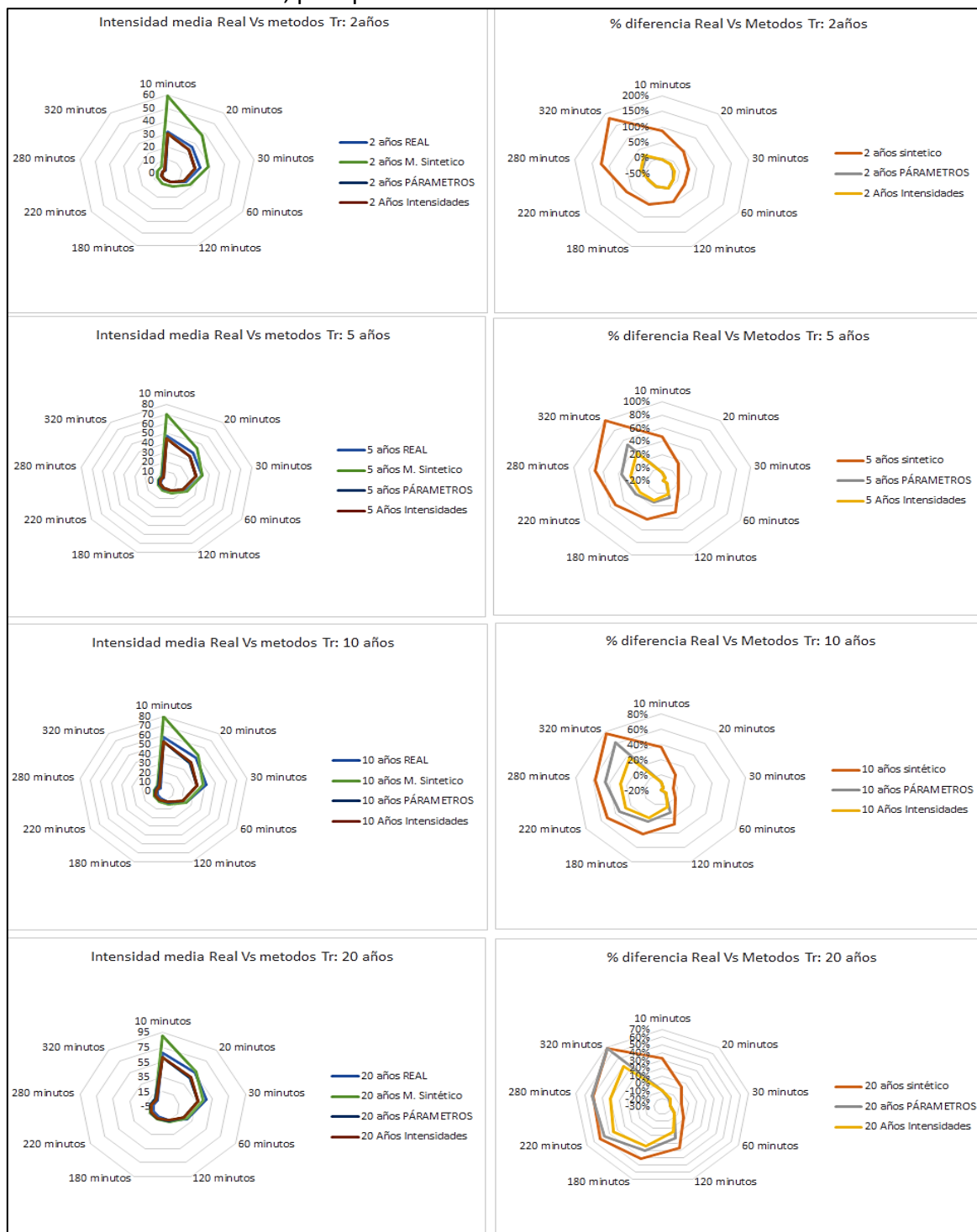
- Real vs. Sintético
- Real vs. Interpolación por parámetros
- Real vs. Interpolación por intensidades

Se analizaron de los valores de intensidad media para cada duración y periodo de retorno, en cada método, verificando la diferencia que existe entre los métodos mencionados y los valores “reales” de la curva IDF.

Las gráficas 5 y 6, Representan la diferencia en intensidades y en porcentajes con respecto a los valores reales. Se evidencio comportamientos distintos en todas las metodologías, claramente este acápite de la investigación no pretende demostrar la equivocación en algún método, pero si la necesidad de seguir investigando y ajustando a la realidad los comportamientos que representa una curva IDF.



Gráfica 5. Comportamiento de la curva IDF real vs. Las estimadas por métodos alternativos, para periodos de retorno de 2 años hasta 20 años.





