



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

COMPARACIÓN DE CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA (IDF) CONSTRUIDAS A PARTIR DEL MÉTODO ESTÁNDAR Y WENZEL PARA CUATRO ESTACIONES DE LA CUENCA MARÍA LINDA Y UNA ESTACIÓN DE LA CUENCA CAHABÓN

Gustavo Francisco Izquierdo Alvarado

Asesorado por la Inga. Karla Giovanna Judith Pérez Loarca

Guatemala, abril de 2019

UNIVERSIDAD SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

COMPARACIÓN DE CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA (IDF) CONSTRUIDAS A PARTIR DEL MÉTODO ESTÁNDAR Y WENZEL PARA CUATRO ESTACIONES DE LA CUENCA MARÍA LINDA Y UNA ESTACIÓN DE LA CUENCA CAHABÓN

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

GUSTAVO FRANCISCO IZQUIERDO ALVARADO
ASESORADO POR LA INGA. KARLA GIOVANNA JUDITH PÉREZ LOARCA

AL CONFERIRSE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, ABRIL DE 2019

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

COMPARACIÓN DE CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA (IDF) CONSTRUIDAS A PARTIR DEL MÉTODO ESTÁNDAR Y WENZEL PARA CUATRO ESTACIONES DE LA CUENCA MARÍA LINDA Y UNA ESTACIÓN DE LA CUENCA CAHABÓN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 21 de octubre de 2018.

Gustavo Francisco Izquierdo Alvarado

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Claudio César Castañón Contreras
EXAMINADOR	Ing. Alejandro Castañón López
EXAMINADOR	Ing. Fredy Adolfo Alvarado Hernández
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser la luz que ha guiado mi vida y permitirme lograr esta meta.
- Mis padres** Persida Alvarado Rivera y Daniel Izquierdo Pérez, por su apoyo y amor incondicional, su gran ejemplo de superación y lecciones de vida las cuales me han formado.
- Mi hermano** Abdiel Alejandro Izquierdo Alvarado, por tu cariño y apoyo.
- Mi abuela** Rosa Eligia Rivera, por su apoyo incondicional al estar siempre pendiente de mí.
- Mis tías y tíos** Alma, Norfas, Mefibocet, Walter Mérida y Saúl Hernández, por su incondicional ayuda y apoyo. En todo momento siempre estaré agradecido.
- Mis primos** Walter Mérida, Almy Mérida, Rodrigo Mérida, Georgeangel Mérida, Ibrandy Hernández, Jorge Hernández, Leydi Hernández, Rosy Hernández, Mefibocet Alvarado; los llevo en mi corazón.

Mi familia en general

Por tantos momentos que compartimos y el ejemplo que me han brindado.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad San Carlos de Guatemala	Por formar parte de profesionales egresados de tan magna casa de estudios profesionales.
Facultad de Ingeniería	A todo el personal docente que, día a día, ofrece entusiasmo para formar profesionales.
Mis amigos de la Facultad	David Marroquín, Alberto Castillo, Carlos Serrano, Quevin Pichiya, Fernando Castillo, Cristian Morales y Javier López, por todas horas de convivencia y estudio.
Mi prometida	Carmen Medina, por brindarme tu amor incondicional y apoyo hasta el final, te amo.
Inga. Karla Giovanna Pérez	Por compartir su conocimiento y asesórame en la realización de este trabajo de graduación.
Instituto Nacional de Electrificación	Al Ing. Juan Carlos Montepeque, por abrir las puertas del área de hidrología y compartir amablemente registros pluviográficos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. DEFINICIONES HIDROLÓGICAS	1
1.1. Ciclo hidrológico	1
1.1.1. Proceso del ciclo hidrológico	2
1.1.2. Agua almacenada en los océanos.....	3
1.1.3. Océanos en movimiento	3
1.1.4. Evaporación.....	4
1.1.5. Agua en la atmósfera.....	4
1.1.6. Condensación.....	4
1.1.7. Precipitación	5
1.1.8. Escorrentía	5
1.1.9. Infiltración	5
1.1.10. Transpiración	5
1.2. Proceso de precipitación	6
1.2.1. Creación de precipitaciones.....	6
1.2.2. Lluvia	7
1.2.2.1. Llovizna	7
1.2.2.2. Chubasco.....	7
1.2.2.3. Granizo	7

1.2.3.	Tipos de precipitación	8
1.2.3.1.	Precipitación ciclónica o frontal	8
1.2.3.2.	Precipitaciones por convergencia.....	8
1.2.3.3.	Precipitación convectiva	8
1.2.3.4.	Precipitación orográfica	9
1.2.4.	Medición de precipitación en Guatemala.....	9
1.2.5.	Estaciones climáticas	10
1.2.6.	Componentes de una estación climática.....	10
1.2.6.1.	Terreno circundante	11
1.2.6.2.	Parcela meteorológica.....	11
1.2.6.3.	Abrigo meteorológico	11
1.2.6.4.	Oficina para el observador	12
1.2.6.5.	Instrumentación.....	12
1.2.7.	Tipos de estaciones climáticas.....	13
1.2.7.1.	Estaciones climáticas tipo A.....	13
1.2.7.2.	Estaciones climáticas tipo B.....	13
1.2.7.3.	Estaciones climáticas tipo C.....	13
1.2.7.4.	Estaciones climáticas tipo D.....	14

2.	DEFINICIÓN DE CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA (IDF).....	15
2.1.	Elementos asociados a las curvas IDF	16
2.2.	Aplicaciones de las curvas IDF	17
2.3.	Metodología para la construcción de curvas IDF	18
2.4.	Recopilación de datos	18
2.5.	Lectura de bandas pluviográficas.....	18
2.6.	Selección de valores máximos.....	19
2.7.	Calculo de las curvas IDF	20

2.7.1.	Ajuste del modelo estándar y el propuesto por Wenzel, a cada estación climática	21
2.7.2.	Descripción de la región de estudio	22
2.7.3.	Estaciones climatológicas estudiadas	22
2.7.4.	Estación climática La Pampa.....	27
2.7.5.	Estación climática Guatemala Sur	28
2.7.6.	Amatitlán.....	29
2.7.7.	Estación climática Embalse Jurúm Marinalá.....	30
2.7.8.	Estación climática El Volcán	31
3.	ESTADÍSTICA UTILIZADA PARA EL CÁLCULO DE CURVAS IDF	33
3.1	Parámetros estadísticos	33
3.1.1.	Medidas de tendencia central	33
3.1.1.1.	Media	34
3.1.1.2.	Mediana.....	34
3.1.1.3.	Moda.....	34
3.1.1.4.	Medidas de dispersión	35
3.1.1.5.	Rango	35
3.1.1.6.	Varianza	35
3.1.1.7.	Desviación estándar	36
3.1.1.8.	Coeficiente de asimetría	36
3.1.2.	Probabilidad.....	37
3.1.3.	Distribuciones de probabilidad.....	38
3.1.3.1.	Distribución normal	38
3.1.3.2.	Distribución binomial.....	39
3.1.3.3.	Distribución lognormal	40
3.1.3.4.	Distribución exponencial.....	41
3.1.3.5.	Distribuciones extremas	41
3.1.3.5.1.	Distribución	

	de Gumbel.....	42
4.	REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE CURVAS IDF	43
4.1.	Estación climática La Pampa	43
4.2.	Estación climática Guatemala Sur	49
4.3.	Estación compuertas Amatitlán	54
4.4.	Estación climática Embalse Jurúm Marinalá	59
4.5.	Estación climática El Volcán	64
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	69
5.1.	Modelos de ajuste	70
5.2.	Estación climática La Pampa	71
5.3.	Estación climática Guatemala Sur	73
5.4.	Estación climática Compuertas Amatitlán	75
5.5.	Estación climática Embalse Jurúm Marinalá	77
5.6.	Estación climática El Volcán	79
5.7.	Comparación de errores relativos	81
5.7.1.	Estación climática La Pampa	82
5.7.2.	Estación climática Guatemala Sur.....	83
5.7.3.	Estación climática Compuertas Amatitlán	84
5.7.4.	Estación climática Embalse Jurúm Marinalá	85
5.7.5.	Estación climática El Volcán.....	86
	CONCLUSIONES.....	93
	RECOMENDACIONES	95
	BIBLIOGRAFÍA.....	97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ciclo hidrológico	3
2.	Esquema de ciclo hidrológico.....	6
3.	Partes de estación climática.....	14
4.	Familia de curvas IDF	16
5.	Banda pluviográfica.....	19
6.	Mapa de localización de cuenca María Linda y Cahabón en República de Guatemala.....	24
7.	Estaciones climatológicas utilizadas en cuenca María Linda	25
8.	Estaciones climatológicas utilizadas en cuenca Cahabón	26
9.	Estación La Pampa	27
10.	Estación Guatemala Sur	28
11.	Estación Amatitlán.....	29
12.	Estación Embalse Jurúm Marinalá.....	30
13.	Estación El Volcán	31
14.	Curvas IDF de la estación La Pampa, utilizando la distribución normal	46
15.	Curvas IDF de la estación La Pampa, utilizando la distribución de Gumbel.....	48
16.	Curvas IDF de la estación Guatemala Sur, utilizando la distribución normal	51
17.	Curvas IDF de la estación Guatemala Sur, utilizando la distribución de Gumbel.....	53
18.	Curvas IDF de la estación Compuertas Amatitlán, utilizando la distribución normal	56

19.	Curvas IDF de la estación Compuertas Amatitlán, utilizando la distribución Gumbel	58
20.	Curvas IDF de la estación Embalse Jurúm Marinalá, utilizando la distribución normal.....	61
21.	Curvas IDF de la estación Embalse Jurúm Marinalá, utilizando la distribución de Gumbel	63
22.	Curvas IDF de la estación El Volcán, utilizando la distribución normal.....	66
23.	Curvas IDF de la estación El Volcán, utilizando la distribución de Gumbel	68
24.	Código de programación en Canopy para coeficientes	70

TABLAS

I.	Estaciones climatológicas utilizadas	23
II.	Máxima precipitación según discretización en estación La Pampa	44
III.	Probabilidad de intensidad de lluvia máxima en la estación climática La Pampa utilizando distribución normal.....	45
IV.	Probabilidad de intensidad de lluvia máxima en la estación climática La Pampa utilizando distribución de Gumbel	47
V.	Máxima precipitación según discretización en estación Guatemala Sur.....	49
VI.	Probabilidad de intensidad de lluvia máxima en la estación climática Guatemala Sur utilizando distribución Normal	50
VII.	Probabilidad de intensidad de lluvia máxima en la estación climática Guatemala Sur utilizando distribución de Gumbel	52
VIII.	Máxima precipitación según discretización en estación Compuertas Amatitlán	54

IX.	Probabilidad de intensidad de lluvia máxima en la estación climática Compuertas Amatitlán utilizando distribución normal.....	55
X.	Probabilidad de intensidad de lluvia máxima en la estación climática Compuertas Amatitlán utilizando distribución de Gumbel.....	57
XI.	Máxima precipitación según discretización en estación Embalse Jurúm Marinalá	59
XII.	Probabilidad de intensidad de lluvia máxima en la estación climática Embalse Jurúm Marinalá utilizando distribución normal...	60
XIII.	Probabilidad de intensidad de lluvia máxima en la estación climática Embalse Jurúm Marinalá utilizando distribución de Gumbel.....	62
XIV.	Máxima precipitación según discretización en estación El Volcán..	64
XV.	Probabilidad de intensidad de lluvia máxima en la estación climática El Volcán utilizando distribución normal	65
XVI.	Probabilidad de intensidad de lluvia máxima en la estación climática El Volcán utilizando distribución Gumbel.	67
XVII.	Coeficientes del modelo estándar para la estación climática La Pampa.....	71
XVIII.	Coeficientes del modelo propuesto por Wenzel para la estación climática La Pampa	72
XIX.	Coeficientes del modelo estándar para la estación climática Guatemala Sur	73
XX.	Coeficientes del modelo propuesto por Wenzel para la estación climática Guatemala Sur	74
XXI.	Coeficientes del modelo estándar para la estación climática Compuertas Amatitlán.....	75
XXII.	Coeficientes del modelo propuesto por Wenzel para la estación climática Compuertas Amatitlán	76

XXIII.	Coeficientes del modelo estándar para la estación climática Embalse Jurúm Marinalá	77
XXIV.	Coeficientes del modelo propuesto por Wenzel para la estación climática Embalse Jurúm Marinalá	78
XXV.	Coeficientes del modelo estándar para la estación climática El Volcán.....	79
XXVI.	Coeficientes del modelo propuesto por Wenzel para la estación climática El Volcán.....	80
XXVII.	Sumatoria de errores relativos al cuadrado para la estación climatológica La Pampa.....	82
XXVIII.	Sumatoria de errores relativos al cuadrado para la estación climatológica Guatemala Sur	83
XXIX.	Sumatoria de errores relativos al cuadrado para la estación climatológica Compuertas Amatitlán.....	84
XXX.	Sumatoria de errores relativos al cuadrado para la estación climatológica Embalse Jurúm Marinalá.....	85
XXXI.	Sumatoria de errores relativos al cuadrado para la estación climatológica El Volcán	86
XXXII.	Ecuaciones que mejor se ajustan para la estación La Pampa.....	88
XXXIII.	Ecuaciones que mejor se ajustan para la estación Guatemala Sur	89
XXXIV.	Ecuaciones que mejor se ajustan para la estación Compuertas Amatitlán.....	90
XXXV.	Ecuaciones que mejor se ajustan para la estación Embalse Jurúm Marinalá	91
XXXVI.	Ecuaciones que mejor se ajustan para la estación El Volcán.....	92

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
'	Minuto sexagesimal
"	Segundo sexagesimal
Σ	Sumatoria
°	Grado sexagesimal
E+	Exponencial de base 10
f(x)	Función de probabilidad
I	Intensidad
km	Kilómetro
m	Metros
Me	Coefficiente de asimetría
mm	Milímetros
mm/h	Milímetros por hora
Mo	Coefficiente de asimetría
n	Número de valores
P	Profundidad de precipitación
P(A)	Probabilidad de un evento
SK1	Coefficiente de asimetría
t	Tiempo de retorno
Td	Duración de precipitación
x	Variable estudiada
Xi	Conjunto valores de variable
α	Parámetro de función Gumbel
β	Parámetro de función Gumbel

ΔP	Diferencia de precipitación
ΔT	Diferencia de tiempo
λ	Tasa media de ocurrencia
π	Función pi
μ	Media
σ	Desviación estándar
σ^2	Varianza

GLOSARIO

Aleatorio	Selección al azar.
Aliviadero	Obra civil con la función de verter el exceso de agua generalmente en presas.
Caudal	Cantidad de agua que se registra en una vertiente con el dimensional volumen sobre tiempo.
Ciclón	Vientos a gran velocidad producidos por una depresión atmosférica que avanza en círculos girando sobre sí mismo.
Condensación	Proceso por el cual el vapor de agua del aire se transforma en agua líquida.
Cuenca	Área circundante cuya lluvia escurre hacia un mismo punto.
-	
Dique	Estructura civil con el objetivo de contener la fuerza del flujo de agua.
Discretización	Operación estadística que permite separar en clases una serie de variables.
IDF	Intensidad-duración-frecuencia

Microclima	Condiciones climáticas particulares de una pequeña zona determinada.
Periodo de retorno	Intervalo de tiempo medio transcurrido entre las ocasiones en el que ocurre un evento de una variable hidrológica con un valor o intensidad por encima de un valor dado.
Precipitación	Producto líquido o sólido de la condensación o sublimación del vapor de agua que cae de las nubes o es depositado desde el aire en el suelo.

RESUMEN

Este trabajo de investigación se basa en la construcción de curvas de intensidad-duración-frecuencia en dos cuencas de la República de Guatemala utilizando cinco estaciones climáticas. El inicio de la construcción de curvas IDF fue la lectura y análisis del registro aproximado de 20 años de bandas pluviográficas de cada estación climática.

Dentro de la lectura y análisis de las bandas pluviográficas de las cinco estaciones climáticas fueron seleccionados los eventos de precipitaciones extremas en los cuales resalta la intensidad de lluvia. Se extrajo el dato de la duración del evento extremo y se tabuló con una discretización de diez minutos. La información fue resumida en datos multianuales para su estudio.

Para la elaboración de las curvas IDF se aplicaron cálculos estadísticos utilizando de la distribución Normal y de Gumbel resultando curvas IDF para cada periodo de retorno, modelos de ajuste. Luego, se realizó la generación de las ecuaciones matemáticas de las curvas IDF con el modelo estándar utilizado por el Instituto Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) y el propuesto por Wenzel, cada modelo proporcionó coeficientes y sumatoria de errores relativos al cuadrado siendo seleccionados los modelos con el menor número.

OBJETIVOS

General

Elaborar y comparar curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) utilizando la metodología Estándar y propuesta por Wenzel para cuatro estaciones de la parte alta de la cuenca María Linda y una estación de la cuenca Cahabón.

Específicos

1. Construir las curvas intensidad-duración-frecuencia utilizando el modelo estándar que aplica el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
2. Construir las curvas intensidad-duración-frecuencia utilizando el modelo propuesto por Wenzel.
3. Comparar y proponer la adaptabilidad de las dos metodologías utilizadas.

INTRODUCCIÓN

Las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) son herramientas fundamentales para el diseño y construcción de obras hidráulicas, como drenajes pluviales, presas, embalses y, demás, que buscan controlar inundaciones y aprovechar los recursos hídricos para generar energía eléctrica. Son valiosas para el estudio de la erosión del suelo, entre otros usos, donde su función primordial es la estimación de tormentas de diseño en el cálculo de caudales máximos asociados a ciertos periodos de retorno.

En Guatemala, existe una diversidad de regiones donde el análisis de la precipitación es importante, para la prevención y manejo del agua pluvial. En este análisis, se ha utilizado la metodología en las estaciones hidrológicas proporcionada por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) de Guatemala. Este es un método catalogado como estándar, que requiere la recopilación de datos sobre milímetros de lluvia precipitadas dentro de la cuenca establecida.

Este trabajo de investigación establecerá una comparación entre las metodologías utilizadas para la modelación de curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) uno proporcionado por el INSIVUMEH, catalogado como el método estándar, y el método Wenzel. La finalidad de ambos es el estudio de la región para estimar la cantidad de valiosas para según sea las condiciones extremas con relación a la frecuencia de tormentas.

1. DEFINICIONES HIDROLÓGICAS

"La hidrología versa sobre el agua de la tierra, su existencia y distribución, sus propiedades físicas y químicas y su influencia sobre el medio ambiente, incluyendo su relación con los seres vivos. El dominio de la hidrología abarca la historia completa del agua sobre la tierra".¹

1.1. Ciclo hidrológico

Afortunadamente, el agua sigue un ciclo de evaporación, precipitación y vuelta a mares y océanos, por el que está continuamente purificándose. Por esta razón, si no se contamina o agota a un ritmo mayor del que necesita para limpiarse o para recargar sus lugares de almacenamiento, se tendría un suministro continuo y barato de agua con muy buena calidad. El agua se mueve en la tierra según fuerzas verticales. Básicamente, existen escorrentías superficiales, evaporación, precipitaciones, infiltración, intrusiones de aguas marinas. Entre ellas, debe incluirse la radiación solar como fuente de energía y constituyen un ciclo casi completo, que se representa de la manera siguiente:

$$\text{Precipitación} = \text{Evapotranspiración} + \text{Escorrentías} + \text{Infiltración}$$

¹ Lee J. Federal Council for Science and Technology. *Scientific Hydrology*. p. 286.

1.1.1. Proceso del ciclo hidrológico

Este ciclo transcurre en la atmósfera, superficie de las masas y cursos de agua, en la superficie del suelo y en el subsuelo.

La humedad que se evapora de los océanos y otras superficies de agua se precipita, a su vez en forma de lluvia, nieve y granizo. Parte de esta precipitación regresa a las superficies de agua y otra cae sobre la tierra.

De esta última, una parte es empleada por la vegetación, algo se evapora, otra cantidad corre hacia los océanos por conducto de corrientes de agua y lagos, mientras que el resto penetra la tierra. Las fuentes de agua aprovechables en el ciclo hidrológico se clasifican como lluvia, agua de superficie y aguas subterráneas.

El ciclo del agua no se inicia en un lugar específico, pero para esta explicación se asume que comienza en los océanos. El sol dirige el ciclo del agua, calienta el agua de los océanos, la cual se evapora hacia el aire como vapor de agua. Corrientes ascendentes de aire llevan el vapor a las capas superiores de la atmósfera, donde la menor temperatura causa que el vapor de agua se condense y forme las nubes. Las corrientes de aire mueven las nubes sobre el globo, las partículas de nube colisionan, crecen y caen en forma de precipitación como se observa en la figura 1.

Figura 1. **Ciclo hidrológico**



Fuente: MetEd. *The Comet Program*. p. 2

1.1.2. **Agua almacenada en los océanos**

Durante los períodos de clima más frío, se forman grandes capas de hielo y glaciares, en la medida que una mayor cantidad de agua se acumula en forma de hielo. Lo contrario sucede durante los períodos más cálidos. Se encuentra ilustrado en la figura 2.

