



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS POR EL MÉTODO TRADICIONAL
UTILIZADO POR INSIVUMEH, CONTRA EL MODELO PROPUESTO POR WENZEL,
PARA LA DETERMINACIÓN DE CURVAS IDF, UTILIZANDO COMO REFERENCIA
CINCO ESTACIONES DE LAS CUENCAS ACHIGUATE Y MARÍA LINDA**

Mirtha Damaris Monzón Villatoro

Asesorado por el Ing. Sergio Antonio López Dubón

Guatemala, julio de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS POR EL MÉTODO TRADICIONAL
UTILIZADO POR INSIVUMEH, CONTRA EL MODELO PROPUESTO POR WENZEL,
PARA LA DETERMINACIÓN DE CURVAS IDF, UTILIZANDO COMO REFERENCIA
CINCO ESTACIONES DE LAS CUENCAS ACHIGUATE Y MARÍA LINDA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MIRTHA DAMARIS MONZÓN VILLATORO
ASESORADO POR EL ING. SERGIO ANTONIO LÓPEZ DUBÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, JULIO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

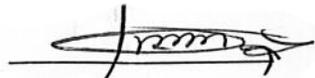
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
EXAMINADOR	Ing. José Mauricio Arriola Donis
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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 LOS DATOS OBTENIDOS POR EL MÉTODO TRADICIONAL
UTILIZADO POR INSIVUMEH, CONTRA EL MODELO PROPUESTO POR WENZEL,
PARA LA DETERMINACIÓN DE CURVAS IDF, UTILIZANDO COMO REFERENCIA
CINCO ESTACIONES DE LAS CUENCAS ACHIGUATE Y MARÍA LINDA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,
con fecha 26 de julio de 2012.



Mirtha Damaris Monzón Villatoro

Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco

Director de la Escuela de Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Pedro Aguilar Polanco:

Por este medio me es grato informarle que en mi calidad de asesor del trabajo de graduación bajo el título: **Comparación de los datos obtenidos por el método tradicional utilizado por INSIVUMEH, contra el modelo propuesto por Wensel, para la determinación de curvas IDF, utilizando como referencia cinco estaciones de las cuencas Achiguate y María Linda;** elaborado por la estudiante de Ingeniería Civil, Mirtha Damaris Monzón Villatoro, en grado de licenciatura, ha realizado ya todas las correcciones indicadas, por lo que doy por aprobado y solicito que se continúen los tramites correspondientes.

Sin otro particular por el momento me es grato despedirme de usted.

Atentamente,



Sergio Antonio López Dubón
Ingeniero Civil
Col. No. 9914

Sergio Antonio López Dubón

Ingeniero Civil Col. 9914

Asesor



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,
10 de marzo de 2015

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

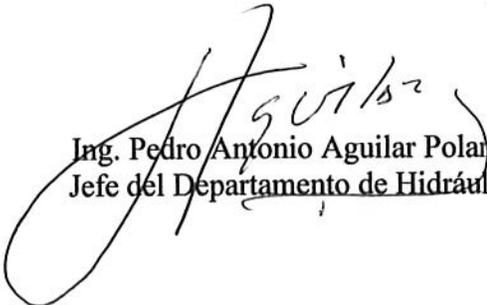
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS POR EL MÉTODO TRADICIONAL UTILIZADO POR INSIVUMEH, CONTRA EL MODELO PROPUESTO POR WENZEL, PARA LA DETERMINACIÓN DE CURVAS IDF, UTILIZANDO COMO REFERENCIA CINCO ESTACIONES DE LAS CUENCAS ACHIGUATE Y MARÍA LINDA,** desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil Mirtha Damaris Monzón Villatoro, quien contó con la asesoría del Ing. Sergio Antonio López Dubón.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y representa un aporte para el departamento y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua

/bbdeb.





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Sergio Antonio López Dubón y del Coordinador del Departamento de Hidráulica, Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco, al trabajo de graduación de la estudiante Mirtha Damaris Monzón Villatoro, titulado **COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS POR EL MÉTODO TRADICIONAL UTILIZADO POR INSIVUMEH, CONTRA EL MODELO PROPUESTO POR WENZEL, PARA LA DETERMINACIÓN DE CURVAS IDF, UTILIZANDO COMO REFERENCIA CINCO ESTACIONES DE LAS CUENCUAS ACHIGUATE Y MARÍA LINDA**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, julio 2015

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS POR EL MÉTODO TRADICIONAL UTILIZADO POR INSIVUMEH, CONTRA EL MODELO PROPUESTO POR WENZEL, PARA LA DETERMINACIÓN DE CURVAS IDF, UTILIZANDO COMO REFERENCIA CINCO ESTACIONES DE LAS CUENCAS ACHIGUATE Y MARÍA LINDA**, presentado por la estudiante universitaria: **Mirtha Damaris Monzón Villatoro**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, 27 de julio de 2015

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres	Mirtha Villatoro de Monzón y Celestino Monzón Mérida, por su apoyo incondicional, amor y buen ejemplo.
Mi nueva familia	Jean Michel Gregory, por su apoyo y Sophie Gregory, en especial, por ser mi mayor inspiración para completar mis estudios.
Mis hermanos	Yessenia y Nelson, por su cariño y paciencia.
Mis amigos (as)	Por todo su apoyo moral, colaboración y tiempo dedicado durante mis estudios.
Mi país	Guatemala, deseando siempre realizar aportes que nos permitan ser cada día mejores.
Mi familia en general	

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por darme la sabiduría y permitirme culminar esta meta.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por permitirme alcanzar una formación integral, gracias a sus diversos programas.
Facultad de Ingeniería	Por el trabajo y esfuerzo de docentes y colaboradores hacia sus estudiantes.
Mi asesor	Ing. Sergio Antonio López Dubón, por su orientación y por estar siempre dispuesto a colaborar.
Insivumeh	Por brindar los datos necesarios para la realización de este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
Hipótesis.....	XVI
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES GENERALES	1
1.1. Definiciones básicas de la cuenca.....	2
1.2. Cuencas de estudio.....	4
1.2.1. Cuenca del río Achiguate	6
1.2.2. Cuenca del río María Linda.....	8
2. ESTACIONES METEOROLÓGICAS	11
2.1. Componentes de la estación meteorológica.....	11
2.1.1. Terreno circundante.....	11
2.1.2. Parcela meteorológica	12
2.1.3. Abrigo meteorológico.....	12
2.1.4. Instrumentos	12
2.2. Clases de estaciones	12
2.3. Estación climatológica de referencia	13
2.4. Requisitos para una estación de observación	14
2.5. Instrumentación	14
2.5.1. Pluviómetro.....	14

2.5.2.	Pluviógrafo	15
2.6.	Estaciones de estudio	17
2.6.1.	Estación Alameda Icta.....	17
2.6.2.	Estación Insivumeh	17
2.6.3.	Estación Sábana Grande	17
2.6.4.	Estación Escuintla	17
2.6.5.	Estación Puerto de San José	18
3.	CURVAS INTENSIDAD–DURACIÓN–FRECUENCIA (IDF)	19
3.1.	Aplicación de las curvas IDF	22
3.2.	Construcción de las curvas IDF	22
3.2.1.	Recopilación obtenida del pluviógrafo	23
3.2.2.	Valores máximos.....	23
3.2.3.	Ajuste de valores a las distribuciones de probabilidad.....	23
3.2.4.	Construcción de curvas con los modelos matemáticos.....	23
4.	ESTADÍSTICA Y MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO	25
4.1.	Distribuciones de probabilidad en hidrología.....	25
4.1.1.	Momento de las distribuciones	26
4.1.2.	Parámetros estadísticos.....	26
4.1.2.1.	Media m.....	27
4.1.2.2.	Varianza s^2	27
4.1.3.	Distribuciones de probabilidad para variables continuas.....	28
4.1.3.1.	Distribución normal.....	28

4.1.3.2.	Distribución de Gumbel o extrema tipo I.....	29
4.2.	Modelos matemáticos.....	30
4.2.1.	Aproximaciones empíricas.....	30
5.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	33
5.1.	Resultados de precipitación y curvas IDF.....	33
5.1.1.	Resultados de la estación Alameda Icta.....	33
5.1.2.	Resultados de la estación Insivumeh.....	35
5.1.3.	Resultados de la estación Sábana Grande.....	38
5.1.4.	Resultados de la estación Escuintla.....	40
5.1.5.	Resultados de la estación Puerto de San José.....	43
5.2.	Coeficientes y errores para modelos estándar y Wenzel.....	45
5.2.1.	Resultados de la estación Alameda Icta.....	46
5.2.2.	Resultados de la estación Insivumeh.....	50
5.2.3.	Resultados de la estación Sábana Grande.....	54
5.2.4.	Resultados de la estación Escuintla.....	58
5.2.5.	Resultados de la estación Puerto de San José.....	62
5.2.6.	Análisis de resultados.....	66
	CONCLUSIONES.....	73
	RECOMENDACIONES.....	75
	BIBLIOGRAFÍA.....	77

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Cuencas hidrográficas de la vertiente del Pacífico.....	5
2.	Cuenca del río Achiguate	7
3.	Cuenca del río María Linda	9
4.	Pluviómetro	15
5.	Pluviógrafo y pluviograma	16
6.	Ubicación de las estaciones a estudiar	18
7.	Familia de curvas IDF	21
8.	Desviación estándar.....	28
9.	Curvas IDF de la estación Alameda Icta, distribución normal	34
10.	Curvas IDF de la estación Alameda Icta, distribución de Gumbel.....	35
11.	Curvas IDF de la estación Insivumeh, distribución normal.....	36
12.	Curvas IDF de la estación Insivumeh, distribución de Gumbel	37
13.	Curvas IDF de la estación Sábana Grande, distribución normal.....	39
14.	Curvas IDF de la estación Sábana Grande, distribución de Gumbel ...	40
15.	Curvas IDF de la estación Escuintla, distribución normal.....	41
16.	Curvas IDF de la estación Escuintla, distribución de Gumbel	42
17.	Curvas IDF de la estación Puerto San José, distribución normal.....	44
18.	Curvas IDF de la estación Puerto San José, distribución de Gumbel ..	45

TABLAS

I.	Cuencas hidrográficas de la vertiente del Pacífico.....	4
----	---	---

II.	Probabilidad de precipitación para la estación Alameda Icta, distribución normal.....	33
III.	Probabilidad de precipitación para la estación Alameda Icta, distribución de Gumbel	34
IV.	Probabilidad de precipitación para la estación Insivumeh, distribución normal.....	36
V.	Probabilidad de precipitación para la estación Insivumeh, distribución de Gumbel	37
VI.	Probabilidad de precipitación para la estación Sábana Grande, distribución normal.....	38
VII.	Probabilidad de precipitación para la estación Sábana Grande, distribución de Gumbel	39
VIII.	Probabilidad de precipitación para la estación Escuintla, distribución normal.....	41
IX.	Probabilidad de precipitación para la estación Escuintla, distribución de Gumbel	42
X.	Probabilidad de precipitación para la estación Puerto de San José, distribución normal.....	43
XI.	Probabilidad de precipitación para la estación Puerto San José, distribución de Gumbel	44
XII.	Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula estándar, para una distribución normal, estación Alameda Icta.....	46
XIII.	Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula estándar, para una distribución de Gumbel, estación Alameda Icta	47
XIV.	Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula Wenzel, para una distribución normal, estación Alameda Icta.....	48
XV.	Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula Wenzel, para una distribución de Gumbel, estación Alameda Icta	49

XVI.	Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula estándar, para una distribución normal, estación Insivumeh	50
XVII.	Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula estándar, para una distribución de Gumbel, estación Insivumeh	51
XVIII.	Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula Wenzel, para una distribución normal, estación Insivumeh	52
XIX.	Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula Wenzel, para una distribución de Gumbel, estación Insivumeh	53
XX.	Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula estándar, para una distribución normal, estación Sábana Grande.....	54
XXI.	Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula estándar, para una distribución de Gumbel, estación Sábana Grande	55
XXII.	Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula Wenzel, para una distribución normal, estación Sábana Grande.....	56
XXIII.	Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula Wenzel, para una distribución de Gumbel, estación Sábana Grande	57
XXIV.	Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula estándar, para una distribución normal, estación Escuintla	58
XXV.	Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula estándar, para una distribución de Gumbel, estación Escuintla.....	59
XXVI.	Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula Wenzel, para una distribución normal, estación Escuintla	60
XXVII.	Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula Wenzel, para una distribución de Gumbel, estación Escuintla.....	61
XXVIII.	Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula estándar, para una distribución normal, estación Puerto de San José	62
XXIX.	Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula estándar, para una distribución de Gumbel, estación Puerto de San José	63

XXX.	Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula Wenzel, para una distribución normal, estación Puerto de San José	64
XXXI.	Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula Wenzel, para una distribución de Gumbel, estación Puerto de San José.....	65
XXXII.	Comparación para cada período de retorno del mejor ajuste para la estación Alameda Icta.....	68
XXXIII.	Comparación de errores absolutos promedio y determinación del mejor ajuste para la estación Insivumeh	69
XXXIV.	Comparación de errores absolutos promedio y determinación del mejor ajuste para la estación Sábana Grande	70
XXXV.	Comparación de errores absolutos promedio y determinación del mejor ajuste para la estación Escuintla.....	71
XXXVI.	Comparación de errores absolutos promedio y determinación del mejor ajuste para la estación Puerto de San José	72

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
P	Altura de precipitación de agua
A	Área
D_s	Densidad de corrientes
D_d	Densidad de drenaje
T_d	Duración de la lluvia
I	Intensidad
£	Intervalo
L_s	Longitud total de las corrientes
m o \bar{x}	Media estadística
\bar{X}	Media matemática
M	Momento
N_s	Número de corrientes perennes e intermitentes
S_{med}	Pendiente media de la cuenca
P(x)	Probabilidad
Σ	Sumatoria
s² o σ^2	Varianza

GLOSARIO

Bifurcación	División de una cosa en dos ramales, brazos o puntas.
Cuenca	Una superficie de tierra que drena hacia una corriente en un lugar especificado.
Discretización	Aproximación de la solución de un problema continuo representándolo en términos de un conjunto discreto de elementos.
Efímero	De corta duración.
Foco calorífico	Cualquier sistema termodinámico capaz de intercambiar cualquier cantidad de calor sin que cambien sus propiedades.
Hidrología torrencial	Estudio del aumento del caudal en un cauce con volúmenes excepcionales.
Intensidad de lluvia	La cantidad de agua que cae por unidad de tiempo en un lugar determinado.
Muestra sesgada	Muestra de un grupo en la cual no están igualmente equilibrados, u objetivamente representados, todos los factores o participantes del mismo.

Período de retorno	Tiempo esperado o tiempo medio entre dos sucesos de baja probabilidad.
Pluviógrafo	Instrumento que registra la duración y la magnitud de las precipitaciones.
Pluviograma	Diagrama utilizado en la meteorología que muestra la magnitud de la precipitación respecto al tiempo.
Tributaria	Dícese del curso de agua con relación al río, mar o lugar adonde va a parar.
Variable aleatoria continua	Una variable aleatoria es continua si su recorrido no es un conjunto numerable. Intuitivamente esto significa que el conjunto de posibles valores de la variable abarca todo un intervalo de números reales.
Variable aleatoria discreta	Una variable aleatoria es discreta si su recorrido es un conjunto discreto.