Grafica 5. Comportamiento de la curva IDF real vs. Las estimadas por métodos alternativos, para periodos de retorno de 50 años hasta 200 años.





Dentro del análisis realizado, en la comparación de las curvas IDF “real” y las obtenidas por el método sintético y por los métodos planteados en esta investigación, es decir, el método de obtención de curvas IDF por interpolación de parámetros y por interpolación de intensidades se puede inferir lo siguiente:

- Existen en los tres métodos variaciones con valor negativo y valor positivo. Esto indica una variación asimétrica en todos los métodos, sin tendencias. Esto también indica la independencia de cada valor típico de las curvas IDF, pues cada intensidad media de precipitación está asociada a un exclusivo periodo de retorno y a una exclusiva duración.
- El caso que presenta una mayor diferencia con tendencia positiva o aumentar con respecto a los valores reales es el método sintético donde se presenta una diferencia del 183%, para la duración de 320 minutos y periodo de retorno de 2 años.
- Se observó que las mayores diferencias en positivo en todos los métodos se presentan a medida que las duraciones aumentan, específicamente después de los 60 minutos de duración.



9. CONCLUSIONES.

Los métodos de determinación de curvas IDF para zonas no instrumentadas por de intensidad media y por parámetros, presentan valores por debajo de los reales en las duraciones cortas y cercanos a estos en duraciones superiores a los 120 minutos.

En la estimación de curvas IDF por medio del método de interpolación de intensidades, demanda una lectura significativamente mayor de datos para la obtención de una sola curva IDF. Por otro lado, la determinación de una curva IDF por los parámetros de la función de probabilidad es sencilla y solo debe calcularse bajo una expresión matemática derivada de la función de probabilidad.

El método de interpolación de intensidad media de precipitación para la estimación de curvas IDF propuesto en esta investigación, en comparación al método de estimación de curvas IDF propuesto por Vargas M & Díaz-Granados (1998), tiene compartimientos diferentes, ya que los propuestos en esta investigación subvaloran la intensidad media en duraciones cortas y a partir de los 120 minutos se aproxima mejor que el método de Vargas M & Díaz-Granados (1998) que sobre dimensiona hasta en 183%. Cabe resaltar que los métodos son solo del todo comparables entre si, desde el punto de vista de resultados únicamente, debido a que los métodos de interpolación se basan en registros pluviográficos a diferencia del estudio Vargas M & Díaz-Granados (1998), que se basa en registros pluviométricos.

La subdimensión de los valores del método de estimación de curvas IDF para zonas no instrumentadas por intensidad frente al real es de -22% en duraciones de 30 minutos, superior a los 60 minutos se presenta sobredimensionamiento aumentando



paulatinamente y directamente proporcional al aumento de las duraciones teniendo un máximo en 320 minutos del 50%.

En caso de la estimación de las curvas por parámetros se presentó una tendencia a la subdimensión igual que en el de intensidades hasta duraciones inferiores a 60 minutos y cercanas a las reales en duraciones superiores, el mayor valor de subdimensión es de -22% y el mayor de sobredimensión es de 79%.

El método que mayor se acerca a los datos reales es el método de interpolación por intensidad media de precipitación, pero las diferencias no son significativas y los valores son relativamente cercanos unos mayoritariamente en duraciones cortas.

Se obtuvieron los mapas de zonificación e isovalores de intensidad media de precipitación, relacionada a una duración y un periodo de retorno, 72 mapas en total, presentando claramente errores de ojo de buey, por lo que es importante recalcar la falta de datos o estaciones de soporte que eviten este error.

De igual manera se obtuvo la zonificación e isovalores de parámetros de la distribución de probabilidad u y α , en este caso se obtuvo 8 mapas por cada parámetro, esta conclusión se suma a las anteriores con el fin de recomendar el método de interpolación de parámetros frente a la interpolación de intensidades.

A partir de las metodologías propuestas en esta investigación se logró determinar las curvas IDF, para todos los centros poblados de la zona centro del departamento de Boyacá, 22 en total. Cabe resaltar que esto no hubiese sido posible con los métodos actualmente utilizados para determinar estas curvas.



Se recomienda para la utilización de los métodos planteados un factor de seguridad que este de lado de la sobredimensión y debe estar calculado con base en la información del lugar donde se pretenda utilizar y la complejidad del proyecto ingenieril.

Para investigaciones futuras puede utilizarse la información plasmada en el presente informe con el fin de perfeccionar los métodos, buscando alternativas en funciones de probabilidad y ampliar el espectro de parámetros, evaluar métodos de extensión de valores como cox-box y evaluar mayores estaciones que faciliten la validación cruzada.



