

**UNIVERSIDAD MAYOR REAL Y PONTIFICIA DE SAN
FRANCISCO XAVIER DE CHUQUISACA
CENTRO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
E INVESTIGACIÓN**

**DIPLOMADO EN INSTALACIONES HIDROSANITARIAS EN
EDIFICACIONES**



**ESTIMACIÓN DE LAS CURVAS INTENSIDAD – DURACIÓN -
FRECUENCIA PARA LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA
AEROPUERTO – TARIJA**

POSTULANTE: FERNANDO RICHARD VELASQUEZ SARAVIA

Marzo 2024

Dedicatoria

A mis queridos padres, Celia y Ricardo,

Con todo mi amor y gratitud, dedico esta monografía a ustedes, los pilares de mi vida. Vuestra constante apoyo, sabiduría y amor incondicional han sido mi inspiración y motivación en cada paso de mi camino académico.

Agradecimiento

Al M.Sc. Jarín Hasbel Alcala,

Por su orientación, apoyo y dedicación han sido fundamentales en mi proceso de aprendizaje.

En particular, quiero destacar el importante papel que ha desempeñado en enseñarme la importancia de la organización y la gestión del tiempo.

ESTIMACIÓN DE LAS CURVAS INTENSIDAD – DURACIÓN - FRECUENCIA PARA LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA AEROPUERTO – TARIJA

Resumen

Para los diseños de obras hidráulicas de evacuación de aguas pluviales una variable importante es el cálculo de los caudales de crecida para diferentes periodos de retorno, su determinación se basa en función de parámetros hidrológicos y parámetros de las estaciones meteorológicas, es ahí donde juegan un rol importante la aplicación de las curvas IDF que constituyen la base hidrológica para la estimación de los caudales de diseño de obras hidráulicas de evacuación.

Hoy en día en la normativa NB 688 se desconoce las curvas IDF para la estimación de caudales de crecida para la ciudad de Tarija, es por ello que el común denominador en problemas de inundación en el radio urbano de Tarija se ve afectado por la deficiencia de sistemas de alcantarillado pluvial, mismos que se desconoce su cálculo y procedencia de datos ya que no funcionan cuando ocurre un evento adverso de precipitación y estos llegan a colapsar.

Es por ello que en el presente trabajo se realizó las curvas de intensidad – duración y frecuencia para diferentes periodos de retorno ($T=1,2,5,10,20,50$ y 100 años) tal como indica la NB 688, se trabajó con datos de la estación meteorológica del aeropuerto de Tarija, extraídos de la plataforma Senamhi un total de 28093 datos de registros de precipitación diaria, con un periodo de 1945 hasta el 2023 haciendo un total de 79 años de registro lo cual se garantizó una consistencia de datos históricos, a su vez se realizó un análisis de selección y calidad de datos actualizados, de esa manera se trabajó con valores máximos anuales, donde posteriormente se evaluó mediante metodología probabilística de la ley de Gumbell, dando que los datos si se ajustan a la ley para su estudio, continuando se aplicó el modelo hidrológico presentado por Bernard y se validó con regresiones potencial para cada periodo de retorno y así obtener los parámetros de la ecuación de intensidad, una vez obtenida la ecuación se procedió a determinar las intensidades (mm/hr) para diferentes duraciones de lluvia en intervalos de 5 minutos y de esa manera se graficó las curvas IDF para la ciudad de Tarija, mostrando que precipitaciones de corta duración son las que ocasionan inundaciones por la alta intensidad presentada en la ciudad, estas curvas ayudarán en el diseño de infraestructuras de drenaje pluvial.

Palabras clave: Intensidad, duración, frecuencia, precipitación máxima.

ÍNDICE

CAPÍTULO I IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1. ANTECEDENTES.	1
1.2. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA.	2
1.2.1. SITUACIÓN PROBLÉMICA.....	2
1.2.2. CAUSAS MÁS PROBABLES.	2
1.3. PREGUNTAS DE LA INVESTIGACIÓN.	3
1.4. OBJETIVOS.....	3
1.4.1. OBJETIVO GENERAL.	3
1.4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	3
1.5. HIPÓTESIS	4
1.6. JUSTIFICACION.	4
CAPÍTULO II MARCO TEORICO.....	5
2.1. NORMA BOLIVIANA DE DISEÑO DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO SANITARIO Y PLUVIAL (NB 688).....	5
2.2. PRECIPITACIÓN.....	5
2.2.1. Precipitaciones medias areales	6
2.3. RÉGIMEN HIDROLÓGICO.....	7
2.4. INTENSIDAD – DURACIÓN – FRECUENCIA	7
2.5. APLICACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS IDF	10
2.6. ESTADÍSTICA HIDROLÓGICA.....	13
2.7. ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE SERIES DE PRECIPITACIONES	15
2.8. PERIODO DE RETORNO	16
2.9. MODELOS HIDROLÓGICOS PARA REPRESENTAR CURVAS IDF	17
2.10. ANÁLISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE.....	17

CAPÍTULO III MARCO PRÁCTICO.....	20
3.1. DATOS SENAMHI	20
3.2. OBTENCIÓN Y SELECCIÓN DE DATOS	20
3.3. TRATAMIENTO DE DATOS DISPONIBLES	21
3.4. ANÁLISIS DE CALIDAD DE DATOS	22
3.5. APLICACIÓN DE LA LEY DE DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL	24
3.5.1. Cálculo de las precipitaciones diarias máximas probables para diferentes periodos de retorno	26
3.6. COEFICIENTES DE DESAGREGACIÓN DE PRECIPITACIÓN	26
3.7. DETERMINACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN MÁXIMA DIARIA	27
3.8. CÁLCULO DE INTENSIDADES DE LLUVIA	27
3.7. APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO.....	28
3.9. ESTIMACIÓN DE LAS CURVAS I-D-F.....	36
CAPÍTULO IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	39
4.1. CONCLUSIONES	39
4.2. RECOMENDACIONES.....	40
BIBLIOGRAFÍA.	41
ANEXOS 43	
ANEXO A: Datos de precipitación diaria de la estación Tarija – Aeropuerto.....	43
ANEXO B: Selección de precipitaciones máximas mensuales en mm.	51
ANEXO C: Precipitación máximas a nivel anual expresadas en mm	53
ANEXO D: Análisis de calidad de datos en función de estadística probabilística.....	55
ANEXO E: Distribución de probabilidades mediante Gumbell	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Curvas de I-D-F para lluvia máxima en Chicago, EEUU	12
Figura 4 Plataforma SENAMHI para la obtención de datos	20
Figura 5 Comportamiento de la precipitación a función al tiempo	23
Figura 6 Correlación de datos de precipitación máxima	24
Figura 7 Regresión potencial para T=1 año.....	29
Figura 8 Regresión Potencial para T=2 años.....	30
Figura 9 Regresión Potencial para T=5 años.....	31
Figura 10 Regresión Potencial para T=10 años.....	32
Figura 11 Regresión Potencial para T=20 años.....	33
Figura 12 Regresión Potencial para T=50 años.....	34
Figura 13 Regresión Potencial para T=100 años.....	35
Figura 14 Regresión potencial para coeficiente (k) y (m)	36
Figura 15 Curvas IDF para la estación meteorológica de Tarija - Aeropuerto	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Base de datos de precipitación diaria en mm	21
Tabla 2 Precipitaciones máximas mensuales en mm.....	21
Tabla 3 Precipitaciones máximas anuales en mm	22
Tabla 4 Análisis de calidad de datos	23
Tabla 5 Datos de precipitación (xi) en mm	25
Tabla 6 Precipitaciones máximas diarias probables para diferentes periodos de retorno	26
Tabla 7 Coeficientes de desagregación de precipitación.....	26

Tabla 8 Valores de precipitación máxima para diferentes periodos de retorno.	27
Tabla 9 Intensidades de lluvia (mm/hr) para diferentes periodos de retorno	27
Tabla 10 Regresión Potencial para T=1 año.....	29
Tabla 11 Regresión Potencial para T=2 años	30
Tabla 12 Regresión Potencial para T=5 años	30
Tabla 13 Regresión Potencial para T=10 años	31
Tabla 14 Regresión Potencial para T=20 años	32
Tabla 15 Regresión Potencial para T=50 años	33
Tabla 16 Regresión Potencial para T=100 años	34
Tabla 17 Resumen de coeficientes de regresión (n)	35
Tabla 18 Regresión potencial para coeficiente (k) y (m)	35
Tabla 19 Resumen de coeficientes de regresión (k) y (m)	36
Tabla 20 Intensidades de lluvia (mm/hr) para la estación meteorológica Aeropuerto - Tarija.	37

ESTIMACIÓN DE LAS CURVAS INTENSIDAD DURACIÓN FRECUENCIA PARA LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA AEROPUERTO – TARIJA.