1.1.3. **Océanos en movimiento**

Existen corrientes en los océanos que mueven grandes masas de agua alrededor de la Tierra. Estos movimientos tienen una gran influencia en el ciclo del agua y el clima. La Corriente del Golfo, es una conocida corriente cálida del Océano Atlántico, que mueve agua desde el Golfo de México a través del Océano Atlántico, hacia Gran Bretaña. A una velocidad de 97 kilómetros por

día, la corriente del Golfo mueve 100 veces más agua que todos los ríos sobre la tierra. Proveniente de climas más cálidos, la Corriente del Golfo mueve agua cálida hacia el Atlántico Norte, lo cual afecta el clima de algunas áreas. Se encuentra ilustrado en la figura 2.

1.1.4. Evaporación

La evaporación es el principal proceso mediante el cual, el agua cambia de estado líquido a gaseoso. Por medio de este proceso, el agua líquida de los océanos ingresa a la atmósfera, en forma de vapor, y regresa al ciclo del agua. Se ilustra en la figura 2.

1.1.5. Agua en la atmósfera

Si bien la atmósfera no es un importante almacenador de agua, es una vía rápida que el agua utiliza para moverse por el globo terráqueo. Siempre hay agua en la atmósfera. Las nubes son la forma más visible del agua en la atmósfera, pero incluso el aire limpio contiene agua. Esto se ilustra en la figura 2.

1.1.6. Condensación

La condensación es el proceso por el cual el vapor de agua del aire se transforma en agua líquida. La condensación es importante para el ciclo del agua ya que forma las nubes. Estas nubes pueden producir precipitación, la cual es la principal forma que el agua regresa a la tierra. La condensación es lo opuesto a la evaporación. Se encuentra ilustrado en la figura 2.

1.1.7. Precipitación

La precipitación es el resultado de la conservación del vapor, el cual surge de la superficie de la tierra como agua de esta forma completa su ciclo hidrológico. Véase la figura 2.

1.1.8. Escorrentía

Generalmente, parte de la lluvia que cae es absorbida por el suelo, pero cuando la lluvia cae sobre suelo saturado o impermeable comienza a correr sobre este, siguiendo la pendiente. Véase la figura 2.

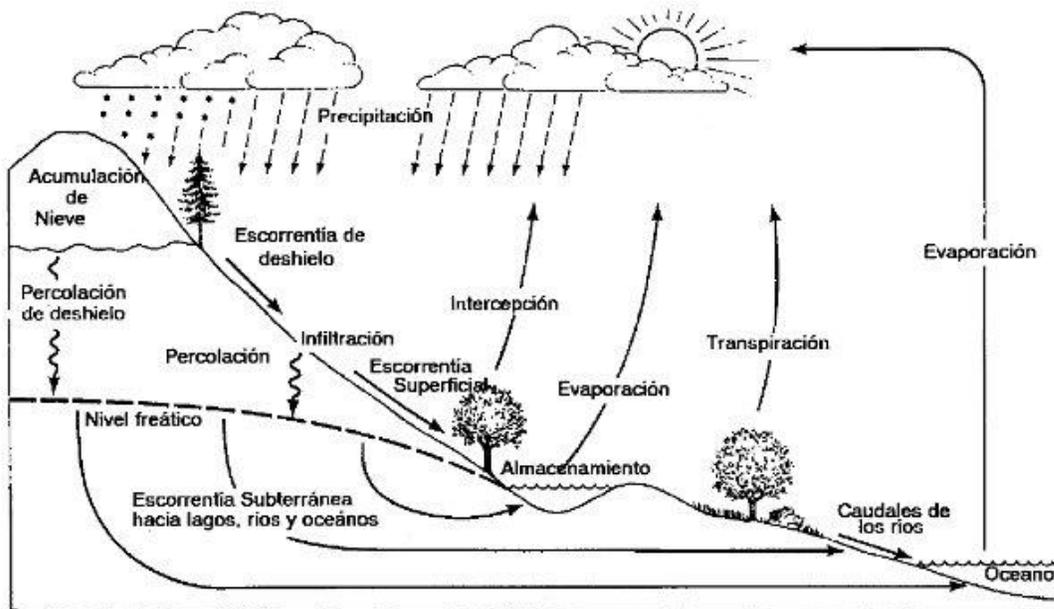
1.1.9. Infiltración

La infiltración ocurre cuando aguas procedentes de las precipitaciones descienden para internarse en el subsuelo, puede alcanzar diferentes profundidades en función de las condiciones. Se ilustra en la figura 2.

1.1.10. Transpiración

La transpiración es el proceso por el cual el agua es llevada desde las raíces hasta pequeños poros que se encuentran en la cara inferior de las hojas, donde se transforma en vapor de agua y se libera a la atmósfera. La transpiración, es esencialmente la evaporación del agua desde las hojas de las plantas. Véase en la figura 2.

Figura 2. **Esquema de ciclo hidrológico**



Fuente: Universidad Nacional de Cuyo. *Guía de estudio para hidrología*. p. 8.

1.2. Proceso de precipitación

El proceso de precipitación está definido por las siguientes definiciones.

1.2.1. Creación de precipitaciones

La precipitación es cualquier producto de la condensación del vapor de agua atmosférico que se deposita en la superficie de la Tierra. Ocurre cuando la atmósfera se satura con el vapor de agua, y el agua se condensa y precipita. La precipitación que alcanza la superficie de la tierra puede producirse en muchas formas diferentes, como lluvia, llovizna, nieve, aguanieve y granizo.

Para que se produzca la condensación de agua en la atmósfera, es necesaria la presencia de pequeñas partículas sólidas (polvo, sales marinas) que actúan como núcleos de condensación.

A continuación se presentan aquellos hidrometeoros que en Guatemala descienden.

1.2.2. Lluvia

Gotas de agua líquida con diámetro superior a 0,5 mm, normalmente de 1 a 2 mm.

1.2.3. Llovizna

Consiste en finas gotas de agua, de diámetro inferior a 0,5 mm.

1.2.4. Chubasco

Gotas o partículas sólidas eventualmente mayores que la lluvia.

1.2.5. Granizo

Básicamente es una precipitación en forma de bolas o formas irregulares de hielo, de diámetro variable entre 5 y 50 mm, y mayores a veces.

1.2.6. Tipos de precipitación

“Cualquier producto formado por la condensación del vapor de agua atmosférico en el aire libre o la superficie de la tierra es un hidrómetro”²

1.2.6.1. Precipitación ciclónica o frontal

Está asociada a los frentes o superficies de contacto entre masas de aire cálido y frío. Estos ciclones se generan cuando se encuentran dos masas de aire de temperaturas distintas, la fría penetra por debajo de la cálida y la levanta del suelo; al ascender la fría forma nubes y precipitaciones.

1.2.6.2. Precipitaciones por convergencia

Son propias de las zonas ecuatoriales, donde el aire asciende por el choque de dos masas de aire de temperatura y humedad similares, procedentes de zonas cercanas de los hemisferios norte y sur, que son arrastradas por los vientos alisios. Esta convergencia provoca lluvias muy intensas.

1.2.6.3. Precipitación convectiva

Suelen ser lluvias de tipo tormentoso, con chubascos y fuertes aguaceros. El mecanismo de su formación es el desigual calentamiento del suelo, que actúa con "efecto de disparo" para iniciar el movimiento ascendente. A partir de aquí, el aire adyacente se desestabiliza y asciende en forma de columnas

² LINSLEY, Ray; KOHLER, Max; PAULS, Joseph. *Hidrología para ingenieros*. p. 48.

aisladas o contiguas, que dan lugar a la formación de nubes; ocurren generalmente en zonas tropicales.

1.2.6.4. Precipitación orográfica

Se produce cuando una masa de aire es forzada a ascender por encima de una barrera montañosa. Al elevarse por una ladera, el aire se enfría, condensa y precipita. Por lo general, en un lado de la montaña se produce un choque del viento que es la zona lluviosa, mientras que el otro lado es más seco.

1.2.7. Medición de precipitación en Guatemala

Guatemala es un país con diferentes microclimas en todo su territorio y por tal razón es de suma importancia tener conocimiento de la precipitación en cada región del país.

El estudio de la precipitación inicia en el ciclo del agua, el cual se asemeja a un ecosistema que, en su interior, circula agua, la cual da vueltas en su entorno y lo hace empezando a través de la evaporación del agua en los océanos, la superficie terrestre y la vegetación.

Luego continúa con la formación de nubes, para después formar el fenómeno principal, es decir, la precipitación, que luego termina por escurrir superficialmente, infiltrarse en el suelo y viajar a través de cadenas subterráneas que llegan finalmente, otra vez a donde inició el ciclo.

Es importante medir la precipitación del país, para luego, realizar estudios en los cuales se le pueda aprovechar, distribuirla o tener planes de alerta de

evacuación, cuando la cantidad de precipitación es excesiva. De esta forma es posible ayudar a poblaciones vulnerables por inundaciones en cualquier región del país.

Los puntos importantes en la recolección de información radica en varios aspectos, entre ellos destaca: la coherente información tomada por el observador encargado de la estación y el buen funcionamiento y calibrado de los instrumentos.

Si los instrumentos se mantienen en buenas condiciones, proporcionarán información adecuada para desarrollar proyectos de investigación o diferentes estudios. Por tal motivo, es importante que las observaciones que se efectúen en dichas estaciones sean normalizadas, sistemáticas y con la mayor precisión posible, de modo que los valores que se obtengan sean homogéneos y más acordes a la realidad.

1.2.8. Estaciones climáticas

Se analizan para la elaboración de curvas IDF. Están instaladas en un predio de aproximadamente 10 m por 5 m (puede ser variable) donde se instalan instrumentos. Para recabar datos de parámetros climáticos o meteorológicos, y evaluar los comportamientos en una región determinada.

1.2.9. Componentes de una estación climática

A continuación se presentan los componentes de una estación climática.

1.2.9.1. Terreno circundante

Una estación climática está comprendida en un terreno circundante que debe ser plano y libre de obstrucciones. Tiene que estar libre de obstáculos y su altura aparente sobre el suelo no debe exceder los 10° del horizonte al este y oeste. El suelo debe estar cubierto por césped y poseer un caminamiento de concreto o adoquín para que exista una mejor circulación en el terreno, además, debe ser circulado por una malla metálica para el resguardo de la estación.

1.2.9.2. Parcela meteorológica

Está comprendida en un terreno rectangular o cuadrado, destinado a la protección de los instrumentos al aire. También se encuentra integrado un abrigo meteorológico.

1.2.9.3. Abrigo meteorológico

Resguarda y protege los instrumentos más sensibles que están en el interior como los termómetros, psicrómetros, termohigrógrafos, evaporímetros de piche, higrómetros, termógrafos e higrógrafos. Está construido con persianas para que exista libre circulación de aire y mantenga la temperatura. Además, está pintado de color blanco, por ser un color neutro repele la luz solar.

1.2.9.4. Oficina para el observador

El observador, eventualmente, es una persona que reside cerca del lugar donde se encuentra la estación climática. Esta persona, en un horario establecido, verifica y recolecta los datos que se han registrado en cada aparato que se posea para medir los parámetros meteorológicos.

1.2.9.5. Instrumentación

Los instrumentos son elementos importantes en la composición de una estación meteorológica. De ellos depende que la medición de los elementos meteorológicos y las observaciones sean correctas para presentar información verdadera.

Las estaciones climáticas que posee el INDE miden los siguientes parámetros climáticos:

- Temperatura ambiente
- Precipitación
- Evaporación a la intemperie (evaporación tanque)
- Evaporación a la sombra (de piche)
- Humedad relativa
- Velocidad del viento
- Insolación

1.2.10. Tipos de estaciones climáticas

El INSIVUMEH ofrece una clasificación para las estaciones. La diferencia radica en los instrumentos que posee cada estación y, por consiguiente, el número de elementos meteorológicos que se observan.

1.2.10.1. Estaciones climáticas tipo A

En estas se registran los siguientes fenómenos meteorológicos: temperatura, precipitación, humedad relativa del aire, presión atmosférica temperatura del subsuelo y visibilidad. Estas estaciones y las automáticas están entre las más completas. Utilizan equipo electrónico para obtener información remota en el momento preciso.

1.2.10.2. Estaciones climáticas tipo B

Los registros que se obtienen son de precipitación, temperaturas, humedad relativa del aire y velocidad de viento. Los instrumentos que operan en las estaciones tipo B son considerables y es necesario que el lector esté capacitado para obtener los registros que cada aparato genera.

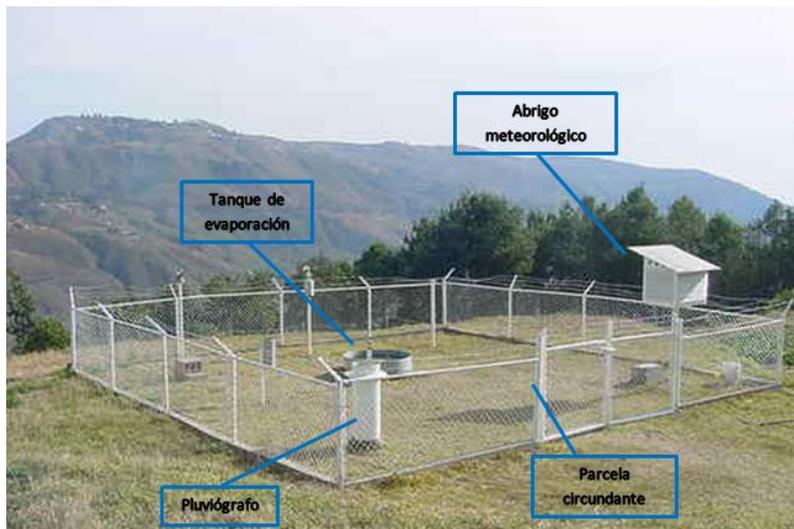
1.2.10.3. Estaciones climáticas tipo C

Únicamente miden temperatura y precipitación. El registro de estos parámetros es importante para tener un control en la zona en donde se encuentra instalada cada estación. La gran mayoría de estaciones climáticas que existen en la República de Guatemala son de tipo C.

1.2.10.4. Estaciones climáticas tipo D

Solo registran la precipitación. Los instrumentos que poseen estas estaciones básicamente son el pluviógrafo y pluviómetro. Los datos proporcionados por los instrumentos que registran la precipitación son valiosos. Con base en estos, se pueden obtener estudios hidrológicos favorables.

Figura 3. Partes de estación climática



Fuente: elaboración propia.

2. DEFINICIÓN DE CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA (IDF)

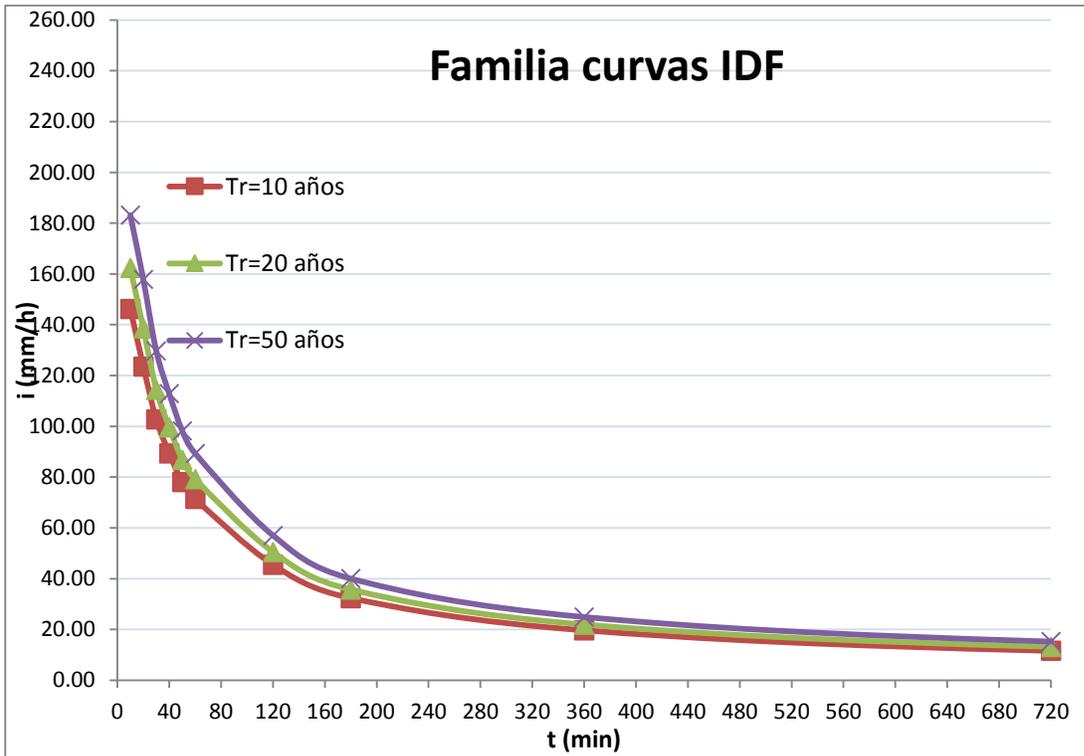
Es importante, además de cuantificar la lluvia que cae registrada en pluviómetros, estimar cuánto podrá caer en un futuro, cuál puede ser la máxima precipitación, para estimar los caudales de agua que producen las cuencas en eventos extremos, de manera que se puedan diseñar las obras de contención, drenaje de carreteras, alcantarillas y otras infraestructuras urbanas.

El problema es que el evento de la precipitación es aleatorio y el estudio de su evolución y predicción se realiza mediante conceptos probabilísticos. Las curvas de intensidad, duración y frecuencia IDF, asocian la intensidad con la duración de la lluvia y la probabilidad de ocurrencia y frecuencia.

Una definición más detallada se refiere a que “las curvas IDF representan a las duraciones en las abscisas y a la altura o intensidad de precipitación en las ordenadas, donde cada curva representada corresponde a una frecuencia (o periodo de retorno), de tal forma que las gráficas de estas curvas representan la intensidad media en intervalos de diferente duración, correspondiendo todos los puntos de una misma curva a un idéntico periodo de retorno”³

³ Unesco. *Curvas intensidad-duración-frecuencia para la zona centro sur de Chile*. p. 12.

Figura 4. Familia de curvas IDF



Fuente: elaboración propia.

2.1. Elementos asociados a las curvas IDF

Junto con definir las curvas IDF, surgen otros elementos que también es necesario considerar. Estos son la intensidad de precipitaciones, la frecuencia y la probabilidad de excedencia.

“La intensidad o cantidad de lluvia caída por unidad de tiempo es un dato de sumo interés para la realización de este tipo de estudios; esta se expresa normalmente en mm/h”⁴. “Se define a la intensidad como la tasa temporal de

⁴ CUADRAT, et. al. *Climatología*. p. 469.

precipitación, lo que es equivalente a la profundidad por unidad de tiempo (mm/h o pulg/h)⁵, de tal forma que matemáticamente se expresa de la siguiente forma:

$$I = \frac{P}{Td}$$

Donde:

I: intensidad en mm

P: profundidad de precipitación en mm

Td: duración del evento en horas

2.2. Aplicaciones de las curvas IDF

Las curvas IDF son importantes para los cálculos o estudios previos al diseño de proyectos de hidráulicos. Como diseño de un drenaje urbano, canales de desviación, diques de gravedad, determinación de la luz de un puente y determinación de caudales máximos. Estos deben pasar por el aliviadero de una represa, o encausarse, para impedir las inundaciones. Es necesario determinar los máximos valores de intensidades de precipitación que se pueden alcanzar, para estimar el monto máximo de escorrentía que se podría producir en la ladera de un cerro, en una quebrada o en una cárcava y así dimensionar dichas obras.

“Para iniciar con el diseño hidráulico es conveniente utilizar una tormenta de diseño o un evento que involucre una relación entre la intensidad de lluvia, la

⁵ CHOW, Ven Te. *Hidrología aplicada*. p. 465.

duración y las frecuencias o periodos de retorno. Esta relación se denomina curvas IDF, que son determinadas para cada sitio en particular”⁶.

2.3. Metodología para la construcción de curvas IDF

La información para la elaboración de curvas IDF en la cuenca de María Linda y Cahabón la proporcionó el Instituto Nacional de Electrificación (INDE).

2.4. Recopilación de datos

Las estaciones analizadas cuentan con equipos pluviográficos que registran los eventos de precipitación que ocurren durante el año por medio de bandas milimetradas. Los eventos quedan registrados de manera constante utilizando bandas diarias. Se utilizó la máxima cantidad de años de registro para disponer de la mayor cantidad de datos pluviográficos y obtener una estadística confiable. Sin embargo, existen años incompletos o bandas pluviográficas con defectos ocasionados por el paso del tiempo o por el funcionamiento incorrecto del instrumento.

