

**APROXIMACIÓN METODOLÓGICA PARA DETERMINAR CURVAS DE
INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA, UTILIZANDO LA DISTRIBUCIÓN
MIXTA DE PROBABILIDAD DOBLE GUMBEL.**

YEISON JOSE VILLARREAL MARIMÓN

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN INGENIERÍA AMBIENTAL E
INGENERÍA CIVIL**

COLOMBIA

CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.

2015

**APROXIMACIÓN METODOLÓGICA PARA DETERMINAR CURVAS DE
INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA, UTILIZANDO DISTRIBUCIÓN MIXTA DE
PROBABILIDAD DOBLE GUMBEL**

YEISON JOSE VILLARREAL MARIMÓN

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER
EN INGENERÍA CON ÉNFASIS EN INGENERIA AMBIENTAL E INGENERÍA CIVIL**

DIRECTOR

OSCAR CORONADO HERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

**MAESTRÍA EN INGENERIA CON ENFASIS EN INGENERIA AMBIENTAL E
INGENERIA CIVIL**

COLOMBIA

CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.

2015

Nota de Aceptación

Director Ingeniero Oscar Coronado Hernández

Jurado

Jurado

TABLA DE CONTENIDO

1.	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	17
1.1.	Introducción	17
1.2.	Objetivos	18
1.2.1.	General.....	18
1.2.2.	Específicos	18
2.	Descripción del Problema	19
2.1.	Descripción	19
2.2.	Marco Teórico	20
2.2.1.	Distribuciones de Probabilidad Simples o Sencillas	20
2.2.2.	Distribuciones Mixtas	21
2.2.3.	Distribución Doble Gumbel:	22
2.2.4.	Prueba Chi-cuadrado.....	23
2.2.5.	Fenómenos Climáticos Naturales	25
2.3.	Antecedente y Estado del Arte.....	26
a.	Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)	27
b.	Ecuaciones para determinar IDF	27
3.	Metodología.....	31
3.1.	Introducción	31
3.2.1	TIPO DE ESTUDIO.....	31
3.3	Fuentes y técnicas para la recolección de la información.....	39
3.3.1	Fuente primaria:.....	39
3.3.2	Fuentes secundarias:.....	39
3.3.3	Tratamiento de la información	40

4. ESTRUCTURA DEL ANÁLISIS DE DATOS	44
4.1 Introducción	44
4.2. Fenómenos climáticos en los casos de Estudios	44
4.4 Diseño de ecuación para obtención de curvas IDF una población.	55
5. PRUEBA DE RESULTADOS.....	64
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	76
ANEXO	84

TABLA DE FIGURAS

Tabla 2-1.....	20
Tabla 2-2.....	29
Tabla 3-1.....	32
Tabla 3-2.....	32
Tabla 3-4.....	34
Tabla 3-5.....	35
Tabla 3-6.....	37
Tabla 3-7.....	41
Tabla 4-1.....	46
Tabla 4-2.....	47
Tabla 4-3.....	47
Tabla 4-4.....	48
Tabla 4-5.....	51
Tabla 4-6.....	53
Tabla 4-7.....	54
Tabla 4-8.....	57
Tabla 4-9.....	58
Tabla 4-10.....	58
Tabla 4-11.....	58
Tabla 4-12.....	59
Tabla 5-1.....	65
Tabla 5-2.....	66
Tabla 5-3.....	66
Tabla 5-4.....	67
Tabla 5-5.....	67
Tabla 5-6.....	67
Tabla 5-7.....	69
Tabla 5-8.....	69
Tabla 5-9.....	69

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Dos tendencias en un conjunto de datos. Estación Rafael Núñez (Cartagena).....	15
Figura 2. Ubicación de las estaciones Sinópticas en Colombia. Google Earth.....	33
Figura 3.Paso 1 del Programa Hyfran.....	50
Figura 4. Imagen Hyfran (Paso 2).....	51
Figura 5Relación de la Contante C respecto su correlación. a) Estación Rafael Núñez b) estación San Luis c) Estación Benito Suarez	57
Figura 6 Curva IDF, Estación Rafael Núñez.....	61
Figura 7. Curva IDF, Estación San Luis.....	62
Figura 8 Curva IDF, Estación Benito Suarez	63
Figura 9 Distribución Doble Gumbel con 2 datos Ciclónicos con duración de 10 Minutos ...	71
Figura 10 Distribución Doble Gumbel con 3 datos Ciclónicos con duración de 10 Minutos ...	71
Figura 11 Distribución Doble Gumbel con 9 datos Ciclónicos con duración de 20 Minutos ...	72
Figura 12 Distribución Doble Gumbel con 3 datos Ciclónicos con duración de 10 Minutos ...	72
Figura 13 Distribución Doble Gumbel con 2 datos Ciclónicos con duración de 20 Minutos ...	73
Figura 14 Distribución Doble Gumbel con 3 datos Ciclónicos con duración de 20 Minutos ...	73
Figura 15. Distribución Doble Gumbel con 2 datos Ciclónicos con duración de 10 Minutos, con 30 años de periodo de registros	75
Figura 16. Distribución Doble Gumbel con 2 datos Ciclónicos con duración de 10 Minutos, con 15 años de período registro.	75
Figura 17 Distribución Doble Gumbel con 3 datos Ciclónicos con duración de 10 Minutos, con 30 años de registros.....	76
Figura 18 Distribución Doble Gumbel con 3 datos Ciclónicos con duración de 10 Minutos, con 15 años de registros.....	76

AGRADECIMIENTOS

Luego de haber realizado el presente trabajo de grado quiero expresar mi profundo sentimiento de gratitud a todas las personas que me apoyaron durante este proyecto.

Primero que todo agradecer a Dios, creador de mi vida y mis pensamientos, gracias por darme la fortaleza y conocimiento para ejecutar con resultados óptimos el presente trabajo.

Gracias a mi papá, mamá y hermanos por su apoyo moral y material, por ser las personas que han hecho de mi lo que soy hoy.

En especial a la empresa en la cual laboro en la ciudad de Medellín, por los permisos oportunos para poder viajar a Cartagena y poder avanzar en el proyecto y reunirme con el Director.

Agradezco a el Director, el Ingeniero Coronado, con el cual quedo en deuda, por disponer del tiempo necesario para atenderme, de acuerdo a mis posibilidades de viaje a la ciudad de Cartagena y por el contacto permanente de comunicación sincrónica y asíncrona.

Mi gratitud para mis compañeros de clase y en especial para mi grupo de trabajo por el acompañamiento en este proceso de aprendizaje significativo.

Gracias a la Universidad Tecnológica de Bolívar por darme la oportunidad de aumentar mis conocimientos en el programa de la maestría, haciendo que sienta aún más sentido de pertenencia por la misma, ya que no solo he realizado esta maestría,

sino también mi carrera profesional. Además por permitir que sea un ciudadano competente para el mercado laboral y globalizado.

Mis más sinceros agradecimientos para estas personas y todas las que me colaboraron de alguna manera para llevar a cabo este proyecto.

RESUMEN

En la elaboración o construcción de las curvas de Intensidad – Duración –Frecuencia (IDF), a lo largo de los años se han tenido grandes avances y evoluciones en sus metodologías de construcción. En la presente investigación se presentó un avance para dicho tema, el cual consiste en incluir en el análisis de los datos, los valores escogidos analizar es decir, cuando se tiene una serie de datos en muchos casos aparecen uno, dos o tres datos alejados del grupo, quedando así el conjunto de datos dividido, debido a la presencia de estos datos comúnmente llamados atípicos. Con esta aproximación metodológica, se analizaron los datos de las estaciones pluviográficas seleccionadas (Neiva, Ipiales, Cartagena) es decir, los considerados atípicos y los agrupados, proponiendo como herramienta principal la distribución mixta de probabilidad Doble Gumbel, la cual ofrece dos tendencias que permiten analizar dos poblaciones de datos contenidos en un solo conjunto. (Ver Figura 1)

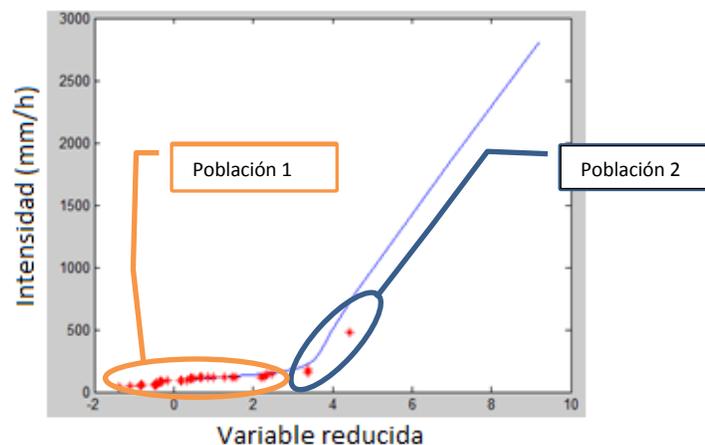


Figura 1. Dos tendencias en un conjunto de datos. Estación Rafael Núñez (Cartagena)

Al realizar el análisis de datos con dicha distribución mixta, se concluye según los resultados que es una gran posibilidad de obtener mejores datos de intensidad cuando se desee utilizar curvas IDF construidas con esta aproximación metodológica, teniendo en cuenta que se debe comprobar si la distribución mixta aplicada (para este caso Doble Gumbel) se ajusta al comportamiento de los datos para cada una de las duraciones planteadas.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1. Introducción

Una de las herramientas útiles en la hidrología, son las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), justificando lo anterior debido a que por medio de ellas se pueden estimar tormentas de diseño en un lugar o zona determinado, además que con ellas se puede establecer intensidades máximas en distintos periodos de retorno en un mismo sitio o lugar que se esté analizando.

Debido a su importancia, con el paso del tiempo las curvas IDF se han ido desarrollando, con tal envergadura que en la actualidad existen distintas metodologías para la elaboración y construcción de estas, considerando que el comportamiento de las precipitaciones ha ido cambiando consecuencia de las variaciones climáticas presentada en los últimos años, causando algunos problemas en el conjunto de datos como la existencia de los llamados datos atípicos que al momento de analizarlos son eliminados por las complicaciones que estos traen para poder ser operados o ser incluidos en un proceso de cálculo.

Como solución a lo anterior, en esta investigación se describe una aproximación metodológica que determine curvas IDF, utilizando la distribución mixta de probabilidad doble Gumbel, la cual es capaz de analizar conjuntos de datos que puedan presentar dos tendencias (datos típicos y datos atípicos), que son consecuencia de la influencia de los fenómenos climáticos que con el paso del tiempo se presentan frecuentemente.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Desarrollar una aproximación metodológica para elaborar curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF), utilizando distribuciones mixtas de probabilidad, analizando las implicaciones de los fenómenos ciclónicos, para mejorar la confiabilidad en los datos arrojados por dichas curvas.

1.2.2. Específicos

- Emplear la distribución mixtas de probabilidad doble Gumbel, en la estimación de curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF), en las estaciones sinópticas ubicadas en las ciudades de Neiva, Pasto y Cartagena, para el procesamiento de datos hidrológicos y obtener resultados validados con sustentos científicos
- Verificar en que situaciones se puede aplicar la aproximación metodológica de construcción de curvas IDF con distribuciones mixtas, aplicándola en los datos de las estaciones casos de estudio.
- Relacionar los fenómenos macro-climáticos registrados con las curvas IDF, utilizando la distribución mixta de probabilidad Doble Gumbel, con el fin de tener una mayor confiabilidad en los resultados.

2. Descripción del Problema

2.1. Descripción

Siendo las curvas Intensidad - Duración - Frecuencia (IDF) una de las herramientas más útiles de la hidrología, que con el paso del tiempo ha demostrado ser muy eficiente y eficaz en los resultados que se obtienen de ella, se encuentra que cada vez más se generan inquietudes sobre la metodología que se utiliza para la elaboración de dichas curvas. (Vyver & Demarée, 2010).

Esto se ve presuntamente ocasionando debido a que la mayoría de las investigaciones se enfocan básicamente en el desarrollo de la curva IDF como tal, es decir, son muy pocos los que se ocupan en incluir una evolución de esta herramienta, lo cual sería de gran importancia para la hidrología, ayudando al análisis de fenómenos que trastornan el comportamiento normal de las lluvias, en especial su intensidad. (Hoyos, 2014).

En Colombia la influencia de estos fenómenos climáticos causantes de los valores extremos registrados en las estaciones de medición cada día es mayor, lo que ha llevado en muchas ocasiones que los eventos registrados no marquen una tendencia con una sola población. (Mailhot, Duchesne, Caya, Talbot, 2007).

Es por esto que se busca llegar a una aproximación metodológica que dentro de sus procedimientos utilice funciones de distribución de probabilidad mixtas, en la cual se puedan operar fenómenos extremos tales como Huracanes, Tormentas Tropicales y Fenómeno de La niña, para lo cual se utilizará una estructura de fórmula desarrollada por medio de otros investigadores, lo que da los indicios de

investigación con este tipo de funciones compuestas, en los que unen dos funciones de Probabilidad. (Herrera, Domínguez y Arganis, 2012)

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Distribuciones de Probabilidad Simples o Sencillas

En la hidrología, a lo largo del tiempo, se han utilizado distintas distribuciones de probabilidad, de las cuales muchos investigadores han obtenido grandes resultados. A continuación se definen alguna de estas distribuciones:

Tabla 2-1.
Resumen de distribuciones

Distribuciones	Ecuación	Parámetros	Referencia
Gumbel	$F(x) = e^{-e^{-d(x-\mu)}}$ <p>Para $-\infty \leq x \leq \infty$</p>	$d = \frac{1}{0,779696 * S} ;$ $\mu = x - 0,450047 * S$	Ríos, 2011
Pearson III	$f(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \left\{ \frac{x-\delta}{\alpha} \right\}^{\beta-1} e^{-\frac{x-\delta}{\alpha}}$	$\alpha = \frac{S}{\sqrt{\beta}}; \beta = \left(\frac{2}{\gamma} \right)^2; \delta = x - \alpha\beta$ $\gamma = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - x)^3 / n}{S^3}$	Ganancias, 2009
Normal	$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx$	<p>x: Variable aleatoria</p> <p>μ: Media de la población</p> <p>σ: Desviación estandar de la población</p>	Tauber, 2001

GEV	$F(x; \mu; \sigma; \varepsilon)$ $= \exp \left\{ \left[-1 + \varepsilon \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\varepsilon} \right\}$	μ : Es un parámetro de localización σ : Es un parámetro de escala ε : Es un parámetros de forma	Rasmussen, 2003
-----	---	--	--------------------

2.2.2. Distribuciones Mixtas

Las distribuciones mixtas han sido utilizadas en las distintas ramas de la ciencia, con el fin de operar datos que marquen dos tendencias en un mismo conjunto de datos. En la hidrología, la presencia de dos tendencias de datos con el paso del tiempo está siendo un poco más frecuente, es decir que para el análisis de estos datos se debe discriminar dos grupos de datos en una población como datos ciclónicos y los datos no ciclónicos.