RESUMEN

La cuenca es una superficie de tierra que drena hacia una corriente en un lugar especificado. Guatemala cuenta con tres grandes regiones hidrográficas, conocidas como vertientes, que abarcan treinta y ocho cuencas. El presente trabajo de graduación utiliza como muestra cinco estaciones hidrológicas en dos cuencas de la vertiente del Pacífico, Achiguate y María Linda. Ambas cuencas presentan elevaciones mayores a 2 700 metros y en su parte más baja llega hasta el nivel del mar. Por lo cual ambas zonas son vulnerables a inundaciones.

La estación meteorológica es la instalación que posee las condiciones adecuadas para medir, evaluar y registrar diversas variables meteorológicas. Las estaciones tienen una clasificación de acuerdo a las variables que registran, que van desde A hasta D, siendo la estación A la más completa y la D la que registra únicamente una variable. También existen las estaciones automáticas, cuyo registro de datos se hace automática y continuamente. Las estaciones que se utilizaron como muestra para realizar este estudio fueron Alameda Icta, Insivumeh, Sábana Grande, Escuintla y Puerto de San José.

Las curvas intensidad-duración-frecuencia representan la intensidad media en intervalos de diferente duración, correspondiendo todos los de una misma curva a un mismo período de retorno.

La construcción de las curvas IDF se inició con la recopilación de los datos de pluviógrafos de cada una de las estaciones meteorológicas. Estas bandas son generadas semanalmente, por lo que se discretizaron para 24 horas. Con

ello se obtuvieron valores máximos de precipitación e intensidad de lluvia. Para obtener los valores correspondientes a cada período de retorno (2, 5, 10, 15, 25, 30, 50, 75, 100 años) se ajustaron los valores para la distribución normal y la distribución de Gumbel. Finalmente se utilizó el programa EurekaPro para realizar las modelaciones matemáticas correspondientes a la fórmula estándar y la propuesta por Wenzel, con lo que se obtuvieron los errores absolutos promedio. La comparación de los resultados indicó que el modelo propuesto por Wenzel se ajusta de mejor forma que el estándar.

OBJETIVOS

General

Comparar e interpretar los modelos obtenidos por el método tradicional de Insivumeh y el propuesto por Wenzel para los valores de precipitación en la elaboración de las curvas intensidad-duración-frecuencia para cinco estaciones de las cuencas Achiguate y María Linda.

Específicos

1. Hacer una comparación correctamente estructurada que permita a la unidad de investigación del Insivumeh y a los profesionales de la ingeniería, determinar qué distribución logra ajustarse de mejor forma para obtener datos más precisos en las curvas IDF, tomando en cuenta otros estudios realizados o a realizarse sobre este tema.
2. Recopilar la información de los pluviogramas de las estaciones y analizarlos a través de un sistema digital que sea de fácil acceso y asimismo tener un sistema comparativo a los estudios realizados con anterioridad.

Hipótesis

La fórmula propuesta por Wenzel se ajusta mejor que la fórmula estándar utilizada por Insivumeh, para la construcción de las curvas intensidad – duración – frecuencia

INTRODUCCIÓN

Para los diferentes proyectos de estructuras hidráulicas, como las obras de captación para proyectos de irrigación o de generación de energía, obras de drenaje transversal, sistemas de drenaje urbano, entre otros, es indispensable contar con los datos de caudales máximos, ya que en casos de lluvias extremas, suelen ocurrir inundaciones por el colapso de drenajes, desborde de ríos o deslizamiento de laderas, causantes de daños en las estructuras. Para un buen diseño se debe contar con las intensidades máximas de precipitación, las cuales son recopiladas en las curvas IDF (intensidad-duración-frecuencia), que resultan de la unión de puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y corresponden todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno.

Las curvas intensidad-duración-frecuencia se obtienen al realizar modelaciones con aproximaciones matemáticas, por lo que en este trabajo de graduación, se propone un estudio para determinar si la aproximación propuesta por Wenzel se ajusta de mejor forma que la aproximación estándar.

El estudio se realizó tomando como muestra cinco estaciones de control de las cuencas Achiguate y María Linda, cuyas características se especifican en los capítulos I y II. De cada una de estas estaciones se obtuvieron los datos de pluviógrafos, cuyas bandas fueron analizadas y se extrajeron los datos para poder realizar las respectivas modelaciones. Cabe mencionar que el estudio se ve limitado por la incompleta información meteorológica que tienen dichas estaciones.

En los capítulos III y IV se presentan las definiciones de las curvas IDF y las definiciones de la estadística y aproximaciones matemáticas que se utilizaron durante el estudio.

Finalmente, en el capítulo V se presentan los resultados obtenidos después de recolectar y procesar los datos de las estaciones. Lo cual conduce a la parte fundamental del estudio, que es la comparación de errores absolutos. Estos resultados permiten determinar qué modelo matemático se adecúa mejor para la muestra.

1. ANTECEDENTES GENERALES

Una cuenca es una superficie de tierra que drena hacia una corriente en un lugar especificado y es la unidad superficial más utilizada. Una definición importante para entender una cuenca es la divisoria de aguas; es una línea que separa la superficie de tierra cuyos desagües corren hacia otros ríos.

Las cuencas también pueden ser consideradas como un sistema; en este caso la frontera del sistema se dibuja alrededor de la cuenca, proyectando la divisoria de aguas verticalmente hacia arriba, y abajo hacia planos horizontales. La lluvia es la entrada, distribuida en el espacio sobre el plano superior; el caudal es la salida, concentrado en el espacio de la salida de la cuenca. La evaporación y el flujo sub superficial también pueden considerarse como salidas, pero son muy pequeños comparados con el caudal durante una tormenta. La estructura del sistema es el conjunto de caminos de flujo sobre el suelo o a través de él e incluye sistemas tributarios que eventualmente convergen para convertirse en caudal a la salida de la cuenca.

Se pueden reconocer dos tipos de cuenca: endorreica y exorreica. Las endorreicas son las que terminan en un lago central y la exorreica las que drenan fuera de la unidad hidrológica.

La superficie del terreno es la que compone la cuenca; contiene lagos y ríos, y alimenta los acuíferos por medio de la infiltración. Además es la fuente para obtener el sedimento que alimenta lagos y ríos y contiene los nutrientes para la vegetación, además de ser utilizada por el hombre para su explotación.

1.1. Definiciones básicas de la cuenca

El parteaguas es la línea imaginaria que divide la parte más alta de las cuencas, de manera que las aguas de lluvia que caen se reparten en una u otra cuenca. De esa forma la cuenca solo tiene una salida por donde pasa el cauce principal de la misma.

Los demás cursos de agua desembocan en el cauce principal y se denominan tributarios. Las formadas por el cauce tributario son cuencas tributarias o subcuencas. Entre mayor densidad de tributarios, la cuenca responde más rápido a una precipitación o tormenta. De hecho una de las formas como se distingue una cuenca es por el orden de tributarios que la conforman.

Un indicador del grado de bifurcación es el orden de corriente. Una corriente de orden 1 significa que no tiene tributarios, una de orden 2 está formada por dos corrientes de orden 1; y así sucesivamente.

Otro indicador del grado de bifurcación de una corriente es la densidad de corrientes, y se define como el número de corrientes perennes e intermitentes por unidad de área y la densidad de drenaje se define como la longitud de corrientes, por unidad de área:

$$D_z = \frac{N_z}{A}$$

$$D_d = \frac{L_z}{A}$$

N_p : número de corrientes perennes e intermitentes

L_s : longitud total de las corrientes

A : área

En una cuenca se reconocen dos tipos de cauces, los perennes y los efímeros. Muchas veces los efímeros son sinónimo de zonas secas o semiáridas, en tanto que las cuencas con cauces perennes son en donde la lluvia está presente a lo largo del periodo hidrológico.

El área de drenaje la constituye el área plana, en proyección horizontal, de la cuenca, limitada por el parteaguas.

La importancia de la forma de la cuenca es que define o tiene influencia en el tiempo que tarda la misma en concentrar la lluvia a la salida.

El factor de forma es la relación que existe entre el ancho medio de la cuenca y la longitud axial de la misma.

La pendiente media de la cuenca se puede extraer de la evaluación estadística de varios puntos colocados sobre la misma. De ellos se realiza un análisis de frecuencia mediante clasificación por clases. La pendiente media se evalúa como:

$$S_{med} = \frac{\sum_i \text{No. ocurrencias} \times \text{pendiente de clase}}{\sum_i \text{No. de ocurrencias}}$$

1.2. Cuencas de estudio

Los sistemas montañosos de Guatemala determinan tres grandes regiones hidrográficas que se conocen con el nombre de vertientes. Estas vertientes son: vertiente de Pacífico, vertiente del Golfo de México y vertiente del mar Caribe. En total con 38 cuencas.

El estudio que se presenta, acerca de la comparación de los datos obtenidos por el método tradicional utilizado por Insivumeh, contra el modelo propuesto por Wenzel, para la determinación de las curvas IDF, utiliza como referencia cinco estaciones de dos cuencas: Achiguate y María Linda. Estas están localizadas en la vertiente del Pacífico, la cual tiene 18 cuencas en total, como lo muestra la tabla I.

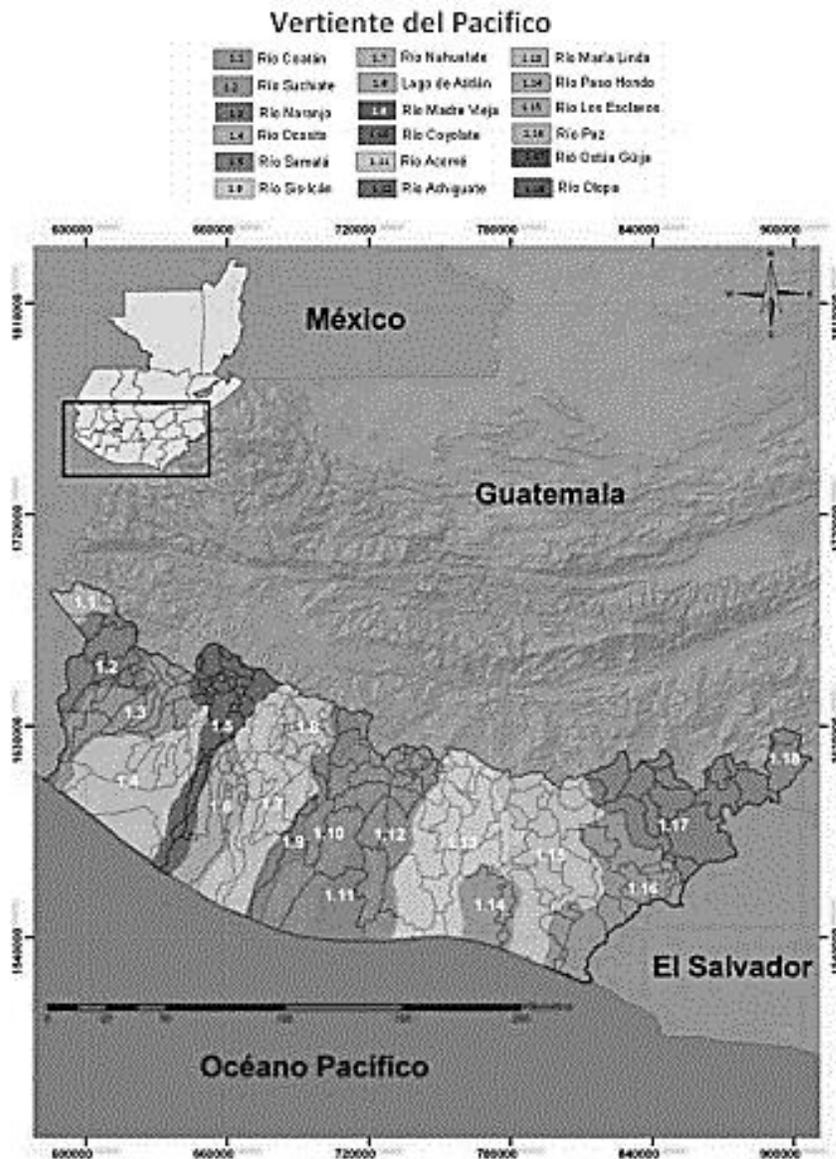
Tabla I. **Cuencas hidrográficas de la vertiente del Pacífico**

Vertiente	Cuenca	Área			Disponibilidad total 2006* (Millones de mts ³)		Caudal en m ³ /seg.
		KM ²	% Cuenca	% Nacional			
P a c í f i c o	1.01 Coatán	272	1%	0.2%	148	1%	4.69
	1.02 Suchiate	1,057	4%	1.0%	1,637	7%	51.91
	1.03 Naranjo	1,273	5%	1.2%	2,225	9%	70.55
	1.04 Ocosito	2,035	8%	1.9%	2,208	9%	70.02
	1.05 Samalá	1,510	6%	1.4%	1,330	6%	42.17
	1.06 Sis-Icán	919	4%	0.8%	1,064	4%	33.74
	1.07 Nahualate	1,941	8%	1.8%	2,506	11%	79.46
	1.08 Atitlán	541	2%	0.5%	333	1%	10.56
	1.09 Madre Vieja	878	4%	0.8%	932	4%	29.55
	1.1 Coyolate	1,648	7%	1.5%	2,176	9%	69.00
	1.11 Acomé	807	3%	0.7%	685	3%	21.72
	1.12 Achiguate	1,291	5%	1.2%	1,584	7%	50.23
	1.13 María Linda	2,572	11%	2.4%	2,205	9%	69.92
	1.14 Paso Hondo	721	3%	0.7%	463	2%	14.68
	1.15 Los Esclavos	2,271	9%	2.1%	2,103	9%	66.69
	1.16 Paz	1,732	7%	1.6%	964	4%	30.57
	1.17 Ostúa - Güija	2,243	9%	2.1%	1,018	4%	32.28
	1.18 Olopa	310	1%	0.3%	229	1%	7.26
Sub Total	18 cuencas	24,021	100%	22%	23,810	26%	755.01

Fuente: MAGA, INSIVUMEH, INE, MARN.

Dichas cuencas se localizan en el mapa de Guatemala, como lo muestra la figura 1.

Figura 1. **Cuencas hidrográficas de la vertiente del Pacífico**



Fuente: MAGA, INSIVUMEH, INE, MARN.

1.2.1. Cuenca del río Achiguate

La cuenca del río Achiguate se localiza en la zona sur de Guatemala, y drena hacia el océano Pacífico. Colinda con las cuencas de los ríos Coyolate y Acomé, localizadas al oeste; y la cuenca del río María Linda a su lado este.

Según la información proporcionada por el Ministerio de Ambiente (MARN), la cuenca Achiguate, cubre 29 municipios y 4 departamentos, que son Sacatepéquez, Chimaltenango, Escuintla y Guatemala. La extensión total es de 129 100 hectáreas. Esta extensión representa un 5 por ciento del área de la vertiente, y 1.2 por ciento del área total del país.

La cuenca presenta elevaciones del orden de los 2 000 metros en la cercanía de San Andrés Itzapa. Los tributarios drenan desde los volcanes de Fuego y Agua, con elevaciones de 3 900 y 2 700 metros sobre el nivel del mar. La elevación que corresponde al área cercana a Escuintla es de 300 metros sobre el nivel del mar y finalmente en la descarga del océano, la altura corresponde a la del nivel del mar.

El uso del suelo de la cuenca es representado en su gran mayoría por el cultivo de caña de azúcar (31,95 por ciento), seguido por granos básicos (15,09 por ciento), café (11,22 por ciento), arbustos y matorrales (10,63 por ciento) y otra variedad de cultivos que representan porcentajes menores.