CAPÍTULO I IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

1. ANTECEDENTES.

En Bolivia la aplicación de las curvas IDF, no son muy difundidas, salvo especificaciones particulares detalladas en los términos de referencia, por otra parte, se debe tener en cuenta que estas relaciones datan de hace más de 2 décadas, y fueron calculadas para algunas ciudades capitales de departamento utilizando la metodología de “Distribución de valores extremos utilizando análisis de frecuencias” propuesta por Gumbel (1958).

Estudios realizados por (Edson Ramírez, Javier Mendoza, Edgar Salas, & Pierre Ribstein, 1995), en base al análisis del régimen temporal de precipitaciones para la cuenca del río de La Paz, determinó una expresión que permitía estimar las precipitaciones para cualquier duración, en función de las precipitaciones máximas de 24 horas.

(Mamani, Curvas IDF para la estación meteorológica de Viacha, Departamento de La Paz, 2018) construyó curvas IDF para la zona de Viacha de la ciudad de La Paz en seis periodos de retorno, 1, 5, 10, 25, 50 y 100 de periodo de retorno con datos del 1973 al 2014, donde existe una relación inversa no lineal entre la intensidad de la precipitación y la duración del evento de lluvia, es decir a mayores intensidades de lluvia se tendrán duraciones menores del evento. Además, se presenta mayores intensidades de lluvia a mayores periodos de retorno.

Estudios realizados en nuestro país acerca de las relaciones IDF, realizados por (Amaya M.R., Lopez C.M., & Seoane S.M., 2009) mediante el análisis de eventos extremos para las ciudades de La Paz, El Alto, Cochabamba y Santa Cruz, fueron realizados en base al método de la curva promedio.

(Melina G., 2009), determinó las curvas IDF para la ciudad de Trinidad, aplicando el método tradicional y comparándolo con la caracterización temporal de eventos extremos con criterios adimensionales.

1.2. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA.

1.2.1. SITUACIÓN PROBLÉMICA.

Falta de información actualizada sobre las curvas IDF en el diseño de obras de desagüe pluvial en la ciudad de Tarija.

En las últimas décadas el autor (Mamani, 2018) menciona que la mayoría de las estaciones meteorológicas en el país no cuentan con información de datos pluviómetros como tampoco de datos de pluviógrafos. El problema es recurrente al no contar con las intensidades de las precipitaciones, porque estos datos son esenciales para el diseño de diferentes tipos de obras hidráulicas, carreteras, sistemas de riego, etc.

Actualmente la Norma Boliviana de Diseño de sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial (NB 688) no cuenta con ecuaciones de las curvas IDF para la ciudad de Tarija, lo cual se desconoce los datos e información para el diseño de Obras Hidráulicas.

Esta situación es preocupante, ya que da lugar a diseños de infraestructuras de evacuación de agua que no sean adecuados para las condiciones actuales de la ciudad. Por qué un sistema de alcantarillado pluvial basado en curvas IDF obsoletas puede ser insuficiente para proteger a la ciudad de las inundaciones.

En el área urbana de Tarija las lluvias intensas generan inundaciones temporales en las calles y avenidas de la ciudad, donde el sistema de desagüe pluvial es obsoleto e insuficiente, ocasionando daños a la infraestructura civil, especialmente a casas antiguas y patrimoniales e incluso centros de salud. Estos eventos adversos se presentan en sitios como: Avenida Las Américas, Avenida Integración y Avenida Circunvalación en intersección con las vías localizadas en lugares con depresiones de las áreas situadas en el casco viejo como la calle General Trigo, sector del Complejo Deportivo García Ágreda y de aquellos barrios de nueva creación o periurbanos con viviendas de construcción precaria y calles sin características hidráulicas que favorezcan la evacuación de las aguas pluviales (Aguilar, 2020).

1.2.2. CAUSAS MÁS PROBABLES.

Estas pueden ser a varios aspectos entre ellos, se identificó que no cuenta con suficientes ecuaciones de intensidad – duración – frecuencia para el diseño de caudales máximos en

sistemas de drenaje pluvial por la carencia de información actualizada, otro factor es el cambio climático, provocando un aumento de las precipitaciones intensas en la región, lo que puede estar agravando los problemas de inundaciones.

Por otra parte, el desarrollo urbano de la ciudad de Tarija se está expandiendo rápidamente, las superficies son más impermeables, como los techos y las carreteras, estas puedan aumentar la velocidad de escorrentía, lo que puede dar lugar a inundaciones, por ello es la carencia y el colapso de sistemas de drenaje pluvial han generado inundaciones dentro del radio urbano de la ciudad de Tarija, ya que no se cuenta con información actualizada para realizar proyectos y mitigar estos eventos adversos.

1.3.PREGUNTAS DE LA INVESTIGACIÓN.

La presente investigación resalta la siguiente pregunta del presente trabajo:

¿Cuál es la imprecisión de las curvas IDF en el cálculo de caudales máximos y cómo influyen dentro del diseño de sistemas de drenaje pluvial?

1.4.OBJETIVOS.

En la presente investigación se realizó los siguientes objetivos

1.4.1. OBJETIVO GENERAL.

Estimar de curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF), mediante métodos probabilísticos para el diseño de infraestructuras hidrológicas y drenajes pluviales en la ciudad de Tarija.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Recopilar los datos de precipitación máxima en 24 horas de la estación meteorológica Aeropuerto - Tarija del (SENAMHI).
- Analizar la disponibilidad de datos y periodo de registros históricos.
- Evaluar la calidad de datos para su ajuste mediante métodos probabilísticos.
- Estimar los parámetros estadísticos del modelo hidrológico.
- Elaborar las curvas IDF para diferentes periodos de retorno según la NB 688.

1.5.HIPÓTESIS

El desarrollo de curvas IDF a base de datos actualizados de precipitación acumulada en un día de la estación meteorológica Aeropuerto de Tarija representarán una variable importante en el cálculo de caudales de crecida para el diseño de Obras de evacuación pluvial más eficientes con el propósito de diseñar obras de drenaje funcionales y eficientes, para reducir y mitigar los riesgos de inundación en el radio urbano de la ciudad de Tarija.

1.6. JUSTIFICACION.

La información hidrológica necesaria, para el diseño de las obras de evacuación, tanto en cantidad y calidad no son fácilmente disponibles y su dificultad es mayor aún, cuando no se dispone de instrumentos de medición de precipitación, tales como pluviógrafos y en su mayoría se cuentan con pluviómetros, cuya base de datos no es suficiente para elaborar las relaciones IDF para diseños de caudales de crecida, por esta razón se utilizan los criterios adimensionales, que permitirán conocer las relaciones IDF con la utilización de la información disponible y actualizada.

En Bolivia, los registros de precipitación para zonas urbanas están geográficamente dispersos, que corresponden principalmente a lecturas diarias acumuladas y casos excepcionales se cuentan con datos históricos de más de 20 y 30 años. Sin embargo, para el análisis de eventos extremos se han desarrollado métodos estadísticos y probabilísticos para generar las tormentas de diseño, mediante hietogramas, que requieren paquetes de modelación hidrológica tal como indica el autor (Gomez, 2006).

Cuando en la zona de proyecto se dispone de curvas IDF para el lugar, se selecciona la curva correspondiente al período de retorno de diseño de la zona más cercana o similar. Si no están las curvas disponibles, y no existe información suficiente para construirlas, se puede recurrir a los coeficientes de duración generalizados para el lugar, de acuerdo a lo indicado en Hidrología, seleccionando valores de intensidad en mm por hora, para varias duraciones, en horas (URBANISMO, 1996)

CAPÍTULO II MARCO TEORICO

De acuerdo a la problemática presentada, a continuación, en el siguiente capítulo describiremos los conceptos claves para el desarrollo de la investigación, considerando que son pieza clave que fundamenta la importancia del desarrollo del tema.

2.1. NORMA BOLIVIANA DE DISEÑO DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO SANITARIO Y PLUVIAL (NB 688)

En la NB 688 se menciona que las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) constituyen la base hidrológica para la estimación de los caudales de diseño. Estas curvas sintetizan las características de los eventos extremos máximos de precipitación de una determinada zona y definen la intensidad media de lluvia para diferentes duraciones de eventos de precipitación con periodos de retorno específicos. Se debe verificar la existencia de curvas IDF para la localidad. Si existen, éstas deben analizarse para establecer su validez y confiabilidad para su aplicación al proyecto. Si no existen, es necesario obtenerlas a partir de información histórica de las lluvias.