“Fernando J. González Villarreal, investigador mexicano, ha demostrado que, en estos casos, la función de distribución de probabilidad se puede como:

$$F(x) = F_1(x)[p + (1 - p)F_2(x)]$$

Donde $F_1(x)$ y $F_2(x)$ son, respectivamente, las funciones de distribución de probabilidad de los caudales máximos anuales no producidos por tormentas ciclónicas y de los producidos por ellas, y p es la probabilidad de que en un año cualquiera el caudal máximo no sea producido por una tormenta ciclónica.

El número de parámetros de la función de distribución de probabilidad es:

$$n = n_1 + n_2 + 1$$

Dónde:

$n_1 =$ número de parámetros de $F_1(x)$, $n_2 =$ número de parámetros de $F_2(x)$

y el parámetro restante es p .

El valor de p será entonces:

$$p = \frac{N_n}{N_T}$$

Dónde:

N_n Es el número de años de registro en que el gasto máximo no se produjo por una tormenta ciclónica y N_T es el número total de años de registro.

Una vez estimado el valor de p , el resto de parámetros se evalúan mediante las fórmulas de función de distribución de probabilidad vistas anteriormente.

Los parámetros $F_1(x)$ y $F_2(x)$ de la ecuación 4.24 los calcularemos con las fórmulas de función de distribución de probabilidad, mediante las combinaciones entre estas". (Puello y Romero, 2012)

2.2.3. Distribución Doble Gumbel:

Partiendo de la estructura de las funciones mixtas de probabilidad, se presenta la distribución Doble Gumbel de probabilidad "En su forma más difundida, se acepta que ambas poblaciones siguen distribuciones, por ejemplo, de valores extremos tipo I o Gumbel, dando origen así a la función mixta conocida como Gumbel Doble, cuya distribución resulta:

$$F(x) = \exp[-e^{-(x-u_1)/\alpha_1}] \{p + (1-p) \exp[-e^{-(x-u_2)/\alpha_2}]\} \quad (4)$$

Donde x es la variable aleatoria de la distribución, μ_1, μ_2 son parámetros de ubicación asociados con las poblaciones 1 y 2 respectivamente, α_1 y α_2 son los parámetros de escala asociados con las poblaciones 1 y 2 respectivamente". (Suarez, 2011).

Para el cálculo de los parámetros ($\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$ y β_2) de la distribución de Probabilidad Doble Gumbel, se presentan las ecuaciones XX

$$\alpha_1 = \frac{\sigma_{y_1}}{s_1} \quad ; \quad \beta_1 = \bar{x}_1 - \frac{\mu_{y_1}}{\alpha_1}$$

De igual manera, para la población ciclónica:

$$\alpha_2 = \frac{\sigma_{y_2}}{s_2} \quad ; \quad \beta_2 = \bar{x}_2 - \frac{\mu_{y_2}}{\alpha_2}$$

Para lo cual, los valores $\mu_{y_1}, \mu_{y_2}, \sigma_{y_1}$ y σ_{y_2} , son obtenidos de la tabla estandarización parámetros de la distribución Gumbel. El cual se da por el número de datos que se estén analizando. (Herrera, Domínguez y Aranjuez, 2012).

2.2.4. Prueba Chi-cuadrado

La prueba bondad del ajuste de una distribución de probabilidad tiene varias maneras de realizarse, pero una de las más utilizadas en la prueba chi cuadrado, en donde por una prueba de hipótesis se puede saber si en realidad los datos se ajustan a la distribución seleccionada o no. La prueba X^2 está dada por la siguiente expresión:

$$x_c^2 = \sum_{i=1}^k \frac{[O_i - E_i]^2}{E_i}$$

Donde

o: Frecuencia observada

e: Frecuencia esperada.

X^2 : Estadístico

El procedimiento de la prueba implica el cálculo de una distribución esperada (E) en el grupo estudiado, usando como punto de partida a la distribución de la variable en el grupo de referencia. El propósito de la prueba es averiguar si existen diferencias estadísticamente significativas entre la distribución observada (O) y la distribución esperada (e). En la prueba se plantean las siguientes hipótesis estadísticas:

Hipótesis estadísticas nula: $H_0: O = E$

Hipótesis estadística alterna $H_a: O \neq E$

El procedimiento de la prueba incluye el cálculo de la medida de resumen llamada chi cuadrada. El rechazo de la H_0 ocurre cuando el valor calculado con los datos resulta mayor que el valor crítico de dicha medida contenido en una tabla llamada valores críticos de Chi cuadrada.

En el caso de que el valor de Chi cuadrada calculada sea igual o menor al de Chi cuadrada crítica se dice que no rechaza al H_0 y, por tanto, se concluye que la “O” es semejante a la “E”. En otras palabras, se dice que ambas distribuciones se ajustan bien; de ahí el nombre de la prueba bondad de ajuste. (Puello y Romero. 2012)

2.2.5. Fenómenos Climáticos Naturales

En la hidrología, los fenómenos ciclónicos naturales juegan un papel muy importante, ya que gracias a ellos se registran eventos o valores extremos en las estaciones, los cuales al ser procesados, ayudan a que mucho de los resultados alteren las tendencias normales del conjunto de datos. Por ejemplo: *“Un Ciclón tropical es un término genérico que se emplea para designar a los sistemas de bajas presiones no frontales que se forman sobre las aguas tropicales o subtropicales, en una escala sinóptica con núcleo caliente y una convección profunda organizada, junto a una circulación ciclónica del viento definida en la superficie”, puede llegar a registrar datos extremos muy altos.* (Lamanzares, 2012)

Los ciclones tropicales se forman sobre las aguas cálidas de la zona tropical o subtropical a partir de perturbaciones pre-existentes, como son las ondas tropicales. Pueden también formarse en la zona de inestabilidad del extremo sur de un frente frío y, a partir de zonas de baja presión, en la atmósfera superior. Hay seis factores generales que son necesarios para hacer posible la formación de ciclones tropicales:

- 1. Altos valores de la vorticidad relativa en los niveles bajos de la troposfera.*
- 2. Localización de un disturbio a más de 2.5° del ecuador.*
- 3. Vientos débiles en la troposfera superior que no cambien mucho en dirección y velocidad.*

4. *Temperatura superficial del mar mayor que 26.5° C hasta al menos 50 m de profundidad.*

5. *Inestabilidad condicional a través de una capa atmosférica profunda.*

6. *Altos valores de la humedad relativa en la troposfera baja y media.*

Los tres primeros factores son funciones de la dinámica horizontal, mientras que los tres restantes son parámetros termodinámicos". (Lamanzares, 2012)

2.3. Antecedente y Estado del Arte

Con el paso del tiempo se han desarrollado diferentes aplicaciones de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), aplicaciones que han tenido relevancia en el continente Americano, específicamente en el centro y sur del mismo. Lo cual se puede verificar, debido a que investigaciones con respecto a las distribuciones mixtas de probabilidad aplicándolas a la curvas IDF, han seguido un camino muy importante en este territorio, donde por su ubicación geográfica hace que los fenómenos naturales afecten el comportamiento de las precipitaciones en toda esta zona.

Ahora bien, Colombia no es el caso aparte en la influencia de estos eventos, ya que por los distintos aspectos geomorfológicos e hidrológicos, posee una diversidad de climas a lo largo de su territorio, lo que causa la presencia en distintas zonas del territorio diferentes magnitudes en la precipitación, lo que resulta como una dificultad en la estimación en general de las lluvias. (Poveda, 2004).

Bajo esta complejidad y el desarrollo que se ha venido dando con las curvas IDF se presentan los siguientes conceptos a los que se ha ido llegando con el tiempo:

a. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Siendo las curvas IDF, la herramienta principal en los análisis hidrológicos y por ende uno de los temas más investigados en su rama, buscando siempre la confiabilidad y exactitud en sus resultados. Investigadores han desarrollado distintas interpretaciones y conceptos para dichas curvas, tales como la *“Relación de la intensidad de la lluvia con su duración, donde para cada periodo de retorno, se tiene una curva diferente. A la cual también agrega una tesis Benítez, quien afirma que estas curvas corresponden a la representación gráfica de la relación que existe entre la intensidad y la duración, asociado a la frecuencia o periodo de retorno de la precipitación”*. (Pizarro, 2001).

b. Ecuaciones para determinar IDF

En la historia de las curvas IDF, se han desarrollado distintas ecuaciones que ayudan a identificar de una manera más fácil y ágil la intensidad de las precipitaciones en una zona determinada.

Estas ecuaciones se toman como el resumen matemático de todas las metodologías que se han desarrollado para la construcción de las curvas IDF. Las cuales se presentan así:

Tabla 2-2*Ecuaciones de las curvas IDF*

Año	Autor	Modelo Matemático	Consideraciones	Referencia
1931	Sherman	$I = KT^m / (D + b)^n$	Donde K, m, n y b son constantes que se calculan mediante un análisis de regresión lineal, en tanto que I, D y T corresponden a la intensidad de precipitación, la duración y el período de retorno respectivamente	Propuesta de un Método para la construcción de curvas IDF en las estaciones pluviométricas de Chile central. Cereceda, Raúl (2008).
1932	Benard	$I = KT^m / D^n$	Donde K, m, n y b son constantes que se calculan mediante un análisis de regresión lineal, en tanto que I, D y T corresponden a la intensidad de precipitación, la duración y el período de retorno respectivamente	Propuesta de un Método para la construcción de curvas IDF en las estaciones pluviométricas de Chile central. Cereceda Raúl (2008).
1994	Chow	NA	Plantea dos formas de trabajar con las curvas. La primera utiliza un análisis de frecuencias de lluvias, considerando para ello una función de probabilidad para valores extremos como la función Gumbel. El segundo método, expresa las curvas IDF como ecuaciones, con el fin de evitar la lectura de la intensidad de lluvia sobre el diseño de una gráfica	Propuesta de un Método para la construcción de curvas IDF en las estaciones pluviométricas de Chile central. Cereceda Raúl (2008).
1997	Aparicio	$I = K * T^m / (D + C)^n$	Donde K, m, n y c son constantes que se calculan mediante un análisis de regresión lineal múltiple, en tanto que I, D y T corresponden a la intensidad de la precipitación la duración y el periodo de retorno respectivamente.	Propuesta de un Método para la construcción de curvas IDF en las estaciones pluviométricas de Chile central. Cereceda Raúl (2008).
2001	Pizarro	$K = I_d / I_{24}$	Se relacionan cada una de la duración con los distintos periodos de retorno, los cuales son asociados a una probabilidad de excedencia, y cuyo propósito es obtener intensidades máximas de precipitación en (mm/h), para distintos periodos de retorno. Donde I_d es la intensidad de precipitación horaria e I_{24} es la intensidad de precipitación para una duración de 24 horas, y ambos valores para un periodo de retorno dado.	Propuesta de un Método para la construcción de curvas IDF en las estaciones pluviométricas de Chile central. Cereceda Raúl (2008).

c. Aplicación de las curvas IDF con funciones de distribución mixta de Probabilidad:

El estudio de las distribuciones mixtas Probabilidad, se viene desarrollando desde pocos años atrás, especialmente en la hidrología, donde la unión como las funciones Gumbel-Gumbel, ha sido de gran utilidad en la identificación del comportamiento de muchos comportamientos de datos en general.

Una de estas aplicaciones es el estudio de *“Caracterización de eventos extremos de precipitación, empleando distribuciones mixtas de probabilidad”*. En donde se considera a *“ México, con ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos diferente cada año, debido a que el clima es influenciado por la posición y fuerza de grandes sistemas subtropicales de presión del norte del atlántico y noreste del Océano Pacífico. Esta condición provocada que los fenómenos sean el resultado de factores distintos; dando al análisis de frecuencias un carácter de distribuciones mixta”*. En este estudio se utilizó la distribución Doble Gumbel, para el ajuste de los datos, el cual arrojó muy buenos resultados e indicando que dicha distribución es la mejor herramienta de análisis para casos como estos. (Suarez, 2011)

Otra investigación importante es el *“Cálculo de registros sintéticos de ingresos por cuenca propia de un sistema de presas de la región Noroeste de México, caracterizada por eventos invernales”*, en el cual el ajuste de los datos se realizó con distribución mixta de probabilidad, específicamente con la distribución doble Gumbel. (Domínguez y Arganis, 2011).

3. Metodología

3.1. Introducción

En este capítulo se encontró toda la estructura desde la selección hasta el tratamiento de los datos utilizados de las estaciones casos de estudio (Rafael Núñez, San Luis y Benito Suarez). Las cuales apoyaran la aproximación metodológica a la que se desea llegar para la construcción de las curvas Intensidad--Duración – Frecuencia con distribuciones mixtas de probabilidad.

3.2METODOLOGÍA

3.2.1 TIPO DE ESTUDIO

El tipo de estudio que se efectuó en la investigación tiene un énfasis científico, en donde se aplicó distintas herramientas tecnológicas, tales como los software Oracle Cristal Ball, Hyfran y Matlab.