10. BIBLIOGRAFÍA

Acevedo, L. (2009). Estimación hidrológica bajo escenarios de cambio climático en Colombia. Bogotá: Universidad Nacional De Colombia.

Acosta Castellanos, P. M., & Sierra Aponte, L. X. (2013). IDF construction methods' evaluation, from probability distributions and adjustment's parameters. Revista Facultad de Ingeniería., 22(35), 25-33.

Acosta Castellanos, P. M. (2008). Determinación de curvas IDF a partir de información histórica para zonas sin instrumentación. INTEKHNIA Vol. 3, No. 7, 61-72.

Acosta, P. M., & Caro, C. A. (2014). Regionalización de parámetros hidrológicos aplicación para intensidad media de precipitación. V congreso internacional de ingeniería civil (págs. 1-9). Tunja: Universidad Santo Tomás.

Almazán, J., Palomino, C., & Márquez, H. (2009). Sistemas de información geográfica en la gestión integral del litoral . Madrid: Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos universidad politécnica de Madrid.

Awadallah, A., ElGamal, M., & ElBadry, H. (2011). Developing intensity-duration-frequency curves in scarce data region: an approach using regional analysis and satellite data. Engineering, 215-226.



Aponte, L.X. & Acosta Castellanos P.M. (2012). Evaluación de 4 metodologías para la construcción de curvas intensidad, duración y frecuencia (idf). Tunja: Universidad Santo Tomás.

Barrientos, M. (s.f.). http://www.gabrielortiz.com/descargas/3D_Analyst_9_2.pdf. Recuperado el 2 de Diciembre de 2012.

Becerra, R., & Gutiérrez, A. (2006). Modelación hidrológica empleando isoyetas de relieve, una aproximación geoestadística. Fifth Friend World Conference. Climate Variability and Change—Hydrological Impacts (págs. 62-67). La Havana: IAHS.

Bell, F. C. (1969). Generalized Rainfall-Duration-Frequency Relationships. Journal of Hydraulics Division.

Bertrand-Krajewski, J.-L., Laplace, D., Joannis, C., and Chebbo, G. (2000). Mesures en hydrologie urbaine et assainissement. Edition TEC & DOC/Lavoisier, Paris, France (ISBN 2743003804).

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

Cabrera, J. A. (1987). Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales . Madrid : Alanmer S.A.



Campos Aranda, D. F. (1998). Procesos del ciclo hidrológico. San Luis Potosí: Universidad Autónoma del San Luis de Potosí.

Castelo, A. J. (2008). Confiabilidad y validez de un inventario de enfoques de estudio. *Tiempo de educar*, 282-304.

Corzo Oviedo, F., & Pinilla Mora, J. (2015). Comparación de curvas Intensidad, duración y frecuencia (IDF) reales y sintéticas. Bogotá: Universidad Católica de Colombia .

Cuadrat, S. M., Vicente, S. M., & Saz, M. A. (2002). La información climática como herramienta de gestión ambiental. VII Reunión Nacional de Climatología (págs. 83-92). Albarracín: Grupo de Clima de la Asociación de Geógrafos Españoles.

De Salas, L. (2004). Regionalización de leyes IDF para el uso de modelos hidrometeorológicos de estimación de caudales. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Descroix, L., Nouvelot, J., & Estrada, A. (1997). Geografía de las lluvias en una cuenca del norte de México : regionalización de las precipitaciones en la región hidrológica 36. México: INIFAP-ORSTOM.

Elsebaie, I. (2012). Developing rainfall intensity–duration–frequency relationship for two regions in Saudi Arabia. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 131-140.

Estadística hidrológica análisis de tormentas extremas. (s.f.). Maestría en Ingeniería Sanitaria FIUBA (p. 27).



Fallas, J. (2007). Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones.

Fornaguera, A. D. (2008). "Automatización del Pluviógrafo P-2". Instituto Superior Politécnico 'José Antonio Echeverría'.

García González, J., & Cebrián Abellán, F. (2006). la interpolación como método de representación cartográfica para la distribución de la población: aplicación a la provincia de Albacete. El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas, 165-178.

García, V. E. (Julio de 2010). Introducción a los sistemas de información geográfica para la administración de la información catastral. Guatemala, Chiquimula.

Hernández, J.D, Campos, L.F, Acosta, PM. (2013). Construcción de curvas IDF, mediante interpolación de intensidades y parámetros de ajuste, aplicación al departamento de Boyacá, Colombia. Tunja: Universidad Santo Tomás.

Hosking, J. R., & Wallis, J. R. (1997). Regional Frequency Analysis. Cambridge: Cambridge University Press.

Instituto Nacional de Vías. (2009). Manual de drenaje para carreteras. Bogotá: Ministerio de Transporte.

