



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

**COMPARACIÓN DEL MÉTODO INSIVUMEH CON EL MÉTODO WENZEL,
PARA LA CREACIÓN DE CURVAS DE INTENSIDAD DURACIÓN Y
FRECUENCIA (IDF) EN LA CUENCA DEL RÍO SALINAS**

Jorge Francisco Gálvez González

Asesorado por el Ing. Sergio Antonio López Dubón

Guatemala, octubre de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN DEL MÉTODO INSIVUMEH CON EL MÉTODO WENZEL,
PARA LA CREACIÓN DE CURVAS DE INTENSIDAD DURACIÓN Y
FRECUENCIA (IDF) EN LA CUENCA DEL RÍO SALINAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JORGE FRANCISCO GÁLVEZ GONZÁLEZ

ASESORADO POR EL ING. SERGIO ANTONIO LÓPEZ DUBÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

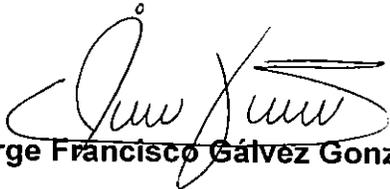
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Daniel Alfredo Cruz Pineda
EXAMINADOR	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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 DEL MÉTODO INSIVUMEH CON EL MÉTODO WENZEL, PARA LA CREACIÓN DE CURVAS DE INTENSIDAD DURACIÓN Y FRECUENCIA (IDF) EN LA CUENCA DEL RÍO SALINAS

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


Jorge Francisco Gálvez González

Guatemala, 15 de julio de 2013

Ingeniero
Pedro Antonio Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Ingeniero Pedro Aguilar:

Luego de un breve saludo, sírvame la presente para informarle que el trabajo de graduación **“COMPARACIÓN DEL MÉTODO INSIVUMEH CON EL MÉTODO WENZEL, PARA LA CREACIÓN DE CURVAS DE INTENSIDAD DURACIÓN Y FRECUENCIA (IDF) EN LA CUENCA DEL RÍO SALINAS”**, elaborado por el alumno Jorge Francisco Gálvez González, ha sido finalizado a satisfacción y revisado por mi persona.

Sin otro particular me despido

Atentamente,



Sergio Antonio López Dubón
Ingeniero Civil
Col. No. 9914

Ing. Civil Sergio Antonio López Dubón

Colegiado No. 9914



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

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



Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Guatemala, Escuela de Ingeniería Civil
5 de septiembre de 2013

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

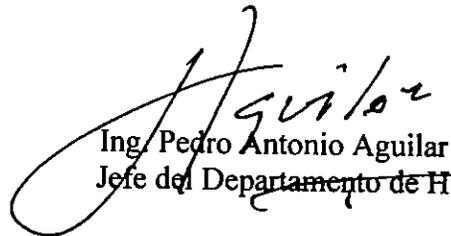
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **COMPARACIÓN DEL MÉTODO INSIVUMEH CON EL MÉTODO WENZEL, PARA LA CREACIÓN DE CURVAS DE INTENSIDAD DURACIÓN Y FRECUENCIA (IDF) EN LA CUENCA DEL RÍO SALINAS,** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Jorge Francisco Gálvez González 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 INGENIERÍA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

/bbdeb.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua





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 Jefe del Departamento de Hidráulica, Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco, al trabajo de graduación del estudiante Jorge Francisco Gálvez González, titulado **COMPARACIÓN DEL MÉTODO INSIVUMEH CON EL MÉTODO WENZEL, PARA LA CREACIÓN DE CURVAS DE INTENSIDAD DURACIÓN Y FRECUENCIA (IDF) EN LA CUENCA DEL RÍO SALINAS**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Hugo Leonel Montenegro Franco
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, octubre de 2013.

/bbdeb.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua





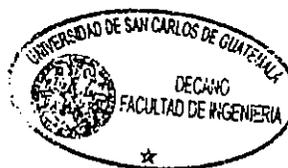
Ref. DTG.723-2013

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 DEL MÉTODO INSIVUMEH CON EL MÉTODO WENZEL PARA LA CREACIÓN DE CURVAS DE INTENSIDAD DURACIÓN Y FRECUENCIA (IDF) EN LA CUENCA DEL RÍO SALINAS**, presentado por el estudiante universitario: **Jorge Francisco Galvez González**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, octubre de 2013



/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Mis padres** Ingeniero Jorge Arnulfo Gálvez y licenciada Vitalina González, por su amor incondicional, consejos y por su motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien. Este triunfo también es suyo.
- Mis hermanos** Diana Sofía y Fabricio Josué Gálvez González, que mi triunfo obtenido sea un ejemplo para ustedes.
- Mis tíos** En especial al ingeniero Carlos Enrique González, por sus consejos y apoyo incondicional.
- Mis abuelos** Por su apoyo incondicional y sabios consejos.
- Mi familia** Por su apoyo y confianza.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por iluminarme en cada etapa de mi vida, estar siempre a mi lado, permitiéndome alcanzar este triunfo.
- Universidad San Carlos de Guatemala** Por permitirme realizar mis estudios en tan gloriosa casa de estudios y crecer como persona y profesional
- Mi familia** Por estar a mi lado en todos los momentos de mi vida y apoyarme incondicionalmente, en especial a la familia Gálvez González.
- Mi asesor** El ingeniero Sergio López Dubon, por el gran apoyo y confianza brindada en mi trabajo de graduación.
- Mis amigos** Por animarme a seguir adelante y por los momentos inolvidables.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
OBJETIVOS/HIPÓTESIS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO SALINAS	1
1.1. División administrativa de la cuenca del río Salinas	1
1.2. Características morfométricas de la cuenca	3
1.3. Cobertura vegetal y uso de la tierra	4
1.4. Mapa climático (precipitación y temperatura promedio anual)	5
1.5. Descripción de las estaciones analizadas	6
2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	9
2.1. Probabilidad	9
2.2. Sucesos simultáneos	11
2.2.1. Regla de la multiplicación	12
2.2.2. Regla de la adición	12
2.3. Parámetros estadísticos	13
2.3.1. Momentos	14
2.3.1.1. Función generatriz	15
2.3.2. Posición	15
2.3.2.1. Valor medio	15

	2.3.2.2.	Modo	16
	2.3.2.3.	Mediana.....	16
2.3.3.		Dispersión	17
	2.3.3.1.	Desviación estándar	17
	2.3.3.2.	Recorrido intercuartil.....	18
	2.3.3.3.	Coefficiente de variación.....	18
2.3.4.		Asimetría	19
	2.3.4.1.	Coefficiente de asimetría relativa	19
	2.3.4.2.	Coefficiente de Pearson.....	19
2.3.5.		Aplanamiento	20
2.3.6.		Estimadores	20
2.4.		Distribuciones teóricas	21
	2.4.1.	Prueba de Bernoulli	21
	2.4.2.	Distribución binomial	22
	2.4.3.	Distribución de Poisson	23
	2.4.4.	Distribución normal.....	24
2.5.		Distribuciones extremas	25
	2.5.1.	Probabilidades y periodos de retorno	29
	2.5.2.	Factores de frecuencia	30
	2.5.3.	Distribuciones teóricas	31
	2.5.3.1.	Función de Gumbel	31
	2.5.4.	Posiciones gráficas.....	33
	2.5.5.	Ajuste de curvas	34
	2.5.5.1.	Regresión mínimo cuadrática	34
2.6.		Distribución de Gumbel	36
	2.6.1.	Parámetros estadísticos	37
	2.6.2.	Determinación de la recta de ajuste	39
	2.6.2.1.	Método de Gumbel	39

	2.6.2.1.1.	Ordenamiento de datos	41
	2.6.2.1.2.	Asignación de probabilidades	42
	2.6.2.1.3.	Valores de variable reducida	43
	2.6.2.1.4.	Gráfico de datos	44
	2.6.2.1.5.	Coeficientes de ajuste ...	44
3.		CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA (IDF).....	45
3.1.		Medición de la precipitación.....	45
3.1.1.		Pluviómetro	46
3.1.2.		Pluviógrafo	47
3.1.3.		Pluviómetros totalizadores	48
3.2.		Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF).....	49
3.2.1.		Aplicación de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)	51
4.		METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA.....	55
4.1.		Recopilación de la información pluviográfica	55
4.1.1.		Selección de intensidades máximas	56
4.2.		Ajuste de los datos a una función de distribución de probabilidad	59
5.		CÁLCULO Y PRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS CURVAS INTENSIDAD DURACIÓN FRECUENCIA.....	61

6.	AJUSTE DE LAS INTENSIDADES DE LLUVIA A LOS MODELOS MATEMÁTICOS WENZEL E INSIVUMEH.....	69
6.1.	Comparación de métodos de ajuste en relación al error relativo	75
6.1.1.	Error relativo.....	75
6.1.1.1.	Comparación de modelos para cada estación climatológica.....	75
6.2.	Análisis de resultados	79
6.2.1.	Análisis de errores relativos de cada estación	79
6.2.1.1.	Estación Chixoy.....	79
6.2.1.2.	Estación Cubulco	80
6.2.1.3.	Estación Sacapulas	80
6.2.1.4.	Estación San Agustín.....	81
6.2.1.5.	Estación San Jerónimo	81
6.2.2.	Análisis global de los errores relativos.....	82
6.3.	Presentación de resultados	83
	CONCLUSIONES	85
	RECOMENDACIONES	87
	BIBLIOGRAFÍA	89

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	División administrativa de la cuenca del río Salinas	2
2.	Mapa de distribución de precipitación en la cuenca del río Salinas	5
3.	Pluviómetro	46
4.	Pluviógrafo	48
5.	Pluviógrafo totalizador	49
6.	Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)	50
7.	Equipo pluviográfico y banda milimetrada	56
8.	Pluviograma	57
9.	Esquema de las curvas IDF	58

TABLAS

I.	Tabla división administrativa de la cuenca del río Salinas	2
II.	Principales características morfométricas de la cuenca del río Salinas	3
III.	Distribución de cobertura vegetal y uso de la tierra	4
IV.	Valores numéricos para algunos parámetros estadísticos para las distribuciones de Gauss y de Gumbel	38
V.	Estación hidrométrica Sanarate (máximos)	39
VI.	Resumen multianual de intensidades de lluvia máximas de la estación climática Cubulco	60
VII.	Probabilidad de intensidad de lluvia en estación Chixoy calculada con distribución normal	62

VIII.	Probabilidad de intensidad de lluvia en estación Cubulco calculada con distribución normal.....	62
IX.	Probabilidad de intensidad de lluvia en estación Sacapulas calculada con distribución normal.....	63
X.	Probabilidad de intensidad de lluvia en estación San Agustín Chixoy calculada con distribución normal.....	63
XI.	Probabilidad de intensidad de lluvia en estación San Jerónimo calculada con distribución normal.....	64
XII.	Probabilidad de intensidad de lluvia en estación Chixoy calculada con distribución Gumbel	64
XIII.	Probabilidad de intensidad de lluvia en estación Cubulco calculada con distribución Gumbel	65
XIV.	Probabilidad de intensidad de lluvia en estación Sacapulas calculada con distribución Gumbel	65
XV.	Probabilidad de intensidad de lluvia en estación San Agustín Chixoy calculada con distribución Gumbel	66
XVI.	Probabilidad de intensidad de lluvia en estación San Jerónimo calculada con distribución Gumbel	66
XVII.	Coeficientes de ajuste para la estación Chixoy, utilizando el método INSIVUMEH	70
XVIII.	Coeficientes de ajuste para la estación Chixoy, utilizando el método WENZEL	70
XIX.	Coeficientes de ajuste para la estación Cubulco, utilizando el método INSIVUMEH	71
XX.	Coeficientes de ajuste para la estación Cubulco, utilizando el método WENZEL	71
XXI.	Coeficientes de ajuste para la estación Sacapulas, utilizando el método INSIVUMEH	72

XXII.	Coeficientes de ajuste para la estación Sacapulas, utilizando el método WENZEL	72
XXIII.	Coeficientes de ajuste para la estación San Agustín, utilizando el método INSIVUMEH.....	73
XXIV.	Coeficientes de ajuste para la estación San Agustín, utilizando el método WENZEL.....	73
XXV.	Coeficientes de ajuste para la estación San Jerónimo, utilizando el método INSIVUMEH	74
XXVI.	Coeficientes de ajuste para la estación San Jerónimo, utilizando el método WENZEL.....	74
XXVII.	Comparación del error relativo para la estación Chixoy.....	76
XXVIII.	Comparación de error relativo para la estación Cubulco	77
XXIX.	Comparación de error relativo para la estación Sacapulas	77
XXX.	Comparación de error relativo para la estación San Agustín	78
XXXI.	Comparación de error relativo para estación San Jerónimo	78
XXXII.	Tabla resumen de sumatoria de errores relativos para estaciones	82
XXXIII.	Parámetros de ajuste para estaciones de la cuenca del río Salinas	84

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
σ	Desviación estándar
I	Intensidad de lluvia en mm/hora
A	Parámetro de ajuste a modelo matemático
B	Parámetro de ajuste a modelo matemático
n	Parámetro de ajuste a modelo matemático
P	Probabilidad de ocurrencia de un suceso
t	Tiempo de concentración en minutos
μ	Valor medio
v	Varianza

GLOSARIO

Afluente	Curso de agua que desemboca en un curso mayor o en un lago.
Alcantarilla	Conducto cerrado para el libre paso del agua de drenaje superficial, bajo una carretera, ferrocarril, canal u otra estructura.
Análisis de regresión	Método estadístico desarrollado para investigar la interdependencia o relación entre 2 o más variables mensurables. La forma más corriente de análisis de regresión es la regresión lineal.
Caudal	Volumen de agua que fluye a través de una sección transversal de un río o canal en la unidad de tiempo.
Ciclo hidrológico	Sucesión de fases por las que pasa el agua en su movimiento de la atmósfera a la tierra y en su retorno a la misma: evaporación del agua del suelo, mar y aguas continentales, condensación del agua en forma de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o en masas de agua y reevaporación.

Cuenca	Área de drenaje de un curso de agua, río o lago.
Curva IDF	Curva que muestra la probabilidad de diversas intensidades de lluvia en períodos cortos para diversas duraciones de precipitación en un determinado lugar. A menudo se trata de un conjunto de curvas, cada una indicando una determinada frecuencia de ocurrencia o un período de retorno expresado en años.
Datos históricos	Datos hidrológicos y meteorológicos referentes a fenómenos ocurridos en el pasado.
Distribución normal	Distribución de probabilidad continua, simétrica, definida matemáticamente y con forma de campana, que tradicionalmente se supone que representa los errores aleatorios.
Divisoria	Línea límite que separa cuencas hidrográficas adyacentes.
Estación hidrométrica	Estación en la cual se obtienen datos sobre el agua de ríos, lagos o embalses, referidos a uno o más de los elementos siguientes: nivel, caudal, transporte y depósito de los sedimentos, temperatura del agua y otras propiedades físicas del agua, características de la capa de hielo y propiedades químicas del agua.

Hidráulica	Rama de la mecánica de fluidos que estudia el flujo de agua (u otros líquidos) en conductos y canales abiertos.
Hidrología	Ciencia que estudia las aguas superficiales y subterráneas de la Tierra, y su aparición, circulación y distribución, tanto en el tiempo como en el espacio, sus propiedades biológicas, químicas y físicas, sus reacciones con el entorno, incluyendo su relación con los seres vivos.
Intensidad de lluvia	Tasa de lluvia expresada en unidades de altura por unidad de tiempo.
Modelo	Representación bajo cualquier forma de un objeto, proceso o sistema. En hidrología, un modelo es, en la mayoría de los casos, la representación matemática de una cuenca, un sistema hídrico, una serie de datos y otros.
Obras hidráulicas	Instalaciones técnicas en las que se toman medidas para la explotación y utilización de los recursos hídricos, así como la protección contra sus efectos perjudiciales.

Parámetro	Coeficiente en algunos modelos hidrológicos, fórmula u otro tipo de relación que puede ser ajustado para aplicar el modelo general, a casos particulares. Por ejemplo para ajustar el modelo lluvia-escorrentía a una cuenca en particular, habrá que determinar los valores de los parámetros apropiados para esa cuenca.
Período de retorno	Intervalo medio de tiempo a largo plazo, o número de años al cabo de los cuales se igualará o superará un suceso, por ejemplo; caudal máximo de crecida.
Tiempo de concentración	Tiempo necesario para que la escorrentía de un chubasco llegue hasta el desagüe desde el punto de la cuenca con mayor tiempo de recorrido.

RESUMEN

Una de las dificultades en el estudio de las precipitaciones, es la irregularidad con que se presentan, dependiendo de la localización de la zona que se está analizando. En este sentido, una forma de caracterizar las precipitaciones lo constituye la intensidad de la misma, que representa la cantidad de lluvia caída en función del tiempo, expresada normalmente en milímetros por hora. De este modo, es posible relacionar dicha intensidad con la frecuencia con que ocurre y con la duración, a través de técnicas estadísticas que relacionan estas 3 variables, obteniéndose así las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), las que están construidas con base en las intensidades máximas.

De este modo, por medio del análisis de las curvas IDF es posible obtener intensidades de diseño, asociadas a distintas duraciones y períodos de retorno, lo que resulta fundamental para el dimensionamiento de numerosos proyectos de control y evacuación de crecidas que requieren de un estudio hidrológico, como proyectos de alcantarillados y colectores de aguas de lluvia en cuencas urbanas, o sistemas de drenaje de caminos y aeropuertos, entre otros, para los cuales se debe conocer la probabilidad de que se produzcan determinados valores de intensidad de precipitación que representen riesgo.

Es por esta razón, que se precisa tener un método confiable para determinar dichos valores de precipitación, en general los métodos de recopilación y análisis de datos no varían, lo que si varia es el método con el que las curvas y expresiones matemáticas son ajustadas a los valores obtenidos del análisis de intensidades recopiladas de los datos de campo.

OBJETIVOS

General

Realizar una comparación del método INSIVUMEH con el método WENZEL, analizando cuál de los 2 se ajusta mejor a los valores reales obtenidos del análisis de intensidades.

Específicos

1. Comprobar con cuál de los 2 métodos se obtienen valores más precisos de intensidad de lluvia.
2. Crear las curvas IDF con ambos métodos estadísticos.
3. Proponer curvas IDF más precisas para la cuenca del río Salinas.