Para llevar a cabo los objetivos de esta investigación, se seleccionaron 3 estaciones (Sinóptica principal) como caso de estudio del presente trabajo. Estas estaciones se encuentran ubicadas en las ciudades de Neiva, Ipiales y Cartagena, ciudades que debido a su ubicación son afectadas por condiciones climáticas distintas, lo que se puede comprobar por los océanos que están más cercas a ellas y su altura con respecto al nivel del mar . (Ver Tabla 3-1 y Tabla 3-2)

Tabla 3-1*Detalles de las estaciones Sinópticas. IDEAM. Meteorología Aeronáutica.*

Estaciones Sinópticas Ubicadas en los Aeropuerto de las ciudades de Neiva, Ipiales y Cartagena					
Benito Salas		San Luis		Rafael Núñez	
Código IDEAM	21115020	Código IDEAM	52055010	Código IDEAM	1401502
Localización	2° 58' 0'' N 75°18' 0'' W	Localización	0°51'26''N 77°40'40''W	Localización	10°26'9''N 75°31'1''W
Altitud	439m.s.n.m	Altitud	2961m.s.n.m	Altitud	2m.s.n.m
Ciudad	Neiva	Ciudad	Aldana	Ciudad	Cartagena
Departamento	Huila	Departamento	Nariño	Departamento	Bolívar

Fuente: Recuperado el 07 de Octubre del 2014, de http://www.meteoaeronautica.gov.co/jsp/estado-del-tiempo-en-aeropuertos_749

De estas estaciones se observan las siguientes condiciones climáticas:

Tabla 3-2*Parámetros climáticos de las estaciones seleccionadas. IDEAM. Periodo desde 1970 al 2010.*

Condiciones Climáticas Promedios Anual					
San Luis		Benito Salas		Rafael Núñez	
Temperatura Media	11,1	Temperatura Media	27	Temperatura Media	27
Brillo Solar	1461	Brillo Solar	2018	Brillo Solar	2577
Humedad	84	Humedad	66	Humedad	81

Fuente: Recuperado el 10 de Abril del 2013 de http://www.meteoaeronautica.gov.co/jsp/estado-del-tiempo-en-aeropuertos_749



Figura 2. Ubicación de las estaciones Sinópticas en Colombia. Google Earth.

Como se puede observar en la tabla 3-2, las tres estaciones registraron condiciones climáticas distintas, lo que influye en el régimen hidrológico de cada una de sus zonas. Además en la Figura 2 se presenta la ubicación espacial de las estaciones en el territorio colombiano. Donde se presencié a grandes rasgos la topografía y la cercanía de las estaciones Benito Salas y San Luis al océano Pacífico y en la estación Rafael Núñez al océano Atlántico.

Luego de seleccionar las anteriores estaciones, se revisaron los registros pluviográficos de cada una de las estaciones, con el fin de seleccionar los meses donde se tuvo mayor altura de precipitación de cada uno de los años. Seleccionando un promedio de 40 años de registro para cada una de las estaciones, es decir desde 1970 hasta el 2010. En dicha selección se identificaron los meses de la tabla 3-2.

Tabla 3-3

Meses de precipitación máxima seleccionada en la estación ubicada en el Aeropuerto Benito Salas

Nombre de la estación:	Aeropuerto Benito Salas	
Años	Meses	
1970	Mayo	Octubre
1971	Enero	Febrero
1972	Octubre	Noviembre
1973	Julio	Noviembre
1974	Octubre	Noviembre
1975	Octubre	Noviembre
1976	Enero	Octubre
1977	Marzo	Diciembre
1978	Octubre	Noviembre
1979	Abril	Octubre
1980	Noviembre	Diciembre
1981	Abril	Septiembre
1982	Enero	Mayo
1983	Mayo	Noviembre
1984	Abril	Octubre
1985	Octubre	Noviembre
1986	Mayo	Octubre
1987	Octubre	Diciembre
1988	Septiembre	Octubre
1989	Enero	Marzo
1990	Enero	Octubre
1991	Noviembre	Diciembre
1992	Noviembre	Diciembre
1993	Noviembre	Diciembre
1994	Octubre	Noviembre
1995	Abril	Diciembre

1996	Febrero	Octubre
1997	Marzo	Noviembre
1998	Marzo	Noviembre
1999	Febrero	Noviembre
2000	Septiembre	Noviembre
2001	Noviembre	Diciembre
2002	Marzo	Mayo
2003	Marzo	Noviembre
2004	Enero	Octubre
2005	Febrero	Diciembre
2006	Marzo	Octubre
2007	Abril	Octubre
2008	Enero	Noviembre
2009	Enero	Octubre
2010	Mayo	Noviembre
2011	Abril	Diciembre

Tabla 3-4

Meses de precipitación máxima seleccionada en la estación ubicada en el Aeropuerto San Luis.

Nombre de la estación:	Aeropuerto San Luis	
Fecha	Meses	
1970	Mayo	Octubre
1971	Enero	Diciembre
1972	Enero	Abril
1973	Abril	Mayo
1974	Septiembre	Diciembre
1975	Octubre	Noviembre
1976	Enero	Marzo
1977	Agosto	Septiembre
1978	Abril	Diciembre

1979	Abril	Octubre
1980	abril	Octubre
1981	Noviembre	Diciembre
1982	Marzo	Abril
1983	Abril	Octubre
1984	Enero	Octubre
1985	Enero	Abril
1986	Marzo	Abril
1987	Abril	Diciembre
1988	Mayo	Octubre
1989	Octubre	Diciembre
1990	Junio	Noviembre
1991	Marzo	Noviembre
1992	Marzo	Septiembre
1993	Abril	Noviembre
1994	Abril	Octubre
1995	Marzo	Diciembre
1996	Octubre	Noviembre
1997	Enero	Marzo
1998	Marzo	Mayo
1999	Febrero	Marzo
2000	Febrero	Mayo
2001	Abril	Noviembre
2002	Abril	Octubre
2003	mayo	Julio
2004	Septiembre	Octubre
2005	Marzo	Abril
2006	Febrero	Junio
2007	Marzo	Noviembre
2008	Marzo	Abril

2009	Abril	Octubre
2010	Mayo	Noviembre
2011	Febrero	Noviembre

Tabla 3-5

Meses donde se registraron mayor precipitación en el año designado en la estación Aeropuerto Rafael Núñez.

Nombre de la estación	Aeropuerto Rafael Núñez	
Código del IDEAM para la estación	1401502	
Año	Meses	
1970	Julio	Diciembre
1971	Enero	Julio
1972	Abril	Junio
1973	Mayo	Octubre
1974	Septiembre	---
1975	Julio	Agosto
1976	Mayo	Octubre
1977	Agosto	Noviembre
1978	Septiembre	Octubre
1979	Abril	Octubre
1980	Julio	---
1981	Septiembre	Octubre
1982	Agosto	Noviembre
1983	Septiembre	Noviembre
1984	Julio	Agosto
1985	Agosto	Octubre
1986	Junio	Octubre

1987	Septiembre	Octubre
1988	Mayo	Junio
1989	Septiembre	---
1990	Septiembre	Diciembre
1991	Mayo	Septiembre
1992	Junio	Julio
1993	Mayo	Septiembre
1994	Agosto	Noviembre
1995	Julio	Agosto
1996	Junio	Octubre
1997	Junio	Noviembre
1998	Mayo	Septiembre
1999	Agosto	---
2000	Julio	Septiembre
2001	Junio	Octubre
2002	Junio	Octubre
2003	Noviembre	---
2004	Mayo	Octubre
2005	Mayo	Octubre
2006	Mayo	Octubre
2007	Mayo	---
2008	Mayo	Noviembre
2009	Agosto	Octubre
2010	Mayo	Noviembre

3.3 Fuentes y técnicas para la recolección de la información

3.3.1 Fuente primaria:

Como fuente primaria se tuvieron las alturas de precipitación (tabla 8), los cuales se adquirieron en el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) de Colombia, información que fue representada mediante cartas pluviográficas de las estaciones sinópticas principal ubicada en Ipiales (Aeropuerto San Luis), Neiva (Aeropuerto Benito Salas) y Cartagena (Aeropuerto Internacional Antonio Nariño).

3.3.2 Fuentes secundarias:

Se obtuvieron recursos tales como libros, artículos científicos e investigaciones relacionadas con las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), pero en especial aquellos relacionados con la elaboración de estas curvas construidas con distribuciones de probabilidad mixta.

Se resalta que todos los datos obtenidos y la información que se encuentre en las fuentes secundarias y primarias, se procesó en software especializados en el tema.

3.3.3 Tratamiento de la información

Los análisis que se realizaron en la presente investigación se relacionan a continuación:

- **Recopilación de Información**

Para obtener la información, se adquieren los registros pluviograficos del 1970 hasta el año 2010 (Pluviogramas), con el fin de seleccionar por lo menos dos meses en cada año en donde se produjo la mayor altura de precipitación. Luego seleccionar dentro de esos dos meses por lo menos dos días donde se registraran las mayores alturas, donde finalmente este serán tus datos para operar.

- **Interpretación de Cartas pluviográficas**

Se convirtieron las alturas de precipitación en intensidades mm/h, la cual se obtiene dividiendo la altura de precipitación por la duración. Luego del anterior resultado se observan cuál de los datos tiene mayor magnitud y esos serán seleccionados como los registros definitivos (Ver tabla 3-7).

Tabla 3-6

Valores de precipitación en cada una de las estaciones de estudio.

Estaciones Caso de Estudio																								
Fecha	Estación Rafael Núñez								Estación San Luis								Estación Benito Salas							
	Duración								Duración								Duración							
Año	10	20	30	60	120	180	240	360	10	20	30	60	120	180	240	360	10	20	30	60	120	180	240	360
2010	115	77	68	60	50	35	27	19	27	20	19	15	11	8	7	4	120	89	84	56	29	20	15	10
2009	76	64	56	40	28	19	15	10	69	41	30	17	10	8	6	4	93	75	69	47	25	17	13	8
2008	67	62	49	31	18,55	14	10,7	7,2	48	33	30	21	10	7	7	5	90	75	70	56	39	27	21	14
2007	115,2	99,3	95,6	76,4	52,3	35,2	26,4	17,6	42	36	26	21	11	9	7	5	120	120	96	64	39	26	20	14
2006	87	57	44	35	20	15	11	8	12	11	9	9	7	6	6	4	90	75	60	45	26	18	14	10
2005	58,2	56,4	42,6	30,8	21,95	19	16	11	16	13	10	7	5	5	4	3	87	62	49	37	23	15	11	8
2004	56	54	52	29	15	10	8	7	24	18	19	12	6	4	3	2	60	48	42	37	25	17	13	9
2003	58,8	57,3	56,6	52,9	44,7	35,1	27,3	20,7	14	13	12	9	8	6	4	3	72	57	50	40	28	19	15	10
2002	48	39	40	26	14	9	7	5	27	26	23	15	12	9	7	5	90	63	54	50	27	18	14	9
2001	71,4	63,6	59,8	43,1	25,05	16,9	13	8,7	63	50	42	38	22	15	11	8	120	99	94	67	37	25	19	12
2000	79	75	62	55	36	24	18	12	15	11	8	7	6	5	5	4	62	61	52	36	25	21	16	11
1999	88	82	74	55	40	29	22	17	48	33	25	17	12	10	8	5	96	78	65	42	21	14	11	7
1998	114	95	74	46	25	19	17	13	30	27	23	17	9	7	5	3	98	61	49	32	21	14	11	7
1997	144	132	117	80	45	30	23	15	18	14	11	7	7	6	5	4	78	78	72	48	25	19	15	10
1996	48	60	43	27	14	9	7	5	21	19	18	15	9	6	5	4	115	115	96	69	38	25	19	13
1995	67,8	54	51,2	45,3	32,35	25,6	20,2	13,5	15	12	10	5	4	3	2	2	57	52	52	38	19	13	10	6
1994	91	75	58	42	22	15	11	7	29	28	21	16	8	6	4	3	89	74	69	50	30	21	16	11
1993	10	6	4	2	1	1	1	1	42	32	26	19	9	6	5	3	144	101	88	53	28	19	14	9
1992	96	64	52	27	13	9	7	4	28	26	22	12	8	7	5	4	102	84	76	59	36	25	20	15
1991	57	44	38	25	14	9	7	5	47	32	30	22	14	9	7	5	42	30	25	19	15	11	9	6
1990	95,4	74,4	81,4	57,3	34,1	23,7	18,1	14	46	32	24	15	10	9	7	5	138	94	76	48	30	21	16	11
1989	58	57	55	48	27	22	17	11	30	26	25	18	9	8	6	4	78	53	37	23	12	8	6	4
1988	83	76	70	47	28	20	15	11	23	18	14	9	5	4	4	3	41	30	21	11	9	7	7	5
1987	108	96	88	66	40	28	23	16	7	7	7	6	5	5	4	3	68	54	40	33	19	13	9	6

- **Relación de los Registro de la NOAA con Registros Obtenidos**

Luego de obtener los registros finales, se revisó la tabla ONI de la NOAA y se relaciona si los datos obtenidos tienen relación con los identificados en la ONI como la posible presencia de fenómenos de la Niña, además se analizaron los registros de huracanes o tormentas tropicales que hayan tenido influencia en el sur del continente americano. Cada una de las relaciones encontrada es marcadas en los registros.

- **Ajuste de datos con Distribuciones de Probabilidad (Simples y Mixtas)**

Teniendo los registros finales, es decir un dato de intensidad por mes y año seleccionado, se realizaron el ajuste de los datos por medio de las distribuciones de probabilidad simples (Gumbel, Gev y Weibull) y la distribución mixta de probabilidad Doble Gumbel.

- **Prueba Chi-cuadrado**

Luego de realizar los ajustes, se debe verificó que los datos se comportaban como algunas de las distribuciones de probabilidad (Gumbel, Gev, Weibull y Doble Gumbel). Para esto se aplica se realiza una prueba de hipótesis (H_0 : Se acepta el comportamiento de los datos para la distribución analizada. H_1 : No se acepta el comportamiento de los datos para distribución analizada) ayudada con chi cuadrado.

- **Elaboración Curva Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)**

Después de corroborar que los datos se ajustan a una distribución de probabilidad. Se procedió a construir las curvas IDF, según los resultados obtenidos.

4. ESTRUCTURA DEL ANÁLISIS DE DATOS

4.1 Introducción

En este capítulo se describe el análisis de los datos para la construcción de las curvas de Intensidad - Duración – Frecuencia (IDF), en las cuales se incluye la herramienta (software) que contiene la distribución mixta de probabilidad Doble Gumbel. Destacando que la población de datos analizados, se encontraron algunos casos con dos poblaciones y otros con una sola población, lo cual se tiene en cuenta en la construcción final de dichas curvas.