La población total de la cuenca al 2002, correspondía a 324 905 habitantes y su proyección al 2010 era de 400 652 habitantes.

1.2.2. Cuenca del río María Linda

La cuenca del río María Linda se localiza al sur de Guatemala y drena al océano Pacífico. Colinda al oeste con la cuenca del río Achiguate, al este con las cuencas del río Paso Hondo y río Los Esclavos, al norte con la cuenca del río Motagua, y al sur con el océano Pacífico.

Según la información proporcionada por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), la cuenca del río María Linda cubre 27 municipios de cuatro departamentos, los cuales son Sacatepéquez, Guatemala, Escuintla y Santa Rosa. La extensión total de la cuenca es de 257 200 hectáreas, que corresponden al 11 por ciento del área de la vertiente y al 2,4 por ciento del área del país. La cuenca tiene elevaciones que van desde los 2 700 msnm hasta el nivel del mar.

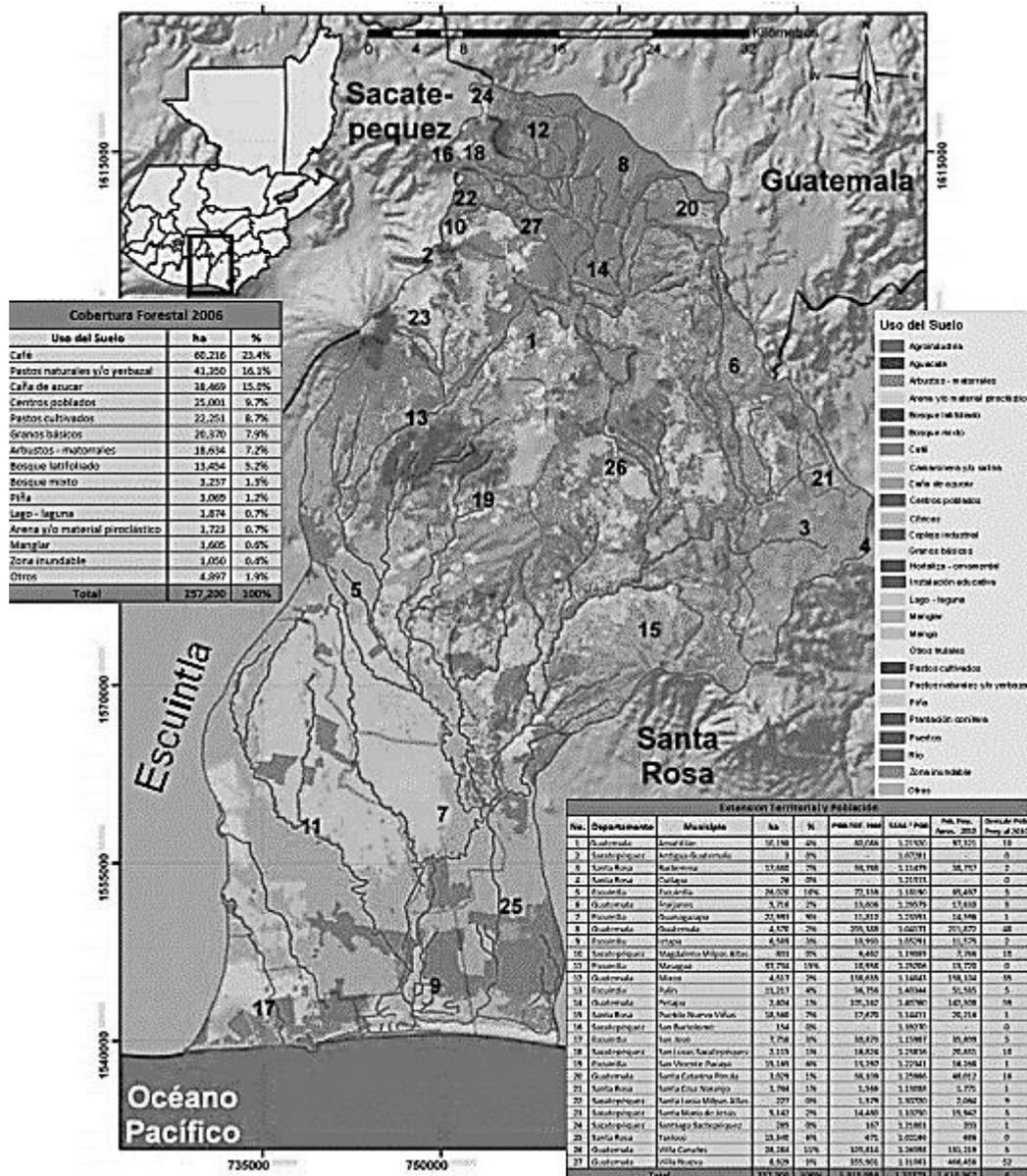
La cuenca del río María Linda es atravesada por una buena red de carreteras, siendo de gran importancia las carreteras centroamericanas CA-1, CA-2 y CA-9. Las rutas nacionales RN2, RN5, RN10, RN14 y RN18. Y las rutas departamentales 1, 2, 2S, 2N, 3, 3N, 3S, 4, 8, 9 y 10.

El uso del suelo en la cuenca del río María Linda, es principalmente para el cultivo de café (23,4 por ciento), seguido por pastos naturales (16,1 por ciento), caña de azúcar (15 por ciento) y centros poblados (9,7 por ciento), seguido de otra serie de cultivos que representan porcentajes menores.

La población al año 2002 correspondía a 1 315 954 habitantes, con una proyección al 2010 de 1 610 367 habitantes.

La figura 3 muestra la localización de la cuenca Achiguate, exponiendo el uso del suelo de la misma, y los departamentos en los que se localiza.

Figura 3. Cuenca del río María Linda



Fuente: MAGA, INSIVUMEH, INE, MARN.

2. ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Es una instalación provista de las condiciones adecuadas para medir, evaluar y registrar diversas variables meteorológicas. Una estación meteorológica actúa como el centro principal de los datos recogidos por el equipo de apoyo. Estos datos son recopilados, procesados e interpretados por los meteorólogos, que luego distribuyen la información como pronósticos.

2.1. Componentes de la estación meteorológica

Según el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh), los componentes básicos con los que debe contar una estación meteorológica son:

2.1.1. Terreno circundante

Este terreno debe ser plano y libre de obstrucciones y obstáculos en el espacio que lo rodee, además el suelo debe estar cubierto y debe ser circulado por una malla metálica. Es importante mencionar que este debe ser verdaderamente representativo de la zona de estudio, y se debe evitar que esté cerca de laderas muy inclinadas, depresiones o zonas expuestas a erosión. Otros factores que deben evitarse, son los que puedan proporcionar focos caloríficos, como fábricas o carreteras de asfalto. De igual forma, debe estar alejado de autopistas o ferrocarriles, debido a la vibración.

2.1.2. Parcela meteorológica

Es un espacio rectangular o cuadrado en donde se ubican los instrumentos de medición. Esta parcela debe estar orientada hacia el Norte, cuyo lado corresponde a la puerta de acceso. La distancia mínima entre los instrumentos de la parcela y la cerca es de 3 metros. La cerca debe estar circulada con alambre espigado o malla metálica.

2.1.3. Abrigo meteorológico

Es una caja de madera que se instala dentro de la parcela meteorológica y cuya función es proteger los instrumentos de medición. La importancia de este objeto es que debe mantener una temperatura uniforme igual al ambiente exterior.

2.1.4. Instrumentos

Es necesario que la instalación de los instrumentos sea semejante en todas las estaciones meteorológicas, ya que de esto depende que la medición sea realizada en forma correcta.

2.2. Clases de estaciones

Las estaciones meteorológicas se clasifican de acuerdo a las variables climáticas que registran, estas clases son respectivamente A, B, C y D.

Las estaciones clase A son las más completas ya que registran datos de precipitación pluvial, temperatura, humedad relativa, radiación solar, evapotranspiración, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento.

Las estaciones clase B cuentan con instrumentos para registrar las variables de precipitación pluvial, temperatura, humedad y velocidad del viento.

Las estaciones clase C tienen los instrumentos para registrar las variables de precipitación pluvial y temperatura.

Las estaciones clase D son las más sencillas, ya que solamente pueden registrar una variable, que puede ser precipitación pluvial o temperatura.

Otro tipo de clasificación de las estaciones, se refiere a las tradicionales y las automáticas. Las tradicionales son aquellas que precisan de la existencia de un encargado que las visite diariamente, a horas fijas, para la toma de datos. Las automáticas son las que se están imponiendo en la actualidad y se describen como estaciones, cuyo registro de datos se hace automáticamente y prácticamente continuo.

2.3. Estación climatológica de referencia

Se llama así a una estación, sin importar su categoría, que sirve de referencia a otras que se ubican en la misma región. Se debe ser especialmente cuidadoso en la ubicación de esta estación, ya que no debe recibir influencias que puedan alterar los registros, cambiando la homogeneidad de las series de observación.

2.4. Requisitos para una estación de observación

Básicamente el propósito de las estaciones climatológicas, es el de registrar los valores de los elementos que constituyen la materia prima de los estudios sobre el clima. Para esto se debe cumplir con las siguientes normas básicas:

- Adecuada ubicación y exposición
- Adecuado equipamiento instrumental
- Que los observadores posean un nivel adecuado de preparación
- Que exista un plan adecuado de observaciones

2.5. Instrumentación

Cada estación meteorológica contiene diversos instrumentos que proporcionan las diferentes variables que se mencionaron anteriormente. Para este estudio, se describen los instrumentos que se encargan de medir precipitación, ya que estos fueron los utilizados para obtener los datos que se presentan. La definición de precipitación del Insivumeh es: “volumen de lluvia que llega al suelo en un período determinado, se expresa en función del nivel que alcanzaría sobre una proyección horizontal de la superficie de la tierra”.

2.5.1. Pluviómetro

El pluviómetro mide la cantidad de agua precipitada en un determinado lugar. Su unidad de medida es en milímetros. Esto quiere decir que si se registra una precipitación de 5 mm, significaría que si toda el agua de lluvia se acumulara en un terreno plano sin evaporarse ni escurrir, la altura de la capa de agua sería de 5 mm.

Las características con las que el Insivumeh describe el pluviómetro indican que es un cilindro cuya boca receptora tiene un área de 200 centímetros cuadrados, delimitada por un anillo de bronce con borde biselado, que va unido a una caja cilíndrica de mayor diámetro y de una altura de 1,10 metros, el sistema registrador del aparato y una jarra colectora. El agua recogida va a través del embudo a una vasija de boca estrecha llamada colector, y para evitar la evaporación por calentamiento, está aislada del cilindro exterior. Para la medición del agua recolectada en el pluviómetro se utiliza una probeta de vidrio o de plástico, graduada con una escala de milímetros o pulgadas, que contiene unas rayitas largas que definen los milímetros y unas rayitas cortas que definen décimas de milímetros.

Figura 4. **Pluviómetro**



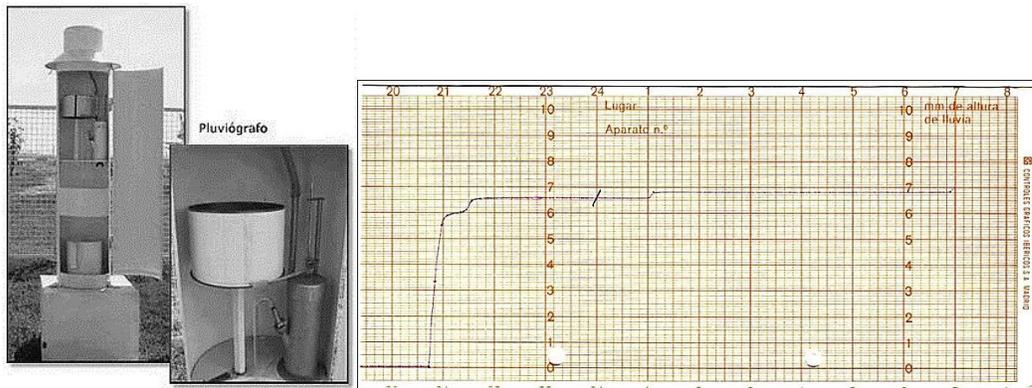
Fuente: ARAMET.

2.5.2. **Pluviógrafo**

Es un instrumento que registra la duración y la intensidad de las precipitaciones. Es la mejora del pluviómetro, ya que se le ha agregado un sistema de registro.

Los registros del pluviógrafo pueden definir la cantidad de precipitación y el tiempo que esta utilizó, con lo cual se puede analizar la distribución de la lluvia en el tiempo, para así calcular la intensidad de lluvia. Existen tres tipos de pluviógrafos: el de balanza, el de peso y el de flotador. El de flotador con sifón o Hellmann es el más utilizado. Este pluviógrafo es un cilindro terminado en su parte superior en una boca circular de 200 centímetros cuadrados de superficie, delimitada por un anillo de bronce con borde biselado, el sistema registrador del aparato y una jarra colectora. El agua de lluvia es recogida por el receptor hacia un embudo y un tubo al mecanismo registrador. Está constituido por un cilindro en cuyo interior hay un flotador que se desplaza verticalmente, al subir el nivel del agua en el cilindro, siguiendo unas guías que imposibilitan cualquier otro tipo de movimiento. El registro se realiza en una hoja milimetrada llamada pluviograma.

Figura 5. **Pluviógrafo y pluviograma**



Fuente: ARAMET.

2.6. Estaciones de estudio

Para este estudio se tomaron como referencia cinco estaciones de las cuencas del río Achiguate y María Linda, con las que se determinaron los valores de precipitación máxima de las mismas, para la conformación de las curvas intensidad-duración-frecuencia. Las estaciones a trabajar son las siguientes:

2.6.1. Estación Alameda Icta

Se localiza en el departamento de Chimaltenango, es una estación clase D y se encuentra en las coordenadas de latitud = $14,633889^{\circ}$ y longitud = $-90,8033333$.

2.6.2. Estación Insivumeh

Se ubica en el departamento de Guatemala, es una estación clase A y se encuentra en las coordenadas de latitud = $14,586384^{\circ}$ y longitud = $-90,532778^{\circ}$.

2.6.3. Estación Sábana Grande

Se ubica en el departamento de Escuintla, es una estación clase D y se encuentra en las coordenadas de latitud = $14,3828^{\circ}$ y longitud = $-90,8292^{\circ}$.

2.6.4. Estación Escuintla

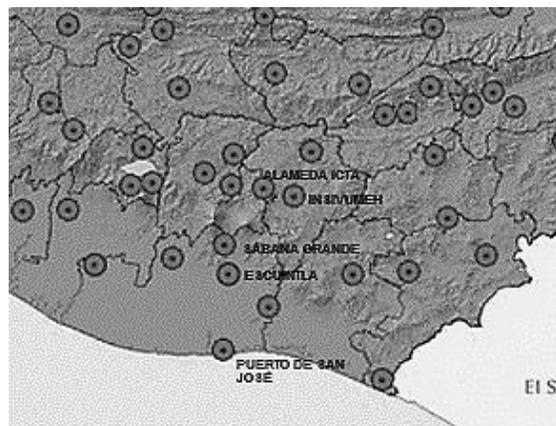
Se encuentra en el departamento del mismo nombre, es una estación automática y se ubica en las coordenadas de latitud = $14,32352^{\circ}$ y longitud = $-90,78758$.