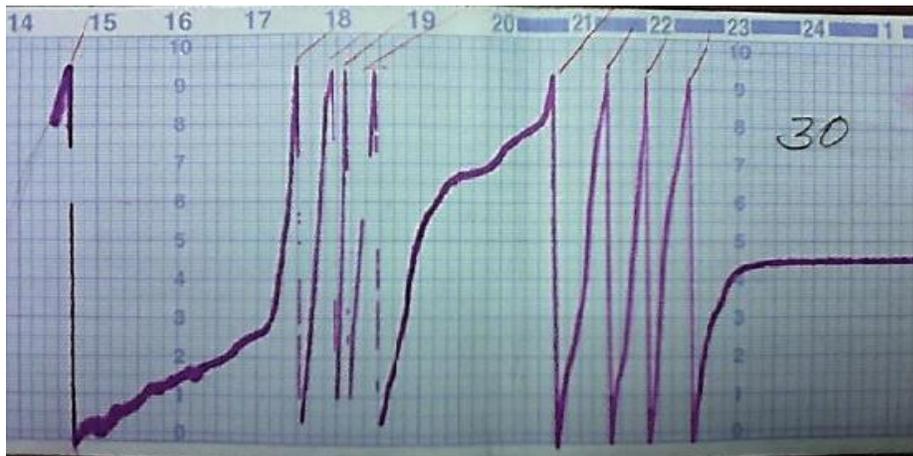
2.5. Lectura de bandas pluviográficas

Se usan para registrar la precipitación a través del tiempo en una región donde existe una estación climática. Básicamente, las bandas pluviográficas registran la información de precipitación, toda vez exista una de ellas instalada en el pluviógrafo, eventualmente estas bandas son reemplazadas, el observador encargado de cada estación climática reemplaza las bandas a las 7:00 am. La mayoría de las bandas analizadas en este estudio son mensuales.

⁶ CHOW, Ven Te. *Hidrología aplicada*. p. 465.

Por ello, su reemplazo es el primer día de cada mes. De acuerdo con la metodología propuesta por Témez, se leen las bandas. En este estudio, se realizó la discretización de los datos a cada 10 min, es decir, la lectura del acumulado de agua en el tubo, que posee un mecanismo regulador, se lleva a cabo con el registro de una gráfica que indica, a través del tiempo, la cantidad de la precipitación. Posteriormente, se elabora un cuadro que incluya el nombre de la estación, fecha, altura inicial del pluviómetro, la hora de inicio del evento y la hora de finalización. Por último, la información se incorpora a la computadora y se trabaja con el software Canopy para analizar posteriormente.

Figura 5. **Banda pluviográfica**



Fuente: Instituto Nacional de Electrificación estación La Pampa, cuenca María Linda.

2.6. Selección de valores máximos

El método de mayor validez para la elaboración de curvas de intensidad-duración-frecuencia es el propuesto por José Ramón Témez en 1978, el cual parte del análisis de bandas de registro pluviográfico y selección de máximos

eventos de precipitación para determinado tiempo y lugar. Posteriormente, los registros que representan eventos extremos son discretizados para obtener las cantidades máximas de lluvia en un lapso de veinticuatro horas. En este caso, dichos registros son tomados desde las 7:00 horas de un día hasta las 7:00 horas del día siguiente.

2.7. Cálculo de las curvas IDF

La lectura de los eventos representativos, con base en la precipitación en un periodo, es importante para el cálculo de las curvas IDF. Para construir las curvas se utiliza la ecuación de la intensidad horaria. Consiste en realizar una división de la diferencia de la precipitación por duración y el intervalo de tiempo transcurrido de la precipitación. La ecuación de la intensidad horaria se presenta de la siguiente manera:

$$i = \frac{\Delta P}{\Delta T}$$

Donde i es la intensidad de la precipitación (mm/h), ΔP el diferencial de precipitación (mm) y ΔT la diferencia de tiempo (h).

Con los datos de la intensidad de la precipitación se realizan las gráficas de cada estación con periodos de retorno de 10, 20 y 50 años. Únicamente se grafican tres periodos de retorno por cuestiones de visualización. Por el contrario, no se identificaría de manera correcta los diez periodos de retorno calculados.

En un tiempo corto de duración se tiene una intensidad alta del evento. Esta característica se observa en cada gráfica representada con los distintos

periodos de retorno. Existe otra característica y se puede notar fácilmente, en cada periodo de retorno representado tiene como tendencia que la gráfica va disminuyendo a través de un periodo de larga duración.

Eventualmente, para realizar este tipo de estudios, se aplica la estadística, utilizando distribuciones de probabilidad. En este caso se utilizó la distribución Normal y de Gumbel. La función normal proviene de las distribuciones de probabilidad teóricas y es apropiada para variables aleatorias que cubren todo el rango de valores. Esto de los resultados posibles que puedan presentarse en un experimento que se esté analizando.

La función de Gumbel proviene de las distribuciones extremas y es apropiada para analizar valores extremos. En este caso, las intensidades máximas registradas en un periodo anual. Al aplicar la función normal y de Gumbel a los datos de las curvas IDF, se generan ecuaciones de los modelos matemáticos. De acuerdo con cada distribución de probabilidad en los distintos periodos de retorno analizados para cada estación climática.

2.7.1. Ajuste del modelo estándar y el propuesto por Wenzel, a cada estación climática

Las bandas del pluviógrafo registran cada evento que ocurre a través del tiempo en una región determinada. En un año pueden ocurrir varios eventos representativos. Con base en la metodología propuesta por Témez se deben de seleccionar los valores máximos de cada año. Posteriormente, se realiza un resumen multianual de intensidades de lluvia máxima para cada estación climática.

Las distribuciones de probabilidad y las técnicas estadísticas se aplican al resumen multianual, se detalla la aplicación de la estadística que se utilizó para realizar las curvas IDF con base en la metodología propuesta por Témex (1978). La aplicación de la estadística, en el estudio de las curvas IDF es la manera de determinar el modelo que se ajusta de acuerdo con cada estación climática entre el modelo estándar y el propuesto por Wenzel. Básicamente el ajuste se determina con un análisis, entre la sumatoria de los errores relativos al cuadrado de cada modelo y sus dos respectivas funciones de probabilidad (distribución Normal y de Gumbel).

2.7.2. Descripción de la región de estudio

El área de estudio es la cuenca María Linda. Limita, al norte, por la cuenca del río Motagua, al sur por el océano Pacífico, al este por la cuenca del Río Los Esclavos y al sureste por la Cuenca del Río Paso Hondo y al Oeste por la cuenca del Río Achiguate.

Tiene un área aproximada de 2 780 km cuadrados, la más extensa es la vertiente del Pacífico, abarca los departamentos de: Sacatepéquez, Guatemala, Santa Rosa y Escuintla.

2.7.3. Estaciones climatológicas estudiadas

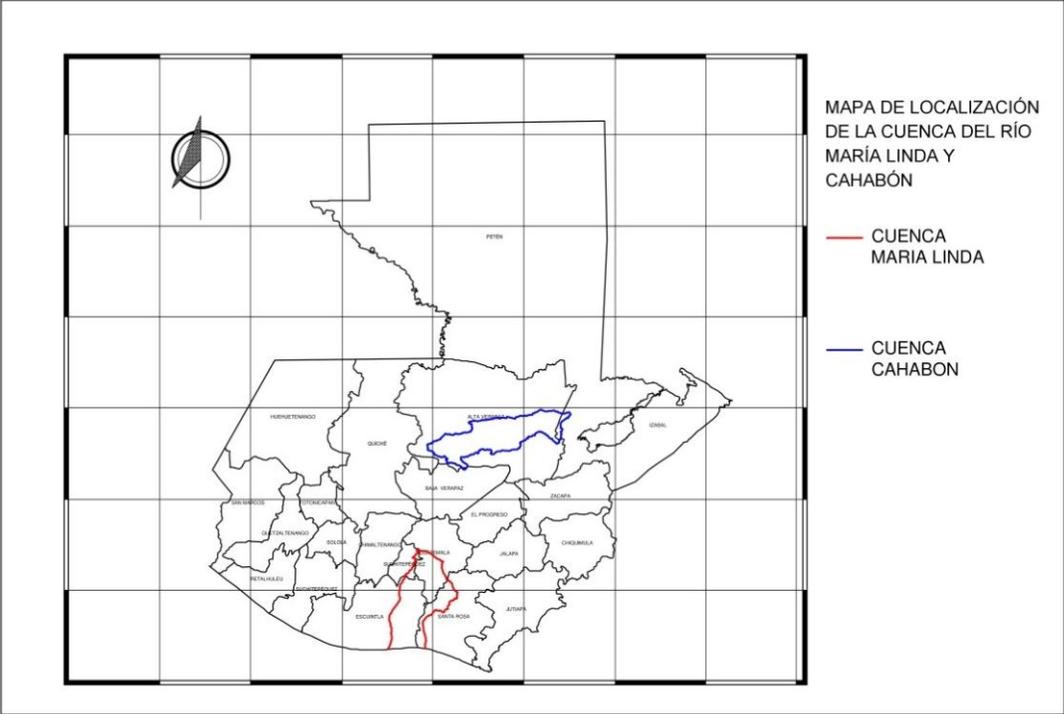
Las estaciones climatológicas estudiadas se encuentran dentro de la cuenca hidrológica María Linda que incluye: La Pampa, Guatemala Sur, Compuertas Amatitlán y Embalse Jurúm Marinalá; integradas en la Vertiente del Pacífico. También la estación climática El Volcán en la cuenca Cahabón, e integrada a la Vertiente del Caribe.

Tabla I. **Estaciones climatológicas utilizadas**

Estación climatológica	Tipo de estación climatológica	Años registrados	Ubicación
La Pampa	C	35	Fraijanes, Guatemala
Guatemala Sur	D	39	Villa Nueva, Guatemala
Compuertas Amatitlán	C	40	Guatemala, Guatemala
Embalse Jurúm Marinalá	B	38	Palín, Escuintla
El Volcán	D	39	Senahú, Alta Verapaz

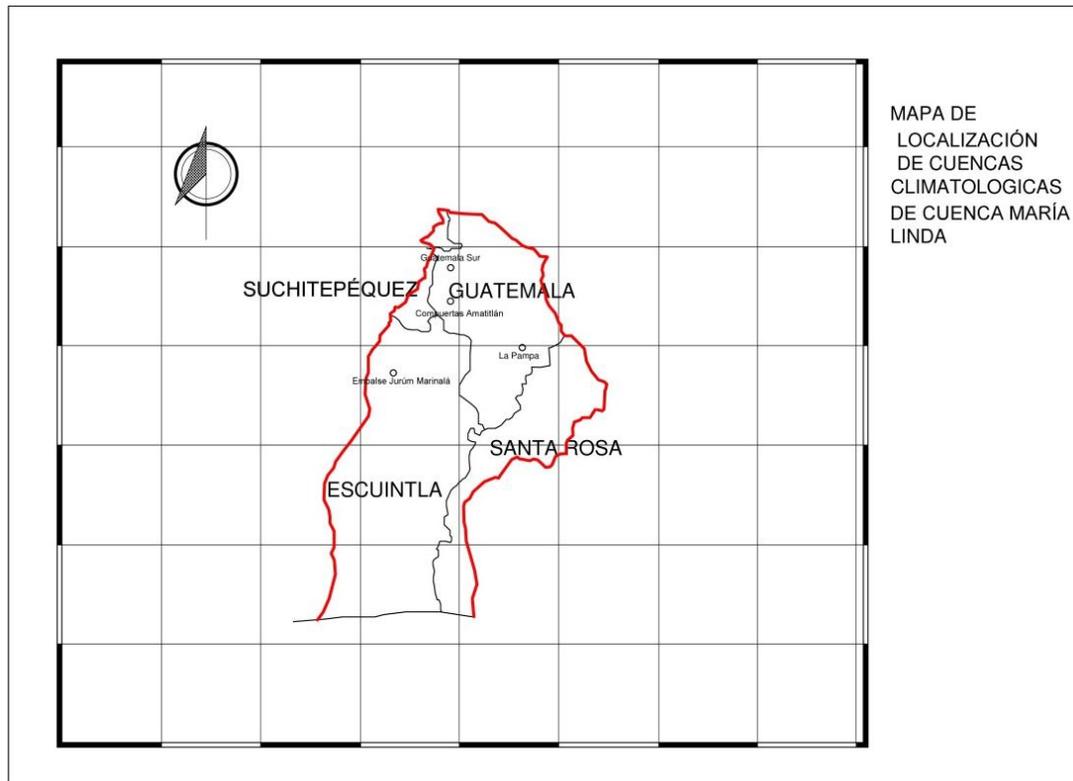
Fuente: Instituto Nacional de Electrificación (INDE).

Figura 6. **Mapa de localización de cuenca María Linda y Cahabón en República de Guatemala**



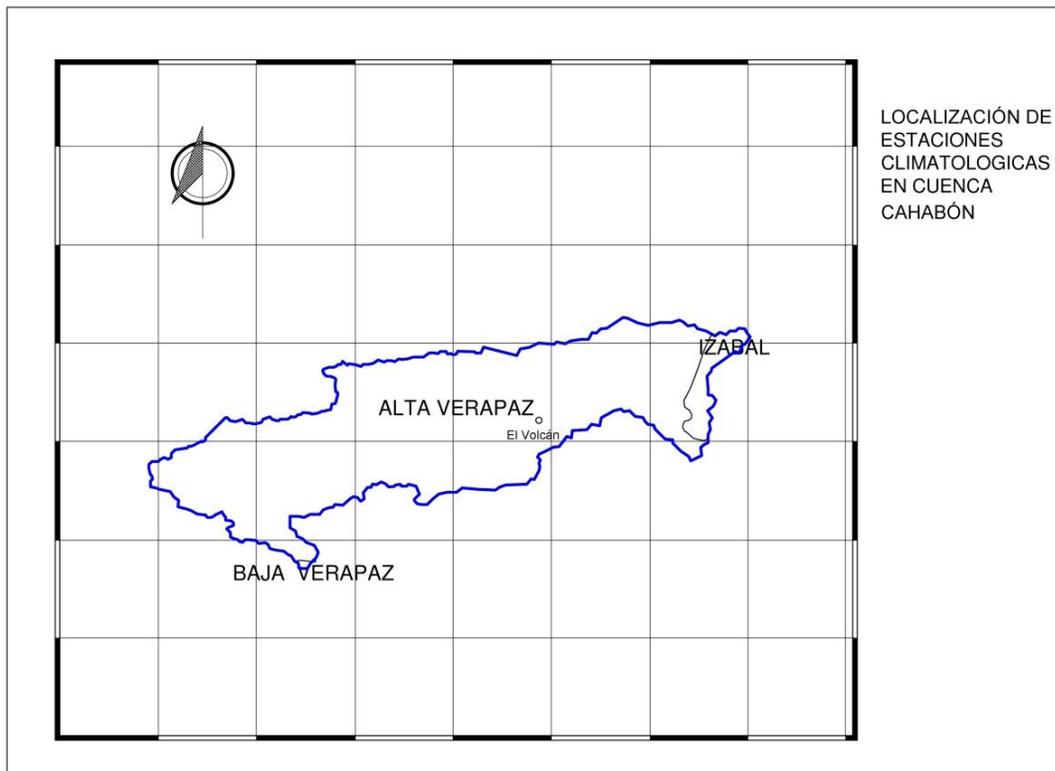
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 7. **Estaciones climatológicas utilizadas en cuenca María Linda**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 8. Estaciones climatológicas utilizadas en cuenca Cahabón



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

2.7.4. Estación climática La Pampa

A partir de 1982 se inició la medición y el registro en esta estación. Es una estación climatológica tipo C, ubicada en el municipio de Fraijanes, departamento de Guatemala. Su elevación a nivel del mar es de 300 m, sus coordenadas geográficas son latitud 14° 24' 53" y longitud 90° 26' 55".

Figura 9. Estación La Pampa



Fuente: Estación La Pampa, Departamento de Hidrología, INDE.

2.7.5. Estación climática Guatemala Sur

A partir de enero 1978 se inició la medición y el registro en esta estación. Es una estación climatológica tipo D, ubicada en el municipio de Villa Nueva, departamento de Guatemala. Su elevación a nivel del mar es de 1360 m, sus coordenadas geográficas son latitud $14^{\circ} 32' 40''$ y longitud $90^{\circ} 35' 08''$.

Figura 10. Estación Guatemala Sur



Fuente: Departamento de Hidrología, INDE, estación Guatemala Sur.

2.7.6. Amatitlán

A partir de enero 1977 se inició la medición y el registro en esta estación. Es una estación climatológica tipo C, ubicada en el municipio de Amatitlán, departamento de Guatemala. Su elevación a nivel del mar es de 1190 m, sus coordenadas geográficas son latitud $14^{\circ} 29' 10''$ y longitud $90^{\circ} 36' 50''$.

Figura 11. Estación Amatitlán



Fuente: Departamento de Hidrología, INDE, estación Amatitlán.

2.7.7. Estación climática Embalse Jurúm Marinalá

A partir de enero 1979, se inició la medición y el registro en esta estación. Es una estación climatológica tipo B, ubicada en el municipio de Palín, departamento de Escuintla. Su elevación a nivel del mar es de 900 m, sus coordenadas geográficas son latitud $14^{\circ} 23' 18''$ y longitud $90^{\circ} 42' 46''$.

Figura 12. Estación Embalse Jurúm Marinalá



Fuente: Departamento de Hidrología, INDE, estación Embalse Jurúm Marinalá.

2.7.8. Estación climática El Volcán

A partir de junio 1978, se inició la medición y el registro en esta estación. Es una estación climatológica tipo D, ubicada en el municipio de Senahú, departamento de Alta Verapaz. Su elevación a nivel del mar es de 790 m, sus coordenadas geográficas son latitud 15° 28' 57" y longitud 89° 52' 28".

Figura 13. Estación El Volcán



Fuente: Departamento de Hidrología, INDE, estación El Volcán.

3. ESTADÍSTICA UTILIZADA PARA EL CÁLCULO DE CURVAS IDF

“Los procesos hidrológicos evolucionan en el espacio y en el tiempo en una forma que es parcialmente predecible, o determinística, y parcialmente aleatoria. Un proceso de este tipo se conoce con el nombre de proceso estocástico.”⁷

Esto indica que los eventos de lluvia están sometidos al azar y deja en un proceso estadístico que involucra un modelo matemático que sirve para tratar magnitudes aleatorias variables en el tiempo, que evoluciona en una función de otra variable, generalmente del tiempo.

3.1 Parámetros estadísticos

Un parámetro estadístico es un número que se obtiene de una gran cantidad de datos. Se aplican en hidrología porque la información recogida tiene procesos aleatorios. El objetivo básico de la aplicación de la estadística en hidrología es el análisis de información en forma de muestras para hallar el comportamiento a futuro del fenómeno estudiado.

3.1.1. Medidas de tendencia central

Son indicadores que resumen en un valor, conjunto de datos, representan un centro en torno al cual se encuentra ubicado el conjunto de los datos.

⁷ CHOW, Ven Te. *Hidrología aplicada*. p. 361

3.1.2. Media

Es la medida de posición central que se define como la suma de todos los valores observados, dividido por el número total de observaciones, es una forma de representar una serie de datos.

$$\mu = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Donde:

μ = media

X_i = conjunto de valores de la variable

n = número total de valores

3.1.2.1. Mediana

Con esta medida se identifica el valor que se encuentra en el centro de los datos, es decir, son el valor que se encuentra exactamente en la mitad del conjunto de datos después de que las observaciones se han ubicado en serie ordenada. Esta medida indica que la mitad de los datos se encuentran por debajo de este valor y la otra mitad por encima del mismo.

3.1.2.2. Moda

En un conjunto de datos, la moda es la variable que más se repite dentro del conjunto, es decir, el valor más común dentro de la muestra. Básicamente es el término que presente la mayor frecuencia.

3.1.2.3. Medidas de dispersión

Permite reconocer que tanto se dispersan los datos del punto central, es decir, cuánto se desvían las observaciones alrededor de su promedio aritmético (Media). Este parámetro indica cómo se reparten los valores de los datos a través del eje X, mediante un valor numérico que representa el promedio de dispersión de los datos.

3.1.2.4. Rango

También conocido como el recorrido o amplitud total de la distribución, es el valor absoluto de la diferencia más uno entre el mayor y el menor de los datos de una distribución estadística. Es una medida de la dispersión, depende solamente de los dos valores extremos y no proporciona ninguna información acerca del resto de la muestra.

3.1.2.5. Varianza

Esta medida identifica la diferencia promedio entre cada uno de los valores respecto a su punto central. Este promedio se calcula, elevando cada una de las diferencias al cuadrado, y calculando su promedio o media; es decir, sumado todos los cuadrados de las diferencias de cada valor respecto a la media y dividiendo este resultado por el número de observaciones que se tengan.

$$\sigma^2 = \frac{\sum(x_i - \mu)^2}{n - 1}$$

Donde:

σ^2 = varianza

μ = media

X_i = conjunto de valores de la variable

n = número total de valores

3.1.2.6. Desviación estándar

Esta medida determina el promedio aritmético de fluctuación de los datos respecto a su punto central o media. El resultado de la desviación estándar es un valor numérico que representa el promedio de diferencia que hay entre los datos y la media. Los valores de la muestra tenderán a alejarse de su media, pero cuando la dispersión es pequeña, los valores tenderán a acercarse a su media. Se define como la raíz cuadrada de la varianza.

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

Donde:

σ = desviación estándar

σ^2 = varianza

3.1.2.7. Coeficiente de asimetría

Esta medida indica si los datos se distribuyen de forma uniforme alrededor del punto central o media. La asimetría presenta tres estados diferentes, cada uno de los cuales define, de forma concisa, cómo están distribuidos los datos respecto al eje de asimetría. Se dice que la asimetría es positiva cuando la mayoría de los datos se encuentran por encima del valor de la media aritmética, la curva es simétrica cuando se

distribuyen aproximadamente la misma cantidad de valores en ambos lados de la media y se conoce como asimetría negativa cuando la mayor cantidad de datos se aglomeran en los valores menores que la media.