También se encuentra el material base para la identificación de fenómenos climáticos que pudieran afectar o alterar el comportamiento normal de las lluvias, como también los registros finales de intensidad utilizados en el análisis de los datos.

4.2. Fenómenos climáticos en los casos de Estudios

Para obtener los fenómenos climáticos que pudieron afectar el comportamiento de las lluvias en las estaciones de medición, se revisaron los registros de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), donde se guarda una gran base de datos de estos temas en específico.

La primera revisión que se realizó en la NOAA fue la tabla llamada “*Changes to Oceanic Niño Index (ONI)*”. En ella se puede observar un indicador que destaca según su magnitud que se pudo haber generado un fenómeno del niño o de la niña, es decir cuando el indicador se encuentra por debajo de -0.5, posiblemente hubo fenómenos de la Niña, pero si el indicador pasa el 0.5, lo más probable es que hubo fenómeno del Niño.

Indicador que la NOAA lo ha podido corroborar con el paso del tiempo, marcando cada uno de los eventos ocurridos en la Tabla 4-1, presentado de la siguiente manera: Si en la columna el dato aparece de color azul, es que en ese mes por lo menos hubo algún indicio del fenómeno de la Niña, pero si el dato aparece de color rojo, fue que por lo menos hubo algún indicio del fenómeno del Niño.

Todo lo anterior es de gran importancia en la investigación, debido a que se realiza un comparativo de los fenómenos identificados en dicha tabla, con los datos que se obtienen mediante las estaciones de medición en las ciudades escogidas (Neiva, Ipiales y Cartagena), comparación que le brinda sustento a la investigación, con el fin de afirmar si ese dato coincidente cuenta con la influencia del fenómeno climático presentado en esa fecha.

Tabla 4-1

Changes to Oceanic Niño Index (ONI). NOAA. Climate Prediction Center

Changes to Oceanic Niño Index (ONI)												
	Enero	feb	marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep	Octu	NOV	DIC
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1950	-1.4	-1.3	-1.2	-1.2	-1.1	-0.9	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7
1951	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.4	0.6	1	1.1	1.2	1.1	0.9
1952	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.1	-0.1	0	0.2	0.2	0.2	0.3
1953	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8
1954	0.7	0.5	0.1	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7
1955	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.7	-1.1	-1.4	-1.7	-1.6
1956	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
1957	-0.3	0.1	0.4	0.7	0.9	1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.5	1.8
1958	1.8	1.6	1.2	0.9	0.7	0.6	0.5	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6
1959	0.6	0.6	0.5	0.3	0.2	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1	0	0.1	0
1960	-0.1	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	0	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
1961	0	0	0	0.1	0.3	0.4	0.2	-0.1	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1
1962	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5
1963	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.3	0.5	0.8	1.1	1.2	1.3	1.4	1.3
1964	1.1	0.6	0.1	-0.4	-0.6	-0.6	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
1965	-0.6	-0.3	0	0.2	0.5	0.8	1.2	1.5	1.7	1.9	1.9	1.7
1966	1.4	1.1	0.9	0.6	0.4	0.3	0.3	0.1	0	-0.1	-0.1	-0.2
1967	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.1	-0.1	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4
1968	-0.6	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.5	0.6	0.8	1
1969	1.1	1.1	1	0.9	0.8	0.6	0.5	0.5	0.8	0.9	0.9	0.8
1970	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.2	-0.5	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-1
1971	-1.2	-1.3	-1.1	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.9	-0.8
1972	-0.6	-0.3	0.1	0.4	0.6	0.8	1.1	1.4	1.6	1.9	2.1	2.1
1973	1.8	1.2	0.6	-0.1	-0.5	-0.8	-1	-1.2	-1.3	-1.6	-1.9	-2
1974	-1.9	-1.6	-1.2	-1	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.6	-0.8	-0.7
1975	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-1	-1.1	-1.2	-1.4	-1.5	-1.6	-1.7
1976	-1.5	-1.1	-0.7	-0.5	-0.3	-0.1	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8	0.8
1977	0.6	0.6	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.8	0.8
1978	0.7	0.5	0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.1	-0.1
1979	-0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0	0	0.2	0.3	0.5	0.5	0.6
1980	0.5	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	0	0	-0.1
1981	-0.4	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1
1982	-0.1	0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.7	1	1.5	1.9	2.1	2.2
1983	2.2	1.9	1.5	1.2	0.9	0.6	0.2	-0.2	-0.5	-0.8	-0.9	-0.8
1984	-0.5	-0.3	-0.3	-0.4	-0.5	-0.5	-0.3	-0.2	-0.3	-0.6	-0.9	-1.1
1985	-1	-0.9	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4
1986	-0.5	-0.4	-0.2	-0.2	-0.1	0	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.2
1987	1.2	1.3	1.2	1.1	1	1.2	1.4	1.6	1.6	1.5	1.3	1.1
1988	0.8	0.5	0.1	-0.2	-0.8	-1.2	-1.3	-1.2	-1.3	-1.6	-1.9	-1.9
1989	-1.7	-1.5	-1.1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1
1990	0.1	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4
1991	0.3	0.2	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	0.7	0.7	0.8	1.2	1.4
1992	1.6	1.5	1.4	1.2	1	0.7	0.3	0	-0.2	-0.3	-0.2	0
1993	0.2	0.3	0.5	0.6	0.6	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	1	1.2
1995	1	0.8	0.6	0.3	0.2	0	-0.2	-0.4	-0.7	-0.8	-0.9	-0.9
1996	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.1	0.2	0.7	1.2	1.5	1.8	2.1	2.3	2.4	2.3
1998	2.2	1.8	1.4	0.9	0.4	-0.2	-0.7	-1	-1.2	-1.3	-1.4	-1.5
1999	-1.5	-1.3	-1	-0.9	-0.9	-1	-1	-1.1	-1.1	-1.3	-1.5	-1.7
2000	-1.7	-1.5	-1.2	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.6	-0.6	-0.8	-0.8
2001	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	-0.1	0	0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3
2002	-0.2	0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.8	0.8	0.9	1.2	1.3	1.3
2003	1.1	0.8	0.4	0	-0.2	-0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3
2004	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0	-0.2	-0.5	-0.8
2006	-0.9	-0.7	-0.5	-0.3	0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1	1
2007	0.7	0.3	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.8	-1.1	-1.2	-1.4
2008	-1.5	-1.5	-1.2	-0.9	-0.7	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	-0.5	-0.7
2009	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	1.1	1.4	1.6
2010	1.6	1.3	1	0.6	0.1	-0.4	-0.9	-1.2	-1.4	-1.5	-1.5	-1.5
2011	-1.4	-1.2	-0.9	-0.6	-0.3	-0.2	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-1	-1
2012	-0.9	-0.6	-0.5	-0.3	-0.2	0	0.1	0.4	0.5	0.6	0.2	-0.3
2013	-0.6	-0.6	-0.4	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2		

Recuperado 15 de noviembre de 2013, de http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml

Otra herramienta presentada para la identificación de alteraciones climáticas fue la búsqueda de la ocurrencia de Huracanes y/o tormentas tropicales, tanto en el océano Pacífico como en el océano Atlántico, que afectaran las estaciones de medición escogidas. Esto se observa en la Tablas 4-2 y Tabla 4-3:

Tabla 4-2

Huracanes en el Océano Atlántico. NOAA. National Huracanes Center.

Huracanes en el Océano Atlántico		
Nombre	Año	Meses
Gustav	2008	Agosto - Septiembre
Félix	2007	Agosto - Septiembre
Emily	2005	Julio
Iris	2001	Octubre
Félix	2005	Agosto
Andrew	1992	Agosto
Gustav	1990	Agosto - Septiembre
Nicholas	2003	Octubre
Gloria	1985	Septiembre
Allen	1980	Agosto

Recuperado 15 de noviembre de 2013, de <http://www.nhc.noaa.gov/>

Tabla 4-3

Huracanes en el Océano Pacífico. NOAA. National Huracanes Center

Huracanes del Pacífico		
Nombre	Año	Meses
Celia	2010	Junio
Daarby	2010	Julio
Agatha	2010	Mayo
Felicia	2009	Mayo
Rick	2009	Octubre
Octave	2001	Octubre - Noviembre
Alma	2002	Mayo - Junio
Javier	2004	Septiembre
Gre	1993	Noviembre
Paul	1978	Noviembre
Cuyutlan	1992	Noviembre
Rachel	1990	Octubre
Paul	1973	Octubre
Ignacio	1979	Octubre

4.2 Análisis de datos

Para el análisis de los datos, se presentan distintas herramientas, de las cuales se encuentra un Programa desarrollado a lo largo de esta investigación, bajo el lenguaje de Matlab, en donde se analizaron todos los registros con distribución mixta de Probabilidad, específicamente la Doble Gumbel.

Para el programa desarrollado en Matlab, se utilizaron las ecuaciones descritas en el ítem 2.2.3, en donde se operan los datos en la ecuación de la distribución doble Gumbel de la siguiente manera: los datos clasificados como ciclónicos se operaron en la primera expresión de la ecuación, y los datos clasificados como no ciclónicos se operaron en la tercera expresión de la ecuación. Además se calcula los parámetros con las ecuaciones descritas en el mismo ítem.

A continuación se presenta un diagrama de flujo del programa en mención:

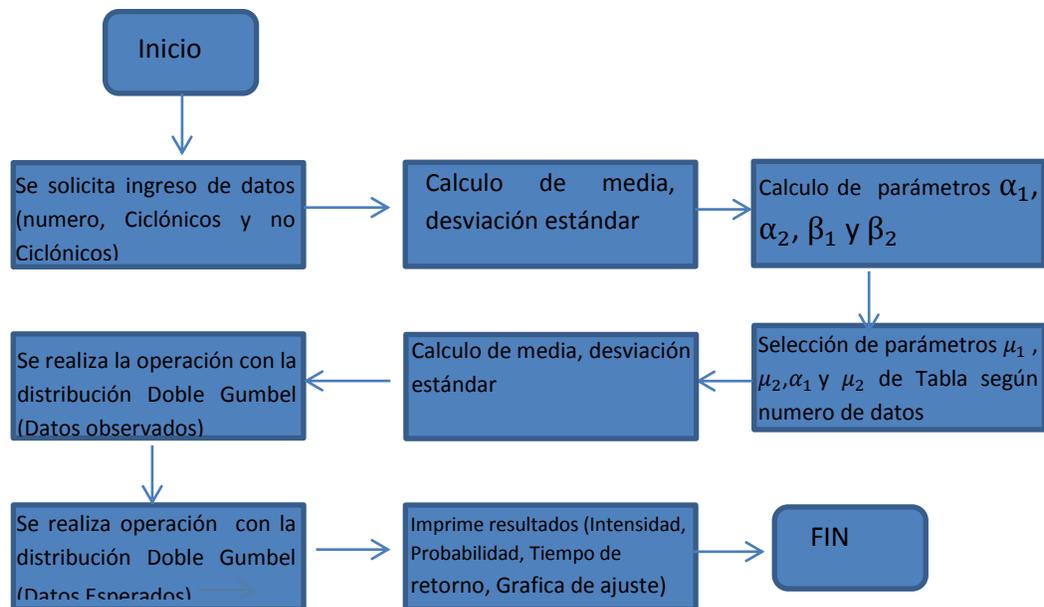


Ilustración 1. Diagrama de Flujo. Software Doble Gumbel

Cabe destacar que las ecuaciones utilizadas en esta secuencia de pasos, son las descritas en el marco teórico del presente documento.

Además se utilizó un software desarrollado por “*Water Resources Publications, LLC*”, llamado *Hyfran*, en el que se operaron los mismos registros pero bajo las distribuciones de probabilidad sencillas (Gumbel, GEV, Wiebul, etc).

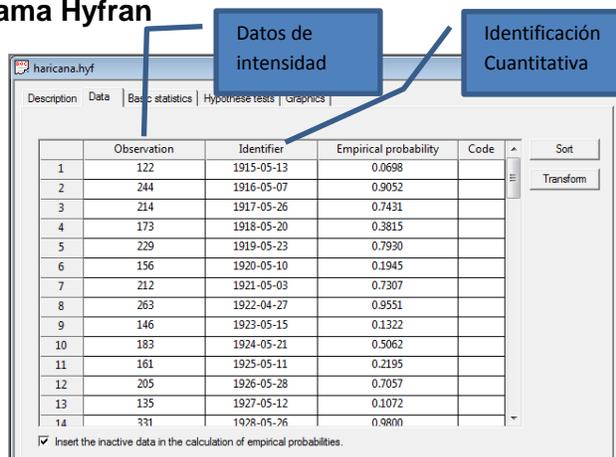
4.2.1 Resultados con Distribuciones Sencillas con el Software Hyfran

Luego de tener los datos de la tabla 4-5, se analizan en el software Hyfran para poder obtener la tendencia de los datos, según las distribuciones de probabilidad sencillas contenidas en dicha herramienta tecnológica.

En el Software Hyfran, se deben realizar los siguientes pasos para poder utilizarlo:

- Ingresar los datos observados y el año, de no tener el año colocar una identificación cuantitativa.

Figura 3. Paso 1 del Programa Hyfran

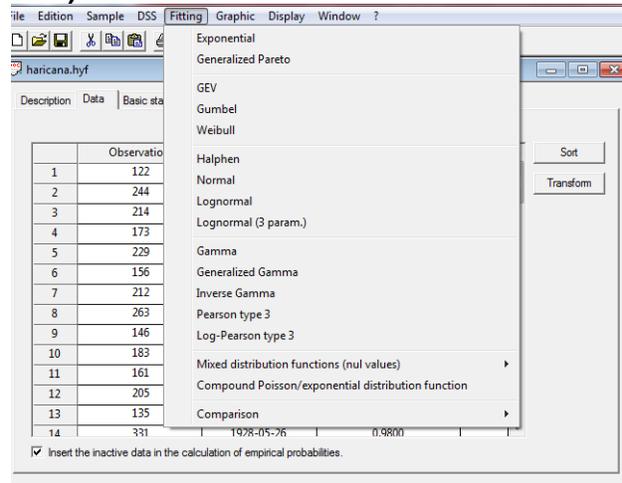


	Observation	Identifier	Empirical probability	Code
1	122	1915-05-13	0.0698	
2	244	1916-05-07	0.9052	
3	214	1917-05-26	0.7431	
4	173	1918-05-20	0.3815	
5	229	1919-05-23	0.7930	
6	156	1920-05-10	0.1945	
7	212	1921-05-03	0.7307	
8	263	1922-04-27	0.9551	
9	146	1923-05-15	0.1322	
10	183	1924-05-21	0.5062	
11	161	1925-05-11	0.2195	
12	205	1926-05-28	0.7057	
13	135	1927-05-12	0.1072	
14	331	1928-05-26	0.9800	

Insert the inactive data in the calculation of empirical probabilities.