2.6.5. Estación Puerto de San José

Se localiza en el departamento de Escuintla, es una estación tipo A y se ubica en las coordenadas de latitud = $13,936111^\circ$ y longitud = $-90,834444^\circ$.

La figura 6 muestra la ubicación de las estaciones en las que se basa este estudio.

Figura 6. Ubicación de las estaciones a estudiar



Fuente: elaboración propia.

3. CURVAS INTENSIDAD–DURACIÓN–FRECUENCIA (IDF)

Las curvas intensidad–duración–frecuencia (IDF) son las que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno (Témez, 1978).

Según Benitez (2002), las curvas IDF son la representación gráfica de la relación existente entre la intensidad, la duración y la frecuencia o período de retorno de la precipitación.

Por otro lado, según Mintegui *et al* (1990), se denominan curvas intensidad- duración-frecuencia (IDF) a aquellas que representan duraciones en abscisas y alturas de precipitación en las ordenadas, en la cual, cada curva representada corresponde a una frecuencia (o período de retorno), de tal forma que las gráficas de las curvas IDF representan la intensidad media en intervalos de diferente duración, correspondiendo todos los de una misma curva, a un idéntico período de retorno.

Junto con la definición de las curvas, surgen otros elementos a considerar, como: la intensidad de precipitación, la frecuencia o la probabilidad de excedencia de un determinado evento. Además es de suma importancia tener claro el concepto de cada una de estas variables, de modo de tener una visión más clara de las curvas intensidad-duración-frecuencia.

En este sentido se debe destacar que la intensidad, según Chow *et al* (1994), se define como la tasa temporal de precipitación, o sea, la altura de agua de precipitación por unidad de tiempo (mm/hr o pulg/hr), y esta se expresa como:

$$i = P / Td$$

Donde P es la altura de agua de precipitación en mm o pulg, y Td es la duración de la lluvia, dada usualmente en horas.

Es importante señalar, que cuando solo se dispone de un pluviómetro en una estación, es evidente que en general, únicamente se podrá conocer la intensidad media en 24 horas. Como se comprenderá, esta información puede inducir a grandes errores por defecto, por cuanto las lluvias de corta duración son en general las más intensas.

Es natural entonces, que las determinaciones de intensidades de lluvia se hagan a partir de los registros proporcionados por los pluviógrafos (Aros, 1997).

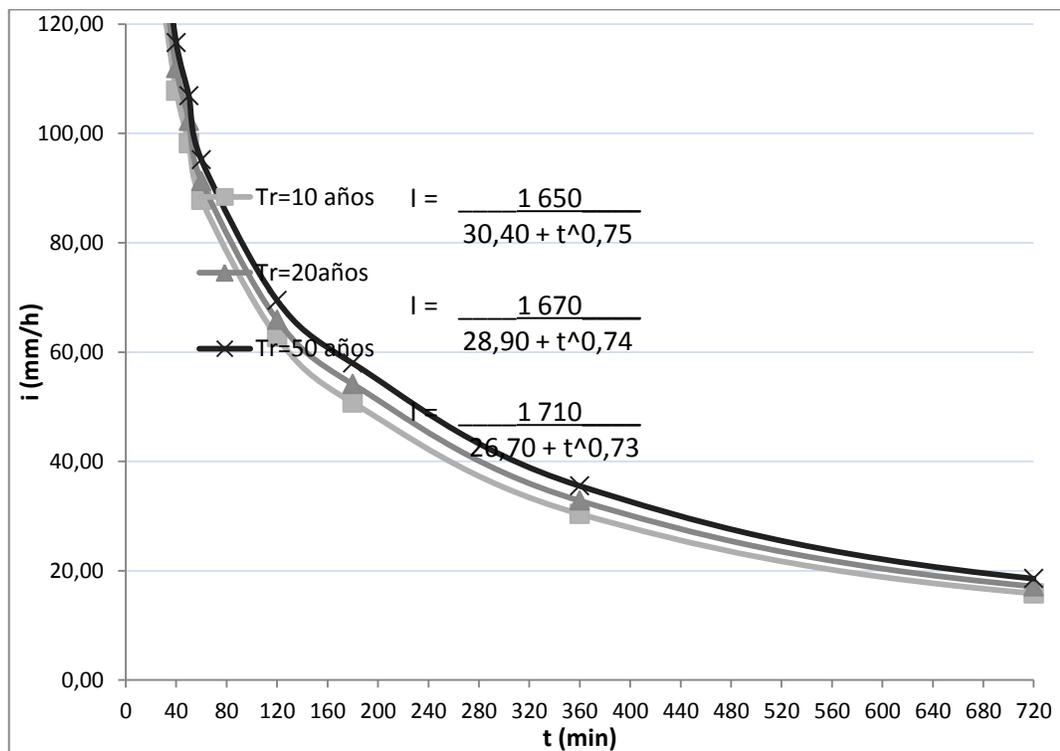
Otro elemento a estudiar en el diseño de las curvas IDF, es la frecuencia, la cual se expresa en función del período de retorno (T), que es el intervalo de tiempo promedio (expresado en años) entre eventos de precipitación que igualan o exceden la magnitud de diseño (Chow *et al*, 1994).

Por otro lado, según Ulriksen *et al* (1979), la probabilidad de excedencia se define como la probabilidad de que un cierto valor, a asumir por la variable aleatoria, sea superado. Se define por $1 / T$, en donde T es el período de retorno; por consiguiente, la probabilidad de excedencia sirve para estimar riesgos en obras civiles en general, y poder tener una aplicación a largo plazo

en el sector productivo. Además, dentro de las aplicaciones de la estadística, usadas comúnmente en hidrología, está la determinación de la probabilidad o del período de recurrencia de determinado suceso.

Es así como, en la hidrología torrencial se trata frecuentemente de evaluar la probabilidad de que una variable hidrológica alcance y sobrepase un determinado valor límite (Mintegui y López, 1990)

Figura 7. Familia de curvas IDF



Fuente: elaboración propia.

3.1. Aplicación de las curvas IDF

El uso de las curvas IDF se enmarca en la estimación de crecidas de cuencas hidrográficas que tienen tiempos de concentración pequeños o de pequeña duración, y su utilidad principal es estimar la intensidad, duración y frecuencia de la precipitación en un lugar que no posee pluviógrafo, solamente pluviómetros totalizadores que entregan precipitaciones diarias o lugares donde no existe información pluviométrica.

Además es importante señalar que uno de los primeros pasos que deben seguirse en muchos proyectos de diseño hidrológico, como es el caso del diseño de un drenaje urbano, el aprovechamiento de recursos hídricos en la generación de energía eléctrica, o el diseño de obras de ingeniería de regadíos, es la determinación del evento o eventos de lluvia que deben usarse. La forma más común de hacerlo es utilizar una tormenta de diseño o un evento que involucre una relación entre la intensidad de lluvia, la duración y las frecuencias o períodos de retorno. Esta relación se denomina curvas IDF, que son determinadas para cada sitio en particular (Chow et al, 1994).

3.2. Construcción de las curvas IDF

Para la construcción de las curvas intensidad-duración-frecuencia, específicamente en este estudio se siguió la siguiente metodología:

3.2.1. Recopilación obtenida del pluviógrafo

El primer paso para la construcción de las curvas IDF es recopilar las bandas que registran la información pluviográfica de cada estación. Para esto, se colocó la mayor cantidad de información posible registrada en cada estación, ya que en algunos casos no se encuentran los años completos o faltan años. Esto puede provocar que los datos obtenidos no sean totalmente fiables.

3.2.2. Valores máximos

Para obtener estos valores, se analiza la información pluviográfica y se seleccionan los valores de los máximos eventos de precipitación para tiempos determinados. Para estos valores se discretizan las bandas para 24 horas.

3.2.3. Ajuste de valores a las distribuciones de probabilidad

Al obtener las tablas que muestran los valores máximos de cada estación, se pueden ajustar estos datos a distribuciones estadísticas que proporcionen información válida para los diferentes períodos de retorno seleccionados. En este estudio se utilizaron la distribución normal y la distribución de Gumbel, ya que se determinó que son las que mejor se ajustan a datos meteorológicos.

3.2.4. Construcción de curvas con los modelos matemáticos

Con los datos obtenidos de precipitación máxima para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50, 75 y 100 años ajustados a la distribución normal y distribución de Gumbel es posible obtener las curvas intensidad-duración- frecuencia, utilizando los modelos matemáticos que se compararán

en este estudio. Se utilizó el programa EurekaPro, en el cual se ingresó la fórmula del modelo utilizado por Insivumeh, o modelo estándar siguiente:

$$i = \frac{a}{(b + t)^n}$$

De igual forma se ingresó la fórmula del modelo propuesto por Wenzel:

$$i = \frac{a}{t^n + b}$$

Finalmente, con los datos obtenidos, se realizó una comparación de los errores obtenidos con cada uno de los modelos.

4. ESTADÍSTICA Y MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO

Para la construcción de las curvas intensidad- duración- frecuencia IDF, es necesario utilizar distribuciones de probabilidad y modelos matemáticos, como se mencionó en el capítulo anterior, por lo cual se definirán los términos correspondientes.

4.1. Distribuciones de probabilidad en hidrología

El comportamiento de las variables aleatorias discretas o continuas se describe con la ayuda de distribuciones de probabilidad. La variable se designa por mayúscula y un valor específico de ella por minúscula.

Por $P(x = a)$ se denota la probabilidad de que un evento asuma el valor a ; similarmente $P(a \leq x \leq b)$ denota la probabilidad de que un evento se encuentre en el intervalo (a,b) . Si se conoce la probabilidad $P(a \leq x \leq b)$ para todos los valores de a y b , se dice que se conoce la distribución de probabilidades de la variable x .

Si x es un número dado y se considera la probabilidad $P(X \leq x)$:

$$F(x) = P(X \leq x):$$

Y se llama $F(x)$ la función de distribución acumulada.

4.1.1. Momento de las distribuciones

Las propiedades de las distribuciones pueden ser definidas completamente en términos de los momentos. Los momentos en estadística son similares a los momentos en física (rotación respecto al origen).

$$M^r = \int_{-\infty}^{\infty} x^r f(x) dx \quad \text{para la variable continua}$$

$$M^r = \sum_{j=1}^n x^r f(x) \quad \text{para la variable discreta}$$

o respecto a la media (eje de rotación diferente al origen)

$$M^r = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^r f(x) dx \quad \text{para la variable continua}$$

$$M^r = \sum_{j=1}^n (x - \mu)^r f(x) \quad \text{para la variable discreta}$$

4.1.2. Parámetros estadísticos

Los estadísticos extraen información de una muestra, indicando las características de la población. Los principales estadísticos son los momentos de primer, segundo y tercer orden correspondiente a la media, varianza, y asimetría respectivamente.

4.1.2.1. Media μ

Es el valor esperado de la variable misma. Primer momento respecto al origen. Muestra la tendencia central de la distribución.

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx$$

El valor estimado de la media a partir de la muestra es:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

4.1.2.2. Varianza σ^2

Mide la variabilidad de los datos. Es el segundo momento respecto a la media.

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx$$

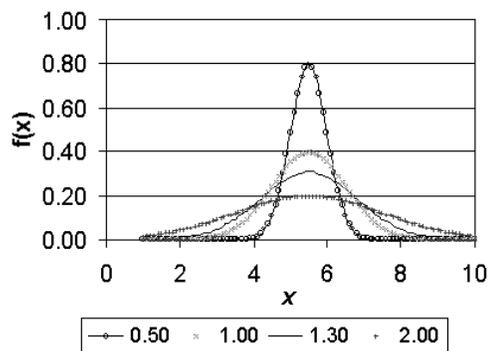
El valor estimado de la varianza a partir de la muestra es:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

En el cual el divisor es n-1 en lugar de n para asegurar que la estadística de la muestra no sea sesgada, es decir, que no tenga una tendencia, en promedio, a ser mayor o menor que el valor verdadero. Las unidades de la varianza son la media al cuadrado, la desviación estándar s es una medida de

la variabilidad que tiene las mismas dimensiones que la media y simplemente es la raíz cuadrada de la varianza, se estima por s . El significado de la desviación estándar se ilustra en la figura 8.

Figura 8. **Desviación estándar**



Fuente: Distribución de probabilidades en hidrología. Escuela de Ingeniería de Antioquia.
p. 168.

4.1.3. **Distribuciones de probabilidad para variables continuas**

Se describirá a continuación dos tipos de distribuciones que se utilizarán en el estudio: la distribución normal y la de Gumbel.

4.1.3.1. **Distribución normal**

La distribución normal es una distribución simétrica en forma de campana, también conocida como campana de Gauss.

- Función de densidad:

La función de densidad está dada por

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}\right\} \quad -\infty < x < \infty$$

Los dos parámetros de la distribución son la media m y desviación estándar s para los cuales \bar{x} (media) y s (desviación estándar) son derivados de los datos.

4.1.3.2. Distribución de Gumbel o extrema tipo I

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 (máximos y mínimos).

- Función de densidad:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[\frac{-x - \beta}{\alpha} - \exp\left(\frac{-x - \beta}{\alpha}\right)\right]$$

En donde a y b son los parámetros de la distribución.

Estimación de parámetros

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} s$$

$$\beta = \bar{x} - 0.5772\alpha$$

Donde \bar{x} y s son la media y la desviación estándar estimadas con la muestra.

4.2. Modelos matemáticos

Las curvas IDF pueden tomar diferentes expresiones matemáticas, teóricas o empíricas, que se ajustan a los datos de precipitación de un determinado observatorio. Para cada duración se estima la función de probabilidad empírica, y se fija una frecuencia o período de retorno determinado. Por lo tanto, la curva IDF empírica viene dada por la unión de los puntos de igual frecuencia de ocurrencia y diferente duración e intensidad. Asimismo, una curva IDF teórica o semiempírica es aquella cuya expresión matemática se justifica físicamente, pero presenta parámetros que deben estimarse mediante ajustes empíricos.

4.2.1. Aproximaciones empíricas

Existe un gran número de aproximaciones empíricas que relacionan la intensidad (I), la duración (t) y el período de retorno (p), a partir de ajustes a potencias tales como:

- Fórmula de Sherman: con tres parámetros (a , c y n), que están en función del período de retorno, p :

$$I(t) = \frac{a}{(t + c)^n}$$

- Fórmula de Wenzel: también con tres parámetros (a, c y n), para un período de retorno p determinado:

$$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$$

- Función potencial: según Aparicio (1997), con cuatro parámetros (k, c, m y n), ya ajustados para todos los períodos de retorno de interés:

$$I(t, p) = k * \frac{p^m}{(t + c)^n}$$

5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

5.1. Resultados de precipitación y curvas IDF

Se describe a continuación los resultados de probabilidad de precipitación y la gráfica de las curvas IDF para cada una de las estaciones.