El coeficiente de asimetría, se representa mediante la ecuación matemática:

$$SK_1 = \frac{\mu - Mo}{\sigma} = \frac{3(\mu - Me)}{\sigma}$$

Donde:

SK_1 = coeficiente de asimetría

Mo = coeficiente de asimetría

Me = coeficiente de asimetría

σ = desviación estándar

3.1.3. Probabilidad

“La probabilidad y la estadística están relacionadas en una forma importante. La probabilidad se emplea como herramienta; permite que usted evalúe la confiabilidad de sus conclusiones acerca de la población cuando tenga sólo información muestral.”⁸

“Una base matemática para la predicción, la cual, para un conjunto exhaustivo de resultados, es la relación entre el número de resultados que producen un evento particular y el número posible de resultados.”⁹

⁸ MENDENHALL, William; BEAVER, Robert J. *Introducción a la probabilidad y a la estadística*, p. 128.

⁹ LINSLEY, Ray; KOHLER, Max; PAULS, Joseph. *Hidrología para ingenieros*. p. 281.

La probabilidad de ocurrencia de un evento dado es igual a la relación entre el número de sucesos “m” y el número de sucesos totales, “n”.

$$P(A) = \frac{m}{n}$$

3.1.4. Distribuciones de probabilidad

Una distribución de probabilidad indica toda la gama de valores que pueden representarse como resultado de un experimento si éste se llevase a cabo.

Es decir, describe la probabilidad de que un evento se realice en el futuro. Es una herramienta fundamental para la prospectiva, puesto que se puede diseñar un escenario de acontecimientos futuros considerando las tendencias actuales de diversos fenómenos naturales.

Toda distribución de probabilidad es generada por una variable; porque puede tomar diferentes valores, aleatoria x ; porque el valor tomado es totalmente al azar.

3.1.5. Distribución normal

La distribución normal o Gaussiana es la más importante y la de mayor uso de todas las distribuciones continuas de probabilidad. La apariencia gráfica de la distribución normal es una curva simétrica con forma de campana, que se extiende sin límite tanto en la dirección positiva como en la negativa.

La distribución de una variable normal está completamente determinada por dos parámetros, su media (μ) y su desviación estándar (σ). Con esta notación, la densidad de la normal viene dada por la ecuación:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}$$

Donde:

$f(x)$ = función distribución normal

σ = desviación estándar

μ = media

3.1.5.1. Distribución binomial

Es una de las distribuciones discretas de probabilidad más útiles, se puede imaginar un experimento en el que el resultado es la ocurrencia o la no ocurrencia de un evento. Sin pérdida de generalidad, llámese éxito a la ocurrencia del evento y fracaso a su no ocurrencia. Además, sea “p” la probabilidad de éxito cada vez que el experimento se lleva a cabo y 1-“p” la probabilidad de fracaso.

Supóngase que el experimento se realiza “n” veces, y cada uno de éstos es independiente de todos los demás, y sea x la variable aleatoria que representa el número de éxitos en los “n” ensayos. El interés es determinar la probabilidad de obtener exactamente X=x éxitos durante los n ensayos.

Las dos suposiciones claves para la distribución binomial son:

- La probabilidad de éxito “p” permanece constante para cada ensayo

- Los “n” ensayos son independientes entre sí.

3.1.5.2. Distribución lognormal

En general, cuando la variable aleatoria “x” es el producto de un gran número de otras variables aleatorias, la distribución de los logaritmos de “x” puede aproximarse a la normal, ya que los logaritmos de “x” son la suma de los logaritmos de los factores contribuyentes.

Se ha demostrado que la distribución lognormal puede aplicarse en un amplio número de eventos hidrológicos, especialmente a aquellos casos en los cuales la variable tiene un límite inferior, la distribución empírica no es simétrica y los factores que causan los eventos son independientes y multiplicativos.

Esta distribución se representa de esta forma:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} (\ln x - \mu)^2 \right]$$

Donde:

f(x) = función distribución lognormal

σ = desviación estándar

μ = media

3.1.5.3. Distribución exponencial

Una de las distribuciones de variable continua es la distribución exponencial, esta se puede utilizar como modelo para representar el tiempo de funcionamiento o de espera.

Es una distribución que tiene un único parámetro λ , se utiliza para describir el tiempo entre la ocurrencia de dos eventos de variables aleatorias, como lo puede ser, precipitaciones, entre otros, y en este caso λ sería la tasa media de ocurrencia de los eventos.

La función de densidad de probabilidad está dada por:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$$

Donde:

$f(x)$ = función distribución exponencial

λ = tasa media de ocurrencia

x = variable estudiada

3.1.5.4. Distribuciones extremas

En la estadística existen estudios de variables donde se localizan valores con valores máximos y mínimos dentro de una muestra, en pocas palabras, esta distribución no se considera normal sino de carácter extremo para su respectivo estudio. En esta investigación, se tomó en cuenta la distribución de Gumbel.

3.1.5.4.1. Distribución de Gumbel

Una familia importante de distribuciones usadas en el análisis de frecuencia hidrológico es la distribución general de valores extremos, la cual ha sido ampliamente utilizada para representar el comportamiento de crecientes y sequías a través de máximos y mínimos.

La función de densidad de la distribución de Gumbel está dada por:

$$f(x) = \alpha e^{-\alpha(x-\beta)-e^{-\alpha(x-\beta)}}$$

No se exceptúa realizar el cálculo de los parámetros:

$$\alpha = \frac{1,2825}{S} \quad \beta = \text{Media} - 0.45$$

Donde:

$f(x)$ = función distribución de Gumbel

α = parámetro de la función

β = parámetro de la función

4. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE CURVAS IDF

En este capítulo se presenta el resultado de las curvas IDF de las estaciones climáticas estudiadas de la cuenca María Linda. Se proporcionan datos de precipitación, probabilidad de lluvia y representación gráfica de la curva IDF representada por cada periodo de retorno. Esto basado de en la distribución normal y Wenzel.

Las estaciones climatológicas estudiadas comprenden un registro de datos pluviográficos considerables para el estudio. Aproximadamente, 20 años o más de registro en bandas pluviográficas en de algunas estaciones climatológicas, tomando en cuenta los registros más actualizados, para obtener curvas IDF consistentes en la cuenca estudiada.

Los resultados generados en las tablas de probabilidades de provienen de los periodos de retorno correspondientes a 2, 5,15, 20, 25, 30, 50, 75 y 100 años.

4.1. Estación climática La Pampa

En la siguiente tabla se detalla la máxima precipitación dada en milímetros de lluvia para cada discretización establecida y analizada en la estación climática La Pampa. Los datos fueron tomados de bandas pluviográficas analizadas con una discretización de 10 minutos.

Tabla II. **Máxima precipitación según discretización en estación La Pampa**

Año	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
1997	21,60	31,60	39,50	47,00	52,20	55,20	59,00	59,10	83,30	83,30	83,30
1998	16,00	27,00	37,00	44,90	46,50	48,20	57,50	71,50	83,60	86,20	86,20
1999	30,00	55,50	68,90	73,30	73,70	74,20	80,90	83,80	83,90	83,90	83,90
2000	20,00	31,40	40,50	51,90	52,30	53,90	61,80	61,90	61,90	61,90	61,90
2001	20,50	33,50	40,00	43,20	47,30	55,50	71,30	72,80	73,20	73,20	73,20
2002	13,30	22,50	32,00	38,70	45,00	49,80	52,90	52,90	52,90	52,90	52,90
2003	20,00	40,00	60,00	72,00	79,00	85,40	87,00	87,00	87,00	111,10	111,10
2004	21,00	29,50	35,00	35,50	35,60	35,60	42,60	54,30	88,30	95,90	98,50
2005	20,00	40,00	51,00	62,00	69,20	76,00	83,30	83,50	83,80	83,80	83,80
2006	30,00	46,00	60,00	70,00	78,00	82,50	95,70	95,90	95,90	95,90	95,90
2007	24,00	42,50	52,50	59,50	65,00	65,80	66,80	66,80	67,90	67,90	67,90
2008	20,00	28,50	38,00	45,00	54,00	60,00	75,30	83,40	103,30	112,20	124,00
2009	23,90	33,90	40,50	47,00	52,60	52,70	58,50	59,60	71,60	99,30	99,30
2010	20,00	31,10	38,00	45,00	46,30	47,70	57,00	59,00	61,30	61,30	61,30
2011	12,00	17,50	21,20	27,00	28,00	31,50	43,40	52,60	56,70	56,70	56,70
2012	26,00	32,50	41,00	52,00	60,00	64,00	72,20	74,50	77,00	77,00	77,00
2013	20,00	38,00	56,00	62,50	66,00	69,30	75,50	77,00	77,00	77,00	77,00
2014	20,00	40,00	53,00	59,70	65,20	66,70	68,90	70,00	99,30	99,30	99,30
2015	20,00	37,00	46,70	51,70	58,50	58,60	61,80	62,20	62,80	62,80	62,80
2016	11,90	20,90	26,00	33,00	40,00	50,00	54,80	54,80	54,80	60,00	102,00
2017	24,00	44,00	58,00	64,00	64,60	64,60	64,60	64,60	64,60	64,60	64,60

Fuente: elaboración propia.

En la tabla III se muestra la cantidad de milímetros de lluvia estimada para los distintos periodos de retorno en la estación climática La Pampa utilizando la distribución normal.

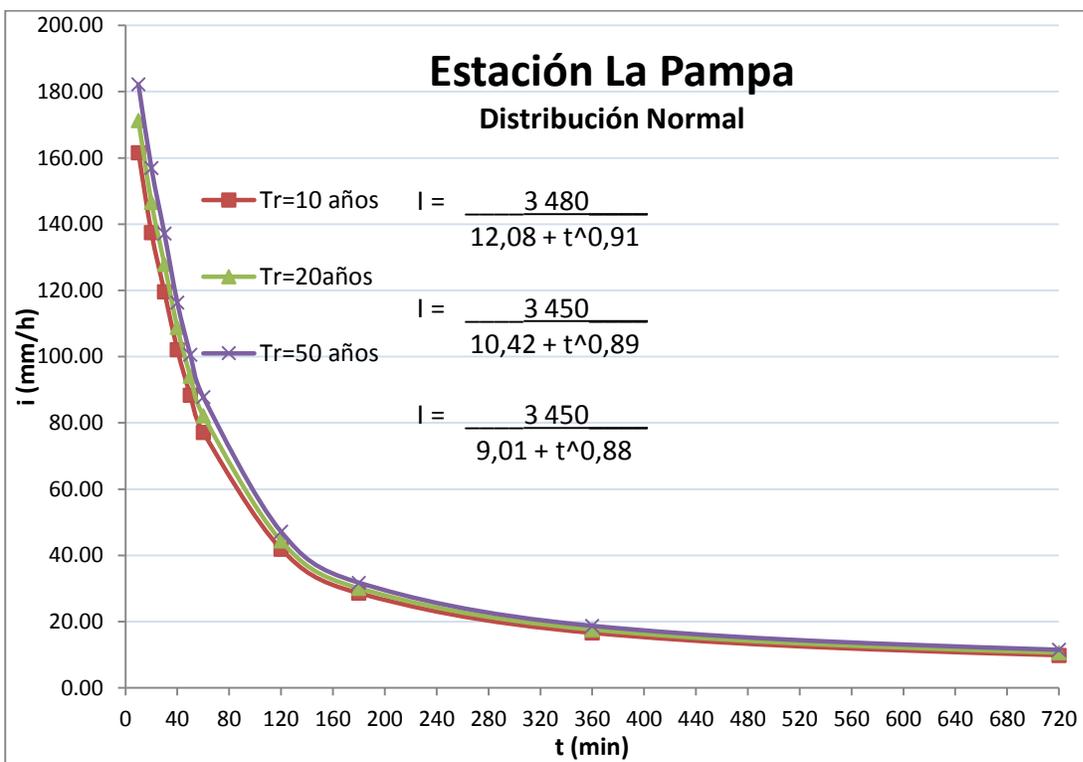
Tabla III. **Probabilidad de intensidad de lluvia máxima en la estación climática La Pampa utilizando distribución normal**

Distribución Normal												
Probabilidad	Período de retorno	Intensidad (mm/h)										
		10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
0,50	2	127,49	105,13	90,41	78,49	68,09	59,52	33,30	23,36	13,03	7,11	3,59
0,80	5	149,91	126,37	109,60	94,01	81,43	71,12	38,97	26,80	15,37	8,91	4,51
0,90	10	161,63	137,48	119,63	102,12	88,40	77,18	41,93	28,60	16,59	9,85	5,00
0,93	15	167,48	143,02	124,63	106,16	91,88	80,20	43,41	29,50	17,20	10,32	5,24
0,95	20	171,31	146,65	127,91	108,81	94,15	82,18	44,38	30,08	17,60	10,63	5,40
0,96	25	174,13	149,32	130,32	110,76	95,83	83,64	45,09	30,52	17,89	10,86	5,51
0,97	30	176,35	151,42	132,22	112,30	97,15	84,79	45,65	30,86	18,12	11,03	5,61
0,98	50	182,21	156,97	137,23	116,35	100,63	87,82	47,13	31,76	18,73	11,50	5,85
0,99	75	186,54	161,08	140,94	119,35	103,21	90,06	48,23	32,42	19,18	11,85	6,03
0,99	100	189,47	163,85	143,45	121,37	104,95	91,58	48,97	32,87	19,49	12,09	6,15

Fuente: elaboración propia.

En la figura 14, se presenta las curvas IDF generadas para la estación climática El Volcán para los periodos de diseño 10, 20 y 50 años, generadas a partir de la aplicación de la distribución normal.

Figura 14. **Curvas IDF de la estación La Pampa, utilizando la distribución normal**



Fuente: elaboración propia.

En la tabla IV se muestra la cantidad de milímetros de lluvia estimada para los distintos periodos de retorno en la estación climática La Pampa utilizando la distribución Gumbel.

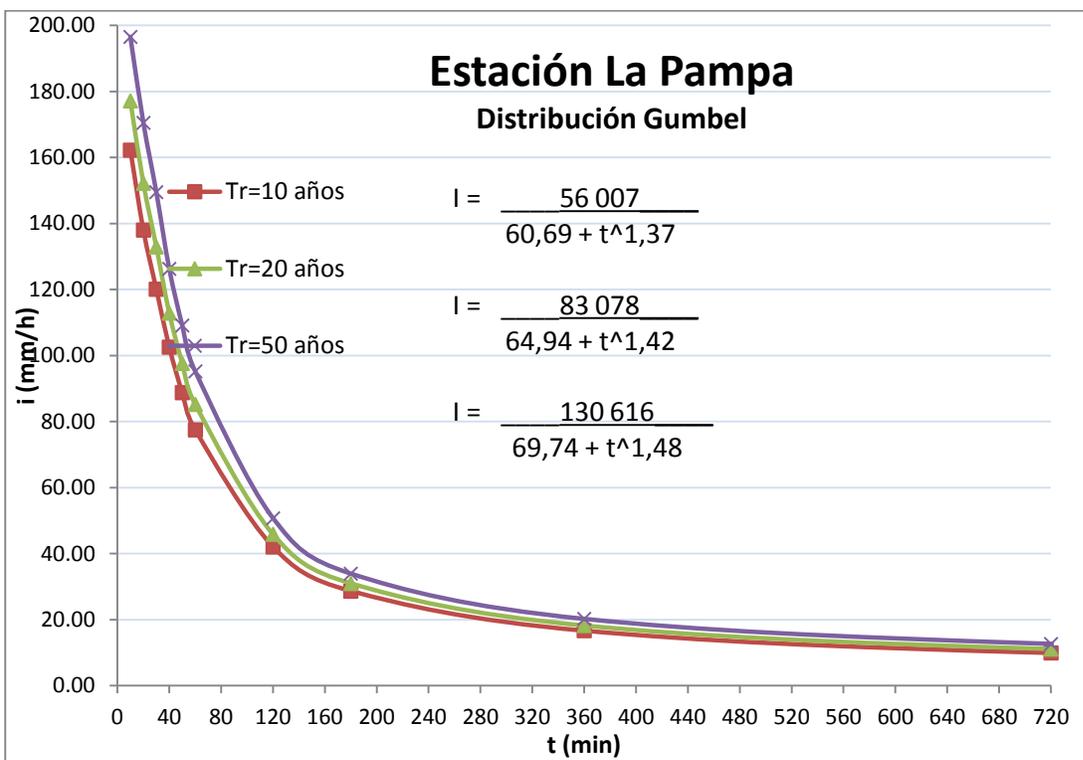
Tabla IV. **Probabilidad de intensidad de lluvia máxima en la estación climática La Pampa utilizando distribución de Gumbel**

Distribución de Gumbel												
Probabilidad	Período de retorno	Intensidad (mm/h)										
		10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
0,50	2	123,11	100,98	86,67	75,47	65,49	57,26	32,19	22,69	12,58	6,76	3,40
0,80	5	146,66	123,29	106,81	91,76	79,49	69,43	38,15	26,30	15,03	8,65	4,38
0,90	10	162,25	138,06	120,15	102,54	88,76	77,50	42,09	28,69	16,65	9,90	5,02
0,93	15	171,04	146,40	127,68	108,63	93,99	82,04	44,31	30,04	17,57	10,61	5,39
0,95	20	177,20	152,23	132,95	112,89	97,66	85,23	45,87	30,99	18,21	11,10	5,64
0,96	25	181,95	156,72	137,01	116,17	100,48	87,68	47,07	31,72	18,71	11,48	5,84
0,97	30	185,81	160,38	140,31	118,84	102,77	89,68	48,04	32,31	19,11	11,79	6,00
0,98	50	196,56	170,57	149,51	126,28	109,17	95,24	50,76	33,96	20,23	12,66	6,44
0,99	75	205,05	178,62	156,78	132,15	114,22	99,63	52,91	35,26	21,11	13,34	6,79
0,99	100	211,06	184,31	161,92	136,31	117,79	102,74	54,43	36,18	21,74	13,82	7,04

Fuente: elaboración propia.

En la figura 15, se presenta las curvas IDF generadas para la estación climática La Pampa para los periodos de diseño 10, 20 y 50 años, generadas a partir de la aplicación de la distribución Gumbel.

Figura 15. **Curvas IDF de la estación La Pampa, utilizando la distribución de Gumbel**



Fuente: elaboración propia.

4.2. Estación climática Guatemala Sur

En la siguiente tabla se detalla la máxima precipitación dada en milímetros de lluvia para cada discretización establecida y analizada en la estación climática Guatemala Sur. Los datos fueron tomados de bandas pluviográficas analizadas con una discretización de 10 minutos.

Tabla V. **Máxima precipitación según discretización en estación Guatemala Sur**

Año	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
2005	20,00	22,40	22,50	23,00	25,50	27,00	30,60	31,40	55,70	71,40	71,40
2006	17,00	30,00	40,00	42,60	42,60	48,20	57,20	63,50	64,30	66,20	66,20
2007	20,00	30,00	40,00	42,70	52,00	60,60	70,20	71,00	71,90	71,90	71,90
2008	20,00	30,00	44,00	50,50	56,60	58,70	72,90	75,50	75,50	75,50	75,50
2009	20,00	30,00	31,90	32,50	34,10	40,00	46,30	46,30	46,30	49,40	49,40
2010	13,70	25,00	32,80	42,80	45,00	50,00	53,60	61,50	66,80	66,80	66,80
2011	14,00	25,50	28,10	28,40	28,60	35,50	46,00	47,70	47,90	75,40	75,40
2012	10,00	12,00	17,10	21,10	26,00	30,00	32,80	33,10	33,10	33,10	33,10
2013	10,00	20,00	28,00	30,00	40,00	41,50	44,00	47,50	47,60	47,60	47,60
2014	20,00	30,50	44,00	54,00	55,30	55,60	56,60	60,20	76,30	76,30	76,30
2015	15,00	25,00	35,00	36,60	37,20	40,00	56,00	81,00	91,30	104,40	133,40
2016	15,40	25,50	36,10	39,20	39,70	40,00	46,80	49,90	49,90	49,90	49,90
2017	20,00	30,00	36,50	42,40	47,50	50,10	58,50	59,60	59,60	59,60	59,60

Fuente: elaboración propia.

En la tabla VI se muestra la cantidad de milímetros de lluvia estimada para los distintos periodos de retorno en la estación climática Guatemala Sur utilizando la distribución normal.