- Luego se debe seleccionar la distribución de probabilidad con la que deseas realizar tu ajuste.

Figura 4. Imagen Hyfran (Paso 2)



Se debe tener en cuenta realizar el cambio de las unidades que deseas analizar. Finalmente de realizar estos pasos el programa arroja como resultado los datos de la tabla 4-5, en la cual se especifican cada uno de ellos en la duración, tiempo de retorno y estación sinóptica de cada uno de los casos de estudio.

Tabla 4-5

Datos de precipitación obtenidos con el software Hyfran.

Estación Benito								
Minutos	10	20	30	60	120	180	240	360
Período de retorno								
100	77	57.2	56.4	40.4	22.2	15.3	10.8	8.34
50	73	54	50.4	36.1	20	13.9	10.2	7.61
20	65	48.8	42.6	30.3	17.1	12	9.3	6.63
10	58	43.9	36.5	25.9	14.8	10.5	8.48	5.86
5	50	37.8	30.1	21.2	12.4	8.93	7.48	5.04
Estación San Luis								
Minutos	10	20	30	60	120	180	240	360
Período de retorno								
100	201	172	145	96,8	55,7	38,0	29,3	19,9
50	181	154	130	87,1	50,3	34,4	26,6	18,0
20	154	130	110	74,1	43,1	29,6	22,9	15,5
10	133	112	94,8	64,1	37,6	25,9	20,1	13,6
5	111	92,6	78,8	53,7	31,8	22,1	17,1	11,6

Estación Rafael Núñez								
Minutos	10	20	30	60	120	180	240	360
Período de retorno								
5	201	151	124	83	54	41	34	26
10	226	170	139	94	61	46	38	29
20	265	199	163	110	71	54	45	34
50	298	224	183	124	80	61	50	38
100	336	253	206	139	90	69	57	43

Cabe destacar que en cada estación se validaron específicamente tres distribuciones de probabilidad simples, las cuales son GEV, Weibull y Gumbel, exceptuando la estación San Luis donde se evaluó una adicional como es la Shapiro-Wilk($n < 50$), esto debido a que en las distribuciones más comunes no se aceptó la tendencia de los datos para esta estación.

Además, se presenta con ayuda del programa *Hyfran* la validación de hipótesis bajo la prueba Chi-cuadrado, en donde se eligió para cada duración la distribución donde se logró un mejor ajuste y por ende se aceptaba la prueba de hipótesis. Estas validaciones se mostrarán en el Capítulo V, especificando cada una de las estaciones de datos.

4.2.2 Resultados Con Las Distribuciones Mixtas de Probabilidad (Doble Gumbel).

Con los datos de las estaciones sinópticas ubicadas en las ciudades de Neiva, Ipiales y Cartagena, se realiza el ajuste con la distribución doble Gumbel, obteniendo los resultados presentados en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6

Datos de precipitación obtenidos con el software de la distribución de Probabilidad Doble Gumbel

Estación Benito Suarez								
Minutos	10	20	30	60	120	180	240	360
Período de Retorno								
5	124	103	90	66	41	29	22	15
10	162	137	119	89	55	38	30	20
20	201	170	149	111	70	48	37	25
50	252	215	188	141	88	60	47	32
100	290	248	217	163	103	70	54	37
Estación San Luis								
Minutos	10	20	30	60	120	180	240	360
Período de Retorno								
5	74	55	45	30	16	12	9	6
10	108	80	66	43	23	16	12	8
20	142	105	86	56	29	20	15	11
50	187	138	113	73	37	25	20	13
100	221	163	133	85	44	29	23	15
Estación Rafael Núñez								
Minutos	10	20	30	60	120	180	240	360
Período de Retorno								
5	124	123	121	71	44	33	26	18
10	147	146	140	89	56	42	33	24
20	240	240	212	108	68	52	39	29
50	371	306	271	147	84	64	50	36
100	515	357	316	248	95	73	57	42

Cabe destacar que los resultados de la Tabla 4-6, son únicamente de la distribución de Probabilidad Doble Gumbel.

4.3 Construcción de las Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF).

En los ajuste de datos obtenidos y mostrados en los ítems anteriores de este capítulo, se pudo observar de acuerdo a su grafica de ajuste y apoyado con el cálculo de la medida de bondad de ajuste *Chi-cuadrado*, todas las estaciones a pesar de contener una supuesta coincidencia el día escogido con la generación de un fenómeno ciclónico, no se comporta en todas las duraciones como un conjunto de dos poblaciones, es decir en la estación Rafael Núñez tiene este comportamiento en las duraciones 10, 20, 30 y 40, en la estación Benito Suarez en las duraciones 10, 20 y 30. Pero en la estación San Luis en ninguna de sus duraciones se comportó como un conjunto de dos poblaciones. (Ver tabla 4-7)

Tabla 4-7

Comportamiento de datos por duraciones en cada estación de medición

Comportamiento De Población De Datos En Las Estaciones Hidrológicas De Medición								
Duración (Min) Estación	10	20	30	60	120	180	240	360
Rafael Núñez	I	I	I	I	O	O	O	O
San Luis	O	O	O	O	O	O	O	O
Benito Suarez	I	I	I	O	O	O	O	O

En la tabla 4-7 se encuentra (I) cuando el conjunto de datos se comporta como dos poblaciones, y (O) cuando el conjunto de datos se comporta como una sola población.

4.4 Diseño de ecuación para obtención de curvas IDF una población.

Para el diseño de la ecuación de la curva IDF de una población se utilizaron los datos ajustados a través de la distribución Doble Gumbel en los que se relacionan los valores de las intensidades para duraciones de 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240 y 360 minutos, con períodos de retorno de 5, 10, 20, 50 y 100 años.

Datos con los cuales se determinan las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, utilizando la ecuación (5) en la que se relacionan las tres variables simultáneamente. Esta es esbozada de la siguiente manera. (Aparicio, 1997)

$$I = \frac{k * (T^m)}{(d + c)^n} \quad (5)$$

Para encontrar las constantes de la ecuación anterior k, m, n y c se realiza un análisis de correlación lineal múltiple, ejecutando el siguiente procedimiento:

- Aplicando logaritmos se obtiene:

$$\log I = \log k + m \log T - n \log(d + c) \quad (6)$$

- Igualando cada uno de los elementos de la siguiente forma:

$$\log I = y \quad (7)$$

$$\log k = a_0 \quad (8)$$

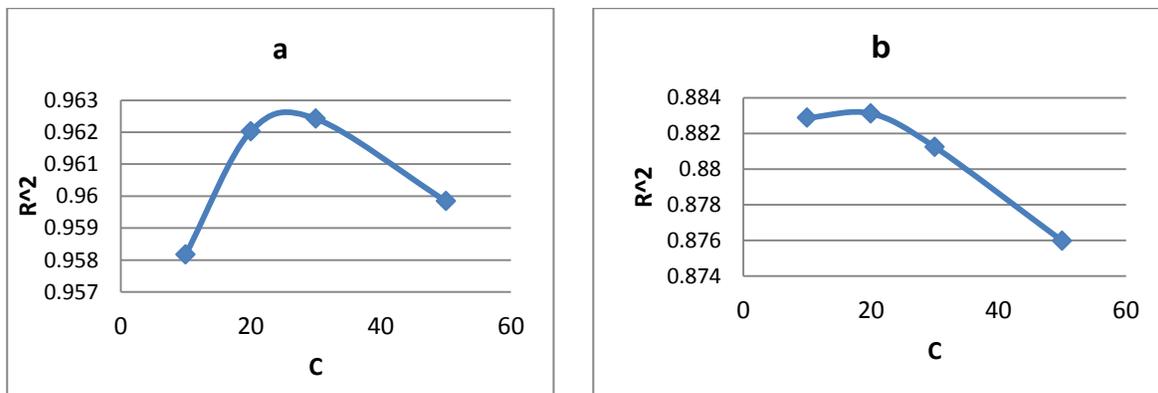
$$m \log T = a_1 x_1 \quad (9)$$

$$-n \log(d + c) = a_2 x_2 \quad (10)$$

- Reemplazando estos valores en la ecuación, se obtiene el siguiente resultado:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 \quad (11)$$

Los valores de T y d son conocidos, para hallar los demás valores es necesario que la constante c sea calculada, colocándole un valor para cada regresión a realizar. Teniendo en cuenta lo anterior se proceden a dar valores a C de 5, 10, 20, 30 y 50 en la gráfica se muestran los resultados del coeficiente de correlación y el valor de c (Constante), donde podemos observar que para C = 30, C = 20 y C = 50 el valor del coeficiente de correlación, es mucho más cercano a 1, en las estaciones donde se enfatizó el estudio (Estación Rafael Núñez, Estación Benito Suarez, Estación San Luis). Todo esto se ve demostrado en la Figura 5:



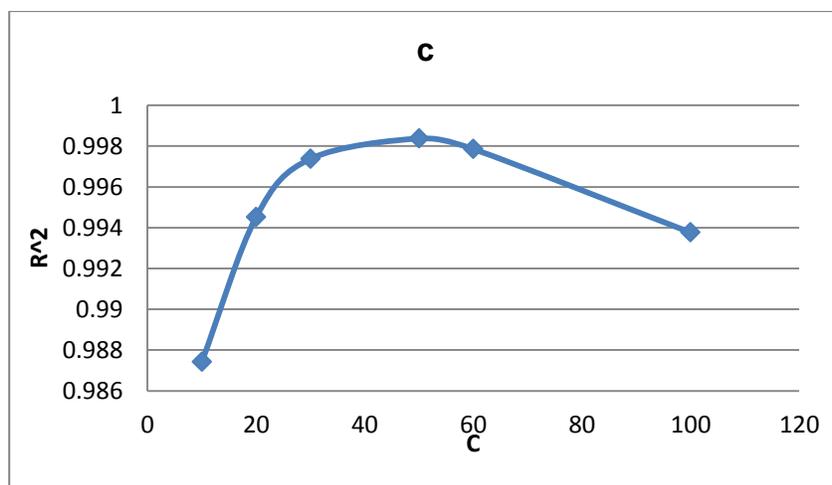


Figura 5. Relación de la Contante C respecto su correlación. a) Estación Rafael Núñez b) estación San Luis c) Estación Benito Suarez.

Luego de obtener el valor de c se conocer el valor de las demás constantes de la ecuación, en este sentido, con los valores obtenidos del análisis de la correlación lineal múltiple (realizado con Microsoft Excel con su función especializada regresión lineal) perteneciente a $C = 30$, $C = 20$ y $C = 50$, en las estaciones Rafael Núñez, Benito Suarez y San Luis respectivamente, encontramos los valores de cada uno de los componentes de la ecuación. En la tabla 4-8 se muestra un resumen estadístico de la regresión múltiple.

Tabla 4-8

Resumen de la estadística de la regresión.

Estadísticas de la regresión	Estación San Luis	Estación Benito Suarez	Estación Rafael Núñez
Coefficiente de correlación múltiple	0.999185976	0.939743249	0.981029708
Coefficiente de determinación R²	0.998372614	0.883117374	0.962419289
R² ajustado	0.998284647	0.876799394	0.960387899
Error típico	0.015002461	0.141210664	0.070287746
Observaciones	40	40	40

Variables			
Intercepción (Coeficientes)	4.563935774	3.250337584	3.504273476
Variable X 1 (Coeficientes)	-0.18455494	0.302201649	0.286580558
Variable X 2 (Coeficientes)	-1.201188012	-0.911328186	-0.922156195

Además se presenta en la tabla 4-9 y 4 - 10 los valores de cada una de las contantes contenidas en la ecuación (5)

Tabla 4-9

Valores de la ecuación

Parámetros	Estación San Luis	Estación Benito Suarez	Estación Rafael Núñez
a_0	4.563935774	3.250337584	3.504273476
a_1	-0.18455494	0.302201649	0.286580558
a_2	-1.201188012	-0.911328186	-0.922156195

Tabla 4-10

Valores parámetros de la ecuación

Parámetros de la ecuación	Estación San Luis	Estación Benito Suarez	Estación Rafael Núñez
$k (10^{a_0})$	36638.33881	1779.662232	3193.548206
m	0.18455494	0.302201649	0.286580558
n	1.201188012	0.911328186	0.922156195

Lo que al construir la ecuación con cada uno de sus parámetros, resulta las expresiones dadas en la tabla 4-11.

Tabla 4-11

Ecuaciones generadas para cada una de las estaciones caso de estudio

Ecuaciones de las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia		
Estación San Luis	Estación Benito Suarez	Estación Rafael Núñez
$I = \frac{36638.34 * (Tr)^{0.18}}{(D + 10)^{1.201}}$	$I = \frac{1779.66 * (Tr)^{0.30}}{(D + 10)^{0.911}}$	$I = \frac{3193.54 * (Tr)^{0.287}}{(D + 10)^{0.922}}$

--	--	--

Con las ecuaciones de la tabla 4 -12 se obtuvieron los valores de las intensidades para cada uno de los periodos de retorno para las estaciones caso de estudio, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 4-12. Resultados

Rafael Núñez								
Duración Tr	10	20	30	60	120	180	240	360
5	124	123	121	71	54	41	34	26
10	147	146	140	89	61	47	38	29
20	240	240	212	108	71	54	45	34
50	371	306	271	147	80	61	51	38
100	515	357	316	248	90	69	57	43
San Luis								
Duración Tr	10	20	30	60	120	180	240	360
5	201	172	145	96.8	55.7	38	29.3	19.9
10	181	154	130	87.1	50.3	34.4	26.6	18
20	154	130	110	74.1	43.1	29.6	22.9	15.5
50	133	112	94.8	64.1	37.6	25.9	20.1	13.6
100	111	92.6	78.8	53.7	31.8	22.1	17.1	11.6
Benito Suarez								
Duración Tr	10	20	30	60	120	180	240	360
5	124	103	90	54	32	22	17	12
10	162	137	119	64	38	26	20	14
20	201	170	149	74	43	30	23	16
50	252	215	188	87	87	87	87	87
100	290	248	217	97	56	38	29	20

Como presenta la tabla 4-12, la ciudad donde hay mayor intensidad es en la ciudad de Cartagena (Estación Rafael Núñez), lo cual ocurre por la gran influencia de

los fenómenos ciclónicos, siendo esta una ciudad costera y bañada por el mar Caribe.