HIPÓTESIS

El método WENZEL, es un método más actualizado, en el que se utilizan métodos estadísticos de ajuste de curvas y distribución de probabilidades, por lo cual los valores resultantes con este método deben ser más precisos que los obtenidos con el método INSIVUMEH.

INTRODUCCIÓN

Las características geográficas de Guatemala, hacen que en el país exista una gran diferencia en cuanto a cantidad y distribución de las precipitaciones, las que aumentan considerablemente en el norte del país.

En Guatemala, el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), propone un método de ajuste llamado método INSIVUMEH, en el cual se ha observado que los valores obtenidos en el modelo matemático no se ajustan adecuadamente a los valores reales de intensidad obtenidos en el análisis. Existen otros métodos más elaborados, como el método WENZEL, que utiliza muchas herramientas estadísticas para realizar un mejor ajuste, con el que se pueden obtener resultados más precisos que con el método INSIVUMEH.

En la presente investigación se realizará el cálculo y análisis de las curvas IDF, tanto por el método INSIVUMEH como por el método WENZEL, los datos son tomados de la cuenca del río Salinas, que abarca parte de los departamentos de Quiché y Baja Verapaz, ubicados en la región norte del país. La cuenca del río Salinas cuenta con 5 estaciones meteorológicas bajo el control del INSIVUMEH. La estación Cubulco Pino en el municipio de Cubulco, la estación San Jerónimo en el municipio San Jerónimo. Estacion Chinque en el municipio de Chinque, la estación Chuitinamit en el municipio de Sacapulas, y la estación Chixoy en el municipio San Miguel Uspantán, departamento de Quiché.

Una vez construidas las curvas IDF por ambos métodos, se realizará una comparación de la sumatoria del error relativo que produce cada modelo, y cuál de ambos métodos se ajusta mejor a los puntos obtenidos del análisis de intensidades. Con base en los resultados, se propondrán nuevas gráficas y modelos matemáticos de curvas IDF con datos actualizados y más precisos que podrán ser utilizados en la región de la cuenca del río Salinas, para los proyectos que requieran de estos datos.

En el capítulo 1, se presenta una breve descripción de la cuenca, su división administrativa, características morfométricas, climáticas y características de las estaciones analizadas. En el capítulo 2, se presenta un resumen del análisis y métodos estadísticos utilizados para la creación de las curvas IDF. En el capítulo 3, se presenta una descripción del equipo utilizado para la medición de la precipitación, la presentación de datos y la descripción de las curvas IDF y su uso. En el capítulo 4, se presenta la metodología de procesamiento de los datos recolectados de los equipos de medición y la construcción de las curvas IDF. En el capítulo 5, se presenta la forma de presentación de las curvas IDF en forma tabular.

Por último en el capítulo 6, se presenta una comparación y análisis, en base al error relativo con respecto al ajuste entre los datos reales y los datos proporcionados por los modelos creados con el método INSIVUMEH y el método WENZEL.

1. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO SALINAS

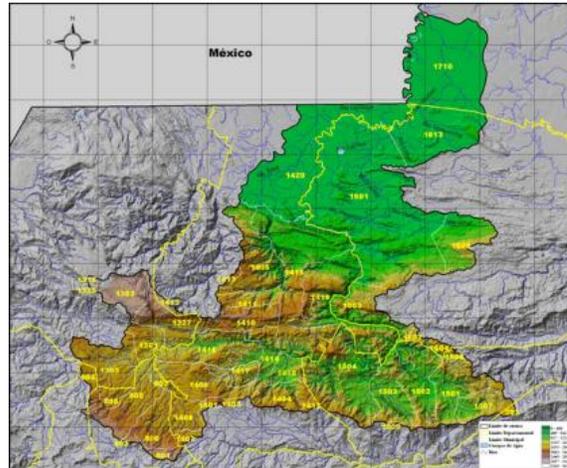
Los factores que intervienen en los estudios hidrológicos son muy diversos: fisiografía, geología, edafología, climatología, vegetación, uso de la tierra y otros; y es un hecho que la influencia de los diversos factores no puede reducirse a expresiones estrictamente matemáticas, aunque existen claras relaciones entre los elementos físico-geográficos que caracterizan un sistema de cuenca determinado y los diversos parámetros hidrológicos que lo afectan.

De acuerdo a Herrera (1995), la cuenca hidrográfica es la unidad básica de estudio en hidrología, al tener la ventaja de poder evaluar cuantitativamente el escurrimiento del recurso hídrico con mayor exactitud que cualquier otra unidad. De acuerdo a este concepto, las cuencas hidrográficas son unidades morfográficas superficiales, cuyos límites están establecidos por la divisoria geográfica principal de las aguas de las precipitaciones, conocidos como parteaguas, el cual teóricamente es una línea imaginaria que une los puntos de máximo valor de altura relativa entre 2 laderas adyacentes, pero de exposición opuesta, desde la parte más alta de la cuenca hasta su punto de aforo en la zona altitudinal más baja.

1.1. División administrativa de la cuenca del río Salinas

En este caso, la cuenca de estudio es la cuenca 3.7, también conocida como río Salinas, a continuación se muestran los límites de esta cuenca, así como su distribución dentro de los departamentos que abarca:

Figura 1. **División administrativa de la cuenca del río Salinas**



Fuente: MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA (MAGA). Atlas temático de las cuencas hidrográficas de la República de Guatemala. p.24.

Tabla I. **Tabla división administrativa de la cuenca del río Salinas**

Del río Salinas		
Departamento	Área (ha)	Área (%) Respecto a la cuenca
Alta Verapaz	309 827,70	25,72
Baja Verapaz	179 530,78	14,91
El Progreso	1 393,43	0,12
Petén	89 532,61	7,43
San Marcos	6,23	0
Huehuetenango	90 450,90	7,51
Quetzaltenango	4518,47	0,38
Quiché	457 208,80	37,96
Totonicapán	71 986,76	5,98
Río Salinas total	1 204 454,68	100

Fuente: MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA (MAGA). Atlas temático de las cuencas hidrográficas de la república de Guatemala. p.24.

1.2. Características morfométricas de la cuenca

Al igual que los ríos de la vertiente del Caribe, los de la vertiente del Golfo de México a la que pertenece la cuenca del río Salinas, poseen grandes longitudes, encontrándose los ríos más caudalosos del país como lo son, el Usumacinta, Chixoy y La Pasión. Las crecidas son de larga duración, los cauces son relativamente estables y los recorridos más sinuosos, dado que las pendientes son relativamente suaves, en comparación a las otras vertientes.

Tabla II. Principales características morfométricas de la cuenca del río Salinas

Vertiente	Cuenca		Características morfométricas							
	Código	Nombre	Lineales							
			Perímetro	Longitud cauce principal	Radio de bifurcación	Longitud media de corrientes	Radio de longitud media	Longitud acumulada de corrientes	---	
			Pk	Lc	Rb	Lmc	RI	La	---	
			(km)	(km)	(km)	(km)	(km)	(km)	---	
Del Golfo de México	3.7	Río Salinas	938,5	408,6	3,9	9	4,8	3 256,30	---	
			Superficiales							
			Area	Relación de forma	Relación circular	Índice de Compacidad	Radio de Elongación	Densidad de drenaje	Frecuencia de corrientes	
			Ak	Rf	Rc	Kc	Re	D		
			(km ²)	---	---	---	(km)	(km/km ²)	(No, Corrs./km ²)	
			12 099,00	0,07	0,17	2,39	0,3	0,27	0,03	
			Relieve							
			Pendiente media	Pendiente media del canal principal	Elevación media	Coefficiente de relieve	Coefficiente de Robustez	---	---	
			Sc	Scp	Em			---	---	
			(m/km)	(%)	(m)	(Rh)	(Rr)	---	---	
326,3	0,62%	1,300	9,37E-05	1	---	---				

Fuente: MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA (MAGA). Atlas temático de las cuencas hidrográficas de la república de Guatemala. p.10.

Para esta vertiente, la precipitación anual para el sector norte, se encuentra entre los 1 000 a 2 500 milímetros; mientras que el sector centro-oeste, varía en 600 milímetros, en las cumbres montañosas de Huehuetenango, Totonicapán, Quiché y Baja Verapaz, alcanza los 5 550 milímetros anuales, en regiones al norte de Huehuetenango, Quiché y Alta Verapaz principalmente; por lo que el volumen de escorrentía se estima en 43 300 millones de metros cúbicos por año.

1.3. Cobertura vegetal y uso de la tierra

Las actividades humanas impactan el medio ambiente, los múltiples intereses dentro de las propiedades, y el entorno en general. A continuación se mencionan algunas de estas actividades.

Tabla III. Distribución de cobertura vegetal y uso de la tierra

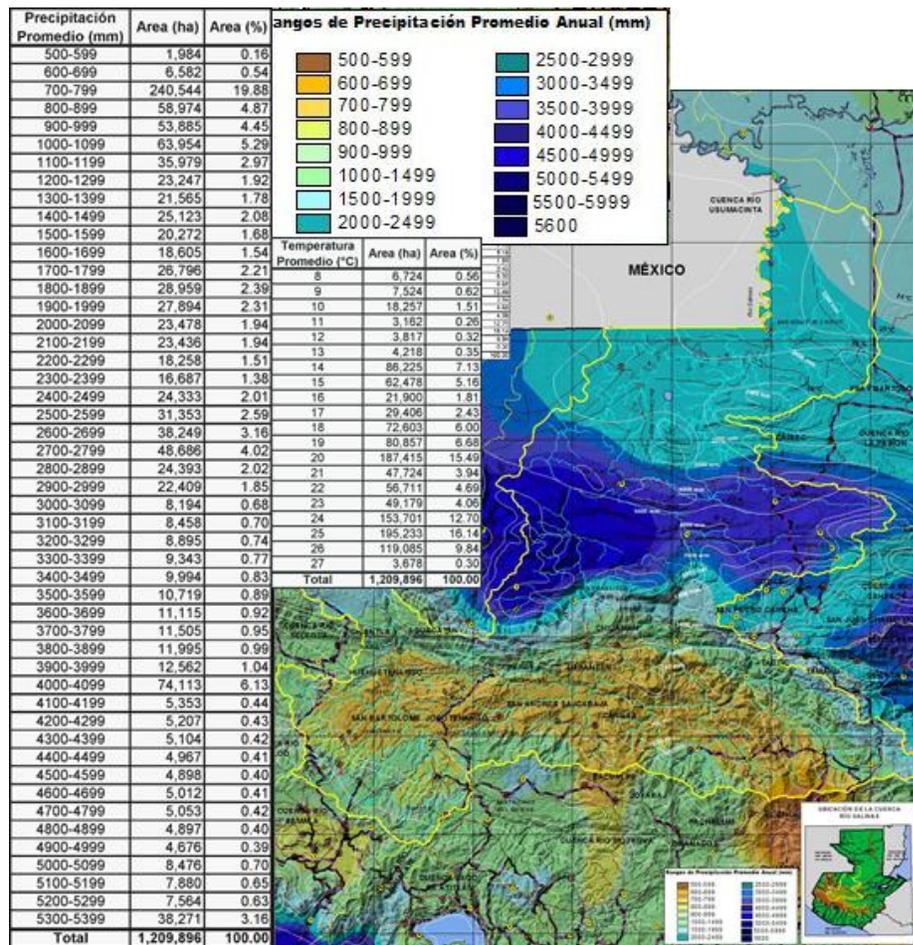
Categoría	Área (ha)	Área (%)
1.1 Centros poblados	1 363	0,11
1.3 Transporte (aeropuertos, puertos, otros)	75	0,01
2.1.1 Agricultura limpia anual	438 959	36,28
2.1.2 Hortalizas	1 712	0,14
2.2.1 Café	1 536	0,13
2.2.6 Otros cultivos	137	0,01
2.3.2 Pastos cultivados	1 131	0,09
3.1 Pastos naturales	57 120	4,72
3.2 Charral o matorral	123 780	10,23
4.1 Latifolias	307 682	25,43
4.2 Coníferas	190 954	15,78
4.3 Mixto	15 773	1,30
4.4 Bosque secundario	64 487	5,33
5. Lagos, lagunas y otros	550	0,05
5.4 Embalses	1 432	0,12
6.1 Humedal con cobertura boscosa	1 207	0,10
6.2 Otros humedales	1 839	0,15
7.1 Área de arena y/o playa	142	0,01
7.3 Rocas expuestas (incluye áreas erosionadas)	17	0,00
Total	1 209 896	100,00

Fuente: MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA (MAGA). Atlas temático de las cuencas hidrográficas de la república de Guatemala. p.49.

1.4. Mapa climático (precipitación y temperatura promedio anual)

Es aquel que muestra el estado general de la atmósfera sobre un lugar determinado de la superficie terrestre, y sus datos se refieren a temperatura promedio anual, cantidad de lluvia anual, tipo de clima.

Figura 2. Mapa de distribución de precipitación en la cuenca del río Salinas



Fuente: MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA (MAGA). Atlas temático de las cuencas hidrográficas de la república de Guatemala. p.169.

1.5. Descripción de las estaciones analizadas

El Departamento de Investigación y Servicios Climatológicos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), tiene a su cargo el monitoreo de una amplia red de estaciones climáticas situadas en todo el territorio nacional, donde se miden parámetros meteorológicos diariamente, estos elementos de observación pueden ser; principales y auxiliares.

Los elementos de observación principales son:

- Temperatura
- Humedad relativa del aire
- Precipitaciones
- Tiempo presente
- Tiempo pasado
- Tipo de nubes
- Nubosidad

Los elementos de observación auxiliares son:

- Presión atmosférica
- Viento en superficie
- Brillo y radiación solar
- Humedad del suelo
- Evaporación y evapotranspiración

El INSIVUMEH clasifica a las estaciones climatológicas como tipo A, B, C o D, donde cada tipo difiere fundamentalmente en el instrumental que posee y por ende, en el número de elementos meteorológicos que se observan.

Estaciones climatológicas de tipo A: los elementos meteorológicos que se observan en total son 11, siendo estos: temperatura, precipitación, humedad relativa del aire, presión atmosférica, brillo solar, radiación solar, evaporación, nubosidad, viento en superficie, temperatura del subsuelo y visibilidad.

Estaciones climatológicas de tipo B: los elementos meteorológicos que se observan en total son 4, siendo estos: temperatura, precipitación, humedad relativa del aire y velocidad de viento. Estaciones climatológicas de tipo C: los elementos meteorológicos que se observan en total son 2, siendo éstos: temperatura y precipitación. Estaciones climatológicas de tipo D: se observa un único elemento meteorológico que es la precipitación.

2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

2.1. Probabilidad

Según la teoría clásica, para un experimento aleatorio que arroje sobre un total de resultados “c”, un conjunto de valores favorables “a”, existirá una probabilidad de éxito igual al cociente:

$$p = \frac{a}{c}$$

Repetiendo un número elevado de veces el experimento en cuestión, todos los casos posibles tenderán a presentarse en una cantidad proporcional a su probabilidad. Aceptando esta característica, pueden ejecutarse n veces el mismo experimento; si en ellas aparecen f casos favorables, la relación f/n será aproximadamente igual a la probabilidad de ocurrencia del suceso, coincidiendo con ella para n tendiendo al infinito, es decir:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f}{n} = \frac{a}{c} = p$$

El número de casos favorables f es la frecuencia del suceso y el cociente f/n es su razón frecuencial. Por ejemplo, si los casos posibles son o no igualmente probables. Esto dio lugar a diversas controversias que fueron solucionándose a medida que la teoría de probabilidades fue profundizándose, en especial gracias a la obra de De Moivre y Bernoulli.

Actualmente se tiende a la creación de modelos matemáticos que permitan explicar los fenómenos probabilísticos. De esta forma puede postularse la existencia de un número p que represente la idealización de la razón frecuencial f/n así como una constante física puede ser tomada como la idealización de mediciones empíricas. En este caso dicho número, será por definición, la probabilidad matemática del suceso en estudio, siendo su frecuencia relativa o razón frecuencial, una medida experimental de la misma.

En forma independiente del tipo de definición a que se recurra, resulta obvio que el campo de variación de la frecuencia relativa está dado por la siguiente desigualdad:

$$0 \leq \frac{f}{n} \leq 1$$

Si f/n representa la razón frecuencial de la aparición de un suceso A en un cierto experimento aleatorio, al hacer n grande su valor se acercará asintóticamente al de la probabilidad de ocurrencia de A . Luego, esta probabilidad tomará valores en un intervalo comprendido entre cero y la unidad.

Si A es un hecho cierto, se presentará en cada repetición del experimento aleatorio, siendo entonces $f=n$ y $p(A)=1$. Por consiguiente la probabilidad de un suceso cierto es unitaria.

Si A en cambio, es un hecho imposible, no se presentará para valor alguno de n , siendo entonces $f=0$ y $p(A)=0$. Por consiguiente la probabilidad de un suceso imposible es nula.

$$0 = p(A) = 1$$

2.2. Sucesos simultáneos

Si se tienen 2 sucesos A y B relacionados con un cierto experimento aleatorio, puede resultar necesario conocer la probabilidad de ocurrencia de ambos simultáneamente, este hecho será expresado como $p(A \cap B)$, leyéndose como; probabilidad de A y B y siendo equivalente la intersección de 2 conjuntos.

Si la aparición de uno de los 2 sucesos, afecta o condiciona la aparición del otro, podrá hablarse de probabilidades condicionales, expresadas como $p(A/B)$, que se lee como probabilidad de A condicionada a que se haya producido B. Si los sucesos no se afectan entre sí, se dice que son independientes, resultando lo siguiente:

$$p(A/B) = p(A) \quad p(B/A) = p(B) \quad (2-1)$$

Si los sucesos A y B son la extracción de 2 naipes de un cierto palo, al tomarlos de mazos distintos serán sucesos independientes, mientras que si los extraen de un único mazo, la probabilidad del segundo suceso se verá condicionada por el resultado del primero.

En otros casos se desea evaluar la probabilidad de que al menos 1 de los sucesos simultáneos se presente. Este hecho se denota como $p(A \cup B)$ y se lee probabilidad de A o de B, tal como la operación unión de conjuntos. Como caso particular, deben considerarse los sucesos mutuamente excluyentes, donde la aparición de uno de ellos implica la imposibilidad del otro.