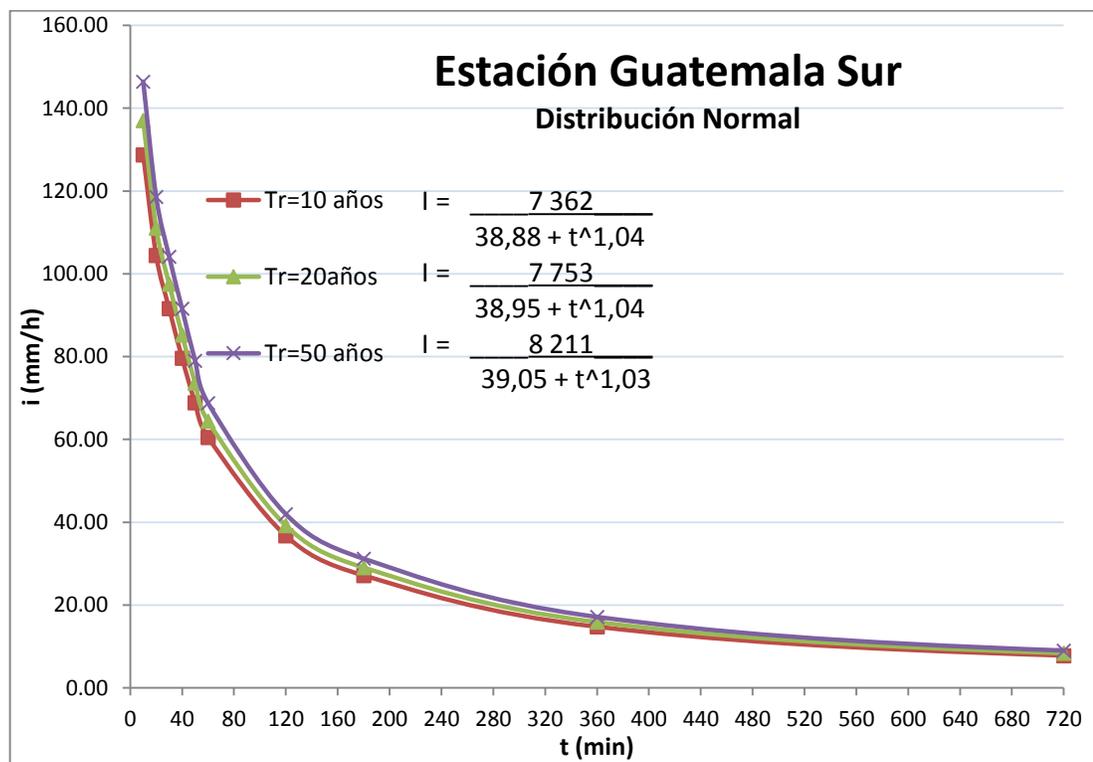
Tabla VI. Probabilidad de intensidad de lluvia máxima en la estación climática Guatemala Sur utilizando distribución normal

Distribución Normal												
Probabilidad	Período de retorno	Intensidad (mm/h)										
		10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
0,50	2	99,28	80,93	70,80	59,72	52,11	46,76	28,08	20,45	10,82	5,80	3,05
0,80	5	118,60	96,35	84,48	72,78	63,13	55,79	33,77	24,86	13,41	7,11	3,90
0,90	10	128,71	104,42	91,63	79,61	68,89	60,51	36,74	27,16	14,76	7,80	4,35
0,93	15	133,75	108,44	95,20	83,01	71,76	62,86	38,22	28,31	15,44	8,15	4,57
0,95	20	137,05	111,07	97,53	85,24	73,64	64,40	39,20	29,06	15,88	8,37	4,71
0,96	25	139,48	113,01	99,25	86,88	75,03	65,54	39,91	29,62	16,21	8,54	4,82
0,97	30	141,39	114,54	100,61	88,18	76,12	66,43	40,47	30,05	16,47	8,67	4,90
0,98	50	146,44	118,57	104,18	91,59	79,00	68,79	41,96	31,20	17,14	9,01	5,13
0,99	75	150,17	121,55	106,82	94,11	81,13	70,53	43,06	32,05	17,64	9,27	5,29
0,99	100	152,70	123,56	108,61	95,82	82,57	71,71	43,80	32,63	17,98	9,44	5,40

Fuente: elaboración propia.

En la figura 16, se presenta las curvas IDF generadas para la estación climática Guatemala Sur para los periodos de diseño 10, 20 y 50 años, generadas a partir de la aplicación de la distribución normal.

Figura 16. **Curvas IDF de la estación Guatemala Sur, utilizando la distribución normal**



Fuente: elaboración propia.

En la tabla VII se muestra la cantidad de milímetros de lluvia estimada para los distintos periodos de retorno en la estación climática Guatemala Sur utilizando la distribución Gumbel.

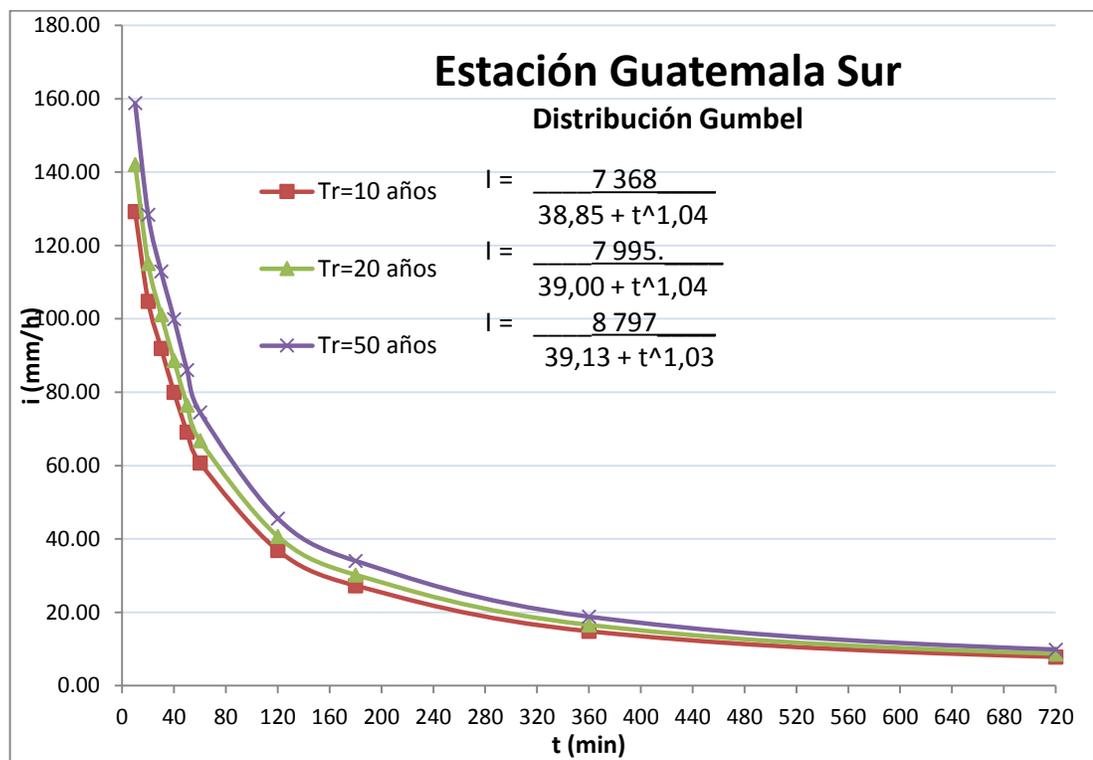
Tabla VII. Probabilidad de intensidad de lluvia máxima en la estación climática Guatemala Sur utilizando distribución de Gumbel

Distribución de Gumbel												
Probabilidad	Período de retorno	Intensidad (mm/h)										
		10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
0,50	2	95,51	77,92	68,13	57,18	49,96	45,00	26,97	19,59	10,31	5,54	2,89
0,80	5	115,80	94,12	82,49	70,89	61,53	54,48	32,94	24,22	13,03	6,92	3,78
0,90	10	129,24	104,84	92,00	79,96	69,19	60,75	36,90	27,28	14,84	7,84	4,37
0,93	15	136,82	110,89	97,37	85,09	73,51	64,29	39,13	29,01	15,85	8,36	4,70
0,95	20	142,12	115,12	101,12	88,67	76,54	66,77	40,69	30,22	16,56	8,72	4,94
0,96	25	146,21	118,39	104,02	91,43	78,87	68,68	41,89	31,15	17,11	9,00	5,12
0,97	30	149,54	121,04	106,37	93,68	80,76	70,23	42,87	31,91	17,56	9,23	5,26
0,98	50	158,81	128,44	112,93	99,94	86,05	74,56	45,60	34,02	18,80	9,86	5,67
0,99	75	166,13	134,28	118,11	104,89	90,22	77,98	47,75	35,69	19,78	10,36	5,99
0,99	100	171,31	138,41	121,78	108,39	93,18	80,40	49,28	36,87	20,48	10,71	6,22

Fuente: elaboración propia.

En la figura 17, se presenta las curvas IDF generadas para la estación climática Guatemala Sur para los periodos de diseño 10, 20 y 50 años, generadas a partir de la aplicación de la distribución Gumbel.

Figura 17. **Curvas IDF de la estación Guatemala Sur, utilizando la distribución de Gumbel**



Fuente: elaboración propia.

4.3. Estación Compuertas Amatitlán

En la siguiente tabla se detalla la máxima precipitación dada en milímetros de lluvia para cada discretización establecida y analizada en la estación climática Compuertas Amatitlán. Los datos fueron tomados de bandas pluviográficas analizadas con una discretización de 10 minutos.

Tabla VIII. **Máxima precipitación según discretización en estación Compuertas Amatitlán**

Año	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
1999	10,00	20,00	24,00	28,70	28,80	28,90	32,50	35,70	39,10	39,10	39,10
2000	13,30	23,30	30,30	30,80	31,10	31,20	37,00	38,40	46,50	50,40	50,40
2001	10,70	13,50	15,00	18,00	25,20	27,20	30,90	35,00	40,40	40,40	40,40
2002	15,30	20,00	30,00	34,00	40,00	44,00	64,60	64,60	64,60	64,60	64,60
2003	8,00	14,00	15,50	15,80	15,80	15,80	25,00	32,60	32,60	32,60	32,60
2004	10,00	15,00	18,50	21,50	24,00	25,50	30,00	49,50	51,50	51,50	51,50
2005	10,00	13,00	16,00	17,00	20,00	25,00	28,70	29,50	44,00	67,70	124,50
2006	15,00	29,00	37,60	41,60	49,00	53,00	58,50	58,50	58,50	58,80	58,80
2007	20,00	30,00	40,00	40,40	44,50	45,30	54,60	65,50	69,70	69,70	69,70
2009	4,80	7,30	8,00	8,80	10,00	11,60	16,50	22,40	29,90	39,30	39,30
2010	15,00	28,00	38,00	39,90	39,90	39,90	48,60	48,80	49,00	61,80	90,90
2011	15,00	25,00	32,50	40,00	50,00	57,50	75,30	83,40	103,30	112,20	124,00
2012	18,00	28,00	30,50	32,50	36,00	40,00	50,80	51,60	51,60	51,60	51,60
2013	12,50	22,50	24,70	25,00	25,10	25,30	30,30	33,60	37,30	38,20	38,20
2014	20,00	30,00	40,00	47,00	52,00	55,50	65,50	69,10	69,80	69,80	69,80
2015	26,00	32,50	36,50	42,50	42,70	42,70	42,70	42,70	50,00	50,00	50,00
2016	19,10	28,00	32,80	40,50	45,00	49,00	54,10	58,90	59,90	59,90	59,90
2017	20,00	40,00	53,00	59,70	65,20	66,70	68,10	70,00	99,30	99,30	99,30

Fuente: elaboración propia.

En la tabla IX se muestra la cantidad de milímetros de lluvia estimada para los distintos periodos de retorno en la estación climática Compuertas Amatitlán utilizando la distribución normal.

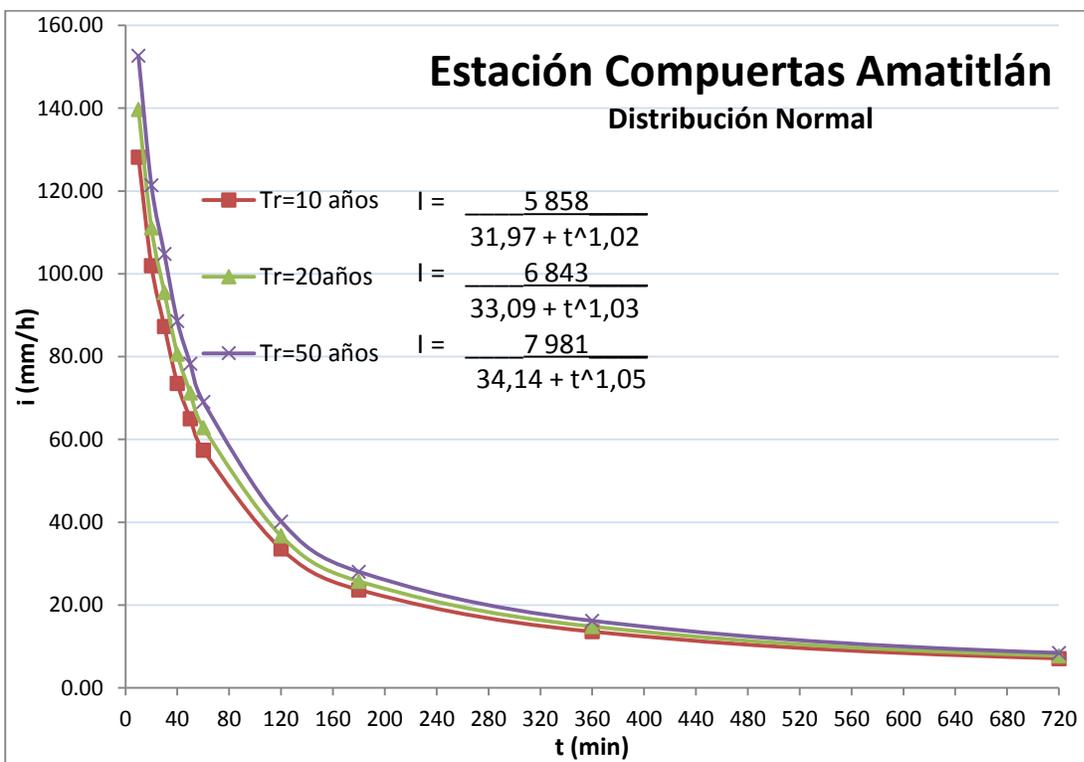
Tabla IX. **Probabilidad de intensidad de lluvia máxima en la estación climática Compuertas Amatitlán utilizando distribución normal**

Probabilidad	Distribución Normal											
	Período de retorno	Intensidad (mm/h)										
		10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
0,50	2	87,57	69,85	58,10	48,64	42,95	38,01	22,60	16,48	9,23	4,89	2,67
0,80	5	114,25	90,98	77,26	65,01	57,44	50,75	29,82	21,22	12,09	6,35	3,66
0,90	10	128,20	102,03	87,28	73,57	65,01	57,41	33,59	23,70	13,58	7,11	4,18
0,93	15	135,16	107,54	92,27	77,84	68,79	60,73	35,48	24,93	14,32	7,49	4,43
0,95	20	139,71	111,15	95,55	80,63	71,27	62,91	36,71	25,74	14,81	7,74	4,60
0,96	25	143,07	113,81	97,96	82,69	73,09	64,51	37,62	26,34	15,17	7,92	4,73
0,97	30	145,71	115,90	99,85	84,31	74,52	65,77	38,33	26,81	15,45	8,07	4,82
0,98	50	152,68	121,42	104,86	88,59	78,30	69,10	40,22	28,05	16,20	8,45	5,08
0,99	75	157,83	125,50	108,56	91,75	81,10	71,56	41,61	28,96	16,75	8,73	5,27
0,99	100	161,32	128,26	111,06	93,89	83,00	73,23	42,56	29,58	17,12	8,92	5,40

Fuente: elaboración propia.

En la figura 18, se presenta las curvas IDF generadas para la estación climática Compuertas Amatitlán para los periodos de diseño 10, 20 y 50 años, generadas a partir de la aplicación de la distribución normal.

Figura 18. **Curvas IDF de la estación Compuertas Amatitlán, utilizando la distribución normal**



Fuente: elaboración propia.

La tabla X muestra la cantidad de milímetros de lluvia estimada para los distintos periodos de retorno en la estación climática Compuertas Amatitlán utilizando la distribución de Gumbel.

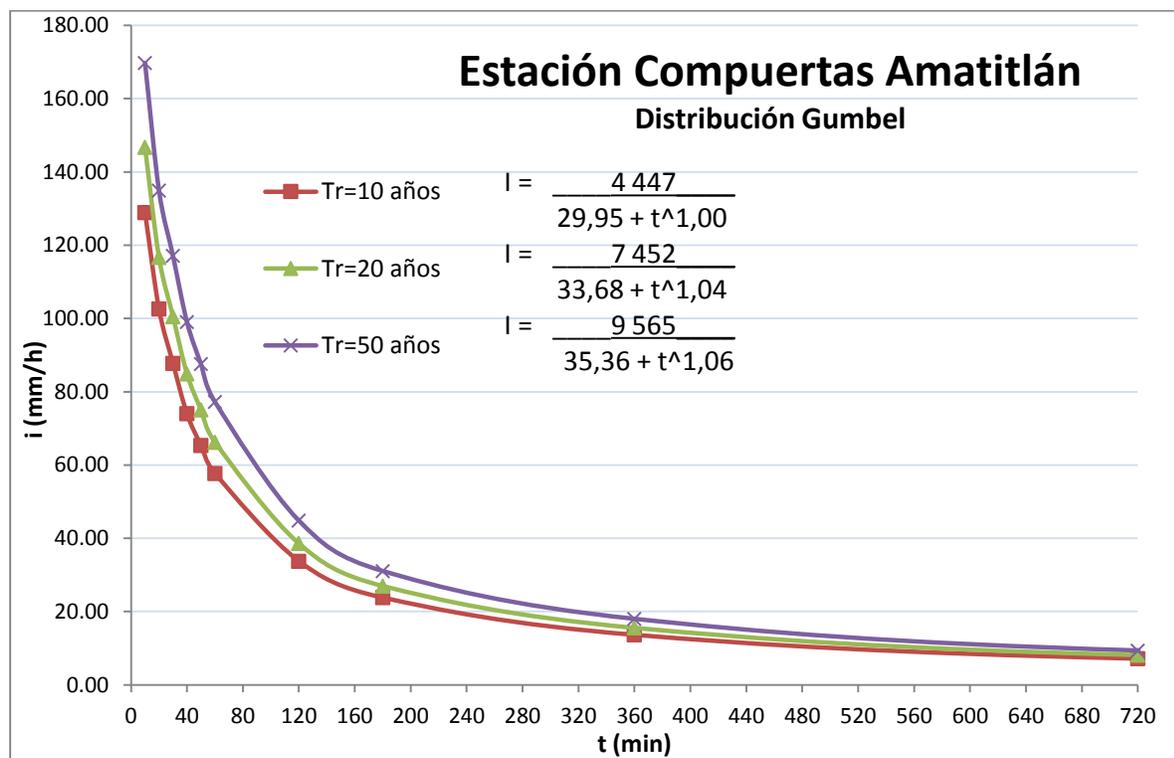
Tabla X. **Probabilidad de intensidad de lluvia máxima en la estación climática Compuertas Amatitlán utilizando distribución de Gumbel**

Distribución de Gumbel												
Probabilidad	Período de retorno	Intensidad (mm/h)										
		10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
0,50	2	82,36	65,73	54,36	45,45	40,13	35,52	21,19	15,55	8,67	4,61	2,48
0,80	5	110,38	87,92	74,48	62,64	55,34	48,90	28,77	20,53	11,67	6,14	3,52
0,90	10	128,93	102,61	87,80	74,02	65,41	57,76	33,79	23,83	13,66	7,15	4,20
0,93	15	139,39	110,90	95,32	80,44	71,09	62,76	36,62	25,69	14,78	7,72	4,59
0,95	20	146,72	116,70	100,58	84,93	75,07	66,26	38,61	26,99	15,56	8,12	4,86
0,96	25	152,36	121,17	104,63	88,39	78,13	68,95	40,13	27,99	16,17	8,43	5,07
0,97	30	156,95	124,81	107,93	91,21	80,63	71,14	41,38	28,81	16,66	8,68	5,24
0,98	50	169,75	134,94	117,12	99,06	87,57	77,26	44,84	31,08	18,03	9,38	5,71
0,99	75	179,86	142,95	124,37	105,26	93,06	82,08	47,57	32,88	19,11	9,93	6,09
0,99	100	187,01	148,61	129,51	109,65	96,94	85,50	49,51	34,15	19,87	10,32	6,35

Fuente: elaboración propia.

En la figura 19, se presenta las curvas IDF generadas para la estación climática Compuertas Amatitlán para los periodos de diseño 10, 20 y 50 años, generadas a partir de la aplicación de la distribución Gumbel.

Figura 19. **Curvas IDF de la estación Compuertas Amatitlán, utilizando la distribución Gumbel**



Fuente: elaboración propia.

4.4. Estación climática Embalse Jurúm Marinalá

En la siguiente tabla se detalla la máxima precipitación dada en milímetros de lluvia para cada discretización establecida y analizada en la estación climática Embalse Jurúm Marinalá. Los datos fueron tomados de bandas pluviográficas analizadas con una discretización de 10 minutos.