La obtención de las curvas IDF debe realizarse con información pluviográfica de estaciones ubicadas en la localidad, derivando las curvas de frecuencia correspondientes mediante análisis puntuales de frecuencia de eventos extremos máximos.

2.2. PRECIPITACIÓN

Los datos de precipitaciones actualizados dentro de nuestra área de estudio pertenecen a los registrados por las estaciones meteorológicas de SENAMHI y AASANA.

Para poder caracterizar las variables meteorológicas de un área determinada es necesario contar con registros continuos, homogéneos y de la mayor longitud posible. Gran parte de las estadísticas meteorológicas presentan vacíos, por la supresión de estaciones, fallas en los instrumentos, errores de los operadores, etc. Estos problemas determinan que existan estaciones meteorológicas con estadísticas de mejor o peor calidad (Riveros, 2012)

La variabilidad interanual de las precipitaciones se expresa en la alternancia de períodos “húmedos” y períodos “secos”. A pesar de que los datos pluviométricos son limitados, es posible concluir que los aportes hídricos de origen pluvial, presentan fuertes variaciones interanuales, originadas por las diferentes condiciones climáticas que puedan suceder.

Estudios realizados por (Roche, 1993) habla sobre el clima en Bolivia, identificando al régimen pluviométrico como:

Distribución estacional de las precipitaciones, e indica que la estación lluviosa se centra en el verano con un máximo en enero y en segundo lugar en febrero. El periodo se inicia generalmente en diciembre para concluir en marzo. La estación seca cae en invierno, con un mínimo de mayo a julio. Dos períodos de transición separan estas dos épocas, uno en abril y otro de septiembre hasta aproximadamente en noviembre.

Distribución espacial de las precipitaciones, donde menciona que en llanura adyacente a los Andes. los valores crecen desde 600 mm/año en el sur hasta 2000 mm/año al norte. según isoyetas en forma de canal cuyo eje se ubica sobre los ríos Pilcomayo, Parapeti, Negro, Itenez y Mamaré. La lluvia aumenta así en dirección al Escudo Brasileño y los Andes un poco antes o sobre el primer relieve de los Andes se observan las máximas del país, con más de 6000 mm/año.

2.2.1. Precipitaciones medias areales

Cuando se pretende realizar un balance hídrico de precipitación/aportación sobre una cuenca, es básico aplicar un valor de precipitación media lo más real posible para que los valores de evapotranspiración, infiltración, etc, no estén condicionados a un error importante de magnitud debido a una precipitación mal estimada.

En este sentido, se podría recurrir a métodos de extrapolación de los datos puntuales que nos proporcionan las estaciones meteorológicas y, teniendo en cuenta las características de la cuenca, estimar una distribución espacial de la precipitación para poder calcular un valor medio (Sánchez, 2003) .

Los métodos más utilizados son los siguientes:

- Media aritmética.
- Polígonos de Thiessen.
- Cálculo de isohietas.
- Polígonos de Thiessen modificado.
- Métodos distribuidos basados en elementos finitos.

2.3. RÉGIMEN HIDROLÓGICO

Considerando que el régimen hidrológico de un río es el modo de variación de su caudal en el tiempo, en este sentido se puede distinguir las siguientes características: En pequeña escala, toma la forma de simples crecidas de algunas horas, o de algunos días. En escala media, es la variación estacional con los períodos de aguas altas y los estiajes. A gran escala, se trata de las variaciones interanuales, de los años secos o lluviosos. Es evidente que este modo de variación, y por lo tanto el régimen, dependen de las lluvias, lo que da un carácter aleatorio, pero también de la cuenca hidrográfica del río que tiene características bien definidas, que varían poco en el tiempo.

El régimen hidrológico puede caracterizarse principalmente por:

- Parámetros de caudal: caudales extremos, promedio de un período dado.
- Parámetros de tiempo: tiempo de subida, de concentración.
- Parámetros adimensionales: razón de caudales extremos, coeficiente de variación de una serie.

Una vez caracterizado el régimen, es interesante determinar similitudes entre cuencas para constituir zonas hidrológicamente homogéneas, pero también relacionar estos parámetros característicos con los diferentes factores que influyen sobre el régimen, ya sea que se trate de factores climáticos o físicos (Jacques, Robert , José, & Luis, 1993).

2.4. INTENSIDAD – DURACIÓN – FRECUENCIA

La intensidad, es la cantidad de agua caída por unidad de tiempo; la duración, indica que corresponde al tiempo que transcurre entre el comienzo y el fin de la tormenta; a la frecuencia, define, como el número de veces que se repite una tormenta, de características de intensidad y duración definidas en un período de tiempo más o menos largo, tomado generalmente en años. Asimismo, define al periodo de retorno, como el intervalo de tiempo promedio, dentro el cual un evento de magnitud definida, puede ser igualado o excedido (Béjar, 2011).

Los autores (Ven Te, David R., & Larry W., 1994) definen la tasa temporal de precipitación, como, la altura de agua de precipitación por unidad de tiempo, y ésta se expresa como:

$$i = P / Td$$

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

La duración de la lluvia de diseño y un periodo de retorno del evento dado, es posible asociar un valor para la intensidad de precipitación en cada una de las estaciones, esto se hace mediante las curvas IDF, desarrolladas para cada estación (Rodríguez, 2012).

En relación a las curvas, IDF, autores como (Nanía, 2003) indica que son curvas que relacionan la intensidad de la lluvia con su duración, donde para cada periodo de retorno, se tiene una curva diferente y/o una ecuación matemática que rige esta variación, tal y como data en la NB 688.

Diferentes problemas hidrológicos requieren un análisis de la distribución temporal y espacial de la precipitación en una tormenta. Básicamente el análisis de una tormenta en función al área, duración y cantidad, se realiza para determinar las cantidades máximas y mínimas de precipitaciones que caen dentro de diferentes duraciones y sobre áreas de diferentes tamaños (Linsley, Kohler, & Paulhus, 1982).

Generalmente las curvas IDF se determinan a base de un análisis con mayores registros de datos pluviográficos, pertenecientes a una estación de estudio. Actualmente las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), siguen siendo una de las herramientas más utilizadas en la estimación de caudales de diseño, especialmente en el diseño de obras de drenaje de vías y alcantarillados pluviales en las zonas urbanas, rurales y en la estimación de las tormentas de diseño en sitios donde, debido a la falta de información de caudales máximos, es necesario recurrir a los modelos hidrológicos de lluvia esorrentía para el cálculo de los caudales máximos (Vélez et al. 2002).

Guevara (2008) menciona que algunos análisis hidrológicos requieren de la estimación de intensidades o alturas de precipitación para duraciones y frecuencias preestablecidas. Dichos datos generalmente se encuentran disponibles en forma de tablas, gráficos o mapas. Una tormenta o lluvia de diseño se especifica a través de sus parámetros Intensidad, Duración y Frecuencia, ya sea expresadas como magnitudes o relacionadas en un modelo matemático que sededuce sabiendo que la Intensidad I , la Duración D y la Altura o Profundidad de lluvia P se relacionan como se indica a continuación:

$$P = I * D \quad \text{ó} \quad I = P/D$$

Para lluvias puntuales la relación IDF se expresa matemáticamente mediante la expresión general:

$$I = k * T^m / (D + c) * n$$

Dónde: T es la Frecuencia (período de retorno) expresado en años; D es la duración de diseño; c , k , m , n , son parámetros de ajuste del modelo.

El autor Maidment (1993), la Duración-Frecuencia de la lluvia (IDF) permiten calcular la intensidad promedio para cierta probabilidad de excedencia y duración. Mientras que Campos (1998) se refiere a las curvas IDF como gráficas en las cuales se concentran las características de las tormentas de la zona o región, con respecto a sus 3 variables principales: magnitud, duración y frecuencia. Considerando que la frecuencia es el inverso del período de retorno (T) o intervalo de recurrencia, el cual es el tiempo promedio, en años, en el que el evento puede ser igualado o excedido por lo menos una vez en promedio, se puede hablar de curvas Intensidad-Duración- Período de retorno (IDT) como sinónimo de las curvas IDF.

Por otra parte, Gonzales (2008) menciona que la lluvia está definida por tres variables: la intensidad, la duración y el periodo de retorno. La intensidad es la lámina o profundidad total de lluvia ocurrida durante una tormenta.