5.1.1. Resultados de la estación Alameda Icta

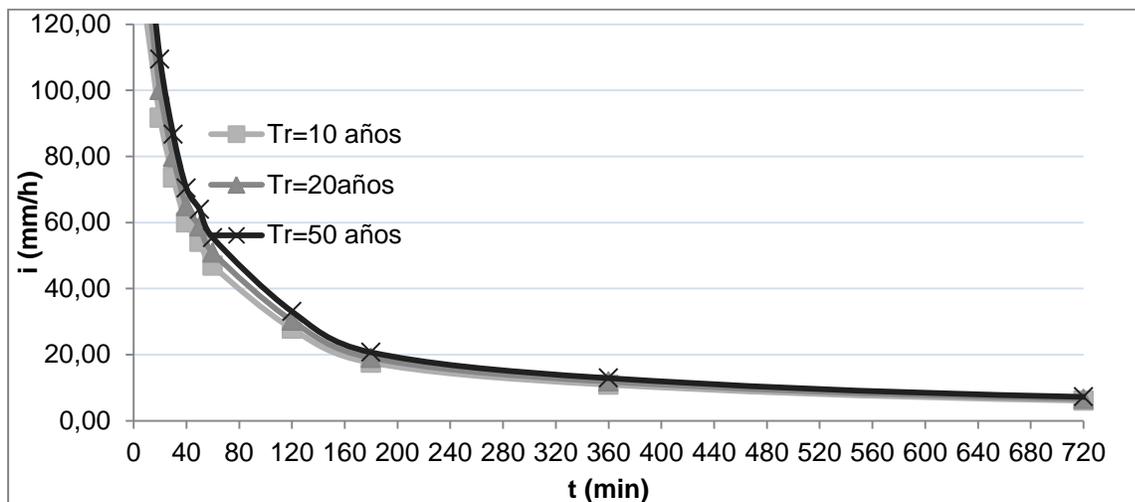
Después de ajustar los valores de las precipitaciones máximas resultantes del resumen multianual, a la distribución normal y a la de Gumbel, se obtienen las tablas II y III. Al recolectar estos datos, se grafican las curvas IDF para cada una de las distribuciones y se presentan en las figuras 8 y 9.

Tabla II. **Probabilidad de precipitación para la estación Alameda Icta, distribución normal**

Distribución normal											
T	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
2	77,14	62,27	51,96	42,79	37,81	32,91	19,18	12,32	7,64	4,19	2,13
5	105,42	81,59	66,17	54,10	48,52	42,12	24,86	15,75	9,79	5,42	2,73
10	120,20	91,69	73,60	60,01	54,13	46,93	27,83	17,55	10,91	6,07	3,05
15	127,58	96,73	77,31	62,96	56,92	49,33	29,31	18,44	11,47	6,40	3,20
20	132,41	100,03	79,73	64,89	58,75	50,90	30,28	19,03	11,84	6,61	3,31
25	135,97	102,46	81,52	66,31	60,10	52,06	31,00	19,46	12,11	6,76	3,38
30	138,76	104,37	82,93	67,43	61,16	52,97	31,56	19,80	12,32	6,89	3,44
50	146,15	109,41	86,64	70,38	63,96	55,38	33,04	20,69	12,88	7,21	3,60
75	151,62	113,14	89,38	72,57	66,03	57,16	34,14	21,36	13,30	7,45	3,72
100	155,31	115,67	91,24	74,04	67,43	58,36	34,88	21,81	13,58	7,61	3,79

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Curvas IDF de la estación Alameda Icta, distribución normal**



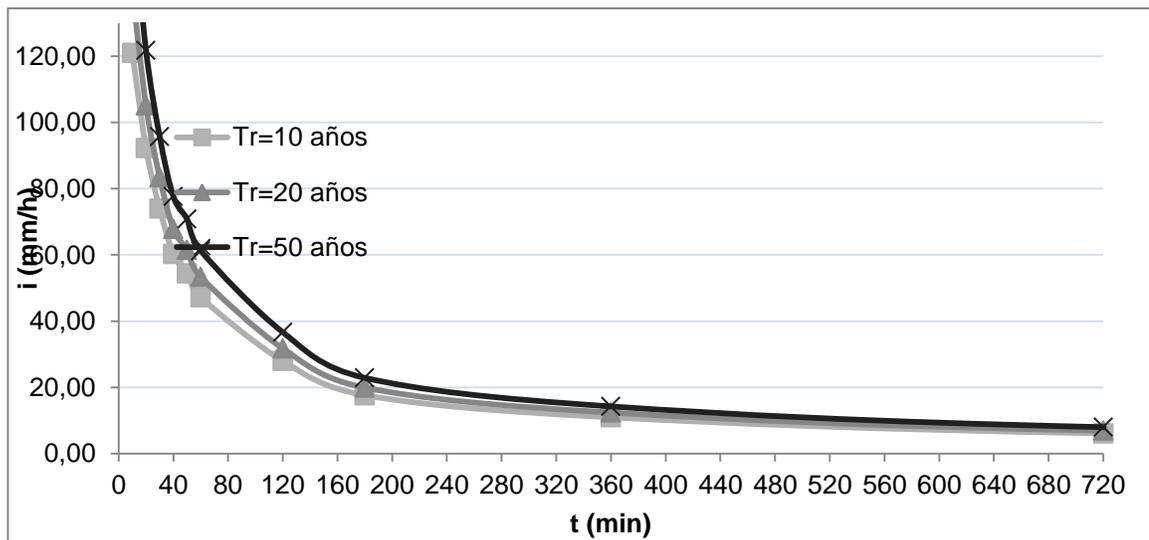
Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Probabilidad de precipitación para la estación Alameda Icta, distribución de Gumbel**

Distribución de Gumbel											
T	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
2	71,62	58,50	49,18	40,59	35,72	31,11	18,07	11,65	7,22	3,94	2,01
5	101,32	78,79	64,11	52,46	46,97	40,78	24,04	15,26	9,47	5,25	2,64
10	120,98	92,22	73,99	60,32	54,42	47,18	27,99	17,64	10,97	6,11	3,06
15	132,07	99,79	79,56	64,75	58,62	50,79	30,21	18,99	11,81	6,59	3,30
20	139,84	105,10	83,47	67,86	61,57	53,32	31,77	19,93	12,40	6,93	3,46
25	145,82	109,18	86,47	70,25	63,83	55,27	32,97	20,65	12,86	7,20	3,59
30	150,69	112,51	88,92	72,19	65,68	56,86	33,95	21,24	13,23	7,41	3,70
50	164,25	121,77	95,73	77,62	70,81	61,27	36,68	22,89	14,26	8,00	3,98
75	174,96	129,09	101,12	81,90	74,87	64,76	38,83	24,19	15,07	8,47	4,21
100	182,54	134,27	104,93	84,93	77,75	67,23	40,35	25,11	15,65	8,80	4,38

Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Curvas IDF de la estación Alameda Icta, distribución de Gumbel**



Fuente: elaboración propia.

5.1.2. Resultados de la estación Insivumeh

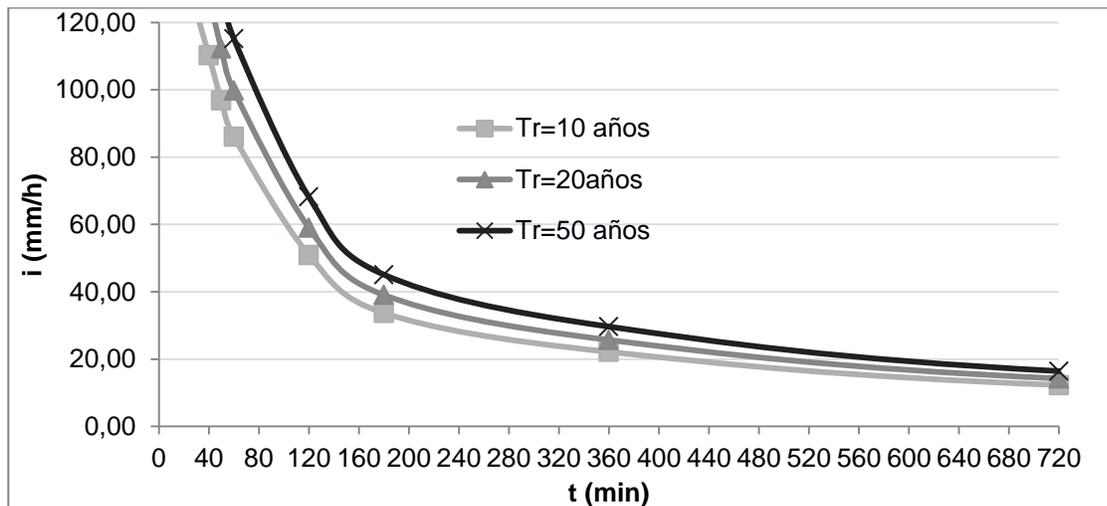
Después de ajustar los valores de las precipitaciones máximas resultantes del resumen multianual, a la distribución normal y a la distribución de Gumbel, se obtienen las tablas IV y V. Al recolectar estos datos, se grafican las curvas IDF para cada una de las distribuciones y se presentan en las figuras 10 y 11.

Tabla IV. Probabilidad de precipitación para la estación Insivumeh, distribución normal

Distribución normal											
T	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
2	82,16	65,92	54,57	48,33	42,43	37,71	22,32	14,76	9,71	5,38	2,71
5	151,31	121,40	100,50	89,01	78,14	69,45	41,11	27,19	17,88	9,90	4,99
10	187,45	150,40	124,51	110,27	96,81	86,04	50,93	33,69	22,15	12,27	6,18
15	205,49	164,87	136,49	120,88	106,13	94,32	55,83	36,93	24,28	13,45	6,77
20	217,30	174,35	144,34	127,83	112,23	99,75	59,04	39,05	25,67	14,22	7,16
25	226,00	181,33	150,11	132,94	116,72	103,74	61,40	40,61	26,70	14,79	7,45
30	232,83	186,81	154,66	136,96	120,25	106,88	63,26	41,84	27,51	15,24	7,67
50	250,90	201,30	166,65	147,59	129,58	115,17	68,17	45,09	29,64	16,42	8,27
75	264,26	212,02	175,53	155,45	136,48	121,30	71,80	47,49	31,22	17,29	8,71
100	273,29	219,27	181,53	160,76	141,14	125,45	74,26	49,11	32,29	17,88	9,01

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Curvas IDF de la estación Insivumeh, distribución normal



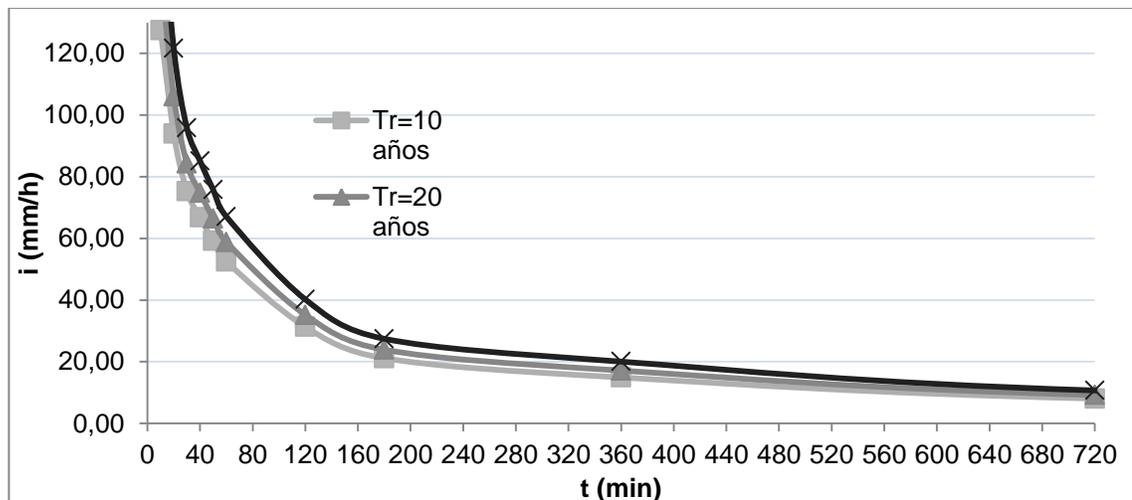
Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Probabilidad de precipitación para la estación Insivumeh, distribución de Gumbel**

Distribución de Gumbel											
T	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
2	76,45	62,39	51,96	46,00	40,32	35,85	21,19	13,96	9,05	5,04	2,54
5	107,19	81,38	66,02	58,54	51,69	45,86	27,29	18,29	12,57	6,85	3,45
10	127,54	93,95	75,33	66,84	59,22	52,49	31,33	21,15	14,91	8,05	4,05
15	139,02	101,05	80,58	71,52	63,47	56,23	33,61	22,77	16,22	8,73	4,39
20	147,06	106,01	84,26	74,80	66,44	58,84	35,20	23,90	17,14	9,20	4,63
25	153,25	109,84	87,09	77,33	68,74	60,86	36,43	24,77	17,85	9,57	4,81
30	158,29	112,95	89,39	79,38	70,60	62,50	37,43	25,48	18,43	9,87	4,96
50	172,33	121,62	95,81	85,11	75,79	67,07	40,22	27,45	20,04	10,69	5,38
75	183,41	128,47	100,89	89,63	79,90	70,68	42,42	29,02	21,31	11,35	5,71
100	191,26	133,32	104,48	92,83	82,80	73,24	43,97	30,12	22,21	11,81	5,94

Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Curvas IDF de la estación Insivumeh, distribución de Gumbel**



Fuente: elaboración propia.

5.1.3. Resultados de la estación Sábana Grande

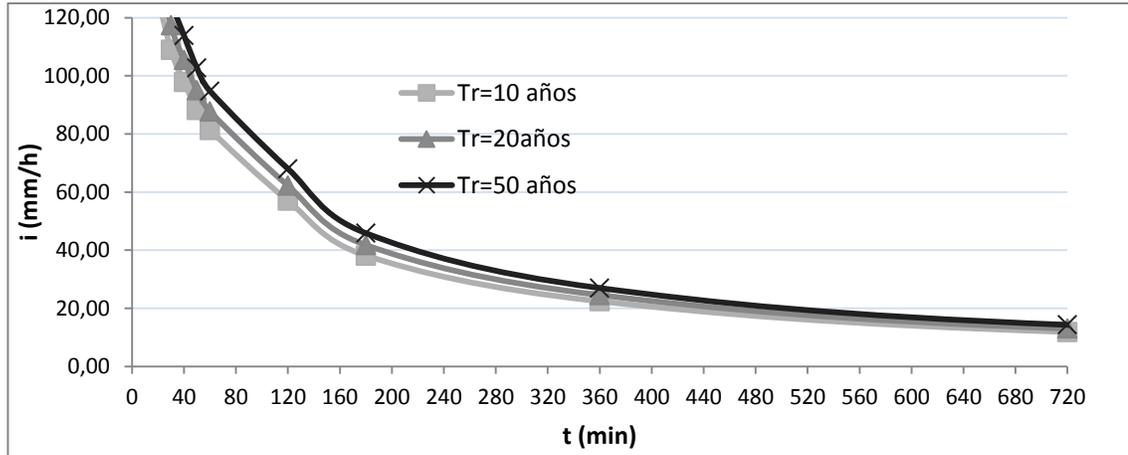
Después de ajustar los valores de las precipitaciones máximas resultantes del resumen multianual, a la distribución normal, y a la distribución de Gumbel, se obtienen las tablas VI y VII. Al recolectar estos datos, se grafican las curvas IDF para cada una de las distribuciones y se presentan en las figuras 12 y 13.