Tabla XI. **Máxima precipitación según discretización en estación Embalse Jurúm Marinalá**

Año	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
2000	16,00	30,00	39,00	42,00	44,70	45,00	64,20	65,60	66,50	66,50	66,50
2001	20,00	40,00	53,50	72,50	82,00	91,50	128,00	136,60	141,80	141,80	141,80
2002	18,00	28,00	38,00	47,00	53,00	59,30	65,00	73,40	93,20	93,20	93,20
2003	22,00	37,50	50,00	60,00	63,50	67,00	93,50	96,20	96,20	96,20	96,20
2004	20,10	40,00	53,00	61,00	70,00	83,00	104,00	105,30	113,80	126,00	130,70
2005	20,00	38,00	50,00	60,00	60,00	60,00	75,00	119,90	119,90	119,90	119,90
2006	10,00	20,00	23,00	30,00	35,00	40,00	75,00	94,00	99,30	99,30	99,30
2007	10,00	18,00	20,00	27,70	32,10	37,50	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
2008	10,00	20,00	30,00	36,00	40,00	44,00	68,00	85,20	86,80	86,80	86,80
2009	30,00	46,00	60,00	70,00	78,00	82,50	95,70	95,90	95,90	95,90	95,90
2010	16,30	25,00	30,00	38,00	48,00	54,00	75,80	78,60	135,00	147,60	279,00
2011	15,00	22,00	30,00	33,10	38,80	40,40	52,60	54,80	58,50	58,50	58,50
2012	10,00	20,00	30,00	36,80	40,00	47,20	64,00	80,00	97,70	98,50	98,50
2013	20,00	30,00	33,00	40,00	42,00	43,00	58,00	87,80	116,60	116,60	126,50
2014	27,00	30,00	40,00	50,00	55,00	60,00	72,80	72,90	72,90	72,90	72,90
2015	15,00	25,00	30,00	40,00	50,00	60,00	65,90	68,70	84,30	84,30	84,30
2016	20,00	40,00	50,00	60,00	67,10	68,50	90,00	99,70	128,70	140,60	140,60
2017	12,00	22,00	32,00	40,60	50,00	51,60	60,00	71,50	73,10	73,10	73,10

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XII se muestra la cantidad de milímetros de lluvia estimada para los distintos periodos de retorno en la estación climática Embalse Jurúm Marinalá utilizando la distribución normal.

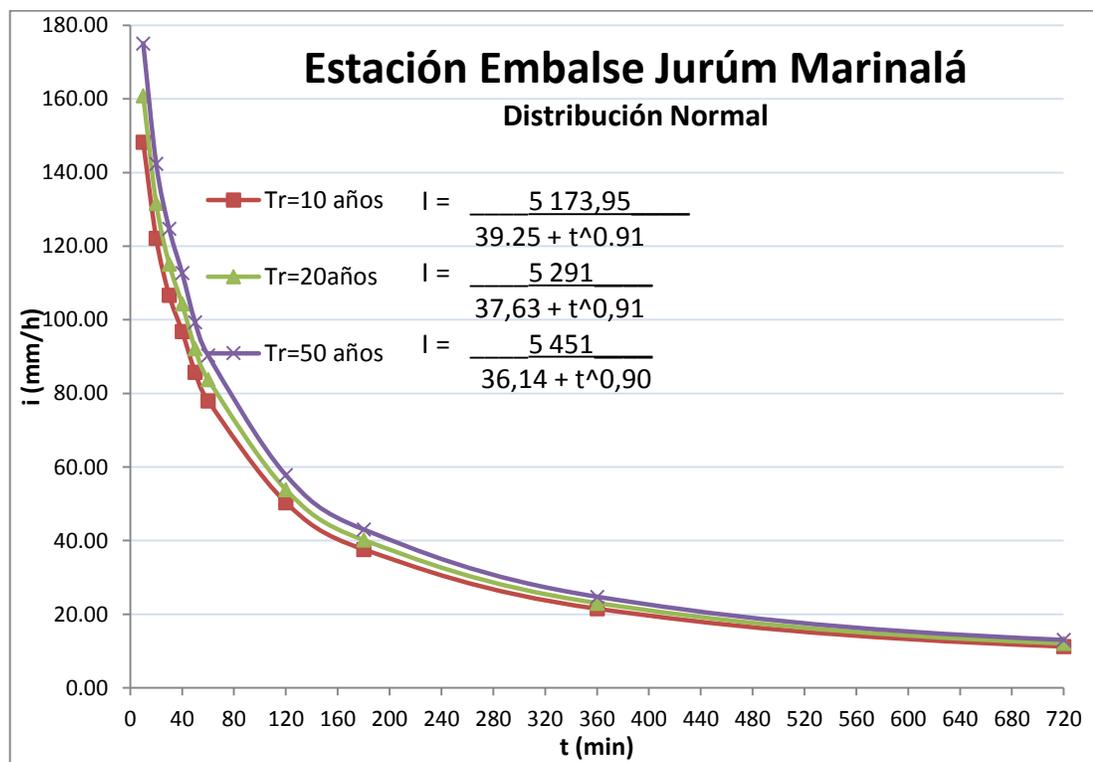
Tabla XII. Probabilidad de intensidad de lluvia máxima en la estación climática Embalse Jurúm Marinalá utilizando distribución normal

Distribución Normal												
Probabilidad	Período de retorno	Intensidad (mm/h)										
		10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
0,50	2	103,80	88,58	76,83	70,39	63,28	57,47	37,99	28,63	16,11	8,23	4,45
0,80	5	133,03	110,65	96,47	87,75	78,08	70,96	46,12	34,54	19,66	10,20	6,22
0,90	10	148,30	122,18	106,73	96,83	85,81	78,01	50,36	37,63	21,51	11,23	7,14
0,93	15	155,93	127,94	111,85	101,36	89,67	81,53	52,49	39,17	22,44	11,74	7,60
0,95	20	160,92	131,71	115,21	104,33	92,20	83,83	53,87	40,18	23,04	12,08	7,90
0,96	25	164,60	134,48	117,68	106,51	94,06	85,53	54,90	40,92	23,49	12,32	8,12
0,97	30	167,49	136,66	119,62	108,23	95,52	86,86	55,70	41,50	23,84	12,52	8,30
0,98	50	175,12	142,43	124,75	112,76	99,39	90,38	57,82	43,04	24,77	13,03	8,76
0,99	75	180,77	146,69	128,54	116,12	102,25	92,99	59,39	44,19	25,45	13,41	9,10
0,99	100	184,59	149,57	131,11	118,39	104,18	94,75	60,46	44,96	25,92	13,67	9,33

Fuente: elaboración propia.

En la figura 20, se presenta las curvas IDF generadas para la estación climática Embalse Jurúm Marinalá para los periodos de diseño 10, 20 y 50 años, generadas a partir de la aplicación de la distribución normal.

Figura 20. **Curvas IDF de la estación Embalse Jurúm Marinalá, utilizando la distribución normal**



Fuente: elaboración propia.

La tabla XIII muestra la cantidad de milímetros de lluvia estimada para los distintos periodos de retorno en la estación climática Embalse Jurúm Marinalá utilizando la distribución de Gumbel.

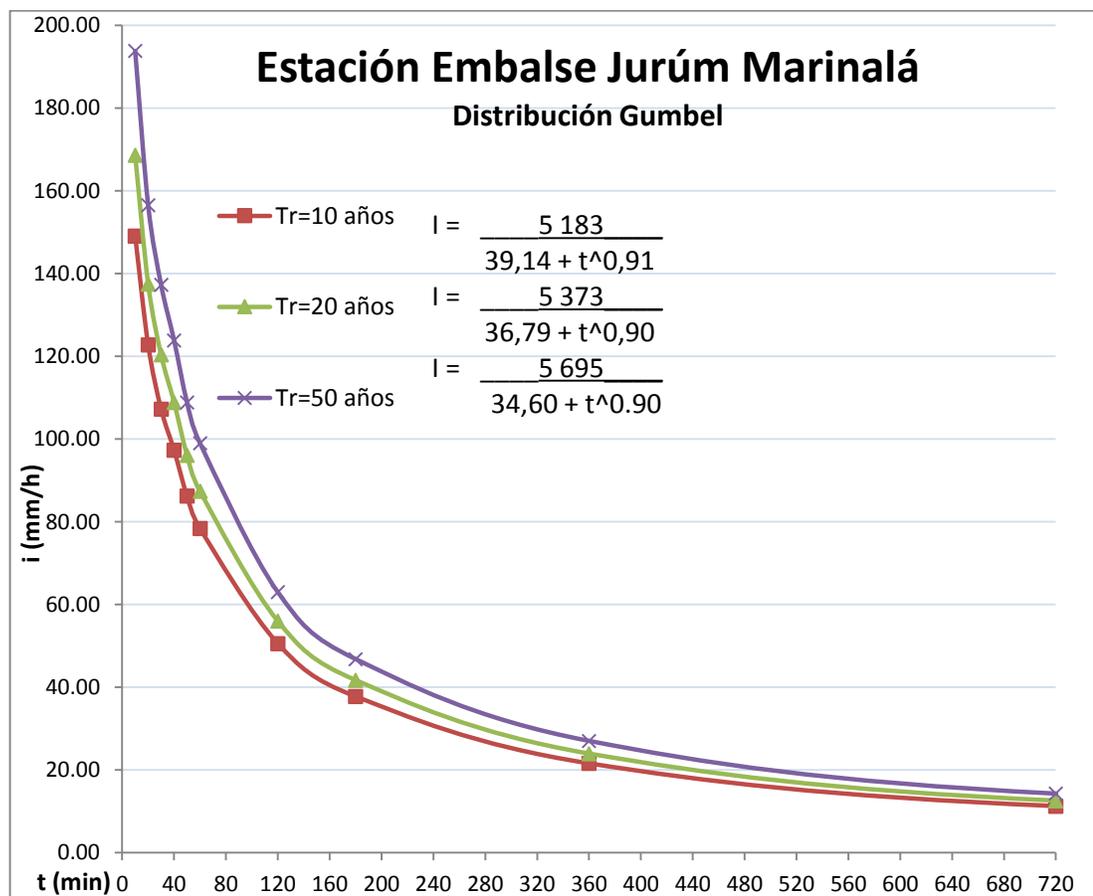
Tabla XIII. Probabilidad de intensidad de lluvia máxima en la estación climática Embalse Jurúm Marinalá utilizando distribución de Gumbel

Distribución de Gumbel												
Probabilidad	Período de retorno	Intensidad (mm/h)										
		10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
0,50	2	98,10	84,28	73,00	67,00	60,39	54,84	36,40	27,48	15,42	7,85	4,11
0,80	5	128,79	107,45	93,62	85,24	75,93	69,00	44,94	33,68	19,14	9,91	5,96
0,90	10	149,10	122,79	107,27	97,31	86,22	78,38	50,59	37,79	21,61	11,28	7,19
0,93	15	160,57	131,44	114,97	104,12	92,02	83,67	53,78	40,10	23,00	12,05	7,88
0,95	20	168,60	137,50	120,36	108,89	96,08	87,37	56,01	41,73	23,97	12,59	8,36
0,96	25	174,78	142,17	124,52	112,56	99,21	90,22	57,73	42,98	24,73	13,01	8,74
0,97	30	179,81	145,96	127,90	115,55	101,76	92,54	59,13	43,99	25,34	13,35	9,04
0,98	50	193,82	156,54	137,31	123,87	108,86	99,01	63,03	46,82	27,04	14,29	9,89
0,99	75	204,89	164,90	144,75	130,45	114,46	104,12	66,11	49,06	28,38	15,04	10,56
0,99	100	212,73	170,82	150,01	135,10	118,43	107,73	68,28	50,65	29,33	15,56	11,03

Fuente: elaboración propia.

En la figura 21, se presenta las curvas IDF generadas para la estación climática Embalse Jurúm Marinalá para los periodos de diseño 10, 20 y 50 años, generadas a partir de la aplicación de la distribución normal.

Figura 21. **Curvas IDF de la estación Embalse Jurúm Marinalá, utilizando la distribución de Gumbel**



Fuente: elaboración propia.

4.5. Estación Climática El Volcán

En la siguiente tabla se detalla la máxima precipitación dada en milímetros de lluvia para cada discretización establecida y analizada en la estación climática El Volcán. Los datos se tomaron de bandas pluviográficas analizadas con una discretización de 10 minutos.

Tabla XIV. **Máxima precipitación según discretización en estación El Volcán**

Año	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
1997	20,00	30,00	40,00	46,00	50,00	54,50	56,20	64,60	81,40	81,40	81,40
1998	30,00	46,00	60,00	70,00	78,00	82,50	95,70	95,90	95,90	95,90	95,90
1999	20,00	38,80	40,00	50,00	51,00	54,60	59,20	63,40	65,60	65,60	65,60
2000	10,00	20,00	30,00	35,00	40,00	50,00	70,00	82,50	97,70	97,70	97,70
2001	13,00	20,00	28,00	35,00	40,50	50,00	56,50	56,50	56,50	56,50	56,50
2002	20,00	40,00	50,00	60,00	63,00	70,00	80,20	80,60	80,60	80,60	80,60
2003	15,00	20,00	23,00	27,00	30,00	32,90	40,50	52,40	53,40	72,50	100,20
2004	20,00	30,00	40,00	50,00	53,50	55,50	71,50	81,50	105,00	105,50	105,50
2005	20,00	30,00	36,00	40,00	45,10	52,60	66,00	91,70	158,70	220,70	240,20
2006	7,00	8,90	11,00	14,00	16,00	18,50	27,00	36,00	61,00	73,20	73,20
2007	20,00	30,00	36,00	40,00	45,00	50,00	66,80	76,70	88,90	90,30	90,30
2008	20,00	30,00	39,60	42,60	44,00	46,60	56,30	60,00	87,40	89,60	89,60
2009	16,00	26,00	36,00	38,00	38,60	40,00	75,10	81,00	95,40	95,40	95,40
2010	20,00	30,00	42,00	54,00	61,80	68,80	100,10	100,40	105,00	105,00	105,00
2011	20,00	40,00	46,00	48,00	50,00	55,00	66,40	70,00	74,00	87,70	87,70
2012	21,00	35,00	41,00	47,10	52,10	54,10	72,00	74,00	95,50	113,80	113,80
2013	16,00	23,00	30,00	35,00	40,00	44,00	59,50	60,50	70,50	103,90	103,90
2014	20,00	30,00	40,00	44,00	50,00	60,00	64,80	65,10	65,10	65,10	65,10
2015	20,00	40,00	50,00	57,00	63,00	70,00	100,00	112,00	114,30	114,30	114,30
2016	15,00	25,00	35,00	41,50	46,00	55,00	70,30	70,30	70,30	70,30	102,00

Continuación tabla XIV.

2017	20,00	30,00	40,00	45,00	50,00	60,00	93,40	93,40	93,40	100,00	101,40
-------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	--------

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XV se muestra la cantidad de milímetros de lluvia estimada para los distintos periodos de retorno en la estación climática El Volcán utilizando la distribución normal.

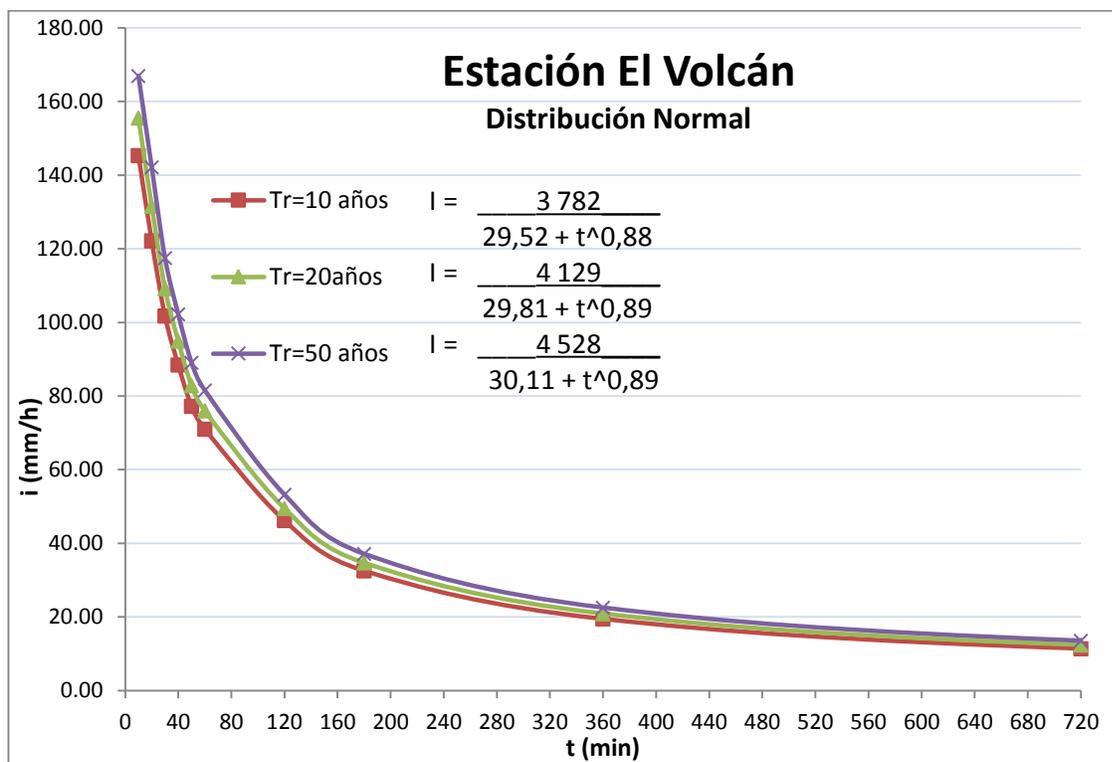
Tabla XV. **Probabilidad de intensidad de lluvia máxima en la estación climática El Volcán utilizando distribución normal**

°												
Probabilidad	Período de retorno	Intensidad (mm/h)										
		10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
0,50	2	109,43	88,96	75,58	65,66	57,58	53,55	34,46	24,90	14,41	7,88	4,10
0,80	5	133,00	110,76	92,77	80,62	70,49	65,03	42,17	29,93	17,75	10,21	5,37
0,90	10	145,32	122,15	101,75	88,45	77,24	71,04	46,19	32,56	19,50	11,43	6,03
0,93	15	151,47	127,84	106,24	92,35	80,61	74,03	48,20	33,87	20,38	12,04	6,36
0,95	20	155,50	131,56	109,17	94,91	82,82	75,99	49,52	34,73	20,95	12,44	6,58
0,96	25	158,46	134,31	111,34	96,79	84,44	77,44	50,48	35,36	21,37	12,73	6,74
0,97	30	160,79	136,46	113,04	98,27	85,72	78,57	51,25	35,86	21,70	12,97	6,86
0,98	50	166,95	142,16	117,53	102,18	89,09	81,57	53,26	37,17	22,57	13,58	7,20
0,99	75	171,50	146,37	120,85	105,07	91,59	83,79	54,75	38,15	23,22	14,03	7,44
0,99	100	174,59	149,22	123,09	107,02	93,28	85,29	55,75	38,80	23,66	14,33	7,61

Fuente: elaboración propia.

En la figura 22, se presenta las curvas IDF generadas para la estación climática El Volcán para los periodos de diseño 10, 20 y 50 años, generadas a partir de la aplicación de la distribución normal.

Figura 22. **Curvas IDF de la estación El Volcán, utilizando la distribución normal**



Fuente: elaboración propia.

La tabla XVI muestra la cantidad de milímetros de lluvia estimada para los distintos periodos de retorno en la estación climática El Volcán utilizando la distribución normal.

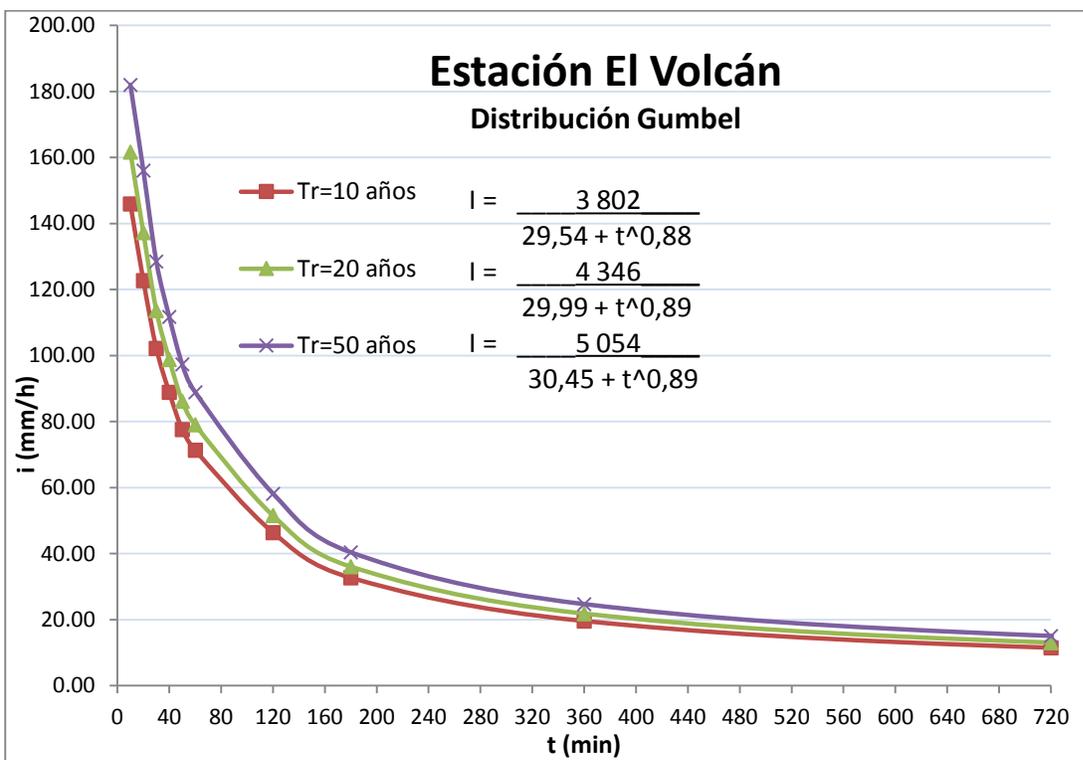
Tabla XVI. Probabilidad de intensidad de lluvia máxima en la estación climática El Volcán utilizando distribución Gumbel

Distribución de Gumbel												
Probabilidad	Período de retorno	Intensidad (mm/h)										
		10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
0,50	2	104,83	84,70	72,23	62,74	55,06	51,31	32,96	23,92	13,76	7,42	3,85
0,80	5	129,58	107,59	90,28	78,45	68,62	63,37	41,05	29,20	17,27	9,87	5,18
0,90	10	145,97	122,75	102,23	88,86	77,60	71,35	46,40	32,70	19,59	11,50	6,07
0,93	15	155,21	131,30	108,97	94,73	82,66	75,85	49,42	34,67	20,91	12,41	6,56
0,95	20	161,69	137,29	113,69	98,84	86,21	79,01	51,54	36,05	21,83	13,05	6,91
0,96	25	166,67	141,90	117,32	102,00	88,94	81,44	53,17	37,12	22,53	13,55	7,18
0,97	30	170,73	145,65	120,28	104,58	91,16	83,41	54,49	37,98	23,11	13,95	7,40
0,98	50	182,03	156,11	128,53	111,75	97,36	88,92	58,19	40,39	24,71	15,07	8,01
0,99	75	190,96	164,37	135,04	117,42	102,25	93,27	61,10	42,30	25,98	15,95	8,49
0,99	100	197,28	170,21	139,64	121,43	105,71	96,34	63,17	43,65	26,88	16,58	8,83

Fuente: elaboración propia.