De esta forma, la altura de la lámina de agua caída en el lugar de la tormenta, incorpora la cantidad de lluvia precipitada y la duración del evento. Mientras que el periodo de retorno, es la frecuencia, o intervalo de recurrencia, es decir, el número de años promedio en el cual el evento puede ser igualado o excedido cuando menos una vez.

En el entendido, que el riesgo es mayor, cuanto menor es el periodo de retorno o recurrencia. Además, señala, que la relación probabilística entre la intensidad de la lluvia, su duración y frecuencia, es usualmente presentada en forma de gráficas. Estas representaciones son generalmente referidas como curvas de intensidad-duración-periodo de retorno, que resultan de unir los puntos que especifican la intensidad de la lluvia, en intervalos de diferente duración y, también en distintos periodos de retorno.

2.5. APLICACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS IDF

La distribución e intensidad de las lluvias tiene efecto en la premisa más básica para el diseño de riego: la disponibilidad de agua. Uno de los problemas con los que tropieza el proyectista al encarar el diseño de un sistema de riego en zona montañosa es la falta de información hidrológica histórica. Por ello la ingeniería de riesgo, se aplica como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno que provocaría un cierto grado de daño a las obras y éstas a su entorno, a causa de rebalses de agua o por construcción en taludes inestable, deslizamientos, socavación o la fuerza destructiva de avenidas, frente a tales situaciones se puede aplicar obras de protección necesarias, para que sean duraderas (Bottega y Hoogendam, 2004).

Uno de los autores sobresalientes Vásquez et al. (1998), menciona que la probabilidad de ocurrencia de la lluvia que se adopte dependerá del valor económico del cultivo, considerándose por lo general un valor de 75% a 80% de probabilidad de ocurrencia como el más adecuado, para el análisis estadístico.

La estimación de la intensidad de precipitación para diferentes duraciones y períodos de retorno son también necesarias para realizar estimaciones de inundaciones (Kothyari 1992), para lo cual es necesario utilizar registros de lluvia menores a 24 horas de duración y para regiones hidrológicas muy similares. A partir de ellos, se planteó una fórmula general para describir la relación IDF, la cual es representada por la ecuación:

$$I_t^T = \frac{a_0 * T^{a_1}}{t^{a_2}}$$

En donde, I_t^T = intensidad de precipitación para una duración t y un período de retorno o recurrencia de T años, y con, a_1 , a_2 y a_0 , constantes.

En 2006 Monsalve, analiza las relaciones intensidad-duración-frecuencia de las lluvias observadas, determinando los intervalos de duración de la lluvia, el tipo de ecuación y el número de parámetros de esa ecuación que mejor caracterizan aquellas relaciones.

Empleando la ecuación del tipo:

$$i = \frac{C}{(t-t_0)^n} \qquad C = K * T^m$$

En donde, i = intensidad de precipitación máxima

t = duración de la lluvia

t_0, C, n, K, m = constantes

Estudios realizados por Pereyra Díaz (2005), demostró que para el uso de la fórmula general de la intensidad de la lluvia-duración-período de retorno propuesta por Chen (1983) es necesario conocer los cocientes lámina de lluvia-duración y lámina de lluvia-período de retorno.

Debido a un mayor retorno de los periodos críticos (años secos o malos) que se presentarían cada 4 a 7 años en comparación con los 6 a 9 años que se presentaba anteriormente (Alegre 2008), se hace necesario y urgente cambiar los sistemas de riego a goteo, aspersión, etc, las cuales permitirían un manejo adecuado del escaso recurso hídrico a futuro y asimismo optimizar los rendimientos de los cultivos alternativos introducidos. (Alegre, 2008)

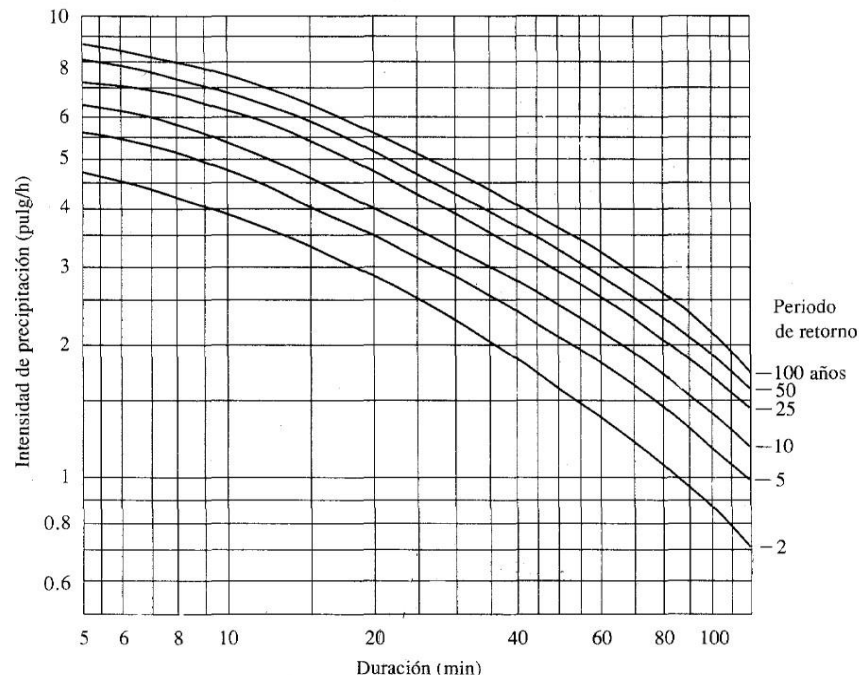
La intensidad es la tasa temporal de precipitación, es decir la profundidad por unidad de tiempo (mm/h ó pulg/h). Puede ser la intensidad instantánea o la intensidad promedio sobre la duración de la lluvia, que puede expresarse como:

$$i = \frac{P}{T_d}$$

Donde P es la profundidad de lluvia (mm o pulg) y T_d es la duración, dada usualmente en horas. La frecuencia se expresa en función del período de retorno T , que es el intervalo de tiempo promedio entre eventos de precipitación que igualan o exceden la magnitud de diseño (Chow, 1994).

Por otro lado, Campos (2008), menciona que el dimensionamiento de las obras hidráulicas se basa en la avenida de diseño y su evaluación estadística puede requerir de datos hidrométricos o pluviográficos. Debido a la escasez de ambos una solución ha sido utilizar regionalmente la información pluviométrica, generalmente más densa, para ello ha desarrollado algunas relaciones empíricas I-D-T entre la intensidad I , la duración d y el período de retorno T . tales como las de: Cheng-Lung Chen y F.C. Bell, entre otras.

Figura 1 Curvas de I-D-F para lluvia máxima en Chicago, EEUU



Fuente: Hidrología Aplicada, Chow et. al.

Las cuales han sido recomendadas para cuencas de diferentes partes del mundo, con características semejantes. Para probar la precisión del modelo de F.C. Bell, en el pronóstico de lluvias de diseño. Se ajustó al Estado de Tabasco México y se contrastó con el de Cheng-Lung Chen y el de F.C. Bell de parámetros originales. Considerando 14 pluviógrafos en el análisis. Deduciendo una metodología, para transferir las relaciones I-D-T, a las estaciones pluviométricas existentes. Por lo que, constituye una mejor alternativa, para el análisis de lluvias máximas y obtener avenidas de diseño en la región.

Sin embargo, Masis (2011) que realizó el estudio Hidrológico de la microcuenca de la Quebrada Agua Buena, San José de Costa Rica, en su publicación menciona que, para el diseño hidrológico e hidráulico de este tipo de obras, tradicionalmente se utiliza el evento de 24 horas de duración y 100 años de periodo de retorno como evento crítico de diseño, sin embargo, menciona que es importante evaluar si eventos con periodos de retorno menores pero con duraciones de 48, 72 o más horas resultarían más críticos en términos de volumen dado el patrón de lluvia de la zona en especial en el mes de octubre, que se presenta como el crítico.

Estudios realizados por Labra (2007) presenta la construcción de las curvas Intensidad - Duración - Frecuencia (IDF), en cinco estaciones pluviograficas de la Región del Biobio, que son Cerro El Padre, Chin Viejo, Embalse Coihueco, Embalse Diguillin y Quilaco; y cuatro estaciones pluviograficas pertenecientes a la Región de la Araucanía, que son Curacautín, Pucon, Pueblo Nuevo (Temuco) y Traiguen.

Con una la metodología empleada este autor determinó las alturas máximas de precipitación anual, a partir de información pluviografica facilitada por la Dirección General de Agua, con el propósito de calcular las intensidades máximas de lluvia, ocurridas en duraciones de 1, 2, 4, 6, 8, 12 y 24 horas.