Si se extraen nuevamente, 2 naipes de un mazo y si A y B representan la extracción de una carta en especial (número y palo), ambos sucesos serán mutuamente excluyentes. Es decir, $p(AB) = 0$.

2.2.1. Regla de la multiplicación

La probabilidad de que 2 sucesos A y B se produzcan simultáneamente es igual a la probabilidad del suceso A multiplicada por la probabilidad de ocurrencia del suceso B bajo el supuesto de que A se haya presentado previamente. O, así mismo, es igual a la probabilidad de B por la probabilidad de A condicionada a la ocurrencia de B.

$$p(AB)=p(A)p(A/B)=p(B)p(B/A) \quad (2-2)$$

Si los sucesos A y B son independientes, la expresión anterior se simplifica de la siguiente manera:

$$p(AB)=p(A)p(B) \quad (2-3)$$

La expresión (1-2) puede extenderse a n sucesos simultáneos.

$$p(A_1A_2\dots A_n)=p(A_1)p(A_2/A_1)p(A_3/A_2A_1)\dots p(A_n/A_1A_2\dots A_{n-1}) \quad (2-4)$$

Si todos ellos son independientes, resulta:

$$p(A_1A_2\dots A_n)=p(A_1)p(A_2)\dots p(A_n) \quad (2-5)$$

2.2.2. Regla de la adición

La probabilidad de que se presente al menos uno de 2 sucesos A o B está dada por la suma de las probabilidades de aparición de cada uno de ellos, menos la probabilidad de presentación simultánea.

$$p(A+B)=p(A)+p(B)-p(AB) \quad (2-6)$$

Como caso particular, se consideran los sucesos mutuamente excluyentes, en los que el último término de la ecuación (2-6), es nulo.

$$p(A+B)=p(A)+p(B) \quad (2-7)$$

La extensión de (2-6) a n sucesos lleva a:

$$\begin{aligned} p(A_1+A_2+\dots+A_n)=p(A_1)+p(A_2)+\dots+p(A_n)-p(A_1A_2)- & (2-8) \\ p(A_1A_3)-\dots-p(A_{n-1}A_n)+p(A_1A_2A_3)+p(A_1A_2A_4)+\dots \\ +p(A_{n-2}A_{n-1}A_n)\dots(-1)^{n-1}p(A_1A_2\dots A_n) \end{aligned}$$

Para n sucesos mutuamente excluyentes, la ecuación anterior se reduce a la siguiente:

$$p(A_1+A_2+\dots+A_n)=p(A_1)+p(A_2)+\dots+p(A_n) \quad (2-9)$$

2.3. Parámetros estadísticos

Si bien el conocimiento de las funciones de frecuencia o de distribución brinda una información completa acerca del experimento aleatorio estudiado, a veces resulta conveniente o necesario describir una distribución estadística por medio de unos pocos valores representativos. Éstos reciben el nombre de características de la distribución o parámetros estadísticos, y permiten mensurar ciertas particularidades.

2.3.1. Momentos

Así como se efectuó una analogía entre masa y probabilidad, también es posible aplicar el concepto físico de momento a una función probabilística. El momento K-ésimo de la variable aleatoria x , está definida de la siguiente forma:

$$\alpha_k = \int_{-\infty}^{\infty} x^k f(x) dx \quad (2-10)$$

Y en particular, para una distribución discreta:

$$\alpha_k = \sum_i x_i^k p(x_i) \quad (2-11)$$

Las ecuaciones (2-10) y (2-11), representan momentos con respecto al origen. Si en ellas se representa la variable aleatoria x por la diferencia $x-c$, se obtendrán los momentos con respecto al punto c , siendo dichas expresiones casos particulares para $c=0$. Resulta de importancia especial, el caso en que c coincide con α_1 , es decir, con el momento de primer orden, dado que éste determina la abscisa del centro de gravedad de la distribución.

$$\alpha_1 = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx = m \quad (2-12)$$

Los momentos con respecto de m son llamados momentos centrales.

$$\mu_k = \int_{-\infty}^{\infty} (x-m)^k f(x) dx \quad (2-13)$$

O bien:

$$\mu_k = \sum_i (x_i - m)^k p(x_i) \quad (2-14)$$

2.3.1.1. Función generatriz

Para una función continua, se define como función generatriz de los momentos a la siguiente expresión:

$$\epsilon(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{tx} f(x) dx \quad (2-15)$$

Y para variable discreta:

$$\epsilon(t) = \sum e^{tx} p(x) \quad (2-16)$$

2.3.2. Posición

El parámetro posición, es un valor de abscisa que determina un punto central de la función alrededor del cual se distribuyen todos sus demás valores. Como por ejemplo se definirán los parámetros de posición más frecuentes usados: el valor medio, el modo y la mediana. En los puntos siguientes, las definiciones se referirán al caso general de variables continuas; sin embargo, los conceptos son también aplicables a variables discretas, para las cuales las integrales se convierten en sumatorias.

2.3.2.1. Valor medio

Está definido como la abscisa del centro de gravedad de la función de frecuencia y coincide con el momento de primer orden con respecto al origen. Representa el baricentro de la función.

$$m = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x) dx = \alpha_1 \quad (2-17)$$

En el caso de observaciones indirectas, en las que exista una relación lineal entre 2 variables ($y = a + bx$), el valor medio también responde a una relación lineal que surge de la aplicación directa de la (2-17).

$$m(y)=a+bm(x) \quad (2-18)$$

Para observaciones indirectas, en las que una variable es suma de otras 2 ($z = x + y$), el valor medio también es igual a la suma de los valores medios individuales.

$$m(z)=m(x)+m(y) \quad (2-19)$$

2.3.2.2. Modo

Está definido como el valor más probable de la variable aleatoria, coincidiendo por lo tanto, con el máximo de la función de frecuencia. Para su cálculo debe resolverse la siguiente ecuación:

$$\text{Si } \frac{df(x)}{dx}=0 \quad \rightarrow \quad x=\text{Modo} \quad (2-20)$$

2.3.2.3. Mediana

Es la abscisa que divide la masa total en 2 porciones exactamente iguales. Puede determinarse fácilmente a partir de la función de distribución:

$$\text{MEDIANA}=f(0.5) \quad (2-21)$$

2.3.3. Dispersión

El parámetro dispersión indica, la medida en que la variable aleatoria se distribuye alrededor del valor de posición. Da una idea del grado de repetitividad de los resultados de un experimento aleatorio. Las principales medidas de dispersión son, la desviación estándar y el recorrido intercuartil.

2.3.3.1. Desviación estándar

Cuando se utiliza el valor medio como medida de posición, es lógico trabajar con la desviación estándar como parámetro de dispersión. Su valor coincide con la raíz cuadrada del momento central de segundo orden.

$$s = \sqrt{\mu_2} \quad (2-22)$$

Se recuerda la expresión que define al momento central de segundo orden:

$$\mu_2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x-m)^2 f(x) dx \quad (2-23)$$

El cuadrado de la desviación estándar, se denomina varianza de la distribución. En el caso de observaciones indirectas en las que exista una relación lineal entre 2 variables ($y = a + bx$), la varianza puede hallarse aplicando la (2-23).

$$s^2(y) = b^2 s^2(x) \quad (2-24)$$

Para observaciones indirectas, en las que una variable es suma de otras 2 ($z = x + y$), la varianza también es igual a la suma de las varianzas individuales.

$$s^2(z) = s^2(x) + s^2(y) \quad (2-25)$$

Nótese que las propiedades no se aplican a la desviación estándar si no a la varianza.

2.3.3.2. Recorrido intercuartil

Así como la mediana representa la abscisa que divide la masa total en 2 porciones iguales, los cuartiles (primero, segundo y tercero) la dividen en cuartos. El segundo cuartil coincide con la mediana.

$$\varepsilon_1 = f(0,25) \quad \varepsilon_2 = f(0,5) \quad \varepsilon_3 = f(0,75)$$

Cuando se trabaja con la mediana como parámetro de posición, suele recurrirse como medida de dispersión al recorrido intercuartil. Este está definido como la diferencia entre los cuartiles tercero y primero.

$$\varepsilon_{3-1} = f(0,75) - f(0,25) \quad (2-26)$$

2.3.3.3. Coeficiente de variación

Es también una medida de dispersión, aunque a diferencia de los anteriores, está expresado en forma adimensional y no en unidades de variable aleatoria.

El coeficiente de variación está definido como el cociente entre la desviación estándar y el valor medio, suele relacionárselo con el error cometido al realizar una serie de mediciones.

$$C_v = \frac{s}{m} \quad (2-27)$$

2.3.4. Asimetría

Permite evaluar la medida en que una función de frecuencia se aparta de la simetría perfecta, caso para el cual este parámetro es nulo. Un alto valor positivo de asimetría, significa una larga cola para valores crecientes de la variable aleatoria, mientras que un valor negativo indica lo opuesto, es decir, cola a la izquierda.

2.3.4.1. Coeficiente de asimetría relativa

Este parámetro se basa en el hecho de que todos los momentos centrales de orden impar, son nulos para distribuciones simétricas. Aprovechando esa característica, toma el momento central de tercer orden dividido por el cubo de la desviación estándar, para dar origen a un coeficiente adimensional.

$$Y_1 = \frac{\mu_3}{s^3} \quad (2-28)$$

2.3.4.2. Coeficiente de Pearson

En este caso, se establece la diferencia entre valor medio y el modo de la distribución y se la divide por la desviación estándar para dar lugar también a un parámetro adimensional.

$$\gamma_p = \frac{\mu - \text{MODO}}{s} \quad (2-29)$$

2.3.5. Aplanamiento

Este refleja el grado en que una función de frecuencia resulta achatada en sus valores centrales. Se basa en el momento central de cuarto orden al que se le divide por la cuarta potencia de la desviación estándar a efectos de hacerlo adimensional.

Como se verá más adelante, la función de frecuencia normal o de Gauss normalizada tiene valor medio, mediana, modo y coeficiente de asimetría nulos y desviación estándar unitaria. Si se aplica la definición anterior a esta función, resulta un coeficiente de aplanamiento o kurtosis igual a 3. Con el objeto de llevarlo a cero, se le restan 3 unidades al mencionado valor, para así obtener el coeficiente de exceso.

$$\gamma_2 = \frac{\mu_4}{s^2} - 3 \quad (2-30)$$

Una función con $\gamma_2 < 0$, es llamada platocúrtica, mientras que una con $\gamma_2 > 0$ es denominada leptocúrtica.

2.3.6. Estimadores

Los parámetros ya estudiados que caracterizan una cierta población son fijos, es decir, que no son variables aleatorias, pero son desconocidos. Pueden ser evaluados a partir de una muestra tomada de la población a través del cálculo de ciertos valores característicos, los cuales brindarán sólo una estimación de los verdaderos parámetros. De esta forma puede afirmarse que

el parámetro α^* , calculado a partir de los resultados de un experimento aleatorio, constituye una estimación del parámetro α de la población, fijo y desconocido.

Los estimadores son variables aleatorias que toman valores distintos para diferentes muestras. Sin embargo, si son elegidos en forma apropiada, representan adecuadamente a los verdaderos parámetros.

2.4. Distribuciones teóricas

Existe un gran número de distribuciones probabilísticas representativas de experimentos aleatorios, que pueden ser descritas razonablemente con ayuda de expresiones matemáticas correspondientes a distribuciones teóricas. Esto tiene la gran ventaja de permitir la aplicación de ciertas propiedades de estas distribuciones a los resultados experimentales. A continuación se describirán las más importantes distribuciones teóricas.

2.4.1. Prueba de Bernoulli

Las más importantes funciones teóricas se originan a partir de un sencillo experimento conocido como prueba de Bernoulli. Una serie de experiencias reciben esta denominación, si en cada ensayo, es posible obtener sólo 2 resultados (favorable y desfavorable) y si las probabilidades respectivas se mantienen constantes a lo largo de toda la serie. Es común llamar p a la probabilidad de éxito y q a la probabilidad de fracaso, resultando:

$$p+q=1 \qquad (2-31)$$

2.4.2. Distribución binomial

Es necesario conocer la probabilidad de obtener x éxitos en n pruebas de Bernoulli, sin importar el orden de los mismos. Puede tomarse como base, el caso particular en el cual los x éxitos se obtienen en las primeras x experiencias y los $n-x$ fracasos aparecen posteriormente en forma también consecutiva. Dado que las pruebas son independientes, es factible aplicar la regla de la multiplicación simplificada (2-3) para el cálculo de la probabilidad.

$$P=p^xq^{n-x}$$

Dado que hay otras posibles series de resultados, deben considerarse todas las posibilidades para el cálculo correcto de la probabilidad buscada. Esta resultará igual a la suma de todos los casos individuales debido a que las secuencias son mutuamente excluyentes. En consecuencia, la función de frecuencia de la distribución binomial, estará dada por la expresión anterior, multiplicada por las combinaciones de n elementos tomados de x .

$$f(x)=\binom{n}{x}p^xq^{n-x} \quad (2-32)$$

Los principales parámetros estadísticos de la distribución binomial son:

$$m=n \cdot p \quad (2-33)$$

$$s=\sqrt{n \cdot p \cdot q} \quad (2-34)$$

$$Y_1=\frac{q-p}{\sqrt{n \cdot p \cdot q}} \quad (2-35)$$

$$Y_2=\frac{1-6 \cdot p \cdot q}{n \cdot p \cdot q} \quad (2-36)$$

2.4.3. Distribución de Poisson

Existen numerosas aplicaciones prácticas de la distribución binomial, en las cuales la probabilidad de hecho favorable es baja, mientras que el número de repeticiones es muy elevado, siendo el producto de ambas magnitudes constante, es decir:

$$\left\{ \begin{array}{l} p \rightarrow 0 \\ n \rightarrow \infty \\ n \cdot p \rightarrow \gamma \end{array} \right. \quad (2-37)$$

En situaciones como la descrita, la distribución binomial puede aproximarse por otra función, también de tipo discreto, llamada distribución de Poisson, cuya función de frecuencia se caracteriza por la expresión matemática siguiente:

$$f(x) = \frac{\gamma^x}{x!} e^{-\gamma} \quad (2-38)$$

Las condiciones (2-37), se cumplen principalmente en ciertos procesos distribuidos en el tiempo, tales como llamadas telefónicas, desintegración radioactiva, arribo de vehículos en un puente y accidentes.

Los parámetros principales de la distribución de Poisson son:

$$m = \gamma \quad (2-39)$$

$$s^2 = \gamma \quad (2-40)$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \quad (2-41)$$

2.4.4. Distribución normal

Otra aproximación de la distribución binomial, en la que se considera una serie grande de repeticiones del experimento aleatorio sin imponer restricciones especiales, respecto al valor de probabilidad, es la función normal o de Gauss, la que, a diferencia de las anteriores, es del tipo continuo.

Antes de definir la función de frecuencia normal, es conveniente introducir el concepto de variable normalizada. Esta normalización consiste en aplicar a la variable aleatoria original la siguiente transformación lineal:

$$z = \frac{x-m}{s} \quad (2-42)$$

Las definiciones de valor medio y desviación estándar aplicadas a la ecuación (2-42), dan por resultados los valores siguientes:

$$m(z)=0 \quad s(z)=1 \quad (2-43)$$

Es decir, que una variable normalizada tiene valor medio nulo y desviación estándar unitaria, en tanto que esos mismo parámetros para la variable original son m y s , respectivamente.

La función de frecuencia normal o de Gauss, está caracterizada por la siguiente expresión:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2} \quad (2-44)$$

Su representación gráfica, es una campana simétrica con respecto al origen y puntos de inflexión en ± 1 . El valor medio, el modo y la mediana, coinciden siendo todos ellos nulos.

Sus parámetros estadísticos, referidos a la variable normalizada z son:

$$m=0 \quad (2-45)$$

$$s=1 \quad (2-46)$$

$$\gamma_1 = 0 \quad (2-47)$$

$$\gamma_2 = 0 \quad (2-48)$$

El área encerrada por la curva de frecuencia normal en un intervalo simétrico con respecto al origen, crece rápidamente hacia la unidad al incrementar dicho intervalo.

2.5. Distribuciones extremas

El enunciado del teorema central del límite, dice que la función de distribución conjunta de n variables aleatorias, responde a una función normal cuando n tiende al infinito. Esta función es independiente de la función de distribución original de dichas variables.

Si, a partir de una población cualquiera, se toman n muestras de m elementos cada una, los valores medios individuales formarán parte, a su vez, de una nueva muestra aleatoria distribuida alrededor de la gran media, tal que:

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

Es decir, que la gran media es una nueva variable aleatoria generada a partir de la suma de otras n variables aleatorias, siendo, por lo tanto, aplicable el teorema central del límite a esa distribución conjunta. O sea que los valores medios de n muestras, de m elementos cada una, se distribuyen normalmente alrededor de la gran media.

Sin embargo, si en lugar de considerar los valores medios se tienen en cuenta los máximos y mínimos de cada muestra, la distribución conjunta no será normal, si no que responderá a otra función distinta. La teoría de distribuciones extremas se ocupa de este tipo de problemas.

La probabilidad de que la variable aleatoria tome un valor inferior o igual a X es por definición la función de distribución:

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

Si se consideran n observaciones independientes, la probabilidad $\Phi(x)$ de que el máximo valor obtenido, o lo que es igual, que todos los n valores resulten inferiores o iguales a X , puede hallarse recurriendo a la regla de la multiplicación para sucesos independientes:

$$\Phi(x) = P(x_1 \leq X) P(x_2 \leq X) \dots P(x_n \leq X)$$

O sea:

$$\Phi(x) = F^n(x) \tag{2-49}$$

La función de frecuencia de los máximos de n observaciones independientes está definida por la derivada de esta expresión.

$$\varphi(x) = nF^{n-1}(x)f(x)$$

Un razonamiento análogo permite determinar la probabilidad de que el menor valor de x sea menor que X , cuando se hacen n observaciones.

$$\Phi_1(x) = 1 - [1 - F(x)]^n$$

Su función de frecuencia es:

$$\varphi_1(x) = n[1 - F(x)]^{n-1}f(x)$$

Si la función de frecuencia inicial es simétrica, se tendrá la siguiente relación entre las funciones de frecuencia extremas para máximos y mínimos:

$$\varphi_1(-x) = \varphi(x)$$

De las expresiones planteadas anteriormente, surgen 2 conclusiones inmediatas:

- Conociendo la distribución inicial de $F(x)$ es posible obtener la distribución correspondiente a valores extremos, $\Phi(x)$.
- La función $\Phi(x)$ depende del número de observaciones, n .