Kothyari, U. C., & Garde, R. J. (febrero de 1992). Rainfall Intensity-Duration-Frequency Formula for India. Journal of Hydraulic Engineering, 118 (2).



Koutsoyiannis, D., Manetas, A. (1998). A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships, *Journal of Hydrology*, 206, 118–135.

L'Ecuyer, P., & Simard, R. (2011). Computing the Two-Sided Kolmogorov-Smirnov Distribution. *Journal of Statistical Software*, 39 (11).

Maldonado Navia, R. A., & Vía Guzmán, G. J. (2015). Determinación de relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) de 11 estaciones meteorológicas del altiplano mediante el análisis de eventos extremos de precipitación. *Redacción Científica*, 11.

Mesa Sánchez, Óscar José (2002). Regionalización de características medias de la cuenca con aplicacion en la estimación de caudales máximos. *Memorias XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica IAHR, La Habana (Cuba)*, 2-13.

Mijares, F. J. (1989). *Fundamentos de hidrología en superficie*. México: Limusa S.A.

Morán, W. C. (1980). *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil*. Lima-Perú: CONCYTEC.

Ninyerola, M., Pons, X., & Roure, J. (2000). A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques. *International Journal of Climatology*, 1823-1841.

OIRSA. (2005). *Sistemas de información geográfica*. El Salvador: OIRSA. Recuperado el 14 de Febrero de 2016



Pesquer Mayos, L., Maso, P. J., & Pons, F. X. (2006). Integración en un sig de métodos estadísticos, interpolación e imágenes de teledetección para la obtención mensual de datos meteorológicos validados. (págs. 1161-1171). Granada: Universidad de Granada.

Pierini, J., Sassi, M., & Perillo, G. (2008). Aplicación de un metodo de interpolacion en regiones costeras. *Geoacta*, 81-90.

Quevedo, K., & Sánchez, K. (2009). Comparación de dos métodos de interpolación para la estimación de la temperatura del aire aplicando técnicas geo-estadísticas. *Revista Peruana Geo-Atmosférica*, 90-107.

Ruberto, A. R., Kutnich, E. J., Depettris, C. A., & Gabazza, S. E. (2006). Actualización y análisis de las curvas IDF en el Area Metropolitana del Gran Resistencia [AMGR]. *Comunicaciones científicas y tecnológicas*.

Sáenz, G. M. (1995). *Hidrología en la Ingeniería*. Santafé de Bogotá (Colombia) : Escuela Colombiana de Ingeniería.

Sivapalan, M., & Blösch, G. (1998). Transformation of point rainfall to areal rainfall: Intensity-duration-frequency curves . *Journal of Hydrology*, 150-167.

Tapia, R. P. (2001). Análisis Comparativo de las Curvas Intensidad – Duración –Frecuencia (IDF) en 6 Estaciones Pluviográficas (VII Región del Maule, Chile). Chile: Universidad de Talca.



Temez, J.R. (1978). Calculo hidrometeorologico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección general de carreteras, España (ISBN: 84-7433-040-8).

Téllez, E. A. (2008). Ayuga Téllez E (2008). Aplicaciones de Inferencia Estadística a la Ingeniería del Medio Natural Fundación Conde del Valle de Medio Natural. Fundación Conde del Valle de Salazar, ETSIM (UPM), Madrid.

Torres Abello, A. E. (2004). Apuntes de clase sobre hidrologia urbana. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.

Tucci, C. E., & Bertoni, J. C. (2006). Gestión de. Porto Alegre, Brasil: WMO OMM.

Vargas M, R., & Diaz-Granados, M. (1998). Curvas Sintéticas de Intensidad-Duración-Frecuencia Regionalización e Implementación de un SIG. Bogotá: Universidad de los Andes.

Ven Te Chow, D. R. (1994). Hidrología aplicada. Santafé de Bogotá: Mc Graw-Hill.

Vélez, J., Poveda, G., Mesa, O., & Hoyos, C. (2002). Aplicación de diferentes metodologías para estimación de curvas Intensidad–Frecuencia–Duración en Colombia. Meteorología Colombiana, 91-100.

Wotling, G., Bouvier, C., Danloux, J., & Fritsch, J. (2000). Regionalization of extreme precipitation distribution using the principal components of the topographical environment. Journal of Hydrology, 86-101.



Yun, P., & Chen , C. (1998). Incorporating uncertainty analysis into a regional IDF formula. Hydrological Process, 713-726.

Zamanillo, E. A. (2008). Procedimientos para la estimación de tormentas de diseño para la provincia de Entre Ríos. Buenos Aires (Argentina) : Universidad Tecnológica Nacional.