Posteriormente el autor, analizo los datos de intensidades máximas y se ajustaron a la función de probabilidad de Gumbel, para posteriormente obtener la gráfica de las curvas IDF asociadas a los periodos de retorno de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75 y 100 años. Además de la gráfica de las curvas IDF, se obtuvo las tablas de uso practico y las tablas del parámetro k, las cuales ayudaron a la lectura de las gráficas y a la extrapolación de la información pluviografica a zonas cercanas y con características climáticas parecidas y que solo cuentan con información pluviométrica. Después determinó las expresiones matemáticas generales para cada estación, de acuerdo con el modelo analítico de Bernard y Yarnell, el que responde a la formula $I = (k \cdot T_m)^n$; y obtuvo una estimación de la intensidad de precipitación máxima en mm/h asociada a una duración y periodo de retorno determinados; y donde k, m y n son constantes de regresión.

Finalmente, el autor, determinó que los datos se ajustan a la distribución de probabilidad de Gumbel, y que los modelos de regresión asociados a cada estación presentan un nivel de ajuste satisfactorio.

2.6. ESTADÍSTICA HIDROLÓGICA

Según el mentor Aparicio (1997), existen dos métodos: el primero, llamado de intensidad – período de retorno, relaciona estas dos variables, y para cada duración por separado, mediante alguna de las funciones de distribución de probabilidad usadas en hidrología. El otro método relaciona simultáneamente la intensidad, la duración y el período de retorno en una familia de curvas, cuya ecuación es:

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

Donde k , m , n y c son constantes que se calculan mediante un análisis de correlación lineal múltiple, y en tanto que I y d corresponden a la intensidad de precipitación y la duración, respectivamente.

A su vez Pizarro (1986), señala, que las funciones de distribución estadística utilizadas en hidrología, pueden mencionarse las siguientes: Normal (Yevjevich 1972), Log-Normal (Chow 1954), Gamma (Yevjevich 1972), LogGamma (Yevjevich 1972), Logistic, loglogistic (Beirlant, Teugels y Vynckier 1996) y Pareto

Por tanto, este método tiene la ventaja teórica sobre el método de los momentos convencional en que por medio de este se caracteriza una amplia gama de funciones de distribución y, además, que es un método más robusto ante la presencia de puntos extraordinarios ó espureos en la muestra outliers, cuando se calculan los parámetros a partir de los datos muestrales (Hosking y Wallis 1997).

Estudios realizados por Rentería (2012) empleando métodos de análisis estadístico de las precipitaciones realizó con los registros contenidos en la base de datos denominada ERIC III. Asimismo, a partir de los datos de precipitaciones máximas diarias de las estaciones climatológicas cercanas a la zona del proyecto se ajustó un modelo de probabilidad, Gumbel de dos poblaciones, el cual tuvo un coeficiente de correlación de $R^2 = 0.99$, que es bueno.

También Rojas (2011), demostró que cuando se realiza un análisis con valores de precipitación se trabaja con tres variables: profundidad de la lluvia medida en milímetros, intensidad en milímetros por hora y duración en minutos u horas. Cuando se realiza un análisis de frecuencia, se introduce una nueva variable definida como período de retorno. Para interpretar estas variables, así como la interpolación y extrapolación de valores, se elaboran las curvas IDF. El procedimiento para la generación de estas curvas consiste en graficar los valores obtenidos en el análisis de frecuencia realizado en este estudio mediante el análisis de distribución de frecuencias de Gumbel.

Estas curvas están expresadas de una manera gráfica, con la duración en el eje horizontal normalmente establecido en minutos u horas, mientras que en el eje vertical se muestra la

intensidad de precipitación en milímetros por hora, en el gráfico se muestran una serie de curvas para cada uno de los períodos de retorno.

Otra forma de desarrollar las curvas IDF es a través de una forma analítica, mediante un modelo de regresión lineal múltiple que relacione simultáneamente la intensidad, duración y período de retorno de un grupo de curvas establecidas para una región o bien para una estación específica, generando una ecuación que puede ser extrapolada a aquellas zonas que carezcan de registros pluviográficos. Este procedimiento es conocido como Método Analítico, el cual consiste en ajustar los valores originales de precipitación a una distribución teórica.

Según mi perspectiva esos resultados de estos modelos debieron ser validados estadísticamente por medio de las hipótesis de linealidad y verificación de los supuestos de regresión.

Hay que recalcar que existen diferentes tipos de pruebas, en su estudio se realizó a partir de la Distribución de Fisher y del análisis del valor establecido para el Coeficiente de Determinación. Por otro lado, para las curvas se realiza la prueba de bondad de ajuste, a partir del estadístico de Kolmogorov Smirnov (K-S), el cual consiste en buscar para cada recta la distancia máxima entre los puntos originales y la recta trazada, la cual se compara con el valor crítico que se encuentran en las tablas establecidas para este test, cuyo valor depende del número de datos de la muestra y del valor del nivel de significación. Para que se acepte el ajuste de la recta, se debe cumplir que la distancia máxima entre las rectas y los puntos originales debe ser menor que el valor crítico del estadístico Kholmogorov Smirnov K-S, en caso contrario se deberá trazar una nueva recta. Para estudios hidrológicos normalmente se considera un nivel de significación $\alpha=0,05$.

2.7. ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE SERIES DE PRECIPITACIONES

Hay que entender que los resultados se analizan estadísticamente teniendo en cuenta cada una de las series obtenidas y las relaciones entre ellas. A partir del análisis inicial de las medidas de tendencia central, de variabilidad y de forma mediante las que se describen estadísticamente cada una de las dos series utilizadas, se determina si las muestras proceden de una distribución normal.

Por otra parte, la variabilidad temporal a medio y largo plazo se determina gráficamente a partir de las medias móviles de 5 años. También se utiliza la curva de valores normales acumulados,

en la cual los tramos descendentes coinciden con períodos de disminución de las de avenidas o de precipitaciones y los ascendentes con aumento de las mismas (Campos, 1992).

Sin embargo, los modelos predictivos más adecuados para el análisis temporal de las series se obtienen mediante un análisis de los residuos de los posibles modelos a utilizar. En cualquier caso, el test secuencial no paramétrico de Kendall es el que fija las etapas más destacadas en la evolución temporal de las variables. (Bullón, 2012).

Por último estudios realizados por Ramirez et al (1995) sobre la variabilidad espacial indican que la metodología empleada partió con la extracción de la información básica a través de la base de datos pluviométricos y pluviográficos creada mediante el paquete PLUVIOM de la ORSTOM, consistente en tormentas registradas que alcanzaron valores mayores o iguales a los 30 mm en 24 horas (pluviometría) al menos en una cantidad mínima de pluviómetros.

2.8. PERIODO DE RETORNO

El periodo de retorno, representado por T, es un intervalo de recurrencia que se puede definir como el tiempo que existe entre una y otra ocurrencia de un evento extremo, es decir que pasan un número determinado de años para que vuelva a ocurrir un evento de las características muy similares o iguales. Se puede decir que, es el intervalo de ocurrencia T ó el tiempo entre ocurrencias del evento (Nanía, 2003) .

Por ello el Periodo de Retorno de un evento con una magnitud dada puede definirse como el intervalo de recurrencia promedio entre eventos que igualan o exceden una magnitud especificada.

El mentor (Campos, 1992) indica que cuando la variable aleatoria considerada es una magnitud relacionada con algún fenómeno natural (caudales, velocidades de viento), es conveniente referirse a periodos de retorno en lugar de a 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 transcurrirán en promedio entre dos oportunidades en que la variable supere dicho valor, es decir:

$$p = P(x \geq X) = \frac{1}{T}$$

El análisis estadístico consiste en hallar la función que mejor represente el comportamiento de la variable aleatoria x , para luego asignar a cada valor X una probabilidad o un periodo de recurrencia. Si $\emptyset(x)$ es la función de distribución, resultando de manera general a:

$$P = 1 - \emptyset(x)$$

Los periodos de retorno seleccionados para el análisis probabilístico en el presente trabajo son: 1, 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, los cuales se pueden analizar en forma disgregada o no disgregada.

2.9. MODELOS HIDROLÓGICOS PARA REPRESENTAR CURVAS IDF

Desde hace mucho tiempo se ha realizado numerosos ensayos para representar a las curvas IDF, estos planteamientos de las primeras relaciones matemáticas, que modelan a dichas curvas, datan desde el inicio de los años treinta del siglo pasado. (Pizarro, s/f).