Ahora bien, dado que por lo general, la expresión matemática de $F(x)$ no se conoce con exactitud, Fréchet, en 1997, Fisher y Tippett, en 1928, estudiaron

un conjunto de funciones asintóticas conocidas como distribuciones de valores extremos, las que partiendo de ciertas funciones iniciales, brindan un ajuste adecuado para grandes funciones de n , como se verá más adelante.

Si se extraen de una población, n muestras de m elementos cada una y luego se toman los n más grandes valores, el mayor de todos éstos será también el más grande del conjunto nm elementos considerados. Entonces, de acuerdo con Fisher y Tippett, la distribución estadística de los valores extremos en una muestra de tamaño nm , debería ser la misma que la correspondiente al mayor valor en una muestra de tamaño n , excepto una transformación lineal en la variable aleatoria x .

$$F^m(x) = F(a_mx + b_m)$$

Para esta ecuación, se han propuesto 3 soluciones distintas que contemplan otras tantas familias de distribuciones.

Las funciones de distribución que convergen hacia la unidad, al menos tan rápidamente como una exponencial pertenecen al tipo I o exponencial, del cual esta función es su prototipo. Esta familia de distribuciones iniciales está integrada por un conjunto de importantes funciones, tales como la normal (Gauss), la log-normal (Galton) y la chi cuadrado (Pearson). Se caracterizan por tener definidos todos sus momentos, aunque esto no significa que cualquier función que cumpla con esta condición pertenezca al tipo I.

Las distribuciones iniciales tipo II o de Chauchy, cuyo prototipo es esta misma función, no poseen momentos superiores a los de un cierto orden. Tal como en el caso anterior, no todas las funciones que carezcan de momentos superiores están incluidas en el tipo II.

Al tipo III o truncadas, pertenecen aquellas distribuciones iniciales con campo de variación de la variable limitado a un cierto valor.

Cada uno de los 3 tipos de distribuciones iniciales, conduce a diferentes distribuciones asintóticas, tal como se verá posteriormente.

2.5.1. Probabilidades y periodos de retorno

Cuando la variable aleatoria considerada, es una magnitud relacionada con algún fenómeno natural (caudales, velocidades de viento), es conveniente referirse a períodos de retorno en lugar de probabilidades de ocurrencia. Si p es la probabilidad de que una variable x supere un dado valor X , en un cierto lapso (por lo general un año), el período de retorno T representará el número de unidades de tiempo que transcurrirán en promedio entre 2 oportunidades en que la variable supere dicho valor, es decir:

$$p=P(x \geq X) = \frac{1}{T} \quad (2-50)$$

Por lo tanto, es equivalente especificar un período de retorno o recurrencia de 100 años o una probabilidad anual de 0,01.

El análisis estadístico, consiste en hallar la función que mejor represente el comportamiento de la variable aleatoria x , para luego asignar a cada valor de X una probabilidad o un período de recurrencia, si $\Phi(x)$ es la función de distribución, resulta que, a partir de $P(x \leq X) = F(x)$ y (2-50):

$$p=1-\Phi(x) \quad (2-51)$$

2.5.2. Factores de frecuencia

Para el caso especial de los fenómenos hidrológicos que responde a una distribución teórica de valores extremos (crecidas y estiajes), no existe una función que se adapte a todos los casos, sino que cada uno debe ser analizado individualmente, para aplicar la ley que mejor lo represente.

No obstante esto, Ven Te Chow demostró que una variable aleatoria hidrológica x , puede ser representada por una combinación lineal de su valor medio y su desviación estándar de la siguiente manera:

$$x = \bar{x} - k\sigma_x \quad (2-52)$$

Para ello se basó en que cada valor de x puede expresarse como la media aritmética más un desplazamiento Δ_x proporcional a la desviación estándar.

$$x = \bar{x} - \Delta_x$$

La expresión (2-52) es conocida como expresión general para el análisis hidrológico de frecuencias. Resulta evidente que ahora el problema consiste en determinar la función que mejor represente al factor de frecuencia k para cada caso. En general éste depende del período de retorno T , existiendo tablas y gráficos que dan la relación entre ambos para las distribuciones de uso más extendido.

2.5.3. Distribuciones teóricas

A continuación se describe una de las funciones de distribución más empleadas en hidrología, detallando sus características principales y parámetros estadísticos.

2.5.3.1. Función de Gumbel

Si la función de distribución inicial converge hacia una exponencial, para x tendiendo a infinito, es aplicable la ley de valores extremos tipo I (Gumbel) cuya expresión matemática es la siguiente:

$$\Phi(y) = e^{-e^{-y}} \quad (2-53)$$

Siendo y , la variable reducida de Gumbel, que es a su vez, función lineal de la variable aleatoria original x .

$$y = \alpha_0(x - u_0) \quad (2-54)$$

El campo de variación de x se extiende entre negativo infinito y positivo infinito. Las constantes α_0 y u_0 , se determinan a partir de los datos para lograr su ajuste adecuado. El valor medio y la desviación estándar de la variable reducida, son fijos e independientes de la muestra.

$$\bar{y} = \gamma \quad (2-55)$$

$$\sigma_y = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \quad (2-56)$$

Siendo γ la constante de Euler ($\gamma=0,577\dots$). Teniendo en cuenta la relación lineal que existe entre las variables x & y pueden calcularse fácilmente el valor medio y la desviación estándar para la variable aleatoria original. De este hecho se puede hallar una relación $k-T$, si se tiene en cuenta, además la vinculación existente entre la función de distribución y el período de retorno dada por las expresiones (2-50) y (2-51), se llega a la siguiente conclusión:

$$k = -\frac{\pi}{\sqrt{6}} \left[\gamma + \ln \left(\ln \frac{T}{T-1} \right) \right] \quad (2-57)$$

Otro aspecto interesante a considerar, es la tendencia asintótica de la función de Gumbel, cuando el período de retorno tiende al infinito. Este punto reviste particular importancia debido a que el objetivo principal del análisis estadístico, es precisamente predecir el comportamiento de la variable bajo estudio (caudal, velocidad del viento, nivel de precipitaciones u otras) para grandes períodos de retorno. A partir de las expresiones (2-50), (2-51) y (2-53), se llega fácilmente a la siguiente igualdad:

$$y = \ln \left(\frac{1}{\ln \frac{T}{T-1}} \right) \quad (2-58)$$

Por otra parte, desarrollando en serie la función $e^{-\frac{1}{T}}$ resulta que, para T tendiendo a infinito, se llega a la siguiente aproximación:

$$e^{-\frac{1}{T}} = 1 - \frac{1}{T}$$

O lo que es igual a:

$$\frac{1}{T} = \ln \frac{T}{T-1} \quad (2-59)$$

Entonces, reemplazando (2-59) en (2-58), se obtiene la siguiente expresión válida para grandes periodos de recurrencia:

$$y = \ln(T)$$

Finalmente, la expresión completa toma la forma siguiente:

$$u = u_0 + \frac{1}{\alpha_0} \ln(T) \quad (2-60)$$

Es decir, que el valor predicho por Gumbel para la variable de interés, crece aproximadamente con el logaritmo del período de retorno. Para $T=10$ el error cometido es del orden del 2 por ciento, en tanto que para $T=100$ alcanza apenas el 0,1 por ciento.

2.5.4. Posiciones graficas

El análisis estadístico en hidrología, tiene por objeto asignar a cada cota hidrométrica o caudal una probabilidad de ser alcanzado o superado o, lo que es lo mismo, atribuirle un período de retorno. Dichas probabilidades surgen del ajuste de los registros históricos, base de todo análisis por medio de una función de distribución conocida. Por ello resulta necesario ubicar cada dato histórico en un gráfico probabilidad-caudal antes de iniciar el ajuste correspondiente.

Fueron propuestos varios métodos, entre ellos: California, Hazen, Weibull, Beard, que otorgan un valor de probabilidad empírica a cada uno de los datos. En todos los casos, la muestra (conjunto de datos históricos) debe ordenarse en forma decreciente, sin importar la fecha de ocurrencia de cada suceso, asignando a cada uno de los n elementos un número de orden i , tal que $1 < i < n$.

2.5.5. Ajuste de curvas

Una vez en posesión del conjunto de datos históricos y habiendo asignado cada uno de ellos una posición gráfica, debe seleccionarse la función de distribución más apropiada y luego determinar los valores de los coeficientes de ajuste de la misma. Obviamente, cuanto mayor sea la coincidencia entre la función teórica y los datos experimentales, será factible efectuar extrapolaciones más confiables.

Si no se tiene una idea a priori de la función a emplear, lo mejor puede ser graficar una línea de ajuste a ojo; seleccionando aquella que parezca brindar los mejores resultados. Esta tarea resulta sencilla, dado que es posible obtener papeles con escalas abscisas y ordenadas adaptadas a distintas funciones de distribución en los cuales ésta aparezca como una recta.

De todas maneras, aunque se conozca de antemano la función teórica que va a ser utilizada, es una buena práctica graficar los datos y trazar en forma manual la recta de ajuste antes de iniciar cálculos numéricos. Si bien ésta adolecerá de los lógicos errores de este método, permitirá tener una idea bastante aproximada del resultado final.

Para hallar los coeficientes de ajuste de la función de distribución elegida, puede emplearse cualquiera de los métodos provistos por la estadística clásica: máxima verosimilitud, momentos o regresión mínimo cuadrática.

2.5.5.1. Regresión mínimo cuadrática

El objetivo de este método, es determinar la recta que mejor ajusta una nube de puntos (x_1, y_1) . Para ello se considera que cada valor de ordenada

puede representarse como la suma del valor esperado (dado por la recta de regresión) más un término de error, que mide la diferencia entre la ordenada experimental y la teórica.

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i \quad (2-64)$$

Esta premisa implica que todo el error recae en la variable dependiente y considera nulo el error en las abscisas.

La regresión mínima cuadrática, se basa en determinar los estimadores que minimicen la sumatoria de los cuadrados de los términos de error.

$$\sum \varepsilon_i^2 = \sum (y_i - \alpha - \beta x_i)^2 \rightarrow \text{MINIMA}$$

La solución consiste en igualar a cero las derivadas parciales con respecto de α y de β y de hallar las raíces, se llega a las soluciones siguientes:

$$\hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta} \bar{x} \quad (2-65)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x^2} \quad (2-66)$$

Siendo:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i \quad (\text{Valor medio de } y)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i \quad (\text{Valor medio de } x)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n} \sum x^2 - \bar{x}^2 \quad (\text{Varianza de } x)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{n} \sum x_i y_i - \bar{x} \bar{y} \quad (\text{Covarianza } x-y)$$

Estos resultados conducen a la obtención de la recta de regresión de y sobre x.

$$y = \hat{\alpha} + \hat{\beta} x$$

2.6. Distribución de Gumbel

A continuación se expondrán algunas características particulares de la función tipo I o de Gumbel dada, su importancia en el campo de la hidrología estadística. Según lo visto anteriormente, esta ley es la más adecuada para ajustar los valores extremos de aquellas distribuciones iniciales caracterizadas por colas factibles de ser aproximadas por exponenciales. Ejemplos de ellas son la función normal, log-normal, chi-cuadrado.

Esto significa que si los datos provenientes por ejemplo, de una estación de aforo tienen una distribución anual tal que responden a una función de frecuencia normal, los n valores extremos (mínimos y máximos) correspondientes a n años de registro hidrométrico, se ajustarán adecuadamente por una función de Gumbel. Su expresión matemática es la siguiente:

$$\Phi(y) = e^{-e^{-y}} \quad (2-67)$$

$$y = \alpha_0(x - x_0)$$

Siendo $\Phi(y)$ la función de distribución de la variable reducida y , la cual esta relacionada linealmente con la variable aleatoria original x por medio de los parámetros de ajuste x y u_0 .

Derivando la ecuación (3-1), puede hallarse la función de frecuencia de Gumbel.

$$\varphi(y) = \Phi'(y) = e^{-(y+e^y)} \quad (2-68)$$

2.6.1. Parámetros estadísticos

Derivando la expresión (2-68) e igualando a cero, puede hallarse el máximo de la función de frecuencia, que no es otra cosa que el modo de la distribución de Gumbel.

$$y(\max) = 0 \quad y(\min) = u_0 \quad (2-60)$$

La mediana puede obtenerse igualando la expresión (2-67) a 0,5 y despejando la variable reducida.

$$y(0,5) = -\ln(\ln 2) \quad x(0,5) = u_0 + \frac{\ln(\ln 2)}{\alpha_0} \quad (2-61)$$

La función generatriz de los momentos es:

$$\Psi(t) = \Gamma(1-t)$$

El valor medio de las variables reducida y y original es, según se mencionó anteriormente:

$$\bar{y}=\gamma \quad \bar{x}=\alpha_0(u_0+\gamma) \quad (2-62)$$

Se recuerda que $\gamma=0,577215\dots$ es la constante de Euler, definida anteriormente. Por otra parte, para la desviación estándar se tiene:

$$\sigma_y = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \quad \sigma_x = \frac{1}{\alpha_0} \frac{\pi}{\sqrt{6}} \quad (2-63)$$

A manera de resumen, se comparan en la tabla VI los valores numéricos de los principales parámetros estadísticos para los casos de Gauss y de Gumbel.

Tabla IV. **Valores numéricos para algunos parámetros estadísticos para las distribuciones de Gauss y de Gumbel**

Parámetro	Gauss	Gumbel
Variable reducida	$z = (x-\bar{x})/\sigma$	$y = \alpha_0(x-u_0)$
Valore medio	0	0,57721
Modo	0	0
Mediana	0	0,36651
Desviación estándar	1	1,28255
Asimetría	0	1,29858
Kurtosis	3	5,40000

Fuente: ARAGUREN Juan F. Análisis estadístico de valores extremos. p. 40

Finalmente, resulta de utilidad conocer el valor del período de retorno para el valor medio de la variable reducida. El mismo puede calcularse con las expresiones antes indicadas y bajo el supuesto que se está trabajando con series anuales:

$$\bar{T}=2,33 \text{ años}$$

2.6.2. Determinación de la recta de ajuste

Una vez en posesión del registro hidrométrico de máximos y/o mínimos anuales, debe procederse a la determinación de los parámetros de la recta de ajuste que permitan obtener la mejor aproximación de los datos originales. Para ello puede seguirse la secuencia de cálculo que se expondrá a continuación.

2.6.2.1. Método de Gumbel

Una familia importante de distribuciones usadas en el análisis de frecuencia hidrológico es la distribución general de valores extremos. Gumbel, en sus trabajos, propone desarrollar la secuencia siguiente:

- Ordenar los datos
- Asignar probabilidades
- Determinar los valores de la variable reducida
- Graficar los datos
- Hallar los coeficientes de la recta de ajuste mínimo cuadrática ortogonal.

Tabla V. Estación hidrométrica Sanarate (máximos)

1	2	3	4	5	6
i	X_i (metros)	$i/(n+1)$	Y_i	año	$\ln(x_i)$
1	3,45	0,020	3,922	1983	1,238
2	3,18	0,039	3,219	1959	1,157
3	3,02	0,059	2,803	1940	1,105
4	2,70	0,078	2,505	1966	0,993
5	2,63	0,098	2,271	1963	0,967
6	2,57	0,118	2,078	1958	0,944
7	2,48	0,137	1,913	1973	0,908

Continuación de la tabla V.

8	2,41	0,157	1,965	1972	0,880
9	2,22	0,176	1,639	1975	0,798
10	2,20	0,196	1,522	1962	0,788
11	2,18	0,216	1,415	1982	0,779
12	2,17	0,235	1,316	1951	0,775
13	2,14	0,255	1,223	1980	0,761
14	2,14	0,275	1,137	1977	0,761
15	2,14	0,294	1,055	1981	0,761
16	2,11	0,314	0,977	1974	0,747
17	2,11	0,333	0,903	1978	0,747
18	2,11	0,353	0,832	1979	0,747
19	2,11	0,373	0,763	1980	0,747
20	2,07	0,392	0,697	1938	0,728
21	2,07	0,412	0,634	1939	0,728
22	2,07	0,431	0,572	1957	0,728
23	2,07	0,451	0,511	1971	0,728
24	2,05	0,471	0,453	1946	0,718
25	2,05	0,490	0,395	1981	0,718
26	2,05	0,510	0,338	1965	0,718
27	2,02	0,529	0,283	1950	0,703
28	2,02	0,549	0,228	1954	0,703
29	2,00	0,589	0,173	1941	0,693
30	2,00	0,588	0,120	1942	0,693
31	2,00	0,608	0,066	1947	0,693
32	2,00	0,627	0,013	1948	0,693
33	2,00	0,647	-0,041	1967	0,693
34	2,00	0,667	-0,094	1976	0,693
35	1,99	0,686	-0,0148	1944	0,688
36	1,98	0,706	-0,202	1968	0,683
37	1,95	0,725	-0,257	1935	0,668
38	1,95	0,745	-0,313	1936	0,668

Continuación de la tabla V.

39	1,95	0,765	-0,389	1970	0,668
40	1,93	0,784	-0,428	1952	0,658
41	1,93	0,804	-0,488	1969	0,658
42	1,90	0,824	-0,551	1955	0,642
43	1,85	0,843	-0,616	1956	0,615
44	1,84	0,863	-0,686	1945	0,610
45	1,82	0,882	-0,761	1953	0,599
46	1,78	0,902	-0,843	1943	0,577
47	1,71	0,922	-0,934	1949	0,536
48	1,58	0,941	-1,041	1937	0,457
49	1,55	0,961	-1,175	1934	0,438
50	1,54	0,980	-1,369	1964	0,432

Fuente: ARAGUREN Juan F. Análisis estadístico de valores extremos. p. 42.

2.6.2.1.1. Ordenamiento de datos

El primer paso consiste en ordenar los datos, es decir los valores de la variable aleatoria x , en orden creciente o decreciente, según se trate de estiajes o avenidas, respectivamente. Complementar este requerimiento implica, por lo general, alterar el orden cronológico del registro, inmediatamente debe asignarse a cada dato un número de orden i , teniendo en cuenta que el número uno corresponde al suceso menos probable (creciente o baja extrema).