Tabla VI. **Probabilidad de precipitación para la estación Sábana Grande, distribución normal**

Distribución normal											
T	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
2	96,72	92,52	79,47	71,41	64,42	59,26	38,87	25,41	14,85	7,77	4,07
5	161,31	117,24	98,85	88,82	80,10	73,81	50,81	33,79	19,82	10,44	5,63
10	185,56	130,16	108,98	97,92	88,30	81,42	57,06	38,16	22,41	11,84	6,44
15	197,66	136,61	114,04	102,46	92,39	85,21	60,17	40,35	23,71	12,54	6,85
20	205,58	140,83	117,35	105,43	95,07	87,70	62,21	41,78	24,56	13,00	7,11
25	211,42	143,94	119,79	107,62	97,05	89,53	63,71	42,83	25,18	13,33	7,31
30	216,00	146,39	121,70	109,35	98,60	90,97	64,89	43,66	25,67	13,60	7,46
50	228,12	152,84	126,77	113,89	102,70	94,77	68,01	45,85	26,97	14,30	7,87
75	237,09	157,62	130,51	117,26	105,73	97,58	70,32	47,46	27,93	14,81	8,17
100	243,15	160,85	133,04	119,53	107,78	99,48	71,88	48,56	28,58	15,16	8,38

Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Curvas IDF de la estación Sábana Grande, distribución normal**



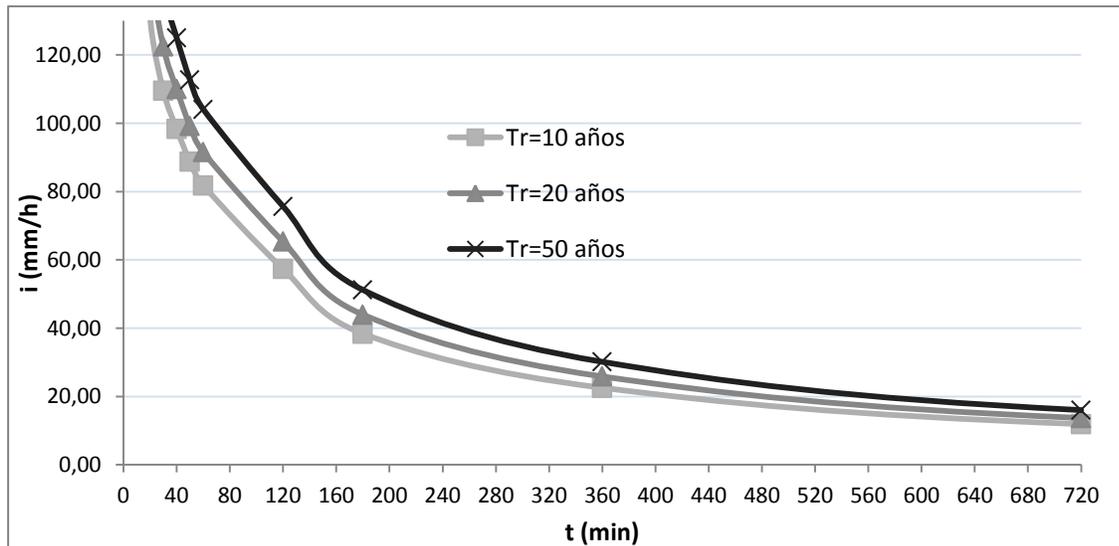
Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Probabilidad de precipitación para la estación Sábana Grande, distribución de Gumbel**

Distribución de Gumbel											
T	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
2	105,87	87,70	75,68	68,01	61,35	56,42	36,54	23,78	13,88	7,24	3,76
5	154,58	113,65	96,04	86,29	77,83	71,70	49,08	32,57	19,10	10,06	5,40
10	186,83	130,84	109,51	98,40	88,73	81,82	57,38	38,39	22,55	11,92	6,48
15	205,03	140,53	117,11	105,23	94,89	87,52	62,07	41,68	24,50	12,97	7,10
20	217,77	147,32	122,44	110,01	99,19	91,52	65,35	43,98	25,86	13,70	7,52
25	227,58	152,55	126,54	113,69	102,51	94,60	67,87	45,75	26,91	14,27	7,85
30	235,56	156,81	129,87	116,69	105,21	97,10	69,93	47,19	27,77	14,73	8,12
50	257,81	168,66	139,17	125,03	112,73	104,08	75,65	51,20	30,15	16,01	8,87
75	275,38	178,02	146,51	131,63	118,68	109,59	80,18	54,38	32,03	17,02	9,46
100	287,82	184,65	151,71	136,30	122,88	113,50	83,38	56,62	33,37	17,74	9,88

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Curvas IDF de la estación Sábana Grande, distribución de Gumbel**



Fuente: elaboración propia.

5.1.4. **Resultados de la estación Escuintla**

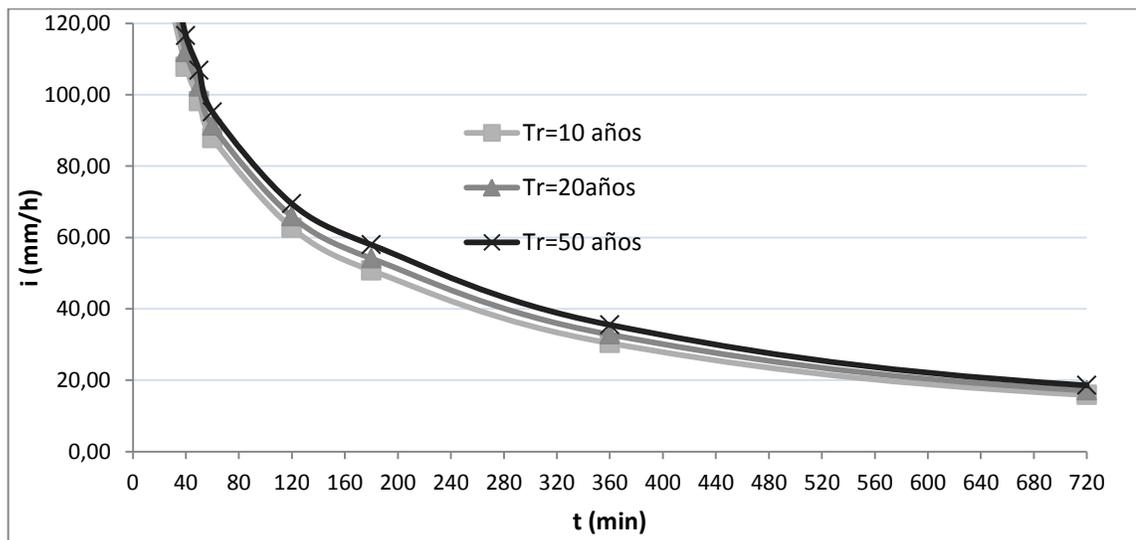
Después de ajustar los valores de las precipitaciones máximas resultantes del resumen multianual, a la distribución normal y a la distribución Gumbel, se obtienen las tablas VII y IX. Al recolectar estos datos, se grafican las curvas IDF para cada una de las distribuciones y se presentan en las figuras 14 y 15.

Tabla VIII. Probabilidad de precipitación para la estación Escuintla, distribución normal

Distribución normal											
T	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
2	139,00	118,60	105,44	93,18	83,71	75,62	51,56	38,82	21,88	11,34	5,94
5	163,01	130,66	117,06	102,76	93,20	83,63	58,89	46,65	27,47	14,30	7,60
10	175,57	136,97	123,14	107,77	98,16	87,82	62,72	50,75	30,38	15,84	8,46
15	181,83	140,11	126,17	110,27	100,64	89,90	64,63	52,79	31,84	16,61	8,90
20	185,93	142,17	128,15	111,90	102,26	91,27	65,88	54,13	32,79	17,12	9,18
25	188,95	143,69	129,62	113,11	103,45	92,28	66,80	55,12	33,50	17,49	9,39
30	191,33	144,88	130,76	114,05	104,39	93,07	67,53	55,89	34,05	17,78	9,55
50	197,60	148,03	133,80	116,56	106,87	95,16	69,44	57,94	35,51	18,55	9,98
75	202,24	150,36	136,04	118,41	108,71	96,71	70,86	59,45	36,59	19,12	10,30
100	205,38	151,94	137,56	119,66	109,95	97,76	71,81	60,47	37,32	19,51	10,52

Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Curvas IDF de la estación Escuintla, distribución normal



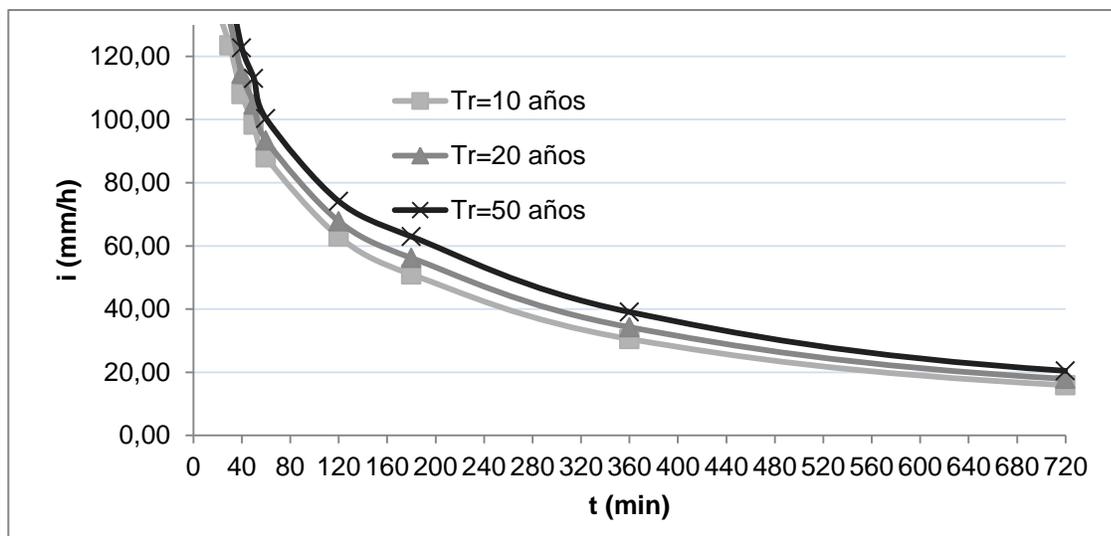
Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Probabilidad de precipitación para la estación Escuintla, distribución de Gumbel**

Distribución de Gumbel											
T	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
2	134,31	116,25	103,18	91,31	81,85	74,06	50,13	37,29	20,79	10,77	5,62
5	159,53	128,91	115,38	101,37	91,82	82,47	57,82	45,52	26,66	13,87	7,36
10	176,22	137,30	123,46	108,03	98,42	88,03	62,92	50,96	30,54	15,92	8,51
15	185,64	142,03	128,01	111,79	102,14	91,18	65,79	54,04	32,73	17,08	9,16
20	192,24	145,34	131,21	114,42	104,75	93,37	67,80	56,19	34,26	17,89	9,61
25	197,32	147,89	133,66	116,44	106,76	95,07	69,35	57,84	35,44	18,52	9,97
30	201,45	149,97	135,66	118,09	108,39	96,45	70,61	59,19	36,40	19,02	10,25
50	212,97	155,75	141,24	122,69	112,95	100,29	74,13	62,95	39,08	20,44	11,05
75	222,06	160,32	145,64	126,31	116,54	103,32	76,90	65,92	41,20	21,56	11,67
100	228,50	163,55	148,75	128,88	119,09	105,47	78,87	68,02	42,69	22,35	12,12

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Curvas IDF de la estación Escuintla, distribución de Gumbel**



Fuente: elaboración propia.

5.1.5. Resultados de la estación Puerto de San José

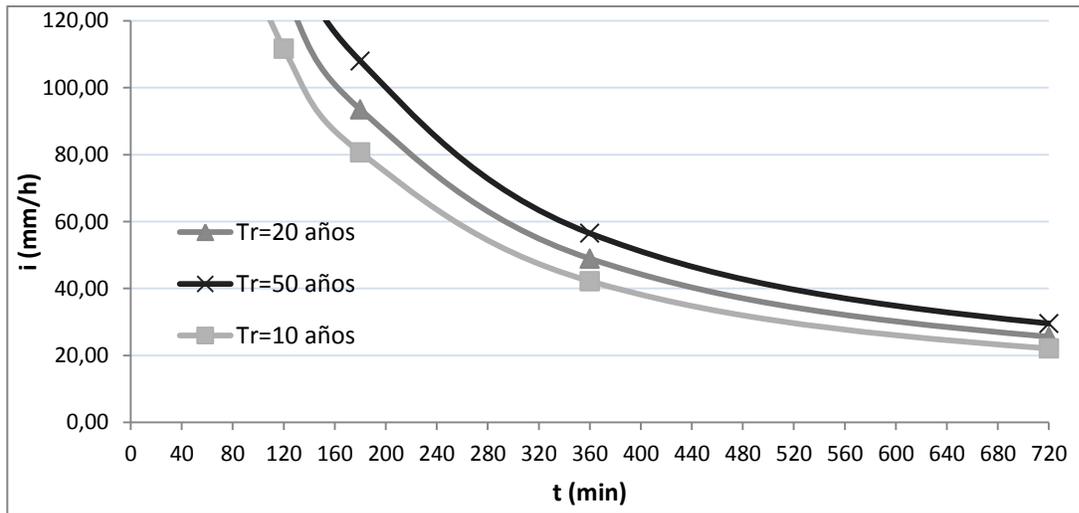
Después de ajustar los valores de las precipitaciones máximas resultantes del resumen multianual, a la distribución normal y a la distribución Gumbel, se obtienen las tablas X y XI. Al recolectar estos datos, se grafican las curvas IDF para cada una de las distribuciones y se presentan en las figuras 16 y 17.