- Modelo propuesto por Sherman (1931)

$$I = \frac{K * T^m}{(D + b)^n}$$

- Modelo propuesto por Bernard (1932)

$$I = \frac{k * T^m}{D^n}$$

Donde:

k, m, n, b = Son parámetros adimensionales
 T = Periodo de Retorno en años.
 I = Intensidad Máxima de Precipitación.
 D = Duración en minutos u horas.

2.10. ANÁLISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE

Estudios realizados por (Amaya M.R., Lopez C.M., & Seoane S.M., 2009) indican que la Estadística Inferencial permite trabajar con una variable a nivel de intervalo o razón, así también se puede comprender la relación de dos o más variables y nos permitirá relacionar mediante

ecuaciones, una variable en relación de la otra variable llamándose Regresión Lineal y una variable en relación a otras variables llamándose Regresión múltiple.

La aplicación de la regresión múltiple al modelo propuesto, el cual tiene una función exponencial, tiene la principal tarea de determinar si existe o no, relación de dependencia entre las variables y la determinación de los valores de predicción a través de una expresión simple. La regresión lineal múltiple es matemáticamente similar a la regresión lineal simple, siendo el siguiente modelo lineal:

$$y = a_0 + a_1 * x_1 + \dots + a_m * x_m$$

Dónde:

m = número de variables independientes

a_0, a_1, a_m = parámetros a estimar

y = función lógica dependiente de x

Para la estimación de los parámetros podemos hacer una extensión del método de los mínimos cuadrados, para el caso de una regresión lineal múltiple.

Donde, n es el número de grupos de elementos de la muestra. La solución del sistema de ecuaciones anterior son los coeficientes a , siendo que el número de ecuaciones normales debe ser igual al número de incógnitas que se tienen a fin de tener un sistema sea consistente. En el caso particular en que se tengan tres ecuaciones con tres incógnitas, la expresión matricial de las expresiones normales es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} \sum y \\ \sum x_1 * y \\ \sum x_2 * y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum x_1 & \sum x_2 \\ \sum x_1 & \sum (x_1^2) & \sum (x_1 * x_2) \\ \sum x_2 & \sum (x_1 * x_2) & \sum (x_2^2) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

Que se la puede expresar también de la siguiente forma:

$$y = x * a$$

De donde la solución es la matriz de coeficientes “a”

$$a = x^{-1} * y$$

CAPÍTULO III MARCO PRÁCTICO

En este capítulo se trabajó bajo fundamentos y metodologías consolidadas del capítulo anterior, con la finalidad de seguir la lógica y esencia de la investigación, por tanto, iniciamos en la fuente disponible y accesible del Senamhi (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología), un análisis y tratamiento de calidad de datos obtenidos, para su ajuste con modelos probabilísticos e hidrológicos y obtener los parámetros de la ecuación de IDF y su gráfica.

3.1. DATOS SENAMHI

Se hizo la solicitud de datos en la plataforma Senamhi con la finalidad de obtener datos históricos de la estación meteorológica de Aeropuerto Tarija, ubicada en longitud -64.70 y latitud -21.55, donde satisfactoriamente se dispuso una base de datos de 79 años de registro, que son la base fundamental para el inicio del trabajo:

Figura 2 Plataforma SENAMHI para la obtención de datos

The screenshot shows the SENAMHI web platform interface. At the top, there is a header with the SENAMHI logo and the text "SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA" and "ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA". Below the header is a navigation bar with links: Inicio, Institución, Transparencia, Meteorología, Clima, Hidrología, Sistemas de Información, and Contacto. The main content area is titled "INFORMACIÓN NACIONAL DE DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS". On the left, there are several dropdown menus and buttons for selecting data: "Seleccionar tipo de exportación" (Municipal), "Seleccione el area" (Tarija), "Estaciones" (Tarija Aeropuerto(Activo)), "Variables" (Precipitación), and "Tipo de dato". On the right, there is a map of Bolivia showing the location of Tarija. The map includes labels for various cities and regions, such as La Paz, Cochabamba, Santa Cruz, Oruro, Sucre, Potosí, Chuquisaca, Tarija, Boquerón, Calama, and Jujuy. The map is credited to "Leaflet | © OpenStreetMap contributors".

Fuente: Senamhi <https://senamhi.gob.bo/index.php/sysparametros>

3.2. OBTENCIÓN Y SELECCIÓN DE DATOS

Se logra descargar con éxito de la plataforma Senamhi un total de 28094 datos de precipitación diaria expresadas en milímetros con un periodo de registro del año 1945 hasta el 2023, siendo

una base histórica y preliminar para el desarrollo de la investigación, a continuación, se muestra una tabla resumen de todos los datos, para visualizar la serie completa ir a Anexo A.

Tabla 1 Base de datos de precipitación diaria en mm

Gestión	Mes	Día	Estación	Longitud	Latitud	Altura	Precipitación
1945	1	1	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	31.00
1945	1	2	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	43.00
1945	1	3	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	9.00
1945	1	4	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	1	5	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	1	6	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	10.00
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
2023	12	30	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	44.40

Fuente: Extraída de plataforma senamhi <https://senamhi.gob.bo/index.php/sysparametros>

3.3. TRATAMIENTO DE DATOS DISPONIBLES

Con la finalidad de identificar los datos máximos ocurridos en cada mes del año, se procede a realizar la selección solamente de máximos ocurridos en cada mes de cada gestión, se observan datos de 0.00 mm, lo cual muestra que son meses donde no se presentaron precipitaciones, se deduce la siguiente tabla de resumen, la tabla completa se encuentra en el Anexo B:

Tabla 2 Precipitaciones máximas mensuales en mm

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1945	72.00	25.00	38.00	6.00	0.00	0.00	9.00	12.00	26.00	47.00	61.00	37.00
1946	46.00	41.00	44.40	5.90	14.10	0.00	0.00	0.00	7.00	16.50	19.00	22.00
1947	72.50	41.40	15.80	13.20	5.50	0.00	0.00	6.50	3.70	14.20	30.00	36.20
1948	58.20	52.00	39.10	7.50	3.10	0.00	0.00	0.00	3.10	16.60	23.00	35.75
1949	57.00	35.00	51.00	7.20	0.00	0.00	0.00	0.00	15.50	6.40	31.00	35.30
1950	45.20	40.60	28.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.90	22.00	9.90	12.00
1951	55.20	27.00	9.90	38.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.50	0.00	55.00
1952	39.00	18.10	40.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.00	14.00	68.30	12.10
1953	38.20	34.00	35.20	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.00	8.75	41.40	23.50
1954	45.10	51.00	60.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.00	3.50	125.00	39.90
1955	15.00	56.00	37.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.10	21.00	16.30
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2023	23.70	33.80	15.20	18.70	0.10	0.10	0.00	0.30	1.90	55.30	17.40	44.40

Fuente: Elaboración propia

Para fines de la investigación se procede a seleccionar las precipitaciones máximas ocurridas en cada año con el propósito de evaluar la calidad de datos seleccionados en estudio y su consiguiente análisis para la obtención de las curvas IDF, a continuación, se muestra un resumen de datos finales para su uso, la tabla completa se encuentra en el Anexo C.

Tabla 3 Precipitaciones máximas anuales en mm

Año	Máximo
1945	72.00
1946	46.00
1947	72.50
1948	58.20
1949	57.00
1950	45.20
1951	55.20
1952	68.30
1953	41.40
1954	125.00
1955	56.00
.	.
.	.
.	.
2023	55.30

Fuente: Elaboración propia

3.4. ANÁLISIS DE CALIDAD DE DATOS

Para verificar la calidad de datos se procede a realizar el ajuste estadístico para ver si son datos que se ajustan la probabilidad que ocurra un evento máximo y si este es excedido o no, para ello, se ordenó los 79 datos de mayor a menor todos los valores máximos, obteniendo el primera instancia la probabilidad de ocurrencia, posteriormente se determinó el periodo de retorno para esa probabilidad de ocurra dicha precipitación, para así determinar la variable reducida que esta en función de la probabilidad de excedencia, dando como resultado las probabilidades de que si ocurra un evento extremo, generando de esta forma la siguiente tabla, la tabla completa se muestra en el Anexo D.