Tomando el caso de las avenidas, la secuencia resulta ser la siguiente:

$$x_1 > x_2 > x_3 > x_4 > \dots > x_n$$

Como ejemplo puede observarse la tabla VII, en la que se encuentran ordenados los datos de la estación hidrométrica Zárate, provincia de Buenos Aires, República Argentina, correspondientes a crecientes. La columna 2 reúne los datos ordenados, mientras que la 1, indica los números de orden y la 5 el año de ocurrencia.

2.6.2.1.2. Asignación de probabilidades

El paso siguiente consiste en asignar a cada dato un valor de probabilidad por medio de alguna de las expresiones presentadas anteriormente. En este caso se recurrió a la fórmula de Weibull, que se reproduce a continuación:

$$p_i = \frac{i}{n+1} = \frac{1}{T_i} \quad (2-64)$$

La aplicación de la expresión (2-64) implica la asignación de un período de retorno $n+1$ años a la mayor creciente y aproximadamente de 1 año a la menor. En la columna 4 de la tabla VII, se encuentran tabulados los valores de y_i , correspondientes a las cotas hidrométricas listadas en la columna 2.

Es de destacar, dado el criterio seguido para la asignación de probabilidades, la importancia de contar con un registro completo, es decir, que incluya los valores extremos para todos los años. En los casos en los que no se disponga de algún valor para la estación bajo análisis, se puede tratar de establecer alguna correlación con los datos de estaciones vecinas, o bien, como última posibilidad, utilizar la media aritmética de los valores disponible para reemplazar los faltantes.

2.6.2.1.3. Valores de variable reducida

Para calcular los valores de la variable reducida a partir de las probabilidades asignadas, debe partirse de la expresión mostrada a continuación, que se dedujo en anteriormente:

$$p_i = 1 - \Phi(x_i) = 1 - e^{-e^{-y_i}}$$

Despejando, se obtiene la expresión siguiente, a partir de la cual se completó la columna 4 de la tabla VII:

$$y_i = -\ln\left(\ln \frac{1}{1-p_i}\right) \quad (2-65)$$

Siguiendo el procedimiento explicado, se han generado n pares de valores x_i , y_i relacionados linealmente, con lo cual el problema original se ha reducido a la determinación de los coeficientes que mejor ajustan la siguiente expresión:

$$x_i = u_0 + \frac{1}{\alpha_0} y_i \quad (2-66)$$

Como alternativa, puede ser conveniente el graficado de los puntos, para luego ensayar una recta de ajuste a ojo, que dará una primera idea acerca de la bondad de la función elegida. Si la mayoría de los puntos se apartan de esta recta, resultará evidente que deberá recurrirse a otra función distinta de la ensayada, en este caso Gumbel. En particular, si para valores elevados de la variable reducida se observa una tendencia de apariencia exponencial, podría ser adecuado el empleo de la función de Frechet, la que aparecerá como una recta cuando se grafiquen los puntos en papel semi-logaritmico.

2.6.2.1.4. Gráfico de datos

Si el conjunto de pares de valores responde a una función de Gumbel, se agruparán sobre una recta cuando sean graficados en papel lineal. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que un gráfico trazado de esta manera, sólo expondrá los valores de la variable reducida, pero no las probabilidades o los períodos de retorno, que no son los realmente importantes desde el punto de vista de la ingeniería. Para ello y con el propósito de efectuar extrapolaciones, suele trabajarse con un papel en el cual se indican 2 escalas, abscisas auxiliares siguiendo esas dos variables.

2.6.2.1.5. Coeficientes de ajuste

El paso final consiste en la elaboración de los datos de manera de hallar los valores de los coeficientes α_0 y u_0 que mejor ajusten la recta. El método propuesto por Gumbel, se basa en la obtención de la recta de regresión ortogonal mediante un ajuste por mínimos cuadrados.

3. CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA (IDF)

3.1. Medición de la precipitación

La precipitación puede definirse como el producto líquido o sólido de la condensación del vapor de agua, que cae de las nubes y se deposita en el terreno procedente del aire. Por tanto comprende la lluvia, granizo, nieve, rocío, centellada blanca, escarcha y precipitación de la neblina. El volumen total de las precipitaciones, se expresa en función del nivel que alcanzaría sobre una proyección horizontal de la superficie de la tierra. El objetivo principal de cualquier método de medición, consiste en obtener una muestra representativa de la precipitación de la zona a que se refiere la medición.

Existen algunas técnicas para medir las precipitaciones, siendo una de las más modernas, el uso del radar meteorológico, que determina la densidad de las nubes y de la lluvia, permitiendo estimar tanto el volumen de lluvia, como su desarrollo sobre una región geográfica y elaborar pronósticos a corto plazo, su uso ha sido de gran utilidad para solucionar problemas de previsión hidrológica. Sin embargo, para utilizar el radar meteorológico, es necesario calibrarlo con un sistema tradicional que consiste en medir la columna vertical de agua acumulada precipitada en un punto fijo, los instrumentos comúnmente utilizados para este tipo de mediciones son: el pluviómetro, el pluviógrafo y el pluviómetro totalizador.

3.1.1. Pluviómetro

La Organización Meteorológica Mundial (OMM), para fines de estudio y comparación, recomienda utilizar el pluviómetro estándar que tiene un área de recepción de 200 centímetros cuadrados, con borde biselado.

El pluviómetro se compone internamente por 2 partes cilíndricas, que son: un receptor y un colector, el receptor ubicado en la parte superior está unido al anillo de bronce y su fondo tiene forma de embudo, el agua recolectada por el receptor, pasa a la parte inferior que consta de una vasija de boca estrecha llamada colector, que está aislada del cilindro exterior para evitar evaporación por calentamiento.

La medición del agua recolectada en el pluviómetro, se lleva a cabo utilizando una probeta especialmente graduada en milímetros y en decimas de milímetros, la altura alcanzada del agua medida en la probeta, representa la capa de agua sobre el terreno, suponiendo que fuese horizontal y no hubiese perdidas ni movimiento del agua.

Figura 3. **Pluviómetro**



Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

3.1.2. Pluviógrafo

A diferencia del pluviómetro, que únicamente permite obtener un parámetro que es la cantidad de agua precipitada durante 24 horas, el pluviógrafo registra la cantidad de precipitación en forma continua, lo que permite obtener 3 parámetros de la lluvia que son: cantidad, duración e intensidad.

Existen varios tipos de pluviógrafos, que son: de flotador con sifón, de balanza, de oscilación y combinación de balanza y oscilación. En Guatemala normalmente se utiliza el pluviógrafo de flotador con sifón, que consta de un receptor igual al del pluviómetro, con un área de recepción de 200 centímetros cuadrados de superficie. El receptor va unido a una caja cilíndrica de 110 centímetros de diámetro, en la que se aloja el sistema registrador del aparato y una jarra colectora.

El agua recolectada por la parte receptora pasa por un embudo y un tubo al mecanismo registrador, constituido por un cilindro en cuyo interior se encuentra un flotador que se desplaza verticalmente, conectado a un brazo de palanca con una plumilla que marca la línea en la banda, que está colocada sobre un cilindro movido por un sistema de relojería, registrándose así la precipitación en función del tiempo.

Figura 4. **Pluviógrafo**



Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

3.1.3. Pluviómetros totalizadores

Este tipo de pluviómetros, es colocado en regiones de difícil acceso o montañosas, por lo que tienen capacidad de almacenar aproximadamente 150 litros durante la época lluviosa, y así el observador puede tomar la lectura una o 2 veces al año, ya que el pluviómetro permite tomar una sola medida de precipitación total en un cierto punto, durante largos periodos de tiempo.

Existen diversos modelos que permiten conservar el agua recolectada durante períodos largos de tiempo, sin embargo, el modelo más utilizado consta de un depósito de zinc con una boquilla de 200 centímetros cuadrados, con un aro de latón de borde cortante. En el fondo lleva un tapón enroscado de 10 centímetros de diámetro y un grifo.

Dicho depósito va soportado y protegido por otro de chapa galvanizada, dejando un espacio entre ambos que evita el enfriamiento o calentamiento exagerado provocado por las condiciones climáticas. El fondo del depósito interno se cierra con un tapón enroscado o con una tapa fijada con candado.

Para evitar la evaporación en el interior se colocan dos litros de aceite, líquido, de vaselina o parafina. Regularmente los pluviómetros totalizadores son colocados en lugares en donde las precipitaciones se producen en gran parte en forma de nieve, que por medios químicos debe fundirse para mantenerla en forma líquida.

Figura 5. **Pluviógrafo totalizador**



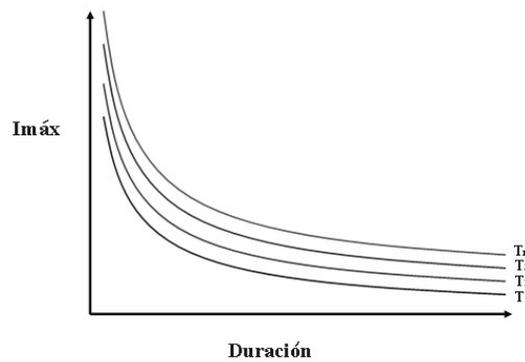
Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

3.2. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Una definición más detallada, es la entregada por Mintegui y López (1990), quienes señalan que las curvas IDF representan a las duraciones en las abscisas y la altura o intensidad de precipitación en las ordenadas, donde cada curva representada corresponde a una frecuencia (o periodo de retorno), de tal forma que las gráficas de estas curvas, representan la intensidad media en intervalos de diferente duración, correspondiendo todos los puntos de una misma curva a un idéntico periodo de retorno.

La figura 6 muestra gráficamente la relación teórica entre la intensidad, la duración y la frecuencia o período de retorno. En ella se observa que la intensidad decrece a mayor duración y a su vez, para una tormenta de cualquier duración, se tendrá mayor intensidad a mayor período de retorno.

Figura 6. **Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)**



Fuente: PROGRAMA HIDROLOGICO INTERNACIONAL (p.i.h.), Curvas intensidad-duración-frecuencia para la zona sur de Chile, p.7.

Para la construcción de estas curvas, es necesario realizar un análisis de frecuencias de lluvias intensas. En este sentido, la distribución más utilizada es la de valores extremos tipo I o de Gumbel. Asimismo esta distribución ha sido empleada con buenos resultados en el estudio de eventos meteorológicos de valores máximos diarios y anuales, obteniéndose así, ajustes precisos.

Es importante señalar que la construcción de las Curvas IDF, se realiza en base a los datos provenientes de los pluviogramas de una determinada estación. Asimismo, las intensidades que se obtienen para cada duración, derivados del análisis realizado a los pluviogramas, son características para cada zona.

Uno de los principales problemas a la hora de diseñar obras de ingeniería, es la determinación del período de retorno, el que se debe basar en criterios tanto económicos como los relacionados con la vida útil de la obra, la protección de la vida humana, el tipo de estructura y la facilidad de reparación de la obra, entre otros. El período de retorno para el diseño de sistemas de evacuación de aguas de lluvia, dependerá del grado de seguridad ante las inundaciones que requiera la ciudadanía, del comportamiento de las precipitaciones, de los caudales involucrados y de la consecuencia de que éstos excedan la capacidad de las obras, así como también del costo asociado a las mismas.

En este sentido, el período de retorno considerado será mayor, cuanto mayor sea la importancia y la repercusión social, ecológica y económica de la obra. Por ello, la necesidad de disponer de amplios períodos de retorno contrasta con la disponibilidad de series de datos climatológicos, por lo que es necesario recurrir a estimaciones estadísticas.

Otro problema para determinar las intensidades máximas de precipitación, es la falta de disponibilidad de pluviógrafos, que son los instrumentos que proporcionan datos con intervalos de tiempo adecuados a las necesidades de diseño. Debido a esta situación, lo que se utiliza normalmente son pluviómetros, que miden las alturas totales para intervalos grandes, generalmente 24 horas, asumiendo con esto, que el comportamiento de la intensidad en ese intervalo de tiempo es constante.

3.2.1. Aplicación de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia, son una de las herramientas más útiles para el diseño hidrológico de caudales máximos, cuando se utilizan

modelos lluvia-escorrentía, como los hidrogramas unitarios o el método Racional. Es así como un gran número de proyectos hidrológicos, como el diseño de evacuadores de crecidas, construcción de puentes y construcción de redes de drenaje, entre otros, se define en relación con la máxima precipitación que se podría esperar para un determinado período de retorno. A partir de estos eventos extremos, se fijan las dimensiones del proyecto y se establecen los criterios de predicción y de riesgo.

Por otra parte, las curvas IDF son de gran ayuda en la construcción de obras de control de erosión y recuperación de suelos degradados. En obras como zanjas de infiltración, canales de desviación, diques de postes, gaviones y otras destinadas al control de cárcavas y procesos erosivos en laderas, se hace necesario conocer los máximos valores de intensidades de precipitación que se pueden alcanzar, con el fin de dimensionar dichas obras.

Adicionalmente a las aplicaciones anteriores, destaca la construcción de las tablas de extensión de las curvas IDF. Éstas permiten estimar las intensidades máximas de precipitación para distintas duraciones y períodos de retorno, relacionando la intensidad de precipitación de 1, 2, 4...12 horas, con la intensidad de 24 horas, puesto que las precipitaciones diarias son las más comunes de obtener, permitiendo así extrapolar estas relaciones, a zonas donde sólo se cuenta con datos pluviométricos

Una particularidad de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, es que pueden expresarse como ecuaciones, con el fin de evitar la lectura de las intensidades de precipitación en una gráfica. De este modo, a través del tiempo, varios investigadores han generado diversos planteamientos de las relaciones matemáticas que modelan a dichas curvas. El planteamiento de las primeras relaciones matemáticas, que modelan a dichas curvas, data desde el inicio de

los años treinta del siglo pasado, y fueron realizadas por Sherman en 1931 y Bernard en 1932 (Pereyra *et al*, 2004). Para Remenieras (1971), estos modelos han conducido a numerosos investigadores del mundo a generar diversas expresiones matemáticas que simulan las curvas IDF, las que se presentan a continuación:

- Modelo propuesto por Sherman

$$I = \frac{KT^m}{(D + B)^n}$$

- Modelo propuesto por Linsley, válida para duraciones entre 5 y 20 minutos

$$I = \frac{A}{D + B}$$

- Modelo propuesto por Linsley, válida para duraciones superiores a 60 minutos:

$$I = \frac{c}{D^n}$$

- Modelo propuesto por WENZEL

$$I = \frac{A}{D^n + B}$$

- Modelo propuesto por Chen

$$I = i_1^T * \frac{A}{(D + B)^c}$$

- Modelo propuesto por Chow

$$I = \frac{KT^m}{D^n + B}$$

- Modelo estándar

$$I = \frac{A}{(D + B)^n}$$

Donde a , b , c , K , m , n y b son parámetros adimensionales, I es la intensidad media de la lluvia de una hora y período de retorno de T años, T es período de retorno, D es la duración e I la intensidad máxima de precipitación.

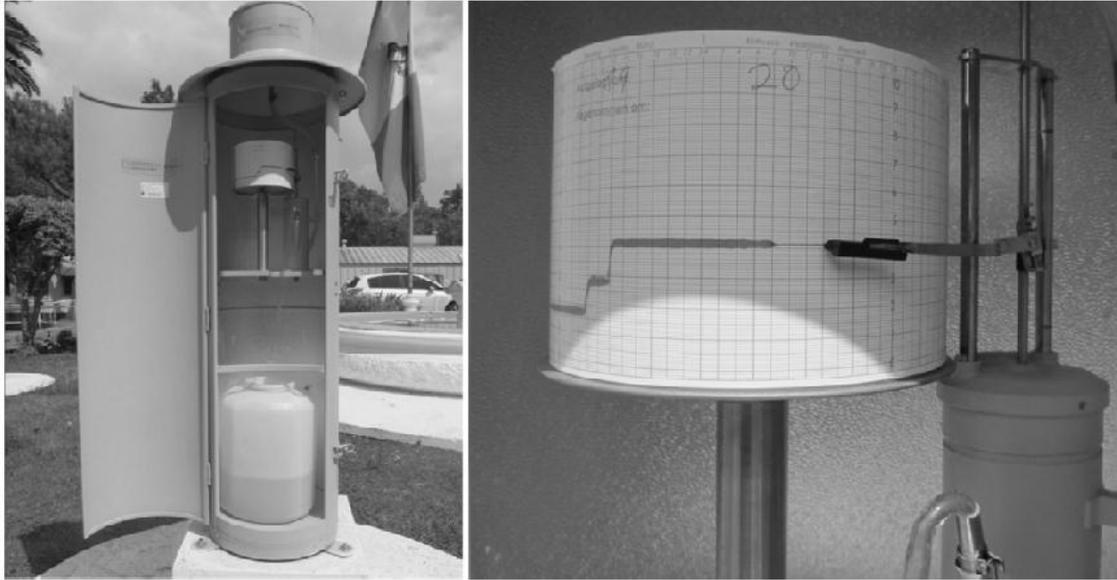
4. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA

4.1. Recopilación de la información pluviográfica

La información utilizada para la elaboración de las curvas IDF de las estaciones climáticas localizadas en la cuenca del río Salinas fue proporcionada por el Departamento de Investigación y Servicios Climatológicos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), que es una dependencia adscrita al Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda.

Las estaciones climáticas analizadas en el presente estudio, fueron un total de 5, cada una cuenta con equipo pluviografico tipo Hellman, que por medio de bandas milimetradas (vea figura 9), registran los eventos de precipitación que ocurren durante el año, de manera constante, utilizando bandas diarias. Actualmente, en dichas estaciones, se utilizan bandas milimetradas semanales, lo que dificulta realizar la lectura a cada 10 minutos durante la época lluviosa, por esta razón, no se pudo incluir el registro generado a partir del 2012.