En la figura 23, se presenta las curvas IDF generadas para la estación climática El Volcán para los periodos de diseño 10, 20 y 50 años, generadas a partir de la aplicación de la distribución normal.

Figura 23. **Curvas IDF de la estación El Volcán, utilizando la distribución de Gumbel**



Fuente: elaboración propia.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En las páginas anteriores se presentaron los resultados finales de las curvas IDF generados a partir de los datos registrados por las estaciones climáticas analizadas de la cuenca María Linda y Cahabón. Se mencionó que el análisis de las ecuaciones matemáticas de los modelos de Wenzel y modelo estándar se realizó con el software Canopy, el cual es una plataforma para analizar datos matemáticos, utilizando algoritmos para su uso.

Los resultados que arroja el software Canopy son los coeficientes para las ecuaciones del modelo estándar y el propuesto por Wenzel. Este solo exige los valores de intensidad de lluvia para cada periodo de retorno obtenido a partir de la distribución normal y de Gumbel, el adicional del software Canopy arroja el valor del error relativo al cuadrado de las ecuaciones de cada periodo de retorno el cual es un dato esencial para establecer el modelo que más se ajusta a cada estación climática estudiada.

Figura 24. Código de programación en Canopy para coeficientes

```
FittingCode.py x
1 import pyeq2
2
3 wenzelFunctionString = 'A / (X**n + B)'
4 standardFunctionString = 'A / ((X + B)**n)'
5
6 data_For_Row_D2 = '''
7 10    72.58
8 20    54.36
9 30    46.25
10 40    39.52
11 50    34.70
12 60    31.02
13 120   19.66
14 180   14.54
15 360   8.18
16 720   4.22
17 1440  2.13
18 '''
19
20 functionString = wenzelFunctionString
21 #functionString = standardFunctionString
22
23 equation = pyeq2.Models_2D.UserDefinedFunction.UserDefinedFunction(inUserFunctionString = functionString)
24
25 pyeq2.dataConvertorService().ConvertAndSortColumnarASCII(data_For_Row_D2, equation, False)
26
27 equation.Solve()
28
29 print 'User Defined Function:', functionString
30 print equation.fittingTargetDictionary[equation.fittingTarget], '=', equation.CalculateAllDataFittingTarget(equation.solvedCoefficients)
31 print "Fitted Parameters:"
32 for i in range(len(equation.solvedCoefficients)):
33     print " %s = %-.16E" % (equation.GetCoefficientDesignators()[i], equation.solvedCoefficients[i])
34
```

Fuente: elaboración propia.

5.1. Modelos de ajuste

En las tablas siguientes se presentan los coeficientes de las ecuaciones matemáticas de los modelos estudiados estándar y el propuesto por Wenzel de las estaciones climáticas estudiadas.

5.2. Estación climática La Pampa

La tabla XVII establece los coeficientes de la ecuación del modelo estándar de ajuste de curvas IDF y la sumatoria de los errores relativos al cuadrado para la distribución normal y de Gumbel de la estación climática La Pampa.

Tabla XVII. **Coeficientes del modelo estándar para la estación climática La Pampa**

Periodo de años	Modelo Estándar							
	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	A	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	a	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	1,01E+04	6,60E+01	1,13E+00	2,86E-02	9,16E+03	6,14E+01	1,12E+00	2,09E-02
5	1,58E+04	8,98E+01	1,19E+00	1,44E-01	1,49E+04	8,63E+01	1,18E+00	1,17E-01
10	1,92E+04	1,02E+02	1,21E+00	2,81E-01	1,94E+04	1,03E+02	1,21E+00	2,88E-01
15	2,10E+04	1,08E+02	1,22E+00	2,15E-01	2,22E+04	1,12E+02	1,23E+00	2,54E-01
20	2,22E+04	1,12E+02	1,23E+00	4,48E-01	2,42E+04	1,18E+02	1,24E+00	5,74E-01
25	2,31E+04	1,15E+02	1,24E+00	5,05E-01	2,57E+04	1,23E+02	1,25E+00	6,94E-01
30	2,39E+04	1,17E+02	1,24E+00	5,55E-01	2,70E+04	1,26E+02	1,25E+00	8,03E-01
50	2,58E+04	1,23E+02	1,25E+00	7,00E-01	3,08E+04	1,37E+02	1,27E+00	1,16E+00
75	2,73E+04	1,27E+02	1,26E+00	8,24E-01	3,39E+04	1,45E+02	1,28E+00	1,50E+00
100	2,83E+04	1,30E+02	1,26E+00	9,16E-01	3,62E+04	1,50E+02	1,29E+00	1,78E+00

Fuente: elaboración propia.

La tabla XVIII establece los coeficientes de la ecuación del modelo propuesto por Wenzel de ajuste de curvas IDF y la sumatoria de los errores relativos al cuadrado para la distribución normal y de Gumbel de la estación climática La Pampa.

Tabla XVIII. Coeficientes del modelo propuesto por Wenzel para la estación climática La Pampa

Periodo de años	Modelo Wenzel							
	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	a	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	1,84E+04	4,86E+01	1,22E+00	5,54E-02	1,57E+04	4,68E+01	1,20E+00	3,60E-02
5	3,91E+04	5,68E+01	1,32E+00	3,54E-01	3,53E+04	5,57E+01	1,31E+00	2,83E-01
10	5,51E+04	6,05E+01	1,37E+00	7,15E-01	5,60E+04	6,07E+01	1,37E+00	7,36E-01
15	6,45E+04	6,22E+01	1,39E+00	5,53E-01	7,09E+04	6,32E+01	1,40E+00	6,57E-01
20	7,14E+04	6,33E+01	1,40E+00	1,16E+00	8,31E+04	6,49E+01	1,42E+00	1,50E+00
25	7,68E+04	6,41E+01	1,41E+00	1,31E+00	9,31E+04	6,61E+01	1,44E+00	1,81E+00
30	8,13E+04	6,47E+01	1,42E+00	1,44E+00	1,02E+05	6,71E+01	1,45E+00	2,10E+00
50	9,39E+04	6,62E+01	1,44E+00	3,11E-04	1,31E+05	6,97E+01	1,48E+00	3,07E+00
75	1,04E+05	6,73E+01	1,45E+00	2,16E+00	1,57E+05	7,17E+01	1,50E+00	3,99E+00
100	1,11E+05	6,80E+01	1,46E+00	2,41E+00	1,78E+05	7,30E+01	1,52E+00	4,74E+00

Fuente: elaboración propia.

5.3. Estación climática Guatemala Sur

La tabla XIX establece los coeficientes de la ecuación del modelo estándar de ajuste de curvas IDF y la sumatoria de los errores relativos al cuadrado para la distribución normal y de Gumbel de la estación climática Guatemala Sur.

Tabla XIX. **Coeficientes del modelo estándar para la estación climática Guatemala Sur**

Periodo de años	Modelo Estándar							
	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	A	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	a	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	5,27E+03	4,21E+01	1,04E+00	8,86E-03	5,08E+03	4,22E+01	1,04E+00	9,23E-03
5	6,23E+03	4,19E+01	1,03E+00	1,77E-02	6,09E+03	4,19E+01	1,03E+00	1,51E-02
10	6,74E+03	4,18E+01	1,03E+00	3,15E-02	6,76E+03	4,17E+01	1,03E+00	3,24E-02
15	6,99E+03	4,17E+01	1,03E+00	2,43E-02	7,14E+03	4,17E+01	1,03E+00	2,87E-02
20	7,16E+03	4,17E+01	1,03E+00	4,99E-02	7,41E+03	4,17E+01	1,03E+00	6,51E-02
25	7,27E+03	4,17E+01	1,03E+00	5,67E-02	7,62E+03	4,17E+01	1,02E+00	7,94E-02
30	7,38E+03	4,17E+01	1,03E+00	6,29E-02	7,78E+03	4,16E+01	1,02E+00	9,30E-02
50	7,63E+03	4,17E+01	1,02E+00	8,03E-02	8,25E+03	4,16E+01	1,02E+00	1,38E-01
75	7,82E+03	4,16E+01	1,02E+00	9,54E-02	8,62E+03	4,16E+01	1,02E+00	1,85E-01
100	7,95E+03	4,16E+01	1,02E+00	1,07E-01	8,88E+03	4,15E+01	1,02E+00	2,23E-01

Fuente: elaboración propia.

La tabla XX establece los coeficientes de la ecuación del modelo propuesto por Wenzel de ajuste de curvas IDF y la sumatoria de los errores relativos al cuadrado, para la distribución normal y de Gumbel de la estación climática Guatemala Sur.

Tabla XX. **Coeficientes del modelo propuesto por Wenzel para la estación climática Guatemala Sur**

Periodo de años	Modelo Wenzel							
	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	a	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	5,97E+03	3,85E+01	1,05E+00	1,00E-02	5,80E+03	3,84E+01	1,06E+00	1,04E-02
5	6,88E+03	3,88E+01	1,04E+00	1,92E-02	6,75E+03	3,87E+01	1,05E+00	1,65E-02
10	7,36E+03	3,89E+01	1,04E+00	3,36E-02	7,37E+03	3,89E+01	1,04E+00	3,44E-02
15	7,59E+03	3,89E+01	1,04E+00	2,56E-02	7,74E+03	3,89E+01	1,04E+00	3,01E-02
20	7,75E+03	3,90E+01	1,04E+00	5,24E-02	8,00E+03	3,90E+01	1,04E+00	6,79E-02
25	7,86E+03	3,90E+01	1,04E+00	5,93E-02	8,19E+03	3,90E+01	1,03E+00	8,25E-02
30	7,97E+03	3,90E+01	3,62E-02	6,57E-02	8,34E+03	3,90E+01	1,03E+00	9,63E-02
50	8,21E+03	3,91E+01	1,03E+00	8,34E-02	8,80E+03	3,91E+01	1,03E+00	1,42E-01
75	8,39E+03	3,91E+01	1,03E+00	9,88E-02	9,16E+03	3,92E+01	1,03E+00	1,89E-01
100	8,51E+03	3,91E+01	1,03E+00	1,11E-01	9,41E+03	3,92E+01	1,03E+00	2,28E-01

Fuente: elaboración propia.

5.4. Estación climática Compuertas Amatitlán

La tabla XXI establece los coeficientes de la ecuación del modelo estándar de ajuste de curvas IDF y la sumatoria de los errores relativos al cuadrado, para la distribución normal y de Gumbel de la estación climática Compuertas Amatitlán.

Tabla XXI. **Coeficientes del modelo estándar para la estación climática Compuertas Amatitlán**

Periodo de años	Modelo estándar							
	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	A	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	a	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	3,11E+03	2,59E+01	9,82E-01	9,35E-04	2,82E+03	2,46E+01	9,76E-01	1,26E-03
5	4,73E+03	3,12E+01	1,01E+00	3,14E-03	4,49E+03	3,06E+01	1,00E+00	2,35E-03
10	5,62E+03	3,35E+01	1,02E+00	8,11E-03	5,66E+03	3,36E+01	1,02E+00	8,40E-03
15	6,07E+03	3,45E+01	1,02E+00	6,93E-03	6,35E+03	3,50E+01	1,02E+00	8,74E-03
20	6,37E+03	3,51E+01	1,02E+00	1,55E-02	6,82E+03	3,60E+01	1,03E+00	2,17E-02
25	6,58E+03	3,55E+01	1,03E+00	1,83E-02	7,20E+03	3,66E+01	1,03E+00	2,79E-02
30	6,76E+03	3,58E+01	1,03E+00	2,06E-02	7,50E+03	3,72E+01	1,03E+00	3,36E-02
50	7,22E+03	3,67E+01	1,03E+00	2,82E-02	8,36E+03	3,85E+01	1,04E+00	5,38E-02
75	7,56E+03	3,73E+01	1,03E+00	3,49E-02	9,04E+03	3,95E+01	1,04E+00	7,38E-02
100	7,80E+03	3,77E+01	1,03E+00	3,99E-02	9,53E+03	4,01E+01	1,04E+00	9,06E-02

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXII establece los coeficientes de la ecuación del modelo propuesto por Wenzel de ajuste de curvas IDF y la sumatoria de los errores relativos al cuadrado, para la distribución normal y de Gumbel de la estación climática Compuertas Amatitlán.

Tabla XXII. Coeficientes del modelo propuesto por Wenzel para la estación climática Compuertas Amatitlán

Periodo de años	Modelo Wenzel							
	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	a	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	2,84E+03	2,65E+01	9,67E-01	7,63E-04	2,52E+03	2,56E+01	9,57E-01	9,94E-04
5	4,74E+03	3,04E+01	1,01E+00	3,24E-03	4,45E+03	2,99E+01	1,00E+00	2,39E-03
10	5,86E+03	3,20E+01	1,02E+00	8,54E-03	5,92E+03	3,21E+01	1,02E+00	8,84E-03
15	6,45E+03	3,27E+01	1,03E+00	7,32E-03	6,81E+03	3,31E+01	1,03E+00	9,23E-03
20	6,84E+03	3,31E+01	1,03E+00	1,64E-02	7,45E+03	3,37E+01	1,04E+00	2,29E-02
25	7,13E+03	3,34E+01	1,04E+00	1,93E-02	7,95E+03	3,41E+01	1,04E+00	2,94E-02
30	7,36E+03	3,36E+01	1,04E+00	2,18E-02	8,37E+03	3,45E+01	1,05E+00	3,54E-02
50	7,98E+03	3,41E+01	1,05E+00	2,98E-02	9,57E+03	3,54E+01	1,06E+00	5,66E-02
75	8,46E+03	3,45E+01	1,05E+00	3,68E-02	1,05E+04	3,60E+01	1,06E+00	7,75E-02
100	8,78E+03	3,48E+01	1,05E+00	4,20E-02	1,12E+04	3,64E+01	1,07E+00	9,51E-02

Fuente: elaboración propia.

5.5. Estación climática Embalse Jurúm Marinalá

La tabla XXIII establece los coeficientes de la ecuación del modelo estándar de ajuste de curvas IDF y la sumatoria de los errores relativos al cuadrado, para la distribución normal y de Gumbel de la estación climática Embalse Jurúm Marinalá.

Tabla XXIII. **Coeficientes del modelo estándar para la estación climática Embalse Jurúm Marinalá**

Periodo de años	Modelo Estándar							
	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	A	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	a	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	5,72E+03	4,59E+01	9,72E-01	5,87E-02	5,68E+03	4,86E+01	9,78E-01	5,91E-02
5	6,08E+03	3,70E+01	9,50E-01	9,64E-02	6,01E+03	3,80E+01	9,53E-01	8,78E-02
10	6,35E+03	3,43E+01	9,43E-01	1,36E-01	6,36E+03	3,42E+01	9,42E-01	1,38E-01
15	6,49E+03	3,32E+01	9,39E-01	1,22E-01	6,58E+03	3,26E+01	9,38E-01	1,34E-01
20	6,59E+03	3,26E+01	9,38E-01	1,75E-01	6,74E+03	3,17E+01	9,35E-01	2,02E-01
25	6,66E+03	3,21E+01	9,36E-01	1,88E-01	6,87E+03	3,10E+01	9,33E-01	2,24E-01
30	6,72E+03	3,18E+01	9,35E-01	1,98E-01	6,98E+03	3,05E+01	9,32E-01	2,43E-01
50	6,88E+03	3,10E+01	9,33E-01	2,25E-01	7,28E+03	2,94E+01	9,28E-01	2,98E-01
75	7,00E+03	3,04E+01	9,31E-01	2,47E-01	7,53E+03	2,86E+01	9,26E-01	3,45E-01
100	7,08E+03	3,01E+01	9,30E-01	2,61E-01	7,70E+03	2,81E+01	9,24E-01	3,78E-01

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXIV establece los coeficientes de la ecuación del modelo propuesto por Wenzel de ajuste de curvas IDF y la sumatoria de los errores relativos al cuadrado, para la distribución normal y de Gumbel de la estación climática Jurúm Marinalá.

Tabla XXIV. Coeficientes del modelo propuesto por Wenzel para la estación climática Embalse Jurúm Marinalá

Periodo de años	Modelo Wenzel							
	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	a	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	5,26E+03	4,96E+01	9,62E-01	4,30E-03	5,39E+03	5,19E+01	9,72E-01	4,12E-03
5	5,08E+03	4,18E+01	9,25E-01	1,22E-02	5,08E+03	4,26E+01	9,29E-01	1,02E-02
10	5,17E+03	3,93E+01	9,14E-01	2,34E-02	5,18E+03	3,91E+01	9,13E-01	2,42E-02
15	5,24E+03	3,82E+01	9,09E-01	1,86E-02	5,29E+03	3,77E+01	9,06E-01	2,21E-02
20	5,29E+03	3,76E+01	9,06E-01	3,78E-02	5,37E+03	3,68E+01	9,02E-01	4,96E-02
25	5,33E+03	3,72E+01	9,04E-01	4,32E-02	5,44E+03	3,62E+01	8,99E-01	6,03E-02
30	5,36E+03	3,69E+01	9,03E-01	4,78E-02	5,51E+03	3,57E+01	8,97E-01	7,06E-02
50	5,45E+03	3,61E+01	9,00E-01	6,08E-02	5,69E+03	3,46E+01	8,93E-01	1,05E-01
75	5,52E+03	3,56E+01	8,97E-01	7,27E-02	5,85E+03	3,38E+01	8,89E-01	1,38E-01
100	5,57E+03	3,53E+01	8,96E-01	8,13E-02	5,97E+03	3,34E+01	8,87E-01	1,65E-01

Fuente: elaboración propia.

5.6. Estación climática El Volcán

La tabla XXV establece los coeficientes de la ecuación del modelo estándar de ajuste de curvas IDF y la sumatoria de los errores relativos al cuadrado, para la distribución normal y de Gumbel de la estación climática El Volcán.

Tabla XXV. **Coeficientes del modelo estándar para la estación climática El Volcán**

Periodo de años	Modelo Estándar							
	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	A	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	a	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	3,39E+03	2,29E+01	9,09E-01	2,20E-03	3,18E+03	2,24E+01	9,05E-01	2,94E-03
5	4,46E+03	2,50E+01	9,23E-01	1,33E-02	4,30E+03	2,47E+01	9,21E-01	9,28E-03
10	5,03E+03	2,59E+01	9,29E-01	3,98E-02	5,06E+03	2,59E+01	9,29E-01	4,18E-02
15	5,31E+03	2,63E+01	9,31E-01	3,71E-02	5,49E+03	2,65E+01	9,33E-01	4,77E-02
20	5,50E+03	2,65E+01	9,33E-01	8,24E-02	5,79E+03	2,68E+01	9,35E-01	1,20E-01
25	5,64E+03	2,67E+01	9,34E-01	9,98E-02	6,02E+03	2,71E+01	9,37E-01	1,59E-01
30	5,75E+03	2,68E+01	9,35E-01	1,15E-01	6,21E+03	2,73E+01	9,38E-01	1,95E-01
50	6,03E+03	2,71E+01	9,37E-01	1,62E-01	6,74E+03	2,79E+01	9,41E-01	3,26E-01
75	6,25E+03	2,74E+01	9,38E-01	2,03E-01	7,16E+03	2,82E+01	9,43E-01	4,62E-01
100	6,39E+03	2,75E+01	9,39E-01	2,35E-01	7,45E+03	2,85E+01	9,45E-01	5,77E-01

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXVI establece los coeficientes de la ecuación del modelo propuesto por Wenzel de ajuste de curvas IDF y la sumatoria de los errores relativos al cuadrado, para la distribución normal y de Gumbel de la estación climática El Volcán.