Tabla X. **Probabilidad de precipitación para la estación Puerto de San José, distribución normal**

Distribución normal											
T	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
2	152,10	116,16	99,26	89,25	79,12	73,57	48,96	35,36	18,51	9,69	5,11
5	280,11	213,92	182,80	164,36	145,70	135,49	90,17	65,12	34,08	17,84	9,40
10	347,02	265,03	226,47	203,63	180,51	167,85	111,70	80,68	42,22	22,10	11,65
15	380,42	290,53	248,26	223,22	197,88	184,00	122,45	88,44	46,29	24,22	12,77
20	402,28	307,23	262,53	236,05	209,25	194,58	129,49	93,52	48,95	25,62	13,50
25	418,38	319,52	273,03	245,50	217,62	202,37	134,67	97,26	50,91	26,64	14,04
30	431,04	329,19	281,29	252,93	224,21	208,49	138,75	100,21	52,45	27,45	14,47
50	464,48	354,72	303,12	272,55	241,60	224,66	149,51	107,98	56,51	29,58	15,59
75	489,21	373,61	319,26	287,06	254,47	236,63	157,47	113,73	59,52	31,15	16,42
100	505,94	386,39	330,17	296,88	263,17	244,72	162,86	117,62	61,56	32,22	16,98

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Curvas IDF de la estación Puerto San José, distribución normal**



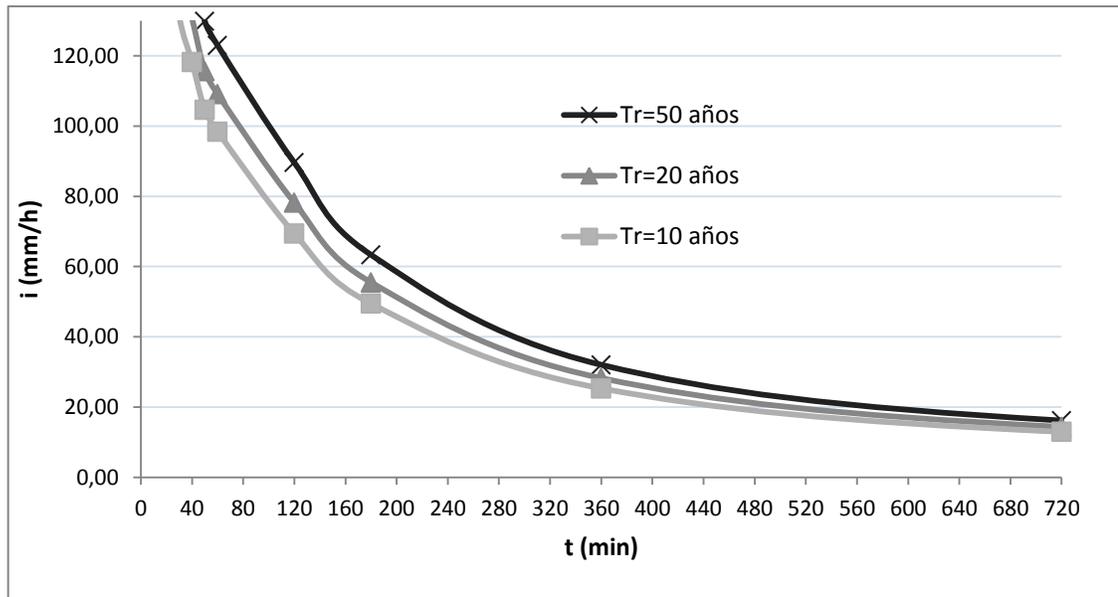
Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Probabilidad de precipitación para la estación Puerto San José, distribución de Gumbel**

Distribución de Gumbel											
T	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
2	137,42	110,76	95,23	85,60	75,90	70,44	46,39	33,59	17,65	9,28	4,88
5	216,41	139,83	116,93	105,23	93,20	87,28	60,24	43,13	22,26	11,48	6,08
10	268,70	159,07	131,30	118,22	104,65	98,44	69,41	49,44	25,31	12,94	6,88
15	298,20	169,93	139,40	125,56	111,11	104,73	74,59	53,01	27,03	13,76	7,32
20	318,86	177,53	145,08	130,69	115,63	109,13	78,21	55,50	28,24	14,34	7,64
25	334,77	183,39	149,45	134,64	119,12	112,53	81,00	57,42	29,17	14,78	7,88
30	347,72	188,15	153,01	137,86	121,95	115,29	83,27	58,99	29,92	15,15	8,07
50	383,79	201,43	162,92	146,82	129,85	122,98	89,60	63,34	32,03	16,15	8,62
75	412,28	211,92	170,75	153,90	136,09	129,06	94,60	66,79	33,69	16,95	9,05
100	432,45	219,34	176,29	158,91	140,50	133,36	98,13	69,22	34,87	17,51	9,36

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Curvas IDF de la estación Puerto San José, distribución de Gumbel**



Fuente: elaboración propia.

5.2. Coeficientes y errores para modelos estándar y Wenzel

Para determinar los coeficientes tanto de la fórmula estándar:

$$I(t) = \frac{a}{(t + c)^n}$$

Como la fórmula propuesta por Wenzel:

$$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$$

Se utilizó el programa EureuqaPro, con el cual se obtuvieron los resultados descritos a continuación.

5.2.1. Resultados de la estación Alameda Icta

Para realizar la comparación de los errores absolutos promedio de cada una de las distribuciones, se representa por medio de cuadros comparativos, los coeficientes y cada uno de los promedios de error, así como el error absoluto promedio total y la sumatoria de dicho error de la estación Alameda Icta.

Tabla XII. **Coefficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula estándar, para una distribución normal, estación Alameda Icta**

FÓRMULA ESTÁNDAR				
Distribución normal				
Período de retorno	a	c	N	Error Absoluto Promedio
2	4598,085198	32,541322	1,089921	0,569830
5	3300,009013	23,009384	0,984815	0,520165
10	2855,140650	19,182194	0,938980	0,547721
15	2730,990433	17,701488	0,921764	0,618808
20	2607,245916	16,303780	0,907802	0,766819
25	2740,711598	16,772771	0,913194	0,686121
30	3053,671766	18,056360	0,926758	0,895808
50	3260,901578	17,943619	0,932584	0,905909
75	3072,745409	16,579103	0,917258	0,833967
100	3086,236426	16,277998	0,914411	0,869827
		PROMEDIO		0,721497
		Σ ERROR		7,214976

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula estándar, para una distribución de Gumbel, estación Alameda Icta**

FÓRMULA ESTÁNDAR				
Distribución de Gumbel				
Período de retorno	a	c	n	Error absoluto promedio
2	4806,051850	34,753158	1,106537	0,587311
5	3564,911149	24,629026	1,004489	0,521077
10	2781,048872	18,822603	0,932713	0,549275
15	2895,527768	17,827263	0,928309	0,640815
20	2736,849125	16,414900	0,908407	0,709085
25	2923,163118	16,510396	0,914725	0,754279
30	3043,614840	16,435976	0,917808	0,801319
50	3146,089075	15,598264	0,910563	0,915306
75	3246,843656	15,080369	0,906510	1,007871
100	3308,961652	14,702472	0,903498	1,079797
		PROMEDIO	0,756613	
		Σ ERROR	7,566135	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula Wenzel, para una distribución normal, estación Alameda Icta**

FÓRMULA WENZEL				
Distribución normal				
Período de retorno	a	c	N	Error Absoluto Promedio
2	4134,9416	41,6490	1,0775	0,5083136
5	3451,2641	22,9068	0,9926	0,5245359
10	3166,0731	15,8075	0,9436	0,5630878
15	3137,0495	15,8075	0,9436	0,6030369
20	3122,0333	14,9246	0,9372	0,6317915
25	3146,8620	14,5420	0,9346	0,6648196
30	3159,8902	14,2194	0,9321	0,6912923
50	3288,6062	13,9493	0,9321	0,7535300
75	3347,5084	13,5725	0,9297	0,8008361
100	3388,3224	13,3397	0,9282	0,8352994
		PROMEDIO	0,6576543	
		Σ ERROR	6,5765431	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula Wenzel, para una distribución de Gumbel, estación Alameda Icta**

FÓRMULA WENZEL				
	Distribución de Gumbel			
Período de retorno	a	C	n	Error absoluto promedio
2	4329,9657	47,9305	1,0978	0,5117830
5	3566,8418	25,0742	1,0056	0,5147484
10	3155,6701	17,1187	0,9526	0,5649377
15	3140,0422	15,0866	0,9390	0,6297253
20	3205,4097	14,3328	0,9339	0,6967171
25	3287,0276	13,9860	0,9323	0,7511747
30	347,5535	13,6896	0,9307	0,7940014
50	3498,0098	12,8743	0,9254	0,9139093
75	3649,5036	12,4715	0,9236	1,0080735
100	3724,3569	12,0739	0,9206	1,0781135
		PROMEDIO		0,7463183
		Σ ERROR		7,4631839

Fuente: elaboración propia.

5.2.2. Resultados de la estación Insivumeh

Para realizar la comparación de los errores absolutos promedio de cada una de las distribuciones, se representa por medio de cuadros comparativos, los coeficientes y cada uno de los promedios de error, así como el error absoluto promedio total y la sumatoria de dicho error de la estación Insivumeh.

Tabla XVI. **Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula estándar, para una distribución normal, estación Insivumeh**

FÓRMULA ESTÁNDAR				
Distribución normal				
Período de retorno	a	c	N	Error Absoluto Promedio
2	2213,1660	27,0156	0,9120	0,4987820
5	4703,3707	28,8189	0,9394	0,9337288
10	5639,6749	28,3551	0,9334	1,1414055
15	5552,4338	27,1110	0,9122	1,2464019
20	5814,6627	26,9654	0,9105	1,3139847
25	6128,5911	27,1368	0,9130	1,3665849
30	6998,4121	28,3595	0,9331	1,4169533
50	7059,3293	27,5884	0,9201	1,5241786
75	7034,4786	26,9116	0,9094	1,5955756
100	8576,0358	28,8307	0,9418	1,6850934
		PROMEDIO	1,2722688	
		Σ ERROR	12,7226888	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula estándar, para una distribución de Gumbel, estación Insivumeh**

FÓRMULA ESTÁNDAR				
Distribución de Gumbel				
Período de retorno	a	c	n	Error absoluto promedio
2	2625,9625	31,2108	0,9510	0,4591811
5	1902,9967	19,0847	0,8535	0,8663937
10	1757,8637	14,8642	0,8025	1,1567048
15	1737,4885	13,2701	0,8025	1,3131461
20	1763,8397	12,4760	0,7982	1,4272587
25	1737,5901	11,7187	0,7889	1,5070212
30	1737,5754	11,2181	0,7843	1,5735795
50	1761,9149	10,1227	0,7744	1,7572266
75	1792,0847	9,4584	0,7679	1,896972
100	1807,5711	8,9696	0,7633	1,998893
		PROMEDIO	1,395637	
		Σ ERROR	13,956377	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Coefficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula Wenzel, para una distribución normal, estación Insivumeh**

FÓRMULA WENZEL				
Distribución normal				
Período de retorno	a	c	n	Error absoluto promedio
2	2675,1715	23,8321	0,9409	0,4895127
5	4930,7416	23,8581	0,9410	0,8996487
10	6162,2615	24,1024	0,9431	1,1127109
15	6699,7029	23,8725	0,9411	1,2220589
20	7277,3321	24,6332	0,9473	1,2956368
25	7361,9454	23,8483	0,9408	1,3442436
30	7762,7973	24,5077	0,9461	1,3853256
50	8445,4480	24,7802	0,9484	1,4980247
75	8801,4063	24,4741	0,9460	1,5732505
100	9056,4609	24,3318	0,9448	1,6229543
		PROMEDIO	1,2443366	
		Σ ERROR	12,4433667	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula Wenzel, para una distribución de Gumbel, estación Insivumeh**

FÓRMULA WENZEL				
Distribución de Gumbel				
Período de retorno	a	c	n	Error absoluto promedio
2	3401,4520	34,4555	1,0016	0,4736655
5	2300,4384	13,9168	0,8776	0,8257666
10	2233,6158	10,4341	0,8500	1,1025678
15	2195,9159	8,9550	0,8351	1,2509003
20	2193,4936	8,1957	0,8274	1,3553236
25	2187,1227	7,6581	0,8204	1,4322045
30	2178,3499	7,2274	0,8152	1,4963946
50	2199,2166	6,3823	0,8048	1,6723608
75	2221,8848	5,8393	0,7976	1,8090292
100	2237,2809	5,4909	0,7929	1,9078866
		PROMEDIO	1,33260996	
		Σ ERROR	13,32609957	

Fuente: elaboración propia.

5.2.3. Resultados de la estación Sábana Grande

Para realizar la comparación de los errores absolutos promedio de cada una de las distribuciones, se representa por medio de cuadros comparativos, los coeficientes y cada uno de los promedios de error, así como el error absoluto promedio total y la sumatoria de dicho error de la estación Sábana Grande.

Tabla XX. **Coefficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula estándar, para una distribución normal, estación Sábana Grande**

FÓRMULA ESTÁNDAR				
Distribución normal				
Período de retorno	a	c	n	Error absoluto promedio
2	15835,4297	72,8982	1,1428	1,1650007
5	1970,1752	15,6831	0,7710	2,5609159
10	1602,0616	10,6454	0,7120	3,2454984
15	1513,6428	8,9357	0,6922	3,5635973
20	1462,2253	7,9448	0,6795	3,7628997
25	1416,0296	7,1910	0,6686	3,9058508
30	1402,3854	6,7687	0,6635	4,0185010
50	1357,2923	5,6365	0,6486	4,3086826
75	1349,5180	5,0347	0,6417	4,5241704
100	1355,3870	4,7175	0,6390	4,6710113
		PROMEDIO	3,7261281	
		Σ ERROR	35,2612810	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula estándar, para una distribución de Gumbel, estación Sábana Grande**

FÓRMULA ESTÁNDAR				
Distribución de Gumbel				
Período de retorno	a	c	n	Error absoluto promedio
2	6394,3418	45,4224	1,0214	0,8072863
5	2121,1123	17,4953	0,7903	2,3563260
10	1463,2221	10,3825	0,7081	3,2775100
15	1463,2221	7,9964	0,6800	3,7491715
20	1406,0926	6,6626	0,6630	4,0648875
25	1378,4817	5,8136	0,6524	4,3015852
30	1378,4817	5,3094	0,6475	4,4983217
50	1329,1018	3,7710	0,6254	5,0043817
75	1319,8133	2,8714	0,6134	5,3986796
100	1287,3314	2,1296	0,6002	5,6507603
		PROMEDIO		3,9108909
		Σ ERROR		39,1089098

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Coefficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula Wenzel, para una distribución normal, estación Sábana Grande**

FÓRMULA WENZEL				
Distribución Normal				
Período de retorno	a	c	n	Error absoluto promedio
2	13368,7196	122,3840	1,1309	1,0319057
5	2861,8929	11,0124	0,8280	2,3356843
10	2297,7654	6,5359	0,7669	2,9830707
15	2119,4565	5,1916	0,8280	3,2908966
20	2025,3824	4,4976	0,7287	3,4939797
25	1946,6974	3,9935	0,7172	3,6408049
30	1905,8527	3,6930	0,7102	3,7536922
50	1809,8528	3,0029	0,6929	4,0552097
75	1736,0364	2,5421	0,6794	4,2735793
100	1690,4628	2,2661	0,6708	4,4200609
		PROMEDIO	3,3278884	
		Σ ERROR	33,2788840	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula Wenzel, para una distribución de Gumbel, estación Sábana Grande**

FÓRMULA WENZEL				
Distribución de Gumbel				
Período de retorno	a	c	n	Error absoluto promedio
2	5958,6473	46,0516	1,0104	0,8147567
5	3119,1936	13,0935	0,8503	2,1535821
10	2286,8742	6,4180	0,7651	3,0135965
15	2029,0270	4,5319	0,7295	3,4791925
20	1878,7292	3,5409	0,7064	3,8011473
25	1795,8776	2,9763	0,6915	4,0397152
30	1751,2017	2,6244	0,6821	4,2352793
50	1605,1295	1,7324	0,6526	4,7718982
75	1529,3423	1,2481	0,6340	5,1953044
100	1485,4988	0,9717	0,6222	5,1953044
		PROMEDIO		3,6699776
		Σ ERROR		36,6997766

Fuente: elaboración propia.

5.2.4. Resultados de la estación Escuintla

Para realizar la comparación de los errores absolutos promedio de cada una de las distribuciones, se representa por medio de cuadros comparativos, los coeficientes y cada uno de los promedios de error, así como el error absoluto promedio total y la sumatoria de dicho error de la estación Escuintla.