Figura 7. **Equipo pluviográfico y banda milimetrada**



Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

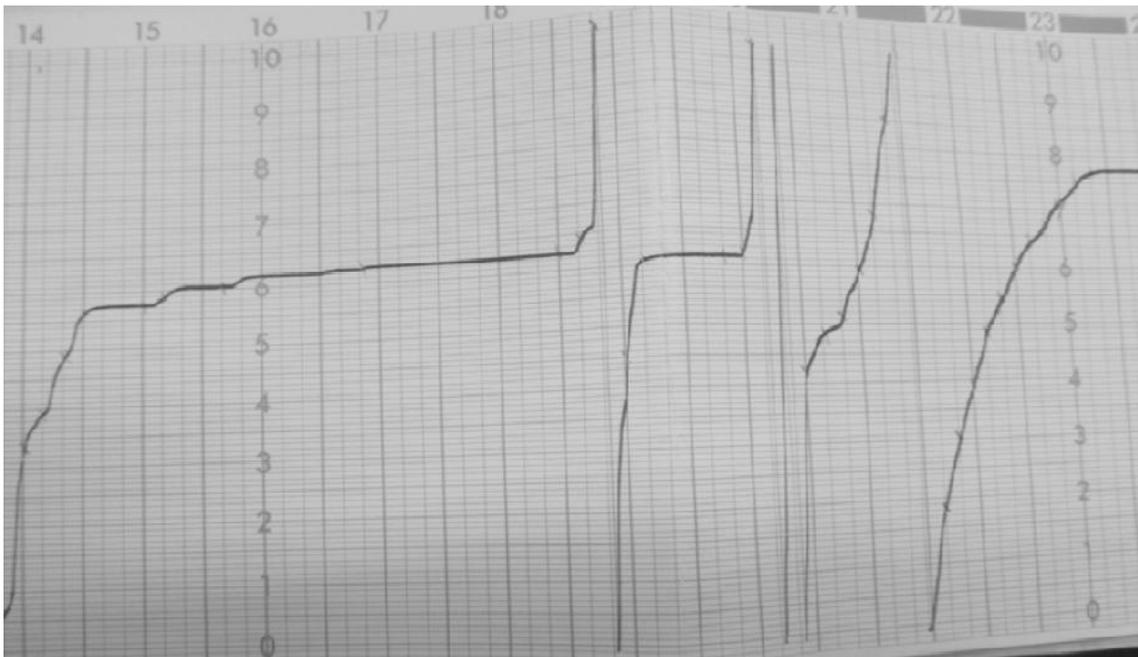
En cada estación climatológica, se utilizó el máximo posible de años de registro, para disponer del máximo de datos pluviográficos y lograr obtener una estadística confiable. Sin embargo, en alguno de los registros de las estaciones climatológicas, existen años incompletos o bandas pluviográficas con defectos ocasionados por el paso del tiempo o por el funcionamiento incorrecto del pluviógrafo.

4.1.1. Selección de intensidades máximas

El método más validado para la construcción gráfica de las curvas IDF, es el propuesto por Temez, que consiste en analizar las bandas de registros pluviográficos, seleccionando los valores extremos de precipitación, para tiempos determinados.

De tal modo, del registro pluviográfico de cada estación climática, únicamente deben ser discreteadas las bandas que representen un valor extremo y que coincidan con el historial de precipitaciones máximas del Departamento de Investigación y Servicios Climáticos, obteniendo así las cantidades máximas de precipitación con duración de 24 horas, que abarca desde las 7:00 horas de un día, hasta las 7:00 horas del día siguiente.

Figura 8. **Pluviograma**



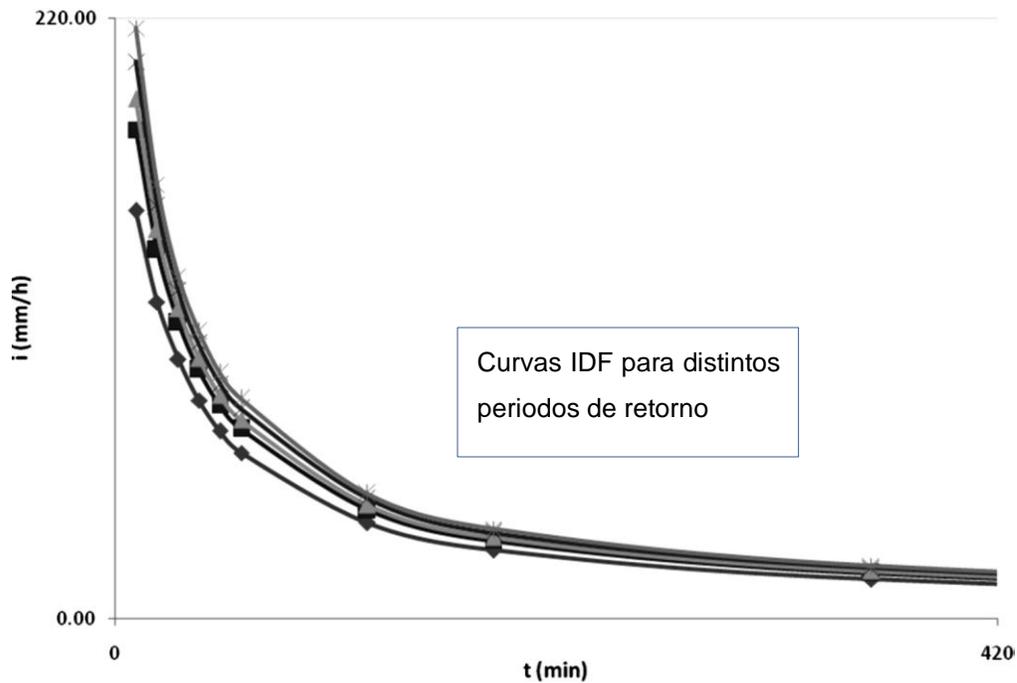
Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

Luego de discretizar los pluviogramas se procede a calcular los valores de la intensidad de la lluvia para distintas duraciones, con la siguiente ecuación:

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

Donde I , es la intensidad de la precipitación en milímetros por hora, ΔP es el diferencial de precipitación en milímetros y ΔT el diferencial de tiempo en horas.

Figura 9. **Esquema de las curvas IDF**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 9, es posible apreciar que el valor de la intensidad disminuye a medida que aumenta el tiempo, presentado una forma exponencial negativa. Esto debido a la posibilidad de encontrar intensidades mayores a medida que la duración disminuye, y viceversa, las intensidades aumentan a medida que las duraciones son menores.

4.2. Ajuste de los datos a una función de distribución de probabilidad

Tomando en cuenta que en un año en particular pueden ocurrir una serie de eventos con valores de intensidades de lluvia diferentes, deben seleccionarse los valores máximos de dicho año, de lo anterior es posible obtener un resumen multianual de intensidades de lluvia máxima para cada estación climática (ver tabla VI).

Al resumen multianual, es necesario aplicar un análisis de frecuencia y para ello se requiere del uso de una función de distribución de probabilidades y aplicar las técnicas estadísticas que se describen en los capítulos 2 y 5.

Aunque existen varias funciones de distribución de probabilidades teóricas como la distribución binomial, de Gumbel, de Poisson, normal, chi cuadrado y gamma, en este estudio se aplicaron, tanto la distribución normal como la distribución de Gumbel, por considerar que ambas funciones son aplicables a eventos meteorológicos.

Sin embargo, la función de distribución de Gumbel o tipo 1, ha sido empleada en el estudio de eventos meteorológicos de valores máximos, obteniendo ajustes muy precisos para valores máximos diarios y anuales. Además, literatura especializada en el tema, cita que la aplicación de dicha función de distribución en estudios que contemplen eventos de valores extremos, resulta ser la más adecuada para representar eventos máximos.

Tabla VI. **Resumen multianual de intensidades de lluvia máximas de la estación climática Cubulco**

Año/Duración	Intensidad (mm/h)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
1988	47,40	28,50	26,60	22,65	20,20	20,20	26,80	29,40	36,70	56,30	56,30
1989	46,00	91,90	137,50	182,80	227,70	272,10	526,10	715,40	875,20	1129,20	1129,20
1990	10,00	19,00	28,50	32,80	35,10	36,80	42,20	50,70	61,20	61,90	61,90
1991	10,00	20,00	25,00	28,50	30,00	30,90	35,00	35,80	35,80	37,90	37,90
1992	20,00	30,00	37,40	38,30	38,50	38,50	47,60	48,40	49,60	49,70	49,80
1993	10,00	20,00	27,40	29,00	30,80	32,60	42,80	44,00	64,70	79,50	80,50
2002	20,00	24,70	28,90	31,70	34,20	34,30	36,20	49,30	54,30	64,50	64,50
2003	20,00	40,00	50,00	60,00	70,00	80,00	129,80	130,30	130,30	130,30	130,30
2004	10,00	20,00	28,50	31,00	40,00	43,00	66,30	67,60	67,60	67,60	67,60
2005	10,00	20,00	30,00	40,00	44,30	46,10	48,50	50,00	50,40	56,10	56,10
2006	42,90	44,80	60,00	75,20	78,30	81,30	86,10	87,10	89,80	89,80	89,80
2007	10,00	20,00	27,00	32,00	37,80	40,00	53,80	56,30	57,10	57,10	57,10
2008	10,50	20,00	27,20	28,00	28,50	28,80	29,50	37,40	51,90	52,90	52,90
2009	9,00	18,00	24,20	28,50	34,70	35,80	37,10	37,50	37,50	37,50	37,50
2010	10,00	13,90	17,50	21,40	23,90	26,20	42,40	42,40	42,40	46,90	58,20

Fuente: elaboración propia.

5. CÁLCULO Y PRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS CURVAS INTENSIDAD DURACIÓN FRECUENCIA

Para aplicar el análisis de frecuencias, deben calcularse los parámetros estadísticos requeridos por las funciones de distribución Normal y de Gumbel, es decir, parámetros estadísticos como el valor medio, desviación estándar y las constantes α y μ , dichos parámetros son obtenidos del resumen multianual de intensidades de lluvia máxima y son definidas con las siguientes expresiones:

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

$$\mu = m - 0,45S$$

Del cálculo anterior se obtuvo los valores de probabilidad de intensidad de lluvia máxima, para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50, 75 y 100 años. Y para cada período de retorno, duraciones de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 120, 180, 360, 720 y 1 440 minutos, dando como resultado final una familia de curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia, para cada estación climatológica.

A continuación, se presentan los valores de las intensidades máximas de lluvia resultantes del cálculo de distribuciones de frecuencias normal y de Gumbel y la representación gráfica de dichos valores.

Tabla VII. **Probabilidad de intensidad de lluvia en estación Chixoy calculada con distribución normal**

Distribución Normal											
Período de retorno/Duración	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
2	79.20	59.10	47.00	41.22	36.14	32.16	20.64	15.07	8.90	4.77	2.56
5	114.16	68.73	54.49	44.68	38.91	35.42	23.92	18.30	11.25	6.07	3.20
10	132.43	73.77	58.41	46.49	40.36	37.12	25.63	20.00	12.47	6.74	3.53
15	141.55	76.28	60.37	47.40	41.09	37.97	26.48	20.84	13.08	7.08	3.69
20	147.52	77.93	61.65	47.99	41.56	38.52	27.04	21.39	13.48	7.30	3.80
25	151.92	79.14	62.59	48.42	41.91	38.93	27.45	21.80	13.78	7.47	3.88
30	155.37	80.09	63.33	48.77	42.18	39.26	27.78	22.12	14.01	7.59	3.94
50	164.51	82.61	65.29	49.67	42.91	40.11	28.63	22.97	14.62	7.93	4.11
75	171.26	84.47	66.73	50.34	43.44	40.74	29.27	23.59	15.08	8.18	4.23
100	175.83	85.73	67.71	50.79	43.80	41.16	29.69	24.02	15.38	8.35	4.31

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Probabilidad de intensidad de lluvia en estación Cubulco calculada con distribución normal**

Distribución Normal											
Período de retorno/Duración	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
2	102.16	84.46	75.89	67.93	61.92	56.44	41.73	33.02	19.06	11.21	5.64
5	162.34	133.83	125.80	119.27	113.60	108.75	94.42	81.36	48.77	30.57	15.31
10	193.79	159.63	151.88	146.10	140.61	136.09	121.96	106.63	64.30	40.70	20.37
15	209.49	172.51	164.90	159.49	154.10	149.73	135.70	119.24	72.04	45.75	22.89
20	219.77	180.94	173.43	168.26	162.92	158.67	144.70	127.50	77.12	49.06	24.55
25	227.33	187.15	179.70	174.72	169.42	165.24	151.33	133.58	80.86	51.49	25.76
30	233.28	192.03	184.64	179.80	174.53	170.42	156.54	138.36	83.79	53.41	26.72
50	249.00	204.92	197.67	193.21	188.03	184.08	170.30	150.99	91.55	58.47	29.25
75	260.63	214.46	207.31	203.12	198.02	194.19	180.48	160.33	97.29	62.21	31.12
100	268.49	220.91	213.84	209.83	204.77	201.02	187.37	166.64	101.18	64.74	32.38

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Probabilidad de intensidad de lluvia en estación Sacapulas calculada con distribución normal**

Distribución Normal											
Período de retorno/Duración	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
2	76.85	61.02	52.00	44.20	39.58	35.42	21.67	15.37	8.58	4.44	2.22
5	101.90	78.94	67.76	56.66	50.13	45.20	27.41	19.12	10.11	5.28	2.64
10	114.99	88.31	75.99	63.18	55.65	50.31	30.41	21.09	10.91	5.71	2.86
15	121.53	92.98	80.10	66.43	58.40	52.86	31.91	22.07	11.31	5.93	2.97
20	125.81	96.04	82.79	68.56	60.21	54.54	32.89	22.71	11.57	6.07	3.04
25	128.96	98.30	84.77	70.12	61.53	55.77	33.61	23.18	11.76	6.18	3.09
30	131.44	100.07	86.33	71.35	62.58	56.73	34.18	23.55	11.91	6.26	3.13
50	137.98	104.75	90.45	74.61	65.33	59.29	35.68	24.53	12.31	6.48	3.24
75	142.82	108.21	93.49	77.02	67.37	61.18	36.79	25.26	12.61	6.64	3.32
100	146.09	110.55	95.55	78.64	68.75	62.46	37.54	25.75	12.81	6.75	3.37

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Probabilidad de intensidad de lluvia en estación San Agustín Chixoy calculada con distribución normal**

Distribución Normal											
Período de retorno/Duración	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
2	117.60	100.86	85.08	66.81	55.44	46.54	30.26	22.73	13.05	6.85	3.42
5	125.26	118.18	98.74	76.71	63.08	52.92	35.20	26.93	14.92	7.81	3.90
10	129.26	127.24	105.88	81.88	67.07	56.25	37.78	29.12	15.90	8.31	4.15
15	131.26	131.76	109.44	84.46	69.07	57.92	39.07	30.21	16.39	8.56	4.28
20	132.57	134.72	111.77	86.15	70.37	59.01	39.91	30.93	16.71	8.72	4.36
25	133.53	136.89	113.49	87.40	71.33	59.81	40.53	31.45	16.95	8.84	4.42
30	134.29	138.61	114.84	88.38	72.09	60.44	41.02	31.87	17.13	8.94	4.47
50	136.29	143.13	118.41	90.96	74.08	62.10	42.31	32.96	17.62	9.19	4.59
75	137.77	146.48	121.05	92.87	75.56	63.34	43.26	33.77	17.98	9.37	4.69
100	138.77	148.74	122.83	94.17	76.56	64.17	43.91	34.32	18.23	9.50	4.75

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Probabilidad de intensidad de lluvia en estación San Jerónimo calculada con distribución normal**

Distribución Normal											
Período de retorno/Duración	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
2	63.90	58.80	58.60	53.55	48.72	45.65	33.55	24.53	13.04	6.81	3.42
5	72.11	61.30	61.46	60.87	52.58	47.61	36.23	24.93	13.05	7.15	3.61
10	76.41	62.61	62.95	64.70	54.59	48.64	37.63	25.14	13.06	7.32	3.71
15	78.55	63.26	63.69	66.61	55.60	49.15	38.33	25.24	13.06	7.41	3.76
20	79.95	63.68	64.18	67.86	56.26	49.49	38.78	25.31	13.06	7.47	3.80
25	80.98	64.00	64.54	68.78	56.74	49.74	39.12	25.36	13.06	7.51	3.82
30	81.80	64.25	64.82	69.50	57.12	49.93	39.39	25.40	13.06	7.54	3.84
50	83.94	64.90	65.57	71.41	58.13	50.44	40.08	25.50	13.07	7.63	3.89
75	85.53	65.38	66.12	72.83	58.88	50.82	40.60	25.58	13.07	7.70	3.93
100	86.60	65.71	66.50	73.78	59.38	51.08	40.95	25.63	13.07	7.74	3.95

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Probabilidad de intensidad de lluvia en estación Chixoy calculada con distribución Gumbel**

Distribución de Gumbel											
Período de retorno/Duración	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
2	72.38	57.22	45.54	40.54	35.60	31.52	20.00	14.43	8.44	4.52	2.44
5	109.09	67.34	53.41	44.18	38.51	34.94	23.44	17.83	10.91	5.88	3.10
10	133.39	74.03	58.62	46.59	40.44	37.21	25.72	20.09	12.54	6.78	3.54
15	147.10	77.81	61.56	47.95	41.53	38.49	27.00	21.36	13.46	7.29	3.79
20	156.70	80.46	63.61	48.90	42.29	39.38	27.90	22.24	14.10	7.64	3.97
25	164.10	82.50	65.20	49.63	42.87	40.07	28.60	22.93	14.60	7.92	4.10
30	170.11	84.15	66.49	50.23	43.35	40.63	29.16	23.49	15.00	8.14	4.21
50	186.88	88.78	70.08	51.89	44.68	42.19	30.73	25.04	16.12	8.76	4.51
75	200.12	92.42	72.92	53.20	45.73	43.42	31.97	26.27	17.01	9.25	4.75
100	209.49	95.01	74.93	54.13	46.47	44.30	32.85	27.13	17.64	9.60	4.92

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. Probabilidad de intensidad de lluvia en estación Cubulco calculada con distribución Gumbel