4.5 Representación Gráfica de las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF).

Como indica el ítem 4.3 del capítulo 4, no todos los datos de las tres estaciones se comportan como dos poblaciones, es decir el comportamiento de las lluvias en ocasiones se puede decir que tiene un comportamiento normal, es decir no existieron eventos muy alejados del conjunto de datos. Este es el caso de la estación San Luis en el municipio de Ipiales, el cual al analizar los datos bajo la distribución Doble Gumbel, no mostro una tendencia de dos poblaciones. Las otras dos estaciones (Rafael Núñez y Benito Suarez), se comportaron en las primeras duraciones (10,20 y 30) como dos poblaciones, el resto de duraciones como una sola población. Lo cual quiere decir, que cuando el conjunto de datos se comportó como dos poblaciones, se tomaron los resultados arrojados bajo la distribución Doble Gumbel, pero cuando se comportó como una población, se tomaron los resultados de las distribuciones simples, tal como se observan en las Figuras 6 a la Figura 8.

**Curvas Intensidad – Duración - Frecuencia De Las Estaciones Caso Estudio
(Rafael Núñez, San Luis, Benito Suarez)**

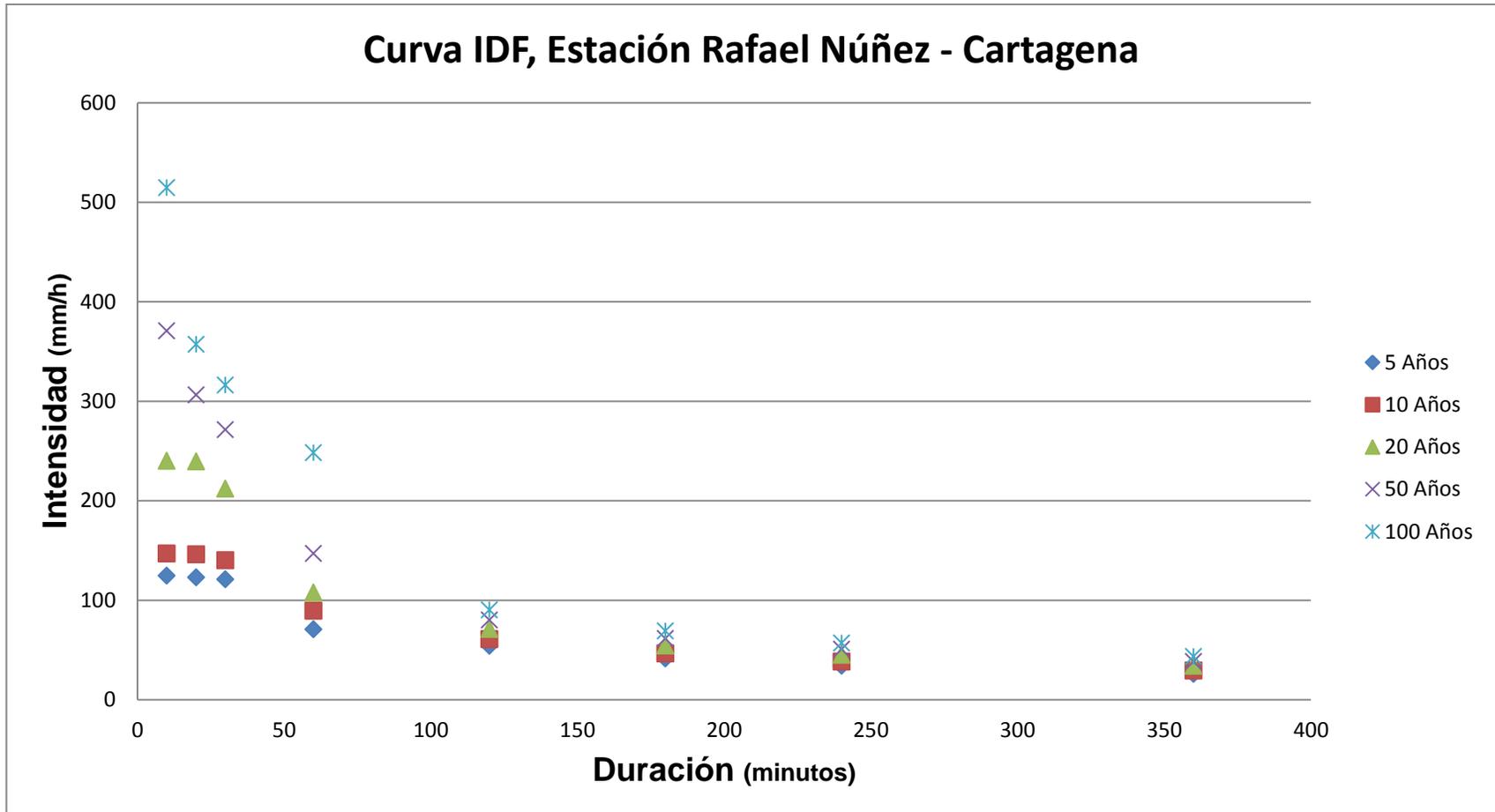


Figura 6 Curva IDF, Estación Rafael Núñez

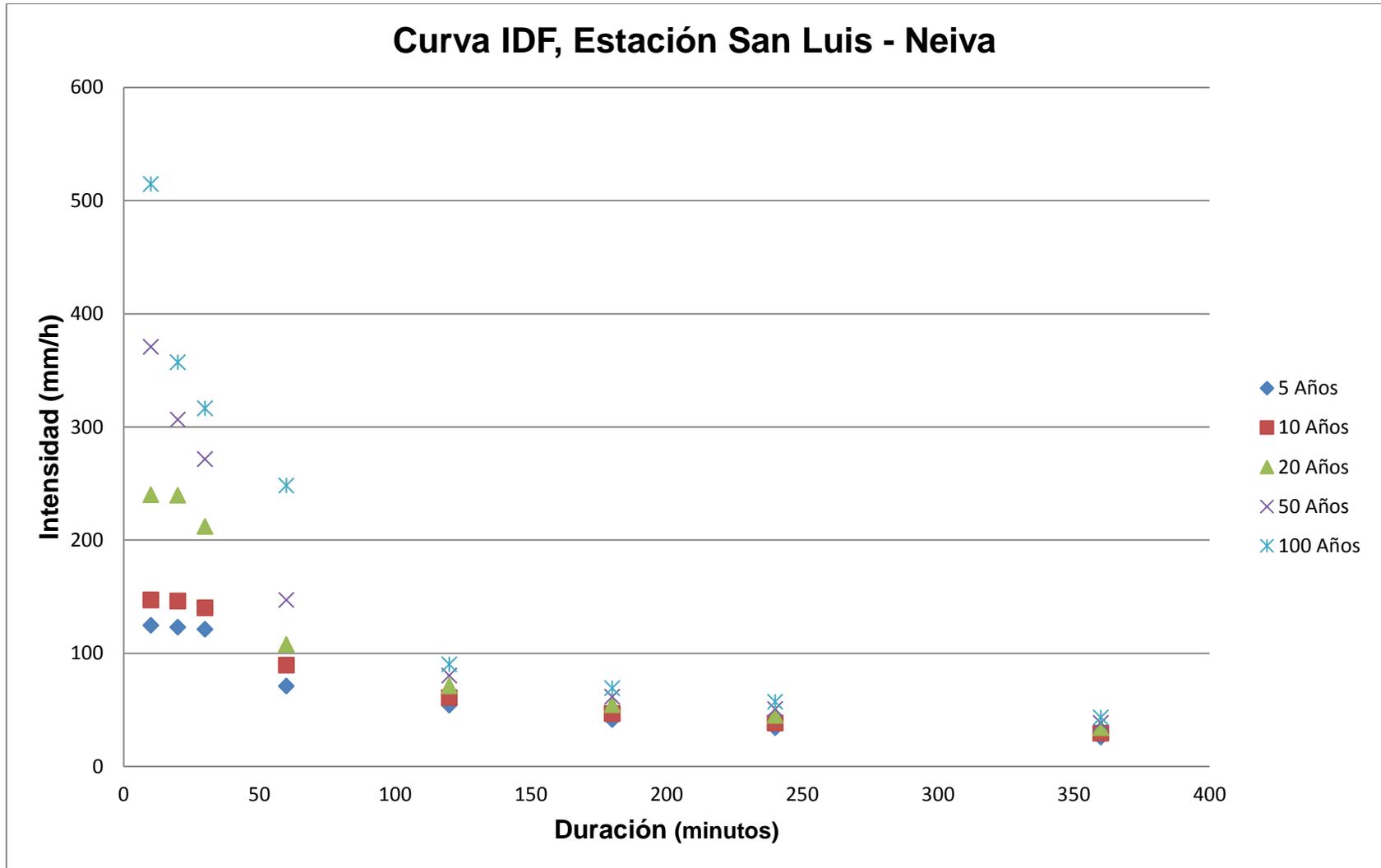


Figura 7. Curva IDF, Estación San Luis

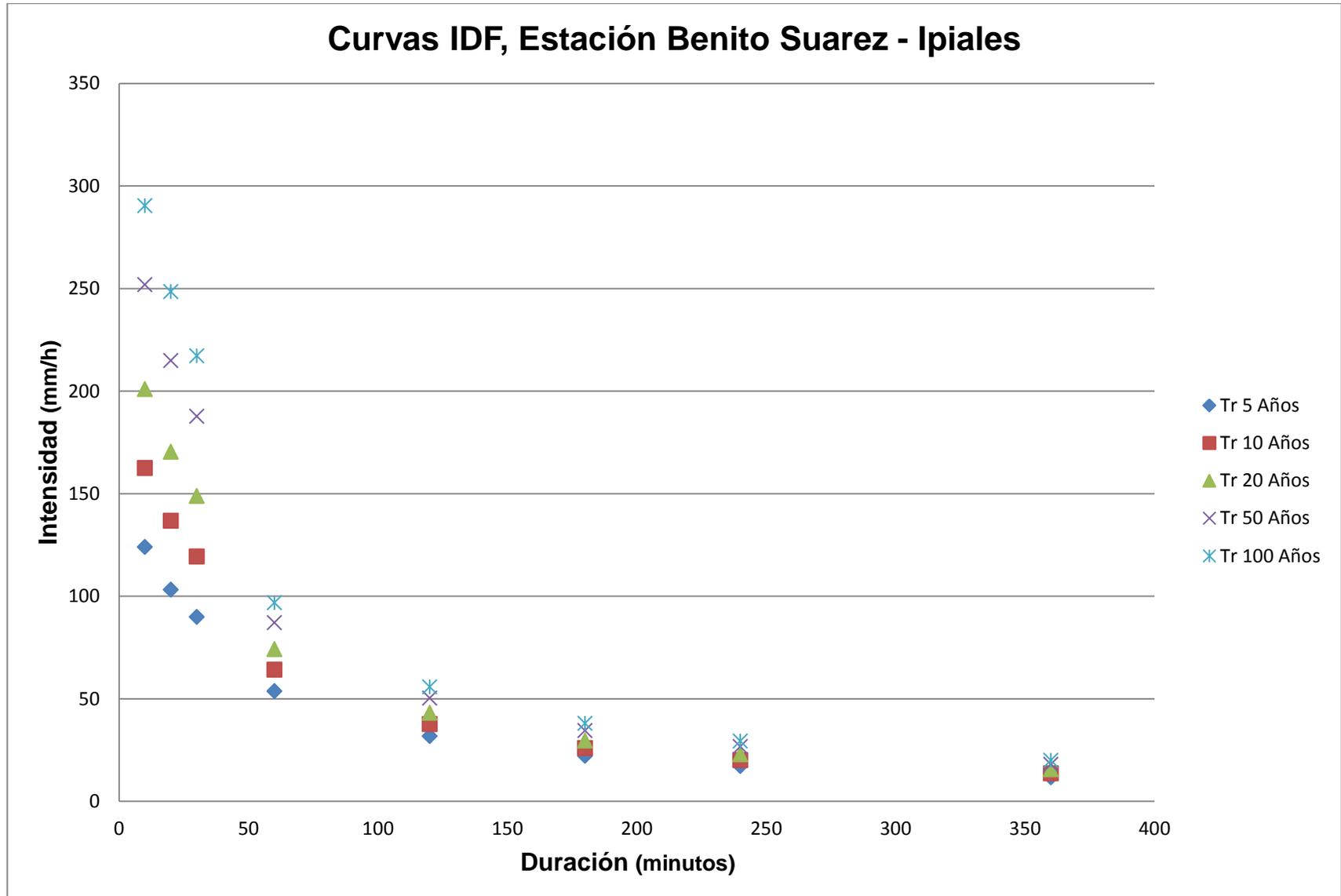


Figura 8 Curva IDF, Estación Benito Suarez

5. PRUEBA DE RESULTADOS

5.1. Introducción

En este capítulo explicaré la validación de los datos, es decir cómo se escogieron los datos ciclónicos, como se utilizaron las herramientas tecnológicas (Software) en esta clasificación. Además se explicaran y se darán los resultados exactos del ajuste de las distribuciones de Probabilidad, tanto mixtas como simples.

También se mostraran las pruebas utilizadas en el conjunto de datos, para corroborar si las decisiones tomadas en cada una de los análisis tenían un respaldo y sustento experimental en escritorio, las cuales siempre justificaron la decisión tomada.

5.2. Pruebas Bondad de Ajustes

Para la validación de las distribuciones de probabilidad estudiadas a partir de los resultados obtenidos en la investigación, se utilizó la prueba de hipótesis estadística de bondad de Ajuste “Chi-cuadrado”, la cual consiste en probar estadísticamente si los datos se ajustan a un modelo considerado.