Tabla XXIV. **Coefficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula estándar, para una distribución normal, estación Escuintla**

FÓRMULA ESTÁNDAR				
Distribución normal				
Período de retorno	a	c	n	Error absoluto promedio
2	6471,2769	47,2811	0,9489	0,6028909
5	2408,7579	26,0784	0,7511	1,4980015
10	1814,2715	19,7101	0,6887	1,9997699
15	1622,1816	17,2173	0,6625	2,2426281
20	1522,1535	15,7358	0,6474	2,3952595
25	1453,5185	14,7047	0,6362	2,5097168
30	1417,4947	14,0938	0,6294	2,6011853
50	1317,3139	12,3884	0,6104	2,8346851
75	1253,2344	11,1960	0,5973	3,0055449
100	1207,4475	10,3541	0,5879	3,1196771
		PROMEDIO		2,2809359
		Σ ERROR		22,8093591

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula estándar, para una distribución de Gumbel, estación Escuintla**

FÓRMULA ESTÁNDAR				
Distribución de Gumbel				
Período de retorno	a	c	n	Error absoluto promedio
2	8275,7002	53,2012	0,9938	0,4532310
5	2665,6965	28,2840	0,7726	1,3587168
10	1795,2725	19,5214	0,6860	2,0299306
15	1516,3014	15,6947	0,6470	2,3849587
20	1392,5969	13,7255	0,6253	2,6360925
25	1319,8552	12,4320	0,6110	2,8202700
30	1265,6887	11,4071	0,5999	2,9741813
50	1149,3328	9,0525	0,5720	3,3917344
75	1076,5320	7,4232	0,5523	3,7189770
100	1041,1638	6,4949	0,5410	3,9448193
		PROMEDIO	2,5712911	
		Σ ERROR	25,7129116	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula Wenzel, para una distribución normal, estación Escuintla**

FÓRMULA WENZEL				
Distribución normal				
Período de retorno	a	c	n	Error absoluto promedio
2	7242,7281	42,9461	0,9621	0,5438952
5	4054,2545	18,1746	0,8261	1,3017322
10	3270,6289	12,6896	0,7737	1,7431951
15	2950,2583	10,6218	0,7487	1,9679777
20	2746,6975	9,3761	0,7321	2,1164864
25	2621,6517	8,6151	0,7209	2,2263348
30	2530,7428	8,0696	0,7125	2,3155770
50	2300,8680	6,7472	0,6899	2,5449739
75	2153,9893	5,9254	0,6744	2,7177124
100	2061,9153	5,4264	0,6640	2,8304828
		PROMEDIO	2,0308367	
		Σ ERROR	20,3083675	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Coefficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula Wenzel, para una distribución de Gumbel, estación Escuintla**

FÓRMULA WENZEL				
Distribución de Gumbel				
Período de retorno	a	c	n	Error absoluto promedio
2	8523,7219	53,5016	0,9983	0,4522360
5	4314,0475	20,0991	0,8416	1,1809244
10	3236,1893	12,4597	0,7712	1,7688571
15	3236,1893	9,4463	0,7330	2,1047213
20	2486,8954	7,8247	0,7086	2,3483004
25	2307,2138	6,7858	0,6908	2,5334340
30	2186,3987	6,0915	0,6778	2,6861216
50	1882,1710	4,4553	0,6418	3,1102318
75	1695,8477	3,5014	0,6166	3,4494593
100	1576,1931	2,9243	0,5992	3,6892809
		PROMEDIO		2,3323566
		Σ ERROR		23,3235668

Fuente: elaboración propia.

5.2.5. Resultados de la estación Puerto de San José

Para realizar la comparación de los errores absolutos promedio de cada una de las distribuciones, se representa por medio de cuadros comparativos, los coeficientes y cada uno de los promedios de error, así como el error absoluto promedio total y la sumatoria de dicho error de la estación Puerto de San José.

Tabla XXVIII. **Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula estándar, para una distribución normal, estación Puerto de San José**

FÓRMULA ESTÁNDAR				
Distribución Normal				
Período de retorno	a	c	n	Error absoluto promedio
2	2981,1526720	24,0788644	0,8432433	2,0406099
5	5362,5972677	23,8449450	0,8382446	3,7584386
10	6822,1125089	24,1045840	0,8439166	4,6567871
15	6168,2547798	21,9097668	0,8044928	5,0944392
20	6679,3693111	22,2085848	0,8092538	5,3857021
25	8581,4569973	24,6763377	0,8519521	5,6167924
30	8581,4569973	24,6763377	0,8519521	5,6167924
50	7658,2267206	22,1521136	0,8077578	6,2231070
75	7440,3832789	21,2620980	0,7909711	6,5946655
100	8901,2280001	22,8564766	0,8211350	6,7781301
		PROMEDIO	5,1765464	
		Σ ERROR	51,7654643	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula estándar, para una distribución de Gumbel, estación Puerto de San José**

FÓRMULA ESTÁNDAR				
Distribución de Gumbel				
Período de retorno	a	c	n	Error absoluto promedio
2	5536,4333692	37,1274874	0,9595077	1,2495086
5	1116,2047793	3,8292580	0,6245305	4,4979398
10	983,4723853	0,4951192	0,5762017	5,9129456
15	961,2532347	1,8895107	0,5591981	6,6156564
20	956,9192556	2,6201002	0,5498548	7,0746742
25	948,6987756	3,1520291	0,5414285	7,4325497
30	951,4817742	3,4934952	0,5375147	7,6999220
50	943,8081080	4,3926712	0,5219303	8,4566129
75	971,2108447	4,7610318	0,5174031	9,0044213
100	954,0059126	5,2527095	0,5079958	9,3906684
		PROMEDIO	6,7334898	
		Σ ERROR	67,3348989	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula Wenzel, para una distribución normal, estación Puerto de San José**

FÓRMULA WENZEL				
Distribución Normal				
Período de retorno	a	c	n	Error absoluto promedio
2	3299,4133253	14,7668199	0,8404559	1,8408911
5	6123,2556359	14,9089490	0,8421653	3,3944710
10	7471,4912462	14,6287132	0,8389600	4,2022975
15	8327,4473622	14,9296778	0,8426405	4,6071541
20	8773,5759716	14,8652495	0,8416478	4,8713374
25	9375,1768353	15,3598120	0,8481049	5,0706139
30	9328,7740316	14,7186819	0,8403524	5,2221562
50	10264,5318055	15,1047261	0,8447455	5,6273615
75	10805,0996497	15,0923358	0,8447691	5,9274894
100	11259,7389935	15,2311969	0,8465906	6,1316197
		PROMEDIO	4,6895391	
		Σ ERROR	46,8953918	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Coeficientes a, c, n y error absoluto promedio de fórmula Wenzel, para una distribución de Gumbel, estación Puerto de San José**

FÓRMULA WENZEL				
Distribución de Gumbel				
Período de retorno	a	c	n	Error absoluto promedio
2	4751,3292635	26,3692830	0,9141032	1,1747044
5	1368,1640221	1,8057090	0,6547910	4,3016499
10	960,4518629	0,5735283	0,1712277	5,9576247
15	832,9277118	0,5388156	0,6647344	6,8173386
20	767,9348370	0,5180791	0,9895776	7,3991228
25	757,0239232	0,5120074	0,9895776	7,8413037
30	689,7137715	0,4909611	1,1136080	8,1838496
50	619,4936652	0,4627602	1,2882706	9,1592871
75	629,3718465	0,4592552	1,3525287	9,8801238
100	577,8244751	0,4387436	1,4101092	10,3848750
		PROMEDIO		7,1099879
		SUMATORIA DE ERROR		71,0998796

Fuente: elaboración propia.

5.2.6. Análisis de resultados

El resultado de mayor interés para este estudio es el error absoluto promedio de cada una de las estaciones.

Se corrobora que en la estación Alameda Icta el menor error se obtuvo con la fórmula Wenzel y distribución normal (0,6576), seguido por la fórmula estándar y distribución normal (0,7214), luego la de Wenzel con distribución de Gumbel (0,7463) y finalmente el mayor error fue utilizando la fórmula estándar con la distribución de Gumbel (0,7566).

Para la estación Insivumeh el menor error fue con la fórmula Wenzel y distribución normal (1,2443), después la fórmula estándar con distribución normal (1,2722), le siguió la fórmula Wenzel con distribución de Gumbel (1,3326) y finalmente la fórmula estándar con distribución de Gumbel (1,3956).

En la estación Sábana Grande, el menor error se obtuvo con la fórmula Wenzel y distribución normal (3,3278), seguido por la fórmula estándar y distribución normal (3,5726), luego la de Wenzel con distribución de Gumbel (3,6699) y finalmente el mayor error fue utilizando la fórmula estándar con la distribución de Gumbel (3,9108).

Para la estación Escuintla el menor error fue con la fórmula Wenzel y distribución normal (2,0308), después la fórmula estándar con distribución normal (2,2809), le siguió la de Wenzel con distribución de Gumbel (2,3323) y finalmente la estándar con distribución de Gumbel (2,5712).

Finalmente, para la estación Puerto San José, se observó que el mejor resultado fue la combinación de fórmula Wenzel y distribución normal (4,6895), seguido por la fórmula estándar y distribución normal (5,1765). En este caso cambió el patrón del resto de estaciones, ya que se ajustó mejor la fórmula estándar con distribución de Gumbel (6,7334) que la fórmula Wenzel con distribución de Gumbel (7,1099).

Después de obtener el promedio del error absoluto de cada una de las estaciones, se observó un patrón general en las mismas. Se determinó que la fórmula Wenzel se ajusta mejor en todos los casos, al utilizarse la distribución normal.

Siendo el segundo lugar de mejor ajuste, la fórmula estándar combinada con la distribución normal; ya que esta presenta un error promedio menor que la combinación de fórmula Wenzel con la distribución de Gumbel, con lo cual esta sería la tercera combinación que mejor se ajusta.

Por último, la combinación que tiene un error absoluto promedio mayor, es la fórmula estándar con la distribución de Gumbel. Este patrón se ajusta a las cinco estaciones, excepto a Puerto San José, en la cual la combinación de fórmula estándar con distribución de Gumbel, se ajusta ligeramente mejor que la combinación de fórmula Wenzel y distribución de Gumbel.

En virtud de lo anterior, para el cálculo de intensidades de lluvia se recomienda utilizar las fórmulas que se presentan a continuación por cada estación y período de retorno.

Tabla XXXII. **Comparación para cada período de retorno del mejor ajuste para la estación Alameda Icta**

ESTACIÓN ALAMEDA ICTA		
Período de retorno	Mejor ajuste	Fórmula
2	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
5	F. Wenzel, D. de Gumbel	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
10	F. Estándar, D. normal	$I(t) = \frac{a}{(t + c)^n}$
15	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
20	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
25	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
30	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
50	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
75	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
100	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Comparación de errores absolutos promedio y determinación del mejor ajuste para la estación Insivumeh**

ESTACIÓN INSIVUMEH		
Período de retorno	Mejor ajuste	Fórmula
2	F. Estándar, D. de Gumbel	$I(t) = \frac{a}{(t+c)^n}$
5	F. Wenzel, D. de Gumbel	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
10	F. Wenzel, D. de Gumbel	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
15	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
20	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
25	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
30	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
50	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
75	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
100	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Comparación de errores absolutos promedio y determinación del mejor ajuste para la estación Sábana Grande**

ESTACIÓN SÁBANA GRANDE		
Período de retorno	Mejor ajuste	Fórmula
2	F. Estándar, D. de Gumbel	$I(t) = \frac{a}{(t+c)^n}$
5	F. Wenzel, D. de Gumbel	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
10	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
15	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
20	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
25	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
30	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
50	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
75	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
100	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Comparación de errores absolutos promedio y determinación del mejor ajuste para la estación Escuintla**

ESTACIÓN ESCUINTLA		
Período de retorno	Mejor ajuste	Fórmula
2	F. Wenzel, D. de Gumbel	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
5	F. Wenzel, D. de Gumbel	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
10	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
15	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
20	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
25	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
30	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
50	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
75	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
100	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Comparación de errores absolutos promedio y determinación del mejor ajuste para la estación Puerto de San José**

ESTACIÓN PUERTO SAN JOSÉ		
Período de retorno	Mejor ajuste	Fórmula
2	F. Wenzel, D. de Gumbel	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
5	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
10	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
15	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
20	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
25	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
30	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
50	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
75	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$
100	F. Wenzel, D. normal	$I(t) = \frac{a}{t^n + c}$

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Las estaciones climáticas en las que se trabajó este estudio, corresponden a dos cuencas de la vertiente del Pacífico, cuyas alturas van desde los 2 000 metros aproximadamente hasta el nivel del mar. Es muy importante realizar estudios hidrológicos para esta zona, ya que es susceptible a inundaciones, especialmente en las partes bajas.
2. Los datos solicitados para las estaciones climáticas abarcaron, aproximadamente 20 años, con lo cual se pudo verificar que hay escasez de información meteorológica, y la recaudación de los datos no es constante. La forma de obtener dichos datos fue con bandas pluviográficas, de las cuales no todas se encuentran en estado adecuado. Estas variables pudieron generar inexactitud en el estudio.
3. En el caso de las cinco estaciones utilizadas para este estudio: Alameda Icta, Insivumeh, Sábana Grande, Escuintla y Puerto San José, el modelo matemático que presenta un error absoluto promedio menor está determinado por el propuesto por Wenzel, para todos los casos.
4. La distribución que mejor se ajustó para todas las estaciones fue la distribución normal, ya que la distribución de Gumbel, presentó errores absolutos promedio mayores, excepto en la estación Puerto San José, donde se adaptó de mejor forma la distribución de Gumbel en comparación a la distribución normal.

RECOMENDACIONES

1. Tener registro de precipitación en cada una de las cuencas del país, ya que esto permite tener una red de información más confiable a la hora de realizar cualquier estudio hidrológico.
2. Implementar más estaciones automáticas en el país, para tener mejor capacidad de obtener datos continuamente, además de evitar error humano.
3. Las bandas pluviográficas deben estar calibradas y que registren los eventos diariamente, lo que mejoraría la base de datos del país, y la información sería más confiable, en especial durante lluvias fuertes.
4. Realizar más estudios de este tipo que determinen las distribuciones que se ajustan mejor a los datos pluviográficos, así como las aproximaciones matemáticas.

BIBLIOGRAFÍA

1. APARICIO MIJARES, Francisco Javier. *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Limusa, 1989. 303 p.
2. *Curvas intensidad-duración-frecuencia para la zona centro sur de Chile*. Informado por el programa hidrológico internacional de la Unesco para América Latina y el Caribe. Uruguay: edificio Mercosur, 1992. 126 p.
3. Departamento de investigación y servicios meteorológicos de Insivumeh. *Estaciones meteorológicas*. [en línea] <<http://www.insivumeh.gob.gt/meteorologia/ESTACIONES/ESTACIONES%20CHIMALTENANGO.htm>>. [Consulta: 13 de enero de 2015].
4. Laboratorio de Información Geográfica. *Atlas temático de la república de Guatemala*. MAGA, 2002. 127 p.
5. LÓPEZ CHOC, Fernando. *Estudio hidrológico básico de la cuenca del río María Linda*. Trabajo de graduación de Agronomía. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Agronomía, 1972. 64 p.
6. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Cuencas hidrográficas de Guatemala*. Guatemala: MARN, 2011. 49 p.

7. NUFIO REYES, Waldemar. *Caracterización preliminar de la cuenca del río Achiguate*. Trabajo de graduación de Agronomía. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Agronomía. 1982. 165 p.
8. OLIVA TRUJILLO, Vicente Alberto. *Análisis de la selección de datos para obtener curvas de duración, intensidad y frecuencia*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. 1992. 73 p.
9. PORRAS Y PORRAS, Edgar Adolfo. *Método estándar de cálculo de curvas duración-intensidad-frecuencia*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. 1988. 77 p.
10. Universidad de San Carlos de Guatemala, *Práctica 2 estación meteorológica*. Facultad de Agronomía. [en línea] <<http://es.scribd.com/doc/16299662/PRACTICA-2-ESTACION-METEOROLOGICA#scribd>>. [Consulta: 05 de diciembre 2014].