Distribución de Gumbel											
Período de retorno/Duración	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
2	90.42	74.83	66.16	57.91	51.84	46.23	31.45	23.59	13.26	7.43	3.75
5	153.60	126.66	118.56	111.82	106.10	101.16	86.77	74.35	44.45	27.76	13.91
10	195.44	160.98	153.25	147.51	142.03	137.52	123.40	107.96	65.11	41.23	20.63
15	219.04	180.34	172.83	167.65	162.30	158.04	144.07	126.92	76.76	48.83	24.43
20	235.57	193.90	186.53	181.74	176.49	172.40	158.54	140.19	84.92	54.14	27.09
25	248.30	204.34	197.09	192.60	187.43	183.47	169.68	150.42	91.21	58.24	29.13
30	258.65	212.84	205.68	201.44	196.32	192.47	178.75	158.74	96.32	61.57	30.80
50	287.51	236.51	229.61	226.06	221.10	217.55	204.02	181.92	110.57	70.86	35.44
75	310.30	255.21	248.51	245.50	240.68	237.36	223.97	200.23	121.82	78.20	39.10
100	326.43	268.45	261.89	259.27	254.53	251.39	238.10	213.19	129.78	83.39	41.70

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. Probabilidad de intensidad de lluvia en estación Sacapulas calculada con distribución Gumbel

Distribución de Gumbel											
Período de retorno/Duración	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
2	71.96	57.52	48.93	41.77	37.52	33.51	20.55	14.64	8.28	4.28	2.14
5	98.26	76.34	65.47	54.86	48.60	43.78	26.58	18.58	9.89	5.15	2.58
10	115.68	88.80	76.42	63.52	55.94	50.58	30.57	21.19	10.95	5.73	2.87
15	125.51	95.83	82.60	68.41	60.08	54.42	32.82	22.66	11.55	6.06	3.03
20	132.39	100.75	86.93	71.83	62.98	57.10	34.40	23.69	11.97	6.29	3.15
25	137.69	104.54	90.26	74.46	65.21	59.17	35.61	24.49	12.30	6.47	3.23
30	142.00	107.62	92.97	76.61	67.03	60.86	36.60	25.13	12.56	6.61	3.31
50	154.01	116.22	100.53	82.58	72.09	65.55	39.35	26.93	13.29	7.01	3.51
75	163.50	123.01	106.50	87.30	76.08	69.25	41.53	28.36	13.87	7.33	3.66
100	170.22	127.81	110.72	90.64	78.91	71.88	43.07	29.36	14.28	7.55	3.78

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Probabilidad de intensidad de lluvia en estación San Agustín Chixoy calculada con distribución Gumbel**

Distribución de Gumbel											
Período de retorno/Duración	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
2	116.11	97.48	82.41	64.88	53.95	45.30	29.30	21.92	12.68	6.66	3.33
5	124.15	115.67	96.76	75.27	61.97	51.99	34.48	26.32	14.65	7.67	3.83
10	129.47	127.71	106.25	82.15	67.28	56.43	37.91	29.23	15.95	8.33	4.17
15	132.48	134.51	111.61	86.03	70.28	58.93	39.85	30.88	16.69	8.71	4.36
20	134.58	139.26	115.36	88.75	72.38	60.68	41.20	32.03	17.20	8.97	4.49
25	136.20	142.93	118.25	90.85	73.99	62.03	42.25	32.91	17.60	9.18	4.59
30	137.52	145.91	120.60	92.55	75.31	63.13	43.10	33.64	17.92	9.34	4.67
50	141.19	154.22	127.15	97.30	78.97	66.19	45.47	35.65	18.82	9.80	4.90
75	144.09	160.78	132.32	101.04	81.86	68.60	47.34	37.23	19.53	10.17	5.08
100	146.14	165.42	135.98	103.70	83.91	70.31	48.66	38.36	20.03	10.42	5.21

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Probabilidad de intensidad de lluvia en estación San Jerónimo calculada con distribución Gumbel**

Distribución de Gumbel											
Período de retorno/Duración	Precipitación (mm)										
	10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
2	62.30	58.31	58.04	52.12	47.97	45.27	33.03	24.46	13.04	6.74	3.39
5	70.92	60.94	61.04	59.81	52.02	47.33	35.84	24.87	13.05	7.10	3.59
10	76.63	62.67	63.03	64.90	54.70	48.69	37.70	25.15	13.06	7.33	3.72
15	79.85	63.65	64.15	67.77	56.21	49.46	38.75	25.30	13.06	7.46	3.79
20	82.11	64.34	64.93	69.78	57.27	50.00	39.49	25.41	13.06	7.56	3.85
25	83.84	64.87	65.54	71.33	58.09	50.42	40.05	25.50	13.07	7.63	3.89
30	85.26	65.30	66.03	72.59	58.75	50.76	40.51	25.57	13.07	7.69	3.92
50	89.20	66.50	67.40	76.10	60.60	51.70	41.80	25.76	13.07	7.85	4.01
75	92.31	67.45	68.48	78.87	62.06	52.44	42.81	25.91	13.08	7.97	4.08
100	94.51	68.12	69.25	80.83	63.09	52.97	43.53	26.01	13.08	8.07	4.13

Fuente: elaboración propia.

Los valores resultantes del análisis de frecuencia, empleando al distribución Gumbel, pueden representarse mediante mapas de isolineas de intensidades de lluvia, lo cual facilita comprender el comportamiento de las intensidades de lluvia alrededor de la cuenca, en este caso la cuenca del río Salinas.

6. AJUSTE DE LAS INTENSIDADES DE LLUVIA AL LOS MODELOS MATEMÁTICOS WENZEL E INSIVUMEH

Con el fin de evitar la lectura de la intensidad de lluvia en una gráfica, los datos fueron ajustados a modelos matemáticos en los cuales la intensidad de lluvia se encuentra en función de variables conocidas, el periodo de retorno y el tiempo de concentración. Para realizar el ajuste se utilizó un software en línea que se encuentra en el siguiente link <http://www.zunzun.com>, en el cual el procedimiento consiste en importar los datos de intensidad de lluvia para cada período de retorno y la ecuación matemática del modelo, seleccionar el error estadístico requerido y las variables tiempo (minutos) e intensidad (mm/h), se obtuvieron los parámetros A, B y n, que deben sustituirse en los siguientes modelos:

Modelo estándar:

$$I = \frac{A}{(D + B)^n}$$

Modelo WENZEL:

$$I = \frac{A}{D^n + B}$$

Tabla XVII. **Coefficientes de ajuste para la estación Chixoy, utilizando el método INSIVUMEH**

Estacion Chixoy								
Periodo de retorno	Distribucion Normal				Distribucion Gumbel			
	A	B	n	Error relativo	A	B	n	Error relativo
2	1467.672	20.386	0.86739	0.00830	1698.451	24.491	0.89613	0.00313
5	847.001	6.142	0.75286	0.05791	902.979	7.676	0.76694	0.05070
10	715.678	2.007	0.71313	0.08394	712.740	1.868	0.71190	0.08599
15	673.687	0.510	0.69738	0.09606	652.391	-0.273	0.68855	0.10317
20	650.344	-0.340	0.68778	0.10316	621.504	-1.446	0.67454	0.11348
25	635.553	-0.897	0.68120	0.10850	604.244	-2.176	0.66544	0.12219
30	626.420	-1.281	0.67674	0.11260	592.201	-2.701	0.65853	0.12825
50	603.106	-2.219	0.66487	0.12212	568.290	-3.873	0.64212	0.14480
75	590.273	-2.793	0.65733	0.12949	555.690	-4.581	0.63112	0.15685
100	582.988	-3.141	0.65266	0.13426	549.374	-4.996	0.62423	0.16486

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Coefficientes de ajuste para la estación Chixoy, utilizando el método WENZEL**

Estacion Chixoy								
Periodo de retorno	Distribucion Normal				Distribucion Gumbel			
	A	B	n	Error relativo	A	B	n	Error relativo
2	1702.310	14.501	0.88684	0.00594	1939.513	18.872	0.91366	0.00228
5	998.060	3.655	0.77517	0.05152	1068.900	4.563	0.78967	0.04417
10	815.544	1.459	0.73160	0.07983	810.959	1.395	0.73020	0.08201
15	749.132	0.740	0.71286	0.09399	713.245	0.378	0.70193	0.10257
20	709.603	0.346	0.70090	0.10271	657.090	-0.147	0.68369	0.11581
25	683.418	0.095	0.69249	0.10934	622.459	-0.459	0.67128	0.12687
30	666.019	-0.074	0.68661	0.11446	596.572	-0.677	0.66152	0.13494
50	620.106	-0.478	0.67047	0.12695	537.677	-1.138	0.63705	0.15716
75	592.141	-0.715	0.65978	0.13656	500.426	-1.396	0.61968	0.17362
100	575.020	-0.855	0.65294	0.14286	478.126	-1.538	0.60838	0.18465

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Coefficientes de ajuste para la estación Cubulco, utilizando el método INSIVUMEH**

Estacion Cubulco								
Periodo de retorno	Distribucion Normal				Distribucion Gumbel			
	A	B	n	Error relativo	A	B	n	Error relativo
2	5203.727	64.329	0.92808	0.01406	4033.166	45.285	0.95255	0.00387
5	63493.903	221.382	1.12114	0.02975	44309.444	196.845	1.08733	0.02929
10	204511.535	305.308	1.23330	0.03105	217017.428	309.635	1.23919	0.03113
15	344634.147	344.259	1.28418	0.03174	464478.645	366.960	1.31333	0.03218
20	473654.380	368.493	1.31515	0.03221	754294.279	404.271	1.36079	0.03297
25	597283.136	386.181	1.33807	0.03256	1078502.584	432.019	1.39610	0.03360
30	708013.916	399.340	1.35464	0.03286	1410640.673	453.120	1.42235	0.03413
50	1093684.990	433.191	1.39730	0.03365	2843311.863	508.643	1.49124	0.03561
75	1481512.356	457.012	1.42711	0.03425	4696019.213	548.743	1.54054	0.03676
100	1811506.383	472.831	1.44700	0.03463	6489325.156	574.796	1.57207	0.03755

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Coefficientes de ajuste para la estación Cubulco, utilizando el método WENZEL**

Estacion Cubulco								
Periodo de retorno	Distribucion Normal				Distribucion Gumbel			
	A	B	n	Error relativo	A	B	n	Error relativo
2	5766.243	50.999	0.93992	0.01207	4330.345	39.640	0.96143	0.00328
5	35662.200	240.101	1.04649	0.03161	28418.996	200.004	1.02881	0.03070
10	70731.283	407.905	1.10057	0.03345	73033.472	417.937	1.10320	0.03353
15	93565.509	501.893	1.12274	0.03401	109118.535	561.087	1.13480	0.03430
20	110258.456	565.144	1.13555	0.03431	138813.706	665.533	1.15350	0.03475
25	123717.333	613.931	1.14468	0.03452	164367.938	748.718	1.16662	0.03509
30	134558.552	651.250	1.15113	0.03469	186230.386	814.927	1.17604	0.03535
50	165601.786	752.210	1.16708	0.03511	253979.103	1000.901	1.19919	0.03608
75	190488.477	827.330	1.17771	0.03542	313587.339	1145.202	1.21452	0.03664
100	208405.424	879.013	1.18455	0.03560	358176.067	1243.177	1.22386	0.03702

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Coefficientes de ajuste para la estación Sacapulas, utilizando el método INSIVUMEH**

Estacion Sacapulas								
Periodo de retorno	Distribucion Normal				Distribucion Gumbel			
	A	B	n	Error relativo	A	B	n	Error relativo
2	2857.627	33.753	0.99888	0.00127	2596.274	34.291	0.99660	0.00144
5	4273.214	32.400	1.00920	0.00122	5044.764	31.952	1.01226	0.00136
10	5008.481	31.975	1.01222	0.00134	5982.367	31.552	1.01508	0.00155
15	5373.764	31.797	1.01339	0.00141	5596.298	31.702	1.01403	0.00147
20	5610.707	31.693	1.01398	0.00148	6250.993	31.374	1.01501	0.00158
25	5772.449	31.573	1.01405	0.00149	6505.148	31.336	1.01589	0.00161
30	5938.688	31.603	1.01521	0.00154	7208.618	31.231	1.01792	0.00177
50	6307.410	31.485	1.01611	0.00160	7742.960	31.109	1.01883	0.00186
75	6574.222	31.381	1.01660	0.00165	7742.960	31.109	1.01883	0.00186
100	6748.436	31.306	1.01672	0.00169	8105.550	31.006	1.01904	0.00191

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Coefficientes de ajuste para la estación Sacapulas, utilizando el método WENZEL**

Estacion Sacapulas								
Periodo de retorno	Distribucion Normal				Distribucion Gumbel			
	A	B	n	Error relativo	A	B	n	Error relativo
2	3296.021	33.535	0.99899	0.00132	3093.333	33.679	0.99489	0.00160
5	4343.796	33.040	1.01488	0.00177	4192.042	33.103	1.01303	0.00154
10	5660.458	33.238	1.02936	0.00413	4953.224	33.109	1.02230	0.00275
15	5203.342	33.064	1.02463	0.00324	5399.782	33.238	1.02708	0.00358
20	5400.679	33.141	1.02675	0.00362	5692.093	33.159	1.02937	0.00422
25	5544.270	33.184	1.02817	0.00391	5955.941	33.390	1.03218	0.00465
30	6177.026	33.347	1.03370	0.00517	6128.434	33.258	1.03309	0.00509
50	5952.476	33.267	1.03179	0.00474	6675.717	33.367	1.03721	0.00624
75	6177.026	33.347	1.03370	0.00517	7136.726	33.620	0.04079	0.00709
100	6339.565	33.472	1.03526	0.00546	7422.620	33.538	1.04211	0.00775

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Coeficientes de ajuste para la estación San Agustín, utilizando el método INSIVUMEH**

Estacion San Agustin Chixoy								
Periodo de retorno	Distribucion Normal				Distribucion Gumbel			
	A	B	n	Error relativo	A	B	n	Error relativo
2	1003.095	21.971	0.92497	0.02972	751.729	21.721	0.92401	0.02880
5	2300.961	22.456	0.92742	0.03153	2116.677	22.461	0.92755	0.03158
10	2974.009	22.522	0.92750	0.03189	3010.401	22.524	0.92760	0.03182
15	3318.900	22.575	0.92807	0.03203	3518.638	22.572	0.92778	0.03213
20	3550.904	22.645	0.92862	0.03224	3881.583	22.620	0.92824	0.03225
25	3712.412	22.643	0.92859	0.03226	4159.844	22.651	0.92846	0.03236
30	3825.751	22.591	0.92791	0.03212	4376.244	22.635	0.92822	0.03236
50	4170.867	22.635	0.92828	0.03227	5011.383	22.699	0.92881	0.03249
75	4414.104	22.619	0.92805	0.03228	5488.944	22.674	0.92840	0.03245
100	4599.744	22.680	0.92871	0.03238	5841.017	22.695	0.92858	0.03255

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Coeficientes de ajuste para la estación San Agustín, utilizando el método WENZEL**

Estacion San Agustin Chixoy								
Periodo de retorno	Distribucion Normal				Distribucion Gumbel			
	A	B	n	Error relativo	A	B	n	Error relativo
2	3307.748	18.342	0.93759	0.02958	3104.943	17.245	0.93249	0.02648
5	5049.522	26.950	0.97022	0.05717	4244.952	23.121	0.95694	0.04445
10	5049.522	26.950	0.97022	0.05717	5071.199	27.019	0.97030	0.05753
15	5370.849	28.395	0.97469	0.06211	5568.292	29.262	0.97726	0.06518
20	5596.838	29.417	0.97792	0.06544	5934.855	30.881	0.98216	0.07050
25	5762.524	30.151	0.98012	0.06789	6222.096	32.123	0.98569	0.07462
30	5887.257	30.683	0.98159	0.06979	6468.645	33.187	0.98877	0.07792
50	6250.656	32.273	0.98628	0.07490	7151.457	36.008	0.99622	0.08704
75	6503.487	33.309	0.98899	0.07850	7709.474	38.233	1.00175	0.09411
100	6692.993	34.117	0.99121	0.08104	8116.140	39.812	1.00554	0.09900

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Coefficientes de ajuste para la estación San Jerónimo, utilizando el método INSIVUMEH**

Estacion San Geronimo								
Periodo de retorno	Distribucion Normal				Distribucion Gumbel			
	A	B	n	Error relativo	A	B	n	Error relativo
2	6059.961	97.669	1.30594	0.06448	5566.700	96.159	1.37792	0.11539
5	12484.431	100.595	1.24067	0.02693	11689.672	100.777	1.24666	0.02837
10	15977.410	100.889	1.23181	0.02355	16072.529	100.795	1.23054	0.02335
15	17498.490	100.661	1.22683	0.02261	18573.704	100.732	1.22555	0.02210
20	18795.919	100.942	1.22660	0.02199	20396.693	100.784	1.22338	0.02149
25	19461.438	100.728	1.22419	0.02173	21950.346	101.027	1.22298	0.02072
30	20151.882	100.805	1.22369	0.02152	22882.339	100.799	1.22052	0.02062
50	22081.376	101.059	1.22334	0.02078	26326.182	101.104	1.21981	0.01977
75	23263.651	100.986	1.22144	0.02048	28672.809	101.002	1.21729	0.01931
100	24163.210	101.036	1.22092	0.02017	30517.335	101.063	1.21675	0.01907

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Coefficientes de ajuste para la estación San Jerónimo, utilizando el método WENZEL**

Estacion San Geronimo								
Periodo de retorno	Distribucion Normal				Distribucion Gumbel			
	A	B	n	Error relativo	A	B	n	Error relativo
2	14560.491	208.938	1.14699	0.00874	14975.002	219.796	1.15197	0.00780
5	12633.171	162.498	1.12121	0.02605	12808.661	167.178	1.12379	0.02263
10	11863.556	144.772	1.10951	0.04108	11790.067	143.450	1.10838	0.04209
15	11509.212	136.928	1.10383	0.04987	11310.873	132.548	1.10058	0.05552
20	11243.703	131.544	1.09947	0.05613	10928.427	124.738	1.09410	0.06608
25	11122.300	128.626	1.09739	0.06069	10712.997	119.956	1.09021	0.07421
30	11000.906	126.040	1.09534	0.06449	10545.570	116.275	1.08717	0.08122
50	10711.079	119.820	1.09020	0.07460	10083.096	106.569	1.07855	0.10197
75	10487.774	115.267	1.08617	0.08272	9767.838	99.970	1.07233	0.11890
100	10386.651	112.867	1.08429	0.08807	9536.835	95.424	1.06767	0.13163

Fuente: elaboración propia.