Tabla XXVI. Coeficientes del modelo propuesto por Wenzel para la estación climática El Volcán

Periodo de años	Modelo Wenzel							
	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	2,55E+03	2,79E+01	8,67E-01	3,63E-03	2,40E+03	2,76E+01	8,64E-01	5,49E-03
5	3,36E+03	2,91E+01	8,80E-01	1,01E-02	3,24E+03	2,89E+01	8,78E-01	7,30E-03
10	3,78E+03	2,95E+01	8,85E-01	2,98E-02	3,80E+03	2,95E+01	8,85E-01	3,13E-02
15	3,99E+03	2,97E+01	8,87E-01	2,81E-02	4,12E+03	2,98E+01	8,88E-01	3,64E-02
20	4,13E+03	2,98E+01	8,88E-01	6,29E-02	4,35E+03	3,00E+01	8,90E-01	9,32E-02
25	4,24E+03	2,99E+01	8,89E-01	7,67E-02	4,52E+03	3,01E+01	8,91E-01	1,24E-01
30	4,31E+03	3,00E+01	8,89E-01	8,85E-02	4,66E+03	3,02E+01	8,92E-01	1,54E-01
50	4,53E+03	3,01E+01	8,91E-01	1,27E-01	5,05E+03	3,05E+01	8,95E-01	2,63E-01
75	4,69E+03	3,02E+01	8,92E-01	1,61E-01	5,37E+03	3,06E+01	8,97E-01	3,78E-01
100	4,79E+03	3,03E+01	8,93E-01	1,87E-01	5,58E+03	3,07E+01	8,98E-01	4,77E-01

Fuente: elaboración propia.

5.7. Comparación de errores relativos

El error relativo se define como el valor resultante de la división entre el error absoluto y el valor exacto, es decir, la media. Por ello, se realiza una comparación de los errores relativos resultantes de los coeficientes de las ecuaciones matemáticas del modelo estándar y el propuesto por Wenzel.

El menor valor obtenido de la resta de estos errores relativos será el indicador para determinar qué modelo se ajusta más al estudio de la estación climatológica, esto realizando la resta entre la sumatoria de los errores absolutos al cuadrado.

En las siguientes tablas se muestran los errores relativos generados por los modelos estándar y el propuesto por Wenzel. Este análisis estadístico es fundamental para lograr determinar el modelo que más se ajusta al resultado de las curvas IDF.

5.7.1. Estación climática La Pampa

La tabla XXVII contiene la diferencia de errores de los modelos estándar y Wenzel, para la distribución normal y de Gumbel de la estación climática La Pampa.

Tabla XXVII. **Sumatoria de errores relativos al cuadrado para la estación climatológica La Pampa**

Periodo de retorno	Distribución Normal			Distribución de Gumbel		
	Modelo Estándar (I)	Modelo Wenzel (II)	Diferencia (I-II)	Modelo Estándar (I)	Modelo Wenzel (II)	Diferencia (I-II)
2	2,86E-02	5,54E-02	2,69E-02	3,60E-02	2,09E-02	1,52E-02
5	1,44E-01	3,54E-01	2,10E-01	2,83E-01	1,17E-01	1,66E-01
10	2,81E-01	7,15E-01	4,34E-01	7,36E-01	2,88E-01	4,47E-01
15	2,15E-01	5,53E-01	3,38E-01	6,57E-01	2,54E-01	4,03E-01
20	4,48E-01	1,16E+00	7,09E-01	1,50E+00	5,74E-01	9,22E-01
25	5,05E-01	1,31E+00	8,06E-01	1,81E+00	6,94E-01	1,12E+00
30	5,55E-01	1,44E+00	8,88E-01	2,10E+00	8,03E-01	1,30E+00
50	7,00E-01	3,11E+00	7,00E-01	3,07E+00	1,16E+00	1,90E+00
75	8,24E-01	2,16E+00	1,34E+00	3,99E+00	1,50E+00	2,49E+00
100	9,16E-01	2,41E+00	1,49E+00	4,74E+00	1,78E+00	2,95E+00

Fuente: elaboración propia.

5.7.2. Estación climática Guatemala Sur

La tabla XXVIII contiene la diferencia de errores de los modelos estándar y Wenzel, para la distribución normal y de Gumbel de la estación climática Guatemala Sur.

Tabla XXVIII. **Sumatoria de errores relativos al cuadrado para la estación climatológica Guatemala Sur**

Periodo de retorno	Distribución Normal			Distribución de Gumbel		
	Modelo Estándar (I)	Modelo Wenzel (II)	Diferencia (I-II)	Modelo Estándar (I)	Modelo Wenzel (II)	Diferencia (I-II)
2	8,86E-03	1,00E-02	1,16E-03	1,04E-02	9,23E-03	1,21E-03
5	1,77E-02	1,92E-02	1,53E-03	1,65E-02	1,51E-02	1,43E-03
10	3,15E-02	3,36E-02	2,01E-03	3,44E-02	3,24E-02	2,01E-03
15	2,43E-02	2,56E-02	1,32E-03	3,01E-02	2,87E-02	1,43E-03
20	4,99E-02	5,24E-02	2,46E-03	6,79E-02	6,51E-02	2,80E-03
25	5,67E-02	5,93E-02	2,61E-03	8,25E-02	7,94E-02	3,10E-03
30	6,29E-02	6,57E-02	2,78E-03	9,63E-02	9,30E-02	3,31E-03
50	8,03E-02	8,34E-02	3,11E-03	1,42E-01	1,38E-01	4,01E-03
75	9,54E-02	9,88E-02	3,38E-03	1,89E-01	1,85E-01	4,62E-03
100	1,07E-01	1,11E-01	3,56E-03	2,28E-01	2,23E-01	5,04E-03

Fuente: elaboración propia.

5.7.3. Estación climática Compuertas Amatitlán

La tabla XXIX contiene la diferencia de errores de los modelos estándar y Wenzel, para la distribución normal y de Gumbel de la estación climática Compuertas Amatitlán.

Tabla XXIX. Sumatoria de errores relativos al cuadrado para la estación climatológica Compuertas Amatitlán

Periodo de retorno	Distribución Normal			Distribución de Gumbel		
	Modelo Estándar (I)	Modelo Wenzel (II)	Diferencia (I-II)	Modelo Estándar (I)	Modelo Wenzel (II)	Diferencia (I-II)
2	9,35E-04	7,63E-04	1,73E-04	9,94E-04	1,26E-03	2,69E-04
5	3,14E-03	3,24E-03	9,77E-05	2,39E-03	2,35E-03	4,27E-05
10	8,11E-03	8,54E-03	4,29E-04	8,84E-03	8,40E-03	4,47E-04
15	6,93E-03	7,32E-03	3,83E-04	9,23E-03	8,74E-03	4,91E-04
20	1,55E-02	1,64E-02	8,67E-04	2,29E-02	2,17E-02	1,20E-03
25	1,83E-02	1,93E-02	1,02E-03	2,94E-02	2,79E-02	1,53E-03
30	2,06E-02	2,18E-02	1,15E-03	3,54E-02	3,36E-02	1,83E-03
50	2,82E-02	2,98E-02	1,55E-03	5,66E-02	5,38E-02	2,79E-03
75	3,49E-02	3,68E-02	1,89E-03	7,75E-02	7,38E-02	3,72E-03
100	3,99E-02	4,20E-02	2,11E-03	9,51E-02	9,06E-02	4,44E-03

Fuente: elaboración propia.

5.7.4. Estación climática Embalse Jurúm Marinalá

La tabla XXX contiene la diferencia de errores de los modelos estándar y Wenzel, para la distribución normal y de Gumbel de la estación climática Embalse Jurúm Marinalá.

Tabla XXX. **Sumatoria de errores relativos al cuadrado para la estación climatológica Embalse Jurúm Marinalá**

Periodo de retorno	Distribución Normal			Distribución de Gumbel		
	Modelo Estándar (I)	Modelo Wenzel (II)	Diferencia (I-II)	Modelo Estándar (I)	Modelo Wenzel (II)	Diferencia (I-II)
2	5,87E-02	4,30E-03	5,44E-02	4,12E-03	5,91E-02	5,50E-02
5	9,64E-02	1,22E-02	8,41E-02	1,02E-02	8,78E-02	7,76E-02
10	1,36E-01	2,34E-02	1,12E-01	2,42E-02	1,38E-01	1,14E-01
15	1,22E-01	1,86E-02	1,03E-01	2,21E-02	1,34E-01	1,12E-01
20	1,75E-01	3,78E-02	1,37E-01	4,96E-02	2,02E-01	1,52E-01
25	1,88E-01	4,32E-02	1,44E-01	6,03E-02	2,24E-01	1,63E-01
30	1,98E-01	4,78E-02	1,50E-01	7,06E-02	2,43E-01	1,72E-01
50	2,25E-01	6,08E-02	1,64E-01	1,05E-01	2,98E-01	1,94E-01
75	2,47E-01	7,27E-02	1,74E-01	1,38E-01	3,45E-01	2,07E-01
100	2,61E-01	8,13E-02	1,80E-01	1,65E-01	3,78E-01	2,13E-01

Fuente: elaboración propia.

5.7.5. Estación climática El Volcán

La tabla XXXI contiene la diferencia de errores de los modelos estándar y Wenzel, para la distribución normal y de Gumbel de la estación climática El Volcán.

Tabla XXXI. **Sumatoria de errores relativos al cuadrado para la estación climatológica El Volcán**

Periodo de retorno	Distribución Normal			Distribución de Gumbel		
	Modelo Estándar (I)	Modelo Wenzel (II)	Diferencia (I-II)	Modelo Estándar (I)	Modelo Wenzel (II)	Diferencia (I-II)
2	2,20E-03	3,63E-03	1,43E-03	5,49E-03	2,94E-03	2,55E-03
5	1,33E-02	1,01E-02	3,17E-03	7,30E-03	9,28E-03	1,98E-03
10	3,98E-02	2,98E-02	1,00E-02	3,13E-02	4,18E-02	1,06E-02
15	3,71E-02	2,81E-02	9,05E-03	3,64E-02	4,77E-02	1,13E-02
20	8,24E-02	6,29E-02	1,95E-02	9,32E-02	1,20E-01	2,72E-02
25	9,98E-02	7,67E-02	2,31E-02	1,24E-01	1,59E-01	3,45E-02
30	1,15E-01	8,85E-02	2,61E-02	1,54E-01	1,95E-01	4,11E-02
50	1,62E-01	1,27E-01	3,51E-02	2,63E-01	3,26E-01	6,30E-02
75	2,03E-01	1,61E-01	4,25E-02	3,78E-01	4,62E-01	8,37E-02
100	2,35E-01	1,87E-01	4,80E-02	4,77E-01	5,77E-01	1,01E-01

Fuente: elaboración propia.

Los resultados utilizando los errores relativos al cuadrado en cada estación climática estudiada, se comparan para seleccionar el mejor ajuste de datos y establecer cuál de los modelos se ajusta mejor, de acuerdo con los siguientes resultados:

El modelo propuesto por Wenzel se ajusta de mejor manera en la estación climática El Volcán, ya que presenta valores menores en errores relativos es un indicador confiable para seleccionar los resultados que el modelo Wenzel proporciona. En cambio, con las estaciones climáticas: La Pampa, Guatemala Sur, Embalse Jurúm Marinalá y Compuertas Amatitlán se ajustan al modelo estándar utilizado por el INSIVUMEH ya que el valor del error relativo es menor. Este modelo presenta mejor exactitud en las estaciones climatológicas de la cuenca María Linda.

Ambos modelos de distribución presentan errores en todas las estaciones climáticas en todos los periodos de retorno, independientemente de la naturaleza de los eventos de precipitación examinados en este estudio.

De la comparación de errores relativos al cuadrado de los modelos comparados, se concluye que el resultado que el modelo estándar es el que más se ajusta y adecua a cuatro de las cinco estaciones climáticas analizadas en este estudio. Estas cuatro estaciones pertenecen a la cuenca María Linda.

En las siguientes tablas se presenta los modelos matemáticos que, según la comparación de errores relativos, son los que se mejor se ajustan a las curvas IDF generadas siendo las siguientes:

La tabla XXXII muestra las ecuaciones que mejor se ajustó a la estación climática La Pampa.

Tabla XXXII. Ecuaciones que mejor se ajustan para la estación La Pampa

Estación climática La Pampa, método estándar			
Distribución Normal			
Periodo de retorno (años)	Ecuación	Periodo de retorno (años)	Ecuación
2	$\frac{10,133}{(t + 65,95)^{1,13}}$	25	$\frac{23,149}{(t + 114,78)^{1,2}}$
5	$\frac{15,842}{(t + 89,82)^{1,19}}$	30	$\frac{23,880}{(t + 117,05)^{1,2}}$
10	$\frac{19,249}{(t + 102,9)^{1,21}}$	50	$\frac{25,823}{(t + 122,84)^{1,2}}$
15	$\frac{21,033}{(t + 108,4)^{1,22}}$	75	$\frac{27,313}{(t + 127,15)^{1,2}}$
20	$\frac{22,245}{(t + 111,95)^{1,2}}$	100	$\frac{28,315}{(t + 129,93)^{1,2}}$

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXXIII muestra las ecuaciones que mejor se ajustó a la estación climática Guatemala Sur.

Tabla XXXIII. Ecuaciones que mejor se ajustan para la estación Guatemala Sur

Estación climática Guatemala Sur, método Estándar			
Distribución Normal			
Periodo de retorno (años)	Ecuación	Periodo de retorno (años)	Ecuación
2	$\frac{5265}{(t + 42, 14)^{1,0}}$	25	$\frac{7275}{(t + 41, 66)^{1,0}}$
5	$\frac{6233}{(t + 41, 88)^{1,0}}$	30	$\frac{7377}{(t + 41, 69)^{1,0}}$
10	$\frac{6741}{(t + 41, 79)^{1,0}}$	50	$\frac{7632}{(t + 41, 67)^{1,0}}$
15	$\frac{6989}{(t + 41, 72)^{1,0}}$	75	$\frac{7820}{(t + 41, 64)^{1,0}}$
20	$\frac{7155}{(t + 41, 70)^{1,0}}$	100	$\frac{7946}{(t + 41, 62)^{1,0}}$

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXXIV muestra las ecuaciones que mejor se ajustó a la estación climática Compuertas Amatitlán.

Tabla XXXIV. Ecuaciones que mejor se ajustan para la estación Compuertas Amatitlán

Estación climática Compuertas Amatitlán, método Estándar			
Distribución Normal			
Periodo de retorno (años)	Ecuación	Periodo de retorno (años)	Ecuación
2	$\frac{3113}{(t + 25,86)^{0,9}}$	25	$\frac{6585}{(t + 35,51)^{1,0}}$
5	$\frac{4729}{(t + 31,22)^{1,0}}$	30	$\frac{6758}{(t + 35,84)^{1,0}}$
10	$\frac{5617}{(t + 33,46)^{1,0}}$	50	$\frac{7217}{(t + 36,67)^{1,0}}$
15	$\frac{6068}{(t + 34,46)^{1,0}}$	75	$\frac{7564}{(t + 37,28)^{1,0}}$
20	$\frac{6368}{(t + 35,10)^{1,0}}$	100	$\frac{7796}{(t + 37,65)^{1,0}}$

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXXV muestra las ecuaciones que mejor se ajustó a la estación climática Embalse Jurúm Marinalá.

Tabla XXXV. **Ecuaciones que mejor se ajustan para la estación Embalse Jurúm Marinalá**

Estación climática Embalse Jurúm Marinalá, método estándar			
Distribución Normal			
Periodo de retorno (años)	Ecuación	Periodo de retorno (años)	Ecuación
2	$\frac{5715}{(t + 45,90)^{0,9}}$	25	$\frac{6662}{(t + 32,11)^{0,9}}$
5	$\frac{6076}{(t + 37,08)^{0,9}}$	30	$\frac{6719}{(t + 31,77)^{0,9}}$
10	$\frac{6345}{(t + 34,29)^{0,9}}$	50	$\frac{6879}{(t + 30,99)^{0,9}}$
15	$\frac{6488}{(t + 33,18)^{0,9}}$	75	$\frac{6999}{(t + 30,45)^{0,9}}$
20	$\frac{6589}{(t + 32,56)^{0,9}}$	100	$\frac{7078}{(t + 30,10)^{0,9}}$

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXXVI muestra las ecuaciones que mejor se ajustó a la estación climática El Volcán.

Tabla XXXVI. **Ecuaciones que mejor se ajustan para la estación El Volcán**

Estación climática El Volcán, método propuesto por Wenzel			
Distribución normal			
Periodo de retorno (años)	Ecuación	Periodo de retorno (años)	Ecuación
2	$\frac{2552}{(t^{0,87} + 27,93)}$	25	$\frac{4237}{(t^{0,89} + 29,91)}$
5	$\frac{3356}{(t^{0,88} + 29,07)}$	30	$\frac{4315}{(t^{0,89} + 29,97)}$
10	$\frac{3782}{(t^{0,88} + 29,52)}$	50	$\frac{4528}{(t^{0,89} + 30,12)}$
15	$\frac{3992}{(t^{0,89} + 29,71)}$	75	$\frac{4686}{(t^{0,89} + 30,23)}$
20	$\frac{4129}{(t^{0,89} + 29,81)}$	100	$\frac{4791}{(t^{0,89} + 30,29)}$

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Se obtuvo información de las curvas IDF en las cinco estaciones climáticas de dos cuencas, que tuvo como zona de estudio la cuenca María Linda y cuenca Cahabón, utilizando la distribución normal y Gumbel; comparando el modelo estándar y propuesto por Wenzel.
2. El modelo estándar de ajuste de curvas IDF fue el que mejor se acopló para todas las estaciones de la cuenca María Linda: La Pampa, Guatemala Sur, Embalse Jurúm Marinalá y Compuertas Amatitlán ya que presentaron menor sumatoria de errores relativos al cuadrado.
3. La única estación climatológica que se ajusta de mejor manera al método propuesto por Wenzel es la estación climatológica El Volcán perteneciente a la cuenca Cahabón.
4. Dentro del modelado de curvas IDF la distribución normal es la que más se acopló a los datos registrados para todas las estaciones climatológicas por su peculiar característica de evaluar variables aleatorias que tendrán un comportamiento aproximadamente normal.

RECOMENDACIONES

1. La actualización de esta información pluviográfica beneficia en gran magnitud, ya que al poseer datos más preciso y confiables aporta al momento de dimensionar obras hidráulicas.
2. Proveer un mantenimiento correcto y periódico a los equipos de medición climática, ya que de ello depende la confiabilidad y preservación de la información que es vital para realizar este tipo de estudios que apoyan de alguna manera al desarrollo del país.
3. El diseño correcto de obras hidráulicas en relación del conocimiento de curvas IDF, deben de proyectarse de manera correcta para evitar desastres naturales provocados por lluvias intensas.
4. Llevar a cabo este tipo de estudios periódicamente, que este estudio sea complementario y actualizado en algún lapso de tiempo, con el fin de añadir información actualizada, la que podría modificar sus resultados.
5. El grado de confiabilidad de las ecuaciones intensidad-duración-frecuencia depende en gran medida en la correcta lectura de registros pluviográficos, y el debido almacenaje de estos datos pluviográficos.

BIBLIOGRAFÍA

1. APARICIO MIJARES, Francisco Javier. *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Limusa, 1989. 303 p.
2. ARAGUREN, Juan F. *Análisis estadístico de valores extremos*. Argentina: Noldor S,R,L,. 1995. 102 p.
3. CANAVOS, George C. *Probabilidad y estadística aplicaciones y métodos*. México: McGraw-Hill Latinoamericana, 1988. 647 p.
4. CHOW, Ven Te. *Estadística en hidrología aplicada*. Colombia: McGraw-Hill Interamericana, 1994. 584 p.
5. CUADRAT, J; Pita, M. *Climatología*. 2a. ed. España: Ediciones Cátedra, 2000. 469 p.
6. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. *Componentes de una estación meteorológica*. [en línea]. <<http://www.insivumeh.gob.gt/1097-2/>> [Consulta: junio 2017].
7. _____. *Método estándar de cálculo de curvas Duración-Intensidad-Frecuencia*. Guatemala: INSIVUMEH, 1988. 77 p.

8. LINSLEY, Ray; KOHLER, Max; PAULS, Joseph. *Hidrología para ingenieros*. 2a ed. México: McGraw-Hill Latinoamericana, 1977. 300 p.
9. MENDENHALL, William. *Introducción a la probabilidad y la estadística*. México: CENAGE Learning, 2010. 644 p.
10. NAVIDI, William. *Estadística para ingenieros y científicos*. México: McGraw-Hill Interamericana, 2006. 736 p.
11. SÁNCHEZ, F, Javier. *Cálculos estadísticos en Hidrología*. Universidad de Salamanca, España. [en línea]. <http://hidrologia.usal.es/temas/calculos_esta.pdf>. [Consulta: febrero 2017].
12. SEGERER, CARLOS D. *Hidrología I*. Universidad Nacional de Cuyo, Argentina, 2007. 26 p.
13. UNESCO. *Curvas Intensidad Duración Frecuencia para las regiones Metropolitana, Maule y Biobío, Intensidades desde 15 minutos hasta 24 horas*. Uruguay: UNESCO, 2013. 129p.
14. VAUGHT, Travis; JONES, Eric. *Canopy*. [en línea]. <<https://store.enthought.com/downloads/#default>>. [Consulta: marzo de 2018]