Por lo anterior, se planteó la siguiente prueba de hipótesis:

- H_0 : los datos tienen una distribución de probabilidad dada.
- H_1 : los datos no tienen una distribución de probabilidad dada.
- Estadístico de prueba: estadístico (X^2) con $(n - 1)$ grados de libertad.
- Región de rechazo: *Se rechaza H_0 en favor de H_1 si $X^2 > X_0^2$*

Si valor p es mayor que 5% no se rechaza la hipótesis nula y por lo tanto los datos siguen la distribución dada con un 95% de confianza.

5.2.1. Pruebas Bondad de Ajustes En las distribuciones Simples

Para cada una de las estaciones caso de estudio en la presente investigación, se realizó la prueba de bondad de ajuste Chi-cuadrado, la cual junto con una prueba de hipótesis, ayudo a tomar una decisión de cual distribución de probabilidad que se ajustaba.

A continuación se presenta por estación, duración y distribución de probabilidad analizada, en donde se aceptó y se negó la tendencia de los datos según la función analizada.

Tabla 5-1
Prueba Chi-cuadrado para la estación San Luis.

Estación San Luis en el municipio de Ipiales								
Distribuciones de Probabilidad	χ^2 (Prueba Chi-cuadrado)							
	10	20	30	60	120	180	240	360
Gumbel	14.13	15.36	10.03	2.64	12.08	9.21	17.82	35.05
GEV	7.56	4.28	10.03	2.64	12.08	10.85	17.82	35.05
Weibull	8.38	12.08	4.28	6.33	6.74	12.08	12.81	35.05

Tabla 5-2*Prueba Chi-cuadrado para la estación Benito Suarez.*

Estación Benito Suarez en el municipio de Neiva								
Distribuciones de Probabilidad	χ^2 (Prueba Chi-cuadrado)							
	10	20	30	60	120	180	240	360
Gumbel	5.37	10.00	4.11	2.00	3.68	3.26	7.89	5.79
GEV	4.11	4.95	4.11	2.00	7.05	4.95	2.00	9.58
Weibull	6.21	7.05	2.38	1.58	7.05	1.16	2.00	9.58

Tabla 5-3*Prueba Chi-cuadrado para la estación Rafael Núñez.*

Estación Rafael Núñez en el municipio de Cartagena								
	χ^2 (Prueba Chi-cuadrado)							
Distribución de Probabilidad	10	20	30	60	120	180	240	360
Gumbel	11.20	4.80	8.00	2.80	4.80	1.20	1.20	3.20
GEV	16.40	4.40	5.60	4.40	1.60	1.20	1.20	3.20
Weibull	15.20	17.60	25.20	9.60	1.60	0.40	3.60	3.20

Podemos ver los resultados obtenidos en cada una de la serie de datos en las estaciones hidrológicas caso de estudio, pero también observamos unos cuadros resaltados con un color azul, lo cual quiere decir que según la prueba de hipótesis realizada no fueron aceptados en la distribución de probabilidad denominada en cada celda. Esto se ve explicado mejor en las siguientes tablas, donde se identifica por duración y distribución de probabilidad.

Tabla 5-4*Prueba Chi-cuadrado para la estación Benito Suarez.*

Estación Benito Suarez								
Distribuciones de Probabilidad	χ^2 (Prueba Chi-cuadrado)							
	10	20	30	60	120	180	240	360
Gumbel	H0	H0	H0	H0	H0	H0	H0	H0
GEV	H0	H0	H0	H0	H0	H0	H0	H1
Weibull	H0	H0	H0	H0	H0	H0	H0	H0

Tabla 5-5*Prueba Chi-cuadrado para la estación Rafael Núñez.*

Estación Rafael Núñez								
Distribuciones de Probabilidad	Resultado de prueba de Hipótesis							
	10	20	30	60	120	180	240	360
Gumbel	H0	H0	H0	H0	H0	H0	H0	H0
GEV	H1	H1	H1	H0	H0	H0	H0	H1
Weibull	H1	H1	H1	H0	H0	H0	H0	H0

Tabla 5-6*Prueba Chi-cuadrado para la estación San Luis.*

Estación San Luis	
Distribuciones de Probabilidad	Resultado de prueba de Hipótesis

	10	20	30	60	120	180	240	360
Gumbel	H1	H1	H0	H0	H0	H0	H1	H1
GEV	H0	H0	H1	H1	H1	H1	H1	H1
Weibull	H1	H1	H1	H1	H1	H1	H0	H1

Observando las tablas anteriores, vemos que para los 360 min en la estación San Luis del municipio de Ipiales, no se aceptó que los datos se comportaran para ninguna distribución de probabilidad (Gumbel, GEV y Weibull). Lo que quiere decir que se tuvo que buscar una distribución de probabilidad poco utilizada en la hidrología para el ajuste de estos datos, en donde se ajustara este comportamiento de los datos, siendo la distribución de probabilidad fue Log-normal de 3 parámetros en donde fueron aceptados el comportamiento de los datos.

5.2.2. Pruebas Bondad de Ajustes En las distribución de Probabilidad Mixta

En este investigación se utilizó la distribución mixta de probabilidad Doble Gumbel, y tal como se explicó en los capítulos anteriores, en donde se obtuvieron un mayor conjunto de datos ciclónicos pertenecientes a la segunda población de datos, fue en la estación Benito Suarez con un total de 3 datos ciclónicos y en la estación Rafael Núñez con un total de 2 datos ciclónicos.

En nuestro caso de investigación específicamente, el cálculo de la bondad de ajuste se dividió en dos conjuntos, el conjunto de datos no ciclónicos y el conjunto de datos no ciclónicos, en los cuales arrojo lo siguientes resultados.

Como se observa en las tabla 5-7 a la 5-9 , para los datos ciclónicos, es decir los datos por el cual se encontraron coincidencia con los fenómenos climáticos ocurridos en la misma fecha donde se selecciona la precipitación máxima en el año. Siempre dio un buen resultado en la prueba de bondad de ajuste, lo cual se justifica que esta prueba en los datos ciclónicos se realizaba en un máximo de 3 datos, lo cual hace muy difícil que no de un ajuste en los datos.

5.3. Ajuste de Los Parámetros de la Distribución Probabilidad Doble Gumbel.

Los resultados obtenidos mediante las ecuaciones descritas en el marco teórico se comprobaron con la simulación de Montecarlo, la cual permite resolver problemas matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias. (Rodríguez, 2011).

Dicha simulación se realizó mediante la macro realizada en Excel por la organización Oracle, bajo el programa Cristal Ball con licencia académica. En la cual se mostraron resultados muy parecidos a los obtenidos mediante las fórmulas de cada parametro.

5.4. Pruebas en la construcción de las Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF).

Para la construcción de las curvas, se realizaron algunas pruebas, para poder corroborar que los datos que estábamos clasificando como datos ciclónicos, en realidad si se comportaran como tal.

Es por esto que para la estación Rafael Núñez, como lo vimos en los capítulos anteriores, cuando se buscó la concordancia de los fenómenos ciclónicos, arrojo que tenía dentro de su conjunto de datos, dos datos por duración con esa tendencia (Ciclónicos), pero teníamos que comprobar si en realidad solo eran esos datos o en Cartagena habían sucedidos eventos muy localizados que pudieran haber alterado las precipitaciones en el sector. Por esto se tomaron tres datos ciclónicos es decir se tomó el dato que seguía en cada duración, después del último ciclónico identificado, resultando, que el comportamiento de la gráfica no variaba y por lo contrario el dato mayor se alejaba un poco más de la línea de datos ajustado.

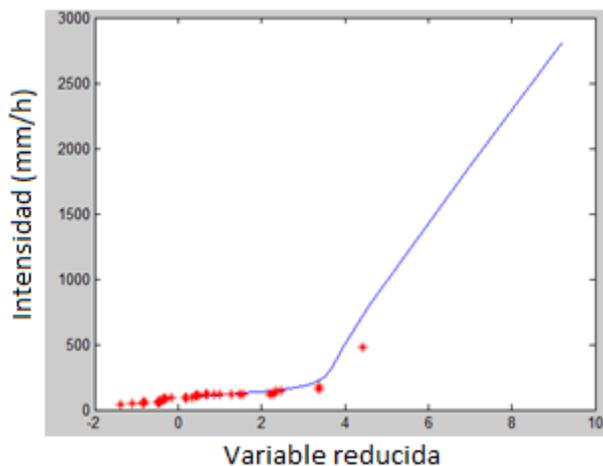


Figura 9 Distribución Doble Gumbel con 2 datos Ciclónicos con duración de 10 Minutos

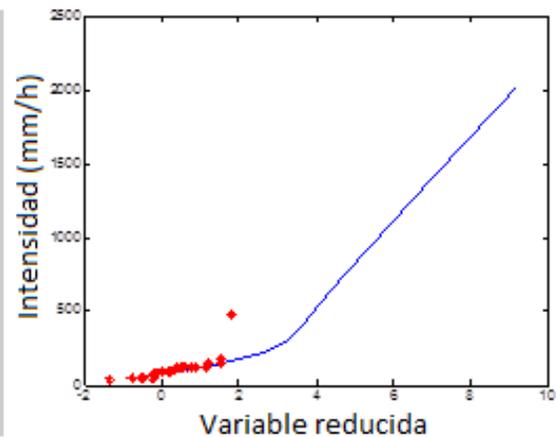


Figura 10 Distribución Doble Gumbel con 3 datos Ciclónicos con duración de 10 Minutos

En las Figuras 6 y 7, se puede observar gráficamente que se da un mejor ajuste de los cuando hay solo 2 datos ciclónicos, que cuando hay 3 y de igual manera se presenta en las otras duraciones.

De igual manera, también se tomaron 4, 5 y 6 datos ciclónicos en secuencia de los datos más altos registrados en nuestra tabla organizada. Dejando como resultado algo muy parecido a lo anterior, pero cada vez que aumentaban los datos ciclónicos, se iba perdiendo el ajuste.

Ahora bien, para la estación Benito Suarez, se observó algo muy distinto a lo anterior, es decir cuando se cruzó la información de huracanes y fenómenos ciclónicos con los datos de precipitaciones más altos en el año, se encontró coincidencia con 9 datos, pero al probar y verificar el ajuste disminuyendo este número de datos, es decir bajando el número de datos ciclónicos. El ajuste tornaba hacer mejor, siendo 3 el números de datos ciclónicos que dio el mejor ajuste y comportamiento como 2 poblaciones. Por lo que se concluye que el número de datos ciclónicos reales para esta estación son tres y no nueve como lo mostraba la coincidencia con los datos de la NOAA.

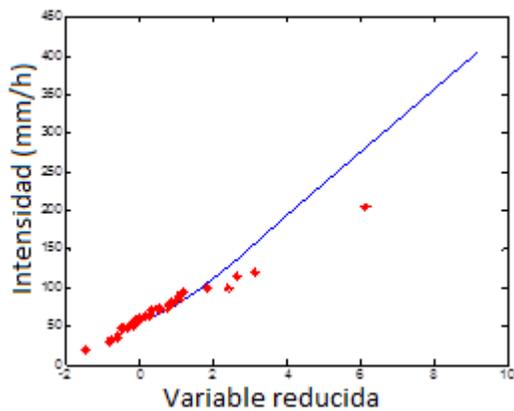


Figura 11 Distribución Doble Gumbel con 9 datos Ciclónicos con duración de 20 Minutos

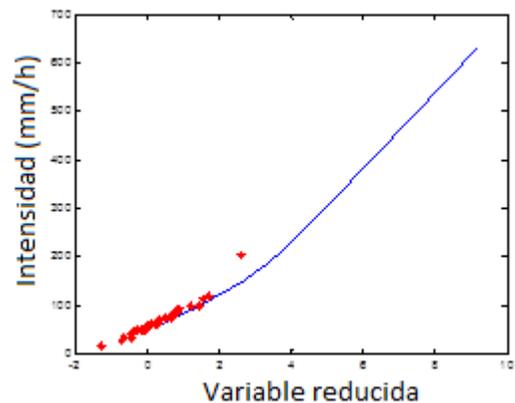


Figura 12 Distribución Doble Gumbel con 3 datos Ciclónicos con duración de 10 Minutos

En las gráficas 8 y 9, se observa de una mejor manera lo explicado en el párrafo anterior. De igual manera en el Anexo 1, encontraremos cada una de las gráficas arrojadas por el ajuste de la distribución Doble Gumbel.

Finalmente para la estación San Luis, se obtuvieron de igual forma que en las estaciones anteriores los datos ciclónicos. Para esta estación se obtuvieron básicamente 2 datos ciclónicos, los cuales fueron analizados con la distribución mixta de probabilidad, obteniendo una gráfica que se comportan los datos como una sola población. De igual forma se probó con tres valores ciclónicos obteniendo los mismos resultados.

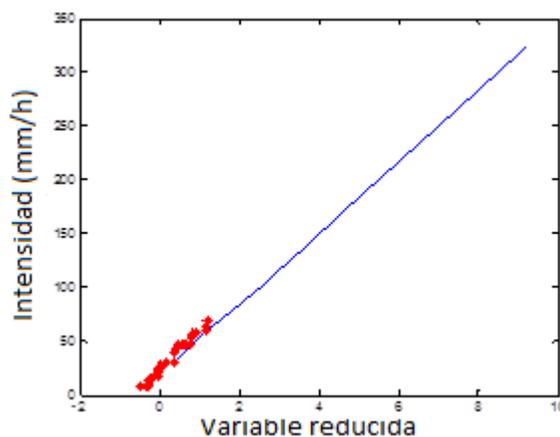


Figura 13 Distribución Doble Gumbel con 2 datos Ciclónicos con duración de 20 Minutos

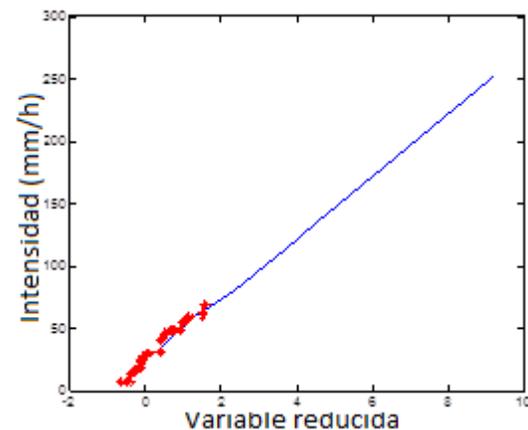


Figura 14 Distribución Doble Gumbel con 3 datos Ciclónicos con duración de 20 Minutos

En las gráficas, podemos observar que en ninguno de los dos casos, se observó una tendencia de dos poblaciones en el conjunto de datos, es por esto que se toma la decisión de realizar el análisis de los datos con las distribuciones simples

de probabilidad, destacando que para esta estación hidrológica en las distribuciones simples, Gumbel no se ajustó en la mayoría de las duraciones.