6.1. Comparación de métodos de ajuste en relación al error relativo

Como se mencionó en el párrafo anterior, el modelo INSIVUMEH y el modelo WENZEL, son modelos matemáticos que pueden ser utilizados para describir el comportamiento de las intensidades de lluvia para determinada región, y tomando como base una gran cantidad de datos recolectados a través de varios años. Sería ideal que cada modelo se ajustara exactamente a los puntos reales obtenidos de los pluviógrafos, pero aún no existe un modelo que sea práctico y a la vez preciso para crear dicho modelo matemático, pero si existen modelos que generan un menor error, en relación a las intensidades reales, que otros modelos.

6.1.1. Error relativo

Es la división entre el error absoluto de la medida y el dato esperado, el cociente de dicha relación matemática es adimensional y generalmente se presenta como porcentajes. Además, el error relativo ofrece un valor que mientras más cercano a cero se encuentre, indica que tiene menos error, la ecuación que representa lo anteriormente expuesto es la siguiente:

error absoluto=valor real-valor medición

$$\text{error relativo} = \frac{\text{error absoluto}}{\text{valor real}}$$

6.1.1.1. Comparación de modelos para cada estación climatológica

Se utilizaron 2 modelos matemáticos distintos; modelo INSIVUMEH y modelo WENZEL, para describir los datos de intensidades de lluvia de los

pluviógrafos ubicados en las 5 estaciones dentro de la cuenca del río Salinas. A continuación se hará una comparación de la precisión de ambos métodos, tomando como parámetro el relativo de error cada modelo con respecto al otro.

Para el cálculo de ambos modelos matemáticos, se utilizó como herramienta un software, que además de los coeficientes, proporciona el error relativo, en relación con los datos ingresados dicho software.

Tabla XXVII. **Comparación del error relativo para la estación Chixoy**

Estacion Chixoy				
Periodo de retorno	INSIVUMEH		WENZEL	
	NORMAL	GUMBEL	NORMAL	GUMBEL
	Error relativo	Error relativo	Error relativo	Error relativo
2	0.00830	0.00313	0.00594	0.00228
5	0.05791	0.05070	0.05152	0.04417
10	0.08394	0.08599	0.07983	0.08201
15	0.09606	0.10317	0.09399	0.10257
20	0.10316	0.11348	0.10271	0.11581
25	0.10850	0.12219	0.10934	0.12687
30	0.11260	0.12825	0.11446	0.13494
50	0.12212	0.14480	0.12695	0.15716
75	0.12949	0.15685	0.13656	0.17362
100	0.13426	0.16486	0.14286	0.18465
Sumatoria	0.95633	1.07342	0.96416	1.12409

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Comparación de error relativo para la estación Cubulco**

Estacion Cubulco				
Periodo de retorno	INSIVUMEH		WENZEL	
	NORMAL	GUMBEL	NORMAL	GUMBEL
	Error relativo	Error relativo	Error relativo	Error relativo
2	0.01406	0.00387	0.01207	0.00328
5	0.02975	0.02929	0.03161	0.03070
10	0.03105	0.03113	0.03345	0.03353
15	0.03174	0.03218	0.03401	0.03430
20	0.03221	0.03297	0.03431	0.03475
25	0.03256	0.03360	0.03452	0.03509
30	0.03286	0.03413	0.03469	0.03535
50	0.03365	0.03561	0.03511	0.03608
75	0.03425	0.03676	0.03542	0.03664
100	0.03463	0.03755	0.03560	0.03702
Sumatoria	0.30675	0.30708	0.32080	0.31673

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Comparación de error relativo para la estación Sacapulas**

Estacion Sacapulas				
Periodo de retorno	INSIVUMEH		WENZEL	
	NORMAL	GUMBEL	NORMAL	GUMBEL
	Error relativo	Error relativo	Error relativo	Error relativo
2	0.00127	0.00144	0.00132	0.00160
5	0.00122	0.00136	0.00177	0.00154
10	0.00134	0.00155	0.00413	0.00275
15	0.00141	0.00147	0.00324	0.00358
20	0.00148	0.00158	0.00362	0.00422
25	0.00149	0.00161	0.00391	0.00465
30	0.00154	0.00177	0.00517	0.00509
50	0.00160	0.00186	0.00474	0.00624
75	0.00165	0.00186	0.00517	0.00709
100	0.00169	0.00191	0.00546	0.00775
Sumatoria	0.01470	0.01642	0.03853	0.04452

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Comparación de error relativo para la estación San Agustín**

Estacion San Agustín				
Periodo de retorno	INSIVUMEH		WENZEL	
	NORMAL	GUMBEL	NORMAL	GUMBEL
	Error relativo	Error relativo	Error relativo	Error relativo
2	0.02972	0.02880	0.02958	0.02648
5	0.03153	0.03158	0.05717	0.04445
10	0.03189	0.03182	0.05717	0.05753
15	0.03203	0.03213	0.06211	0.06518
20	0.03224	0.03225	0.06544	0.07050
25	0.03226	0.03236	0.06789	0.07462
30	0.03212	0.03236	0.06979	0.07792
50	0.03227	0.03249	0.07490	0.08704
75	0.03228	0.03245	0.07850	0.09411
100	0.03238	0.03255	0.08104	0.09900
Sumatoria	0.31873	0.31879	0.64358	0.69683

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Comparación de error relativo para estación San Jerónimo**

Estacion San Jerónimo				
Periodo de retorno	INSIVUMEH		WENZEL	
	NORMAL	GUMBEL	NORMAL	GUMBEL
	Error relativo	Error relativo	Error relativo	Error relativo
2	0.06448	0.11539	0.00874	0.00780
5	0.02693	0.02837	0.02605	0.02263
10	0.02355	0.02335	0.04108	0.04209
15	0.02261	0.02210	0.04987	0.05552
20	0.02199	0.02149	0.05613	0.06608
25	0.02173	0.02072	0.06069	0.07421
30	0.02152	0.02062	0.06449	0.08122
50	0.02078	0.01977	0.07460	0.10197
75	0.02048	0.01931	0.08272	0.11890
100	0.02017	0.01907	0.08807	0.13163
Sumatoria	0.26424	0.31019	0.55244	0.70206

Fuente: elaboración propia.

6.2. Análisis de resultados

Se hará en 2 etapas, primero se analizará individualmente cada una de las estaciones, y segundo se realizará un análisis global por medio de las sumatorias de errores relativos de cada estación.

6.2.1. Análisis de errores relativos de cada estación

Al comparar el valor absoluto de los resultados de error relativo obtenido por ambos métodos, el resultado obtenido con distribución normal y método INSIVUMEH, contra el resultado obtenido con distribución normal y método WENZEL; y el resultado obtenido con distribución de Gumbel y el método INSIVUMEH, contra el resultado obtenido con la distribución de Gumbel y el método WENZEL. El resultado que es más preciso, es aquel en el cual su valor absoluto sea más cercano a cero.

6.2.1.1. Estación Chixoy

En comparación con la distribución normal: de la tabla XXVII, se puede ver que el mayor error relativo en 5 de los períodos de retorno, se obtiene en los cálculos realizados con el método WENZEL y 5 de los períodos de retorno, se obtiene mayor error relativo con los cálculos hechos con el método INSIVUMEH.

- Comparación con distribución normal: de la tabla XXVII, se puede ver que el mayor error relativo en 6 de los períodos de retorno, se obtiene en los cálculos realizados con el método WENZEL y solo en 4 de los períodos de retorno, se obtiene mayor error relativo con los cálculos hechos con el método INSIVUMEH.

6.2.1.2. Estación Cubulco

Al analizar la distribución normal: de la tabla XXVIII, se puede ver que el mayor error relativo en 9 de los períodos de retorno, se obtiene en los cálculos realizados con el método WENZEL y en 1 de los períodos de retorno, se obtiene mayor error relativo con los cálculos hechos con el método INSIVUMEH.

- Comparación con distribución normal: de la tabla XXVIII, se puede ver que el mayor error relativo en 7 de los períodos de retorno, se obtiene en los cálculos realizados con el método WENZEL y solo en 3 de los períodos de retorno, se obtiene mayor error relativo con los cálculos hechos con el método INSIVUMEH.

6.2.1.3. Estación Sacapulas

Analizando la distribución normal: de la tabla XXIX, se puede ver que el mayor error relativo en 10 de los períodos de retorno, se obtiene en los cálculos realizados con el método WENZEL y en 0 de los períodos de retorno, se obtiene mayor error relativo con los cálculos hechos con el método INSIVUMEH.

- Comparación con distribución normal: de la tabla XXIX, se puede ver que el mayor error relativo en 10 de los períodos de retorno, se obtiene en los cálculos realizados con el método WENZEL y en 0 de los períodos de retorno, se obtiene mayor error relativo con los cálculos hechos con el método INSIVUMEH.

6.2.1.4. Estación San Agustín

En comparación con la distribución normal: de la tabla XXX, se puede ver que el mayor error relativo en 1 de los períodos de retorno, se obtiene en los cálculos realizados con el método INSIVUMEH y en 9 de los períodos de retorno, se obtiene mayor error relativo con los cálculos hechos con el método WENZEL.

- Comparación con distribución Gumbel: de la tabla XXX, se puede ver que el mayor error relativo en 1 de los períodos de retorno, se obtiene en los cálculos realizados con el método INSIVUMEH y en 9 de los períodos de retorno, se obtiene mayor error relativo con los cálculos hechos con el método WENZEL.

6.2.1.5. Estación San Jerónimo

En comparación con la distribución normal: de la tabla XXXI, se puede ver que el mayor error relativo en 2 de los períodos de retorno, se obtiene en los cálculos realizados con el método INSIVUMEH y en 8 de los períodos de retorno, se obtiene mayor error relativo con los cálculos hechos con el método WENZEL.

- Comparación con distribución Gumbel: de la tabla XXXI, se puede ver que el mayor error relativo en 2 de los períodos de retorno, se obtiene en los cálculos realizados con el método INSIVUMEH y en 8 de los períodos de retorno, se obtiene mayor error relativo con los cálculos hechos con el método WENZEL.

Esto quiere decir, que utilizando la distribución normal y el método WENZEL, se obtienen resultados más precisos en 9 de los 50 casos posibles, lo cual representa el 18 por ciento de los casos, mientras que utilizando la distribución normal y el método INSIVUMEH se obtienen resultados más precisos en 41 de los 50 casos posibles, lo cual representa el 82 por ciento restante.

Utilizando la distribución de Gumbel y el método WENZEL, se obtienen resultados más precisos en 10 de los 50 casos posibles, lo cual representa el 20 por ciento de los casos, mientras que utilizando la distribución de Gumbel y el método INSIVUMEH, se obtienen resultados más precisos en 40 de los 50 casos posibles, lo cual representa el 80 por ciento restante.

6.2.2. Análisis global de los errores relativos

Este análisis se hará comparando la sumatoria de errores relativos de cada estación (ver tablas de errores), y realizando una nueva sumatoria para obtener la sumatoria de errores para el método WENZEL e INSIVUMEH, y para la distribución normal y la distribución de Gumbel.

Tabla XXXII. **Tabla resumen de sumatoria de errores relativos para estaciones**

SUMATORIA ERROR RELATIVO				
ESTACION	INSIVUMEH		WENZEL	
	NORMAL	GUMBEL	NORMAL	GUMBEL
CHIXOY	0.95633	1.07342	0.96416	1.12409
CUBULCO	0.30675	0.30708	0.32080	0.31673
SACAPULAS	0.01470	0.01642	0.03853	0.04452
SAN AGUSTÍN	0.31873	0.31879	0.64358	0.69683
SAN JERÓNIMO	0.26424	0.31019	0.55244	0.70206
SUMATORIA	1.86075	2.02590	2.51950	2.88423

Fuente: elaboración propia.

Como se puede ver en la tabla XXXII, al comparar la sumatoria de error relativo con método WENZEL y distribución normal, contra el método INSIVUMEH y distribución normal, se aprecia que la sumatoria del primero es mayor que la del segundo en un 15,04 por ciento. Y comparando la sumatoria de error relativo con el método WENZEL y distribución de Gumbel, contra el método INSIVUMEH y la distribución de Gumbel, se aprecia que la sumatoria del primero es mayor que la del segundo en un 17,48 por ciento. Por lo que tanto con la distribución normal como con la distribución de Gumbel, el método de ajuste que genera el menor error relativo es el modelo INSIVUMEH.

6.3. Presentación de resultados

En el análisis de error relativo, se observa que el método que mejor se ajusta al comportamiento real de la intensidad de lluvia, es el método estándar propuesto por el INSIVUMEH, a continuación se presenta el modelo matemático que se propone para el cálculo de intensidades máximas de lluvia asociadas a períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 25, 30, 50, 75, 100 años.

$$I = \frac{A}{(B+t)^n}$$

Donde:

I=intensidad de lluvia en mm/hr

t=tiempo de concentración y es calculado a criterio del diseñador (minutos)

A=parámetro de ajuste

B=parámetro de ajuste

n=parámetro de ajuste

Se presentan, los parámetros de ajuste para la combinación de la distribución estadística y método de ajuste, éstos son la distribución normal con el método de ajuste INSIVUMEH.

Tabla XXXIII. Parámetros de ajuste para estaciones de la cuenca del río Salinas

T (años)	2	5	10	15	20	25	30	50	75	100
Estación Chixoy										
A	1 468	847	716	674	650	636	626	603	590	583
B	20,4	6,1	2,0	0,5	-0,3	-0,9	-1,3	-2,2	-2,8	-3,1
n	0,87	0,75	0,71	0,70	0,69	0,68	0,68	0,66	0,66	0,65
Error relativo	0,008	0,058	0,084	0,096	0,103	0,108	0,113	0,122	0,129	0,134
Estación Cubulco										
A	5 204	6 3494	2 04512	3 44634	47 3654	59 7283	70 8014	109 3685	148 1512	181 1506
B	64,3	221,4	305,3	344,3	368,5	386,2	399,3	433,2	457,0	472,8
n	0,93	1,12	1,23	1,28	1,32	1,34	1,35	1,40	1,43	1,45
Error relativo	0,014	0,030	0,031	0,032	0,032	0,033	0,033	0,034	0,034	0,035
Estación Sacapulas										
A	2 858	4 273	5 008	5 374	5 611	5 772	5 939	6 307	6 574	6 748
B	33,8	32,4	32,0	31,8	31,7	31,6	31,6	31,5	31,4	31,3
n	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02	1,02
Error relativo	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002
Estación San Agustín Chixoy										
A	1 003	2 301	2 974	3 319	3 551	3 712	3 826	4 171	4 414	4 600
B	22,0	22,5	22,5	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,7
n	0,92	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
Error relativo	0,030	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
Estación San Jerónimo										
A	6 060	1 2484	15 977	17 498	18 796	19 461	20 152	22 081	23 264	24 163
B	97,7	100,6	100,9	100,7	100,9	100,7	100,8	101,1	101,0	101,0
n	1,31	1,24	1,23	1,23	1,23	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22
Error relativo	0,064	0,027	0,024	0,023	0,022	0,022	0,022	0,021	0,020	0,020

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Al observar el comportamiento de los valores mostrados en las tablas de la sección 6, se observa que la intensidad de lluvia disminuye conforme el tiempo de concentración aumenta. Esto quiere decir que la intensidad de lluvia es mayor en los primeros minutos de la tormenta, disminuyendo en una forma exponencial hasta que se termina la tormenta.
2. Con el aumento del período de retorno (inverso de la probabilidad de ocurrencia), se esperan intensidades mayores de lluvia, esto debido a que es más frecuente encontrar tormentas mayores si aumenta el número de años analizados.
3. De los resultados obtenidos en el capítulo 6, se observa que comparando el método WENZEL con el método INSIVUMEH, en el que se obtiene un mayor número de valores precisos, según el análisis de error relativo, es usando el método INSIVUMEH. Realizando un análisis de acuerdo a la sumatoria de error relativo se obtiene el mismo resultado, mostrando como el método más preciso el del INSIVUMEH. Por lo que la hipótesis planteada no se cumple.
4. Analizando estación por estación, y comparando la sumatoria de error relativo del método INSIVUMEH con la distribución normal, contra el método INSIVUMEH con distribución de Gumbel, se observa que la combinación de la distribución estadística y método de ajuste con los que se obtienen resultados más precisos es la distribución normal con el método de ajuste INSIVUMEH.

5. Aunque no afecta en los resultados de ambos métodos de ajuste (WENZEL e INSIVUMEH) se debe mencionar que algunas de las estaciones no se contaba con un número adecuado de datos de registro, en la estación San Jerónimo, por ejemplo, solo se contaba con 2 años de registro, por lo que posiblemente afectaría la exactitud en la predicción de las intensidades máximas.

RECOMENDACIONES

1. Los desastres naturales provocados por intensidades de lluvia muy altas, pueden evitarse mediante el diseño de obras hidráulicas adecuadas, derivadas del conocimiento de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, propias de la región de interés.
2. Es necesario elaborar curvas Intensidad-Duración-Frecuencia en cada cuenca del país, ya que constituyen la base para el diseño de obras hidráulicas enfocadas a evitar o mitigar daños provocados por eventos con intensidades de lluvia máxima.
3. Para facilitar la lectura y discretización de las bandas pluviográfico es necesario que el equipo pluviográfico esté calibrado para registrar eventos diarios y no semanales, en especial en zonas donde la precipitación de lluvia es frecuente.
4. Al construir las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia con valores de intensidad de lluvia máxima, es conveniente utilizar la función de distribución de frecuencias tipo I o de Gumbel.
5. Deben implementarse más estudios enfocados a la elaboración de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para poder determinar el modelo que mejor se ajusta a los resultados de intensidades de lluvia máxima.

BIBLIOGRAFÍA

1. CHEN, Cheng. *Rainfall intensity-duration-frequency formulas*. ASCE, United States, 1983. 1621 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, 1992. 126 p.
3. MAGGIO, Giovanni. *Análisis estadístico de valores extremos, aplicaciones en hidrología*. Argentina: McGraw-Hill, 1983. 253 p.
4. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación de Guatemala (MAGA), *Atlas temático de la República de Guatemala*. Guatemala: Laboratorio de Información Geográfica del MAGA, 2002. 127 p.