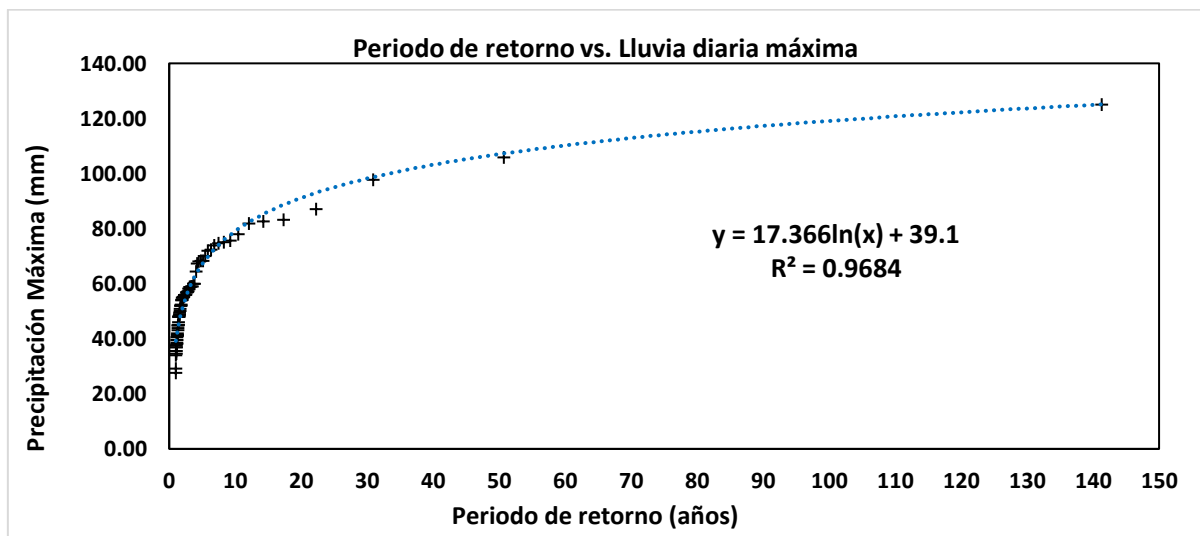
Tabla 4 Análisis de calidad de datos

Posición	Máxima diaria (mm)	Probabilidad de Excedencia P	Periodo de retorno T	Log T	Probabilidad de no Excedencia q	Variable reducida y	Prob ($x \leq X_t$)
n							
1	125.00	0.01	141.29	2.15	0.99	4.95	99.29
2	106.00	0.02	50.72	1.71	0.98	3.92	98.03
3	97.80	0.03	30.91	1.49	0.97	3.41	96.76
4	87.20	0.04	22.22	1.35	0.96	3.08	95.50
5	83.30	0.06	17.35	1.24	0.94	2.82	94.24
6	82.60	0.07	14.23	1.15	0.93	2.62	92.97
7	82.00	0.08	12.06	1.08	0.92	2.45	91.71
8	78.00	0.10	10.47	1.02	0.90	2.30	90.44
9	75.80	0.11	9.24	0.97	0.89	2.17	89.18
10	75.20	0.12	8.28	0.92	0.88	2.05	87.92
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
79	27.70	0.99	1.01	0.00	0.01	-1.60	0.71

Fuente: Elaboración propia

Para visualizar el comportamiento de los datos, se representó la curva de periodo de retorno vs la precipitación máxima, donde se muestra que, a periodos cortos de tiempo, las precipitaciones fueron en el orden de 40 a 80 mm, mismas que son causales de inundaciones bruscas por intensidades altas en periodos cortos de tiempo.

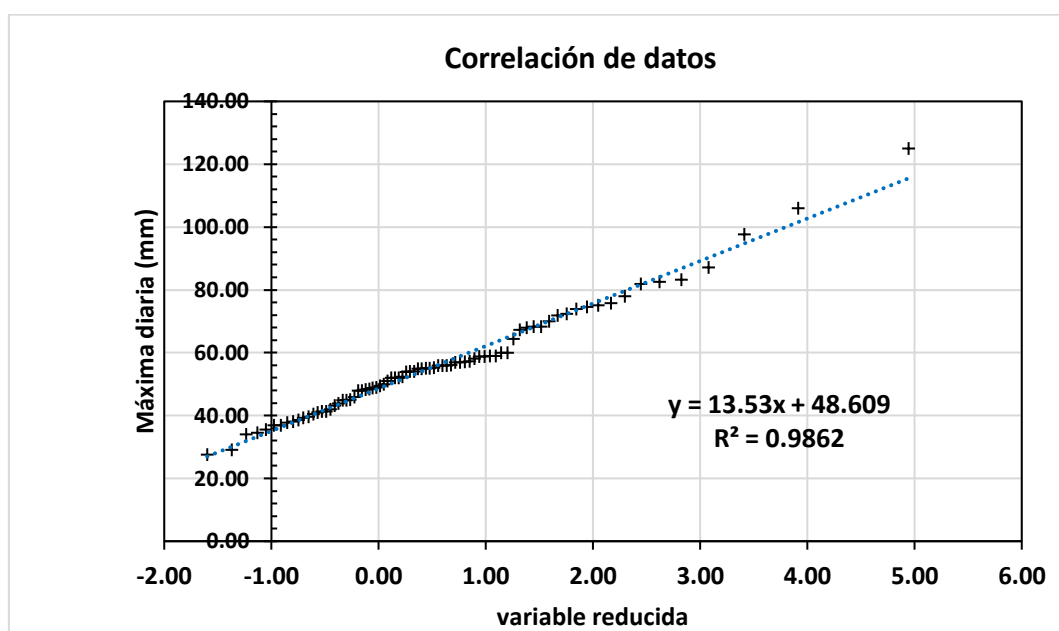
Figura 3 Comportamiento de la precipitación a función al tiempo



Fuente: Elaboración propia

Así mismo se puede graficar la correlación que existe entre los datos medidos con los datos probables de ocurrencia en función a la variable reducida, obteniendo un coeficiente de correlación mayor a 0.98 lo cual significa que hay una correlación de datos y son óptimos para su uso consiguiente.

Figura 4 Correlación de datos de precipitación máxima



Fuente: Elaboración propia

Se destaca que la mayor concentración de datos correlativos está dentro de 1, lo cual garantiza una buena calidad de datos para poder aplicar una ley de distribución probabilísticas.

3.5. APLICACIÓN DE LA LEY DE DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL

De acuerdo a bibliografía, para trabajar con datos máximos, se recomienda utilizar la ley de distribución de Gumbel, que aplica a datos extremos, para ello se debe determinó los parámetros de la función de distribución, entre ellas la media, desviación estándar, los parámetros de escala y la moda correspondientes a la función de distribución, por tanto, se dispuso los datos de precipitación denominados como (xi) y la operación del valor observado menos la media del conjunto de datos (Xi-X), a continuación se muestra un resumen de lo mencionado, la tabla completa se encuentra en el Anexo E:

Tabla 5 Datos de precipitación (xi) en mm

Nº	Año	Precipitación (mm)	
		x_i	$(x_i - \bar{x})^2$
1	1945	72.00	245.378
2	1946	46.00	106.821
3	1947	72.50	261.293
4	1948	58.20	3.477
5	1949	57.00	0.442
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
79	2023	55.30	1.072
Suma		4450.5	22935.2

Fuente: Elaboración propia

a) La media aritmética de la serie de datos considerados:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{4450.5}{79} = 56.34 \text{ mm}$$

b) Desviación estándar o típica de la muestra de datos considerados:

$$s = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{n - 1} = 17.15 \text{ mm}$$

c) Parámetro (α) de escala:

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \times S = 13.37 \text{ mm}$$

d) Parámetro (μ) de moda:

$$\mu = \bar{x} - 0,5772 * \alpha = 48.62 \text{ mm}$$

La manipulación de estas variables contribuyó al cálculo de las precipitaciones diarias máximas probables para distintas frecuencias y para varios periodos de retorno planteados (1, 2, 5, 10, 20, 50, 100) años.

3.5.1. Cálculo de las precipitaciones diarias máximas probables para diferentes periodos de retorno

Con los parámetros ya establecidos, se procedió a aplicar la Funcion de distribución de la Ley de Gumbell para distintos periodos de retorno como indica la NB 688, mediante la siguiente ecuación:

$$F_{(x)} = e^{-e^{-\left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)}}$$

También vale mencionar que se incrementó un 13% de factor de seguridad por errores posibles existentes a la hora de lecturar los valores medidos, por operacionalidad u otros factores externos que se frecuentan en la medición de datos correspondientes a las estaciones meteorológicas.