5.4.1. Pruebas de registros en la tendencia de los datos con la distribución de Probabilidad Doble Gumbel (Validación)

En las estaciones a pesar de variar un poco los datos ciclónicos, también se quiso comprobar un poco como se comportaba la distribución de probabilidad Doble Gumbel, con unos años menos de registro, por lo que se fue bajando de 10 en 10 años de registro, excluyendo el último conteo donde se dejó 15 años de registro, es decir la prueba menor que se hizo con los años de registro fueron 15 años.

En la cual se tomó como guía la investigación realizada sobre la aplicación de diferentes metodologías para estimación de curvas Intensidad – Frecuencia – Duración en Colombia, en donde se validaban cada una de las metodologías propuestas, con los registros menores a $T_r = 2.33$. Lo que dio en su investigación muy buenos resultados. (Vélez, Poveda, Mesa, Hoyos, Mejía, Salazar y Viera, 2002)

5.4.1.1. Estación Sinóptica Rafael Núñez

Para la estación Rafael Núñez, se realizaron años de registros con 15, 20, 30 y 40, en los cuales cada vez que se iba bajando los años de registros, se iban desajustando la tendencia del conjunto de datos de dos poblaciones como se muestra en las Figuras 12 y 13.

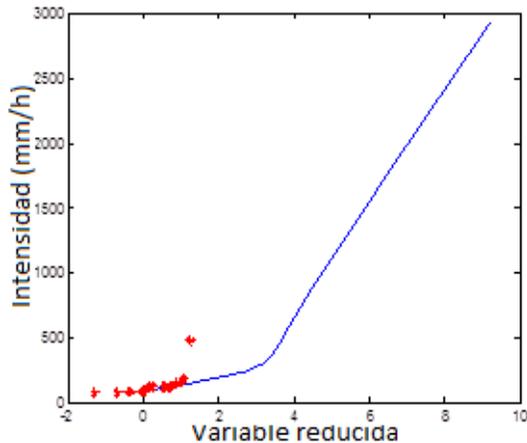


Figura 15. Distribución Doble Gumbel con 2 datos Ciclónicos con duración de 10 Minutos, con 30 años de periodo de registros

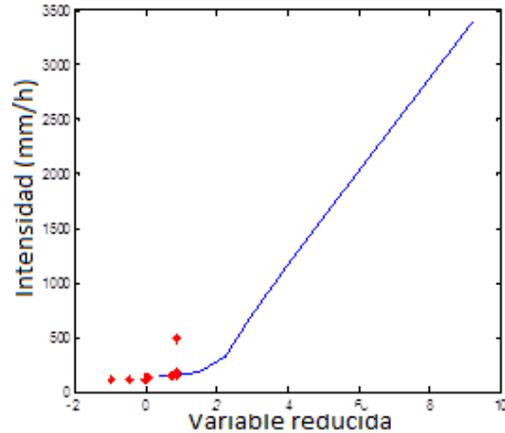


Figura 16. Distribución Doble Gumbel con 2 datos Ciclónicos con duración de 10 Minutos, con 15 años de periodo registro.

De igual manera en las otras duraciones se observa una tendencia igual a la comparación mostrada anteriormente.

5.4.1.2. Estación Sinóptica San Luis

Para la estación San Luis, se realizaron con el objetivo de encontrar si el conjunto de datos denotaba un comportamiento como dos poblaciones, si se aumentaban los datos ciclónicos, lo cual nos arrojó los mismos resultados, es decir los datos siguieron comportándose como una sola población.

5.4.1.3. Estación Sinóptica Benito Suarez

Para la estación Benito Suarez, se realizaron años de registros con 15, 20, 30 y 40, en los cuales cada vez que se iba bajando los años de registros, se iban

desajustando la tendencia del conjunto de datos de dos poblaciones como se muestra en las siguientes imágenes.

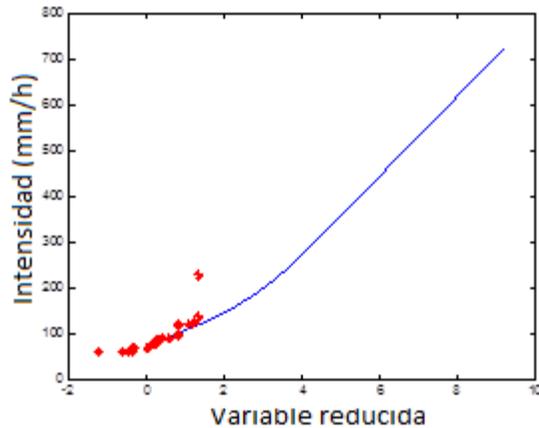


Figura 17 Distribución Doble Gumbel con 3 datos Ciclónicos con duración de 10 Minutos, con 30 años de registros

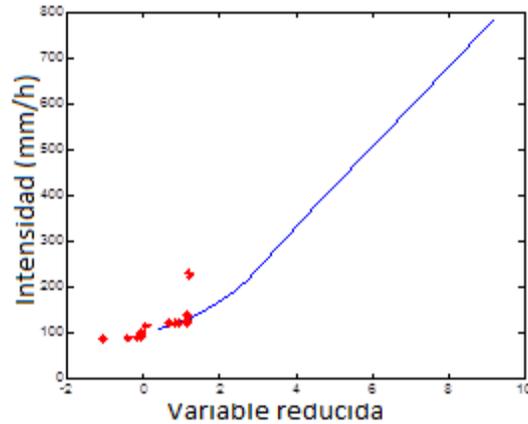


Figura 18 Distribución Doble Gumbel con 3 datos Ciclónicos con duración de 10 Minutos, con 15 años de registros

De igual manera en las otras duraciones (Ver anexo) se observa una tendencia igual a la comparación mostrada anteriormente, en donde se va perdiendo el ajuste en la medida donde hay una menor cantidad de datos.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se desarrolló una aproximación metodológica, que ayuda a elaborar curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF), utilizando la distribución mixtas de probabilidad Doble Gumbel, tal como se presenta en el ítem 3.3.3 del documento.

Se Identifica que en la estación San Luis, los datos no se comportan como dos poblaciones, por tanto no se puede aplicar la metodología planteada en la presente

investigación, es decir para esta estación es suficiente la construcción de las curvas IDF con distribuciones de probabilidad simples.

Se relacionan los fenómenos macro-climáticos registrados en la NOAA con los datos de las estaciones casos de estudio, encontrando relaciones en las fechas de ocurrencia de dichos fenómenos con los eventos máximos registrados en cada una de las estaciones San Luis, Benito Suarez y Rafael Núñez.

Todos los análisis se realizaron bajo un nivel de confianza del 95%, con el cual se tuvieron los resultados de la prueba de hipótesis. Cabe destacar que las hipótesis que se rechazaron bajo este nivel de confianza, si se aceptaron para un nivel de confianza del 99%

Se emplea la distribución mixta de probabilidad doble Gumbel en el análisis de los datos, resultando para las primeras duraciones (10, 20 y 30 minutos) una buena herramienta.

Se comprueba que al utilizar la distribución de probabilidad mixta Doble Gumbel, en la estación San Luis, los datos no están conformados como dos poblaciones, esto pudo ocurrir porque en realidad no se ajustan a la distribución Gumbel y no tienen a su comportamiento. Por lo cual se debe utilizar otra combinación en la distribución de probabilidad mixta.

Cuando se construyen las curvas IDF, diagnosticando en cada una de las duraciones, la cual tiene un comportamiento como dos poblaciones, se puede observar notablemente los datos que son denominados como datos ciclónicos, ya

que estos se ubican en una parte muy alta de la gráfica, destacándose con una mayor intensidad.

Se nota que la construcción de curvas IDF bajo las distribuciones de probabilidad mixta (Doble Gumbel), arrojan resultados muy distintos (Mayores) que cuando son analizados bajo las distribuciones de probabilidad sencillas, lo cual debe tenerse muy en cuenta, ya que al construir una obra de drenaje, la tormenta podría ser de tal manera que esta pueda colapsar y causar graves daños a la comunidad.

Como se ha demostrado por algunos investigadores, cada vez que van pasando los años, las precipitaciones acumuladas en cada región van siendo las mismas, pero la intensidad de estas si ha ido cambiando notablemente, es decir una lluvia que años anteriores se registraba en 2 días, en la actualidad colombiana ha llegado a registrarse en un solo día, todo esto en términos de intensidad, por lo cual el tema de construir las curvas IDF bajo las distribuciones mixtas de probabilidad, debe ser de uso obligatorio. (Hoyos, 2014).

6.1. Trabajos Futuros

Para la secuencia de mi investigación, se plantea un trabajo futuro muy interesante, el cual trata de realizar distintas combinaciones de distribuciones de probabilidad, con el fin de crear distribuciones mixtas de probabilidad bastante robustas a la hora de analizar los datos, es decir como se pudo observar en la estación San Luis, el comportamiento de los datos, no se dio como dos poblaciones, pero de crear una combinación de funciones de probabilidad como la Log-Pearson III (Distribución en la que fueron aceptadas todas las duraciones en las distribuciones

simples), de pronto esto podría encontrar un mejor comportamiento y ajuste de los datos.

Otro trabajo que se pudiera realizar, es crear un software, que analice automáticamente, el comportamiento del conjunto de datos e informarle al investigador si la muestra que desea analizar se comporta como como dos poblaciones, o en realidad es mejor realizar el análisis con una sola población. Lógicamente el software, debe comprobar este comportamiento con varias combinaciones de distribuciones de probabilidad (Distribuciones de Probabilidad Mixta)

REFERENCIAS

- Aparicio F. (1992). Fundamentos de Hidrología de Superficie, Balderas, México Editorial: Limosa.
- Bustamante L.G. y Rolon A.D. (2000) *Update Curves Intensity-Duration-Frequency Precipitación in Paraguay, Paraguay, Universidad Nacional de Paraguay*
- Casas M.C. (1995). Análisis Espacial y temporal de las lluvias extremas en Catalunya. Modelización y clasificación objetiva. Tesis de doctorado en Astronomía y Meteorología. Universidad de Barcelona, Barcelona , España
- Evans y Rosenthal (2005). Probability and Statistics. The Science of Uncertainty. New York and Basingstoke. Editorial: W.H Freeman and Company.
- Ganancias Fernando (2011). Catedra de Hidrología y Procesos Hidráulicos. Universidad Nacional de Córdoba. Recuperado en 14 de enero de 2015 de http://www.efn.uncor.edu/departamentos/hidraul/hidrologia/Auxiliar/2011_Estadistica_Hidrologica.pdf.
- Hong H.P., Ye W. Estimating extreme wind speed based on regional frequency analysis Structural Safety, Volume 47, March 2014, Pages 67-77.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2014). Meteorología Aeronáutica. Recuperado el 07 de Octubre del 2014, de http://www.meteoaeronautica.gov.co/jsp/estado-del-tiempo-en-aeropuertos_749

Kingumbi, A. & Mailhot, A. (2010) Courbes Intensité–Durée–Fréquence (IDF): comparaison des estimateurs des durées partielles et des maximums annuels. *Hydrol. Sci. J.* **55**(2), 162–176.

National Oceanic And Atmospheric Administration (2013). National Hurricane Center. Recuperado 15 de noviembre de 2013, de http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml

National Oceanic And Atmospheric Administration (2013). National Hurricane Center. Recuperado 15 de noviembre de 2013, de Recuperado 15 de noviembre de 2013, de <http://www.nhc.noaa.gov>

Pizarro R. (2001). Compared analysis of Intensity-Duration-Frequency curves for 6 pluviograph stations. (Maule Región, Chile). Departamento de Gestión Forestal y Ambiental. Universidad de Talca, Talca, Chile

Puello L.S. Y Romero V. E. (2012). Propuesta Metodológica Para La Elaboración De Curvas Intensidad- Duración –Frecuencia, Utilizando Distribuciones Mixtas De Probabilidad. Caso De Estudio, Estación Sinóptica Principal Aeropuerto Rafael Núñez. Tesis de Ingeniería Civil no publicada, Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena, Colombia

Raynal J.A. y M.E. Raynal (2004). Calculation of Confidence Limits for the Probability Distribution of Extreme Values of Type I for Two Populations.

Artículo publicado en Scielo. Universidad de las Américas – Puebla. Puebla, México.

Ríos-Alejandro, José G. (2011). Temperaturas extremas en la ciudad de Monterrey N. L. México. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(2), 225-230. Recuperado en 14 de enero de 2015, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018632312011000200005&lng=es&tlng=es. 10.5154/r.rchscfa.2010.06.036.

Suarez B.N. (2011). Caracterización de Eventos Extremos de Precipitación, Empleando Distribuciones Mezcladas. Tesis de Maestría en Recursos Hídricos y Ambiental no publicada, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México

Tauber Liliana (2001). La construcción del significado de la distribución normal a partir de actividades de análisis de datos. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina. Recuperado en 14 de enero de 2015 de http://www.ugr.es/~jgodino/funciones-semioticas/tauber_dnnormal.pdf

Van de Vyver, H. & Demarée, G. R. (2010) Construction of Intensity–Duration–Frequency (IDF) curves for precipitation at Lubumbashi, Congo, under the hypothesis of inadequate data. *Hydrol. Sci. J.* 55(4), 555–564.

Vásquez R., Redaño A. y Lorente J. (1987). Curvas IDF. Barcelona – Fabra, Barcelona , *Revista de Obras Publicas*, 1, 91 – 102.

Vélez, J., G. Poveda, O. Mesa, C. Hoyos, J. Mejía, D. Quevedo, L. Salazar & S. Vieira. 2002: Aplicación de diferentes metodologías para estimación de curvas intensidad – frecuencia – duración en Colombia. Meteorol. Colomb. 6:91-100. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. – Colombia.

ANEXO