Tabla 6 Precipitaciones máximas diarias probables para diferentes periodos de retorno

<i>Periodo</i>	<i>Variable</i>	<i>Precip.</i>	<i>Prob. de</i>	<i>Corrección</i>
<i>Retorno</i>	<i>Reducida</i>	<i>(mm)</i>	<i>ocurrencia</i>	<i>intervalo fijo</i>
<i>Años</i>	<i>YT</i>	<i>XT'(mm)</i>	<i>F(xT)</i>	<i>XT (mm)</i>
1	-1.933	22.777	0.001	25.738
2	0.367	53.519	0.500	60.476
5	1.500	68.672	0.800	77.600
10	2.250	78.706	0.900	88.937
20	2.970	88.330	0.950	99.812
50	3.902	100.787	0.980	113.889
100	4.600	110.122	0.990	124.438

Fuente: Elaboración propia

3.6. COEFICIENTES DE DESAGREGACIÓN DE PRECIPITACIÓN

Es importante desagregar los datos diarios en intervalos de horas, para entender la distribución horaria ocurrida en el día, para ellos se utilizó los coeficientes de desagregación de (Campos, 1992), donde dicho autor en función a muchos estudios encuentra el comportamiento de la precipitación en un día, muy útiles para nuestro cálculo.

Tabla 7 Coeficientes de desagregación de precipitación

Duraciones, en horas									
1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
0.30	0.39	0.46	0.52	0.57	0.61	0.68	0.80	0.91	1.00

Fuente: Extraído del libro Procesos del Ciclo Hidrológico (Campos, 1992).

3.7. DETERMINACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN MÁXIMA DIARIA

Teniendo en cuenta los coeficientes que se presentan en la tabla 7 se determinaron las precipitaciones máximas Pd (mm) para diferentes tiempos de duración y periodos de retorno. Se utiliza el término XT (mm), el cual multiplicado por cada uno de los coeficientes corresponde al tiempo de duración.

Tabla 8 Valores de precipitación máxima para diferentes periodos de retorno.

Tiempo de Duración	Cociente	Precipitación máxima Pd (mm) por tiempos de duración						
		1 años	2 años	5 años	10 años	20 años	50 años	100 años
24 hr	X24	25.7381	60.4760	77.5998	88.9373	99.8125	113.8893	124.4379
18 hr	X18=91%	23.4216	55.0331	70.6158	80.9330	90.8294	103.6393	113.2385
12 hr	X12=80%	20.5904	48.3808	62.0799	71.1498	79.8500	91.1114	99.5503
8 hr	X8=68%	17.5019	41.1237	52.7679	60.4774	67.8725	77.4447	84.6178
6 hr	X6=61%	15.7002	36.8904	47.3359	54.2518	60.8856	69.4725	75.9071
5 hr	X5=57%	14.6707	34.4713	44.2319	50.6943	56.8931	64.9169	70.9296
4 hr	X4=52%	13.3838	31.4475	40.3519	46.2474	51.9025	59.2224	64.7077
3 hr	X3=46%	11.8395	27.8190	35.6959	40.9112	45.9137	52.3891	57.2414
2 hr	X2=39%	10.0378	23.5856	30.2639	34.6856	38.9269	44.4168	48.5308
1 hr	X1=30%	7.7214	18.1428	23.2799	26.6812	29.9437	34.1668	37.3314

Fuente: Elaboración propia

3.8. CÁLCULO DE INTENSIDADES DE LLUVIA

El proceso referente al cálculo de las intensidades de lluvia I (mm) se desarrolló partiendo de los datos de duración de la precipitación máxima diaria Pd (mm) y frecuencia de la misma, mediante la fórmula:

$$I = \frac{P \text{ (mm)}}{t_{\text{duración}} \text{ (hr)}}$$

Tabla 9 Intensidades de lluvia (mm/hr) para diferentes periodos de retorno

Tiempo de duración		Intensidad de la lluvia (mm /hr) según el Periodo de Retorno						
Hr	min	1 años	2 años	5 años	10 años	20 años	50 años	100 años
24 hr	1440	1.0724	2.5198	3.2333	3.7057	4.1589	4.7454	5.1849
18 hr	1080	1.3012	3.0574	3.9231	4.4963	5.0461	5.7577	6.2910
12 hr	720	1.7159	4.0317	5.1733	5.9292	6.6542	7.5926	8.2959
8 hr	480	2.1877	5.1405	6.5960	7.5597	8.4841	9.6806	10.5772
6 hr	360	2.6167	6.1484	7.8893	9.0420	10.1476	11.5787	12.6512

5 hr	300	2.9341	6.8943	8.8464	10.1389	11.3786	12.9834	14.1859
4 hr	240	3.3459	7.8619	10.0880	11.5619	12.9756	14.8056	16.1769
3 hr	180	3.9465	9.2730	11.8986	13.6371	15.3046	17.4630	19.0805
2 hr	120	5.0189	11.7928	15.1320	17.3428	19.4634	22.2084	24.2654
1 hr	60	7.7214	18.1428	23.2799	26.6812	29.9437	34.1668	37.3314

Fuente: Elaboración propia

3.7. APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO

Mediante un modelo de regresión lineal se extrapoló la ecuación generada, a zonas que no cuentan con registros pluviográficos, pero que se localizan relativamente cerca. A esta ecuación se le aplicó la siguiente modificación:

$$I = \frac{K * T^m}{D^n}$$

Donde k, m y n son constantes de regresión lineal múltiple, T es el periodo de retorno en años, D la duración en minutos u horas y por último I que representa la intensidad de la precipitación en mm/hr.

Esta metodología requiere de varios pasos para lograr el valor de los parámetros, coeficientes y constantes de regresión que son los siguientes:

Se necesitó la intensidad de acuerdo al tiempo de duración en minutos y por supuesto al periodo de retorno

- Se obtiene los logaritmos naturales de estos dos valores, y sus respectivas sumas.
- La multiplicación entre ellos y su adición.
- El cuadrado del logaritmo natural del tiempo de duración y su suma.
- Para encontrar el valor de Ln (d) del cambio de variable ($d = K * T^m$) y el coeficiente (n) para cada periodo de retorno, se hacen operaciones matemáticas entre los resultados encontrados anteriormente.

Luego se resumió la aplicación de la regresión potencial hallando el promedio del término constante (d) y del coeficiente (n) de regresión

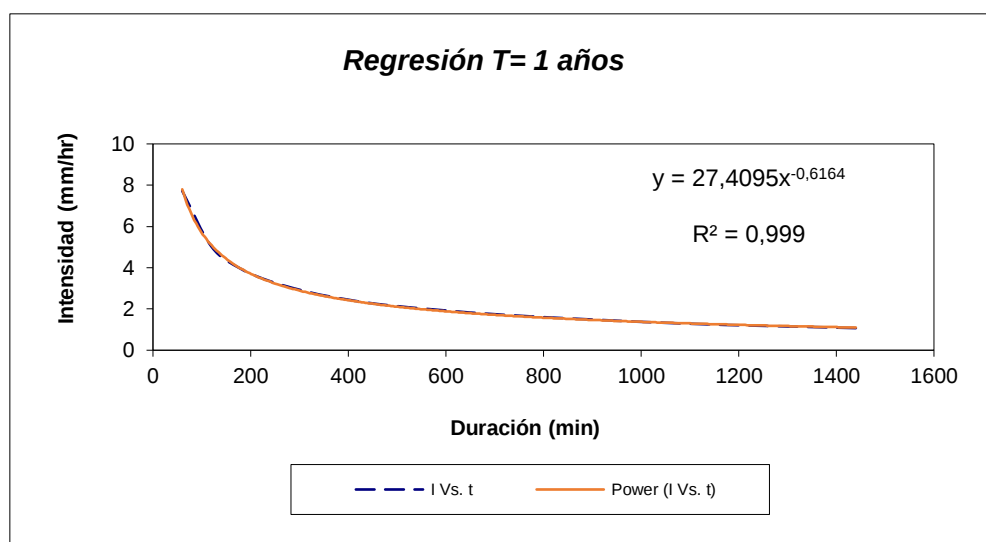
Obteniendo de esta manera cada tabla con su gráfica para cada periodo de retorno:

Tabla 10 Regresión Potencial para T=1 año

<i>Periodo de retorno para T = 1 años</i>						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	1440	1.0724	7.2724	0.0699	0.5085	52.8878
2	1080	1.3012	6.9847	0.2633	1.8390	48.7863
3	720	1.7159	6.5793	0.5399	3.5523	43.2865
4	480	2.1877	6.1738	0.7829	4.8333	38.1156
5	360	2.6167	5.8861	0.9619	5.6619	34.6462
6	300	2.9341	5.7038	1.0764	6.1396	32.5331
7	240	3.3459	5.4806	1.2077	6.6192	30.0374
8	180	3.9465	5.1930	1.3728	7.1290	26.9668
9	120	5.0189	4.7875	1.6132	7.7233	22.9201
10	60	7.7214	4.0943	2.0440	8.3688	16.7637
10	4980	31.8609	58.1555	9.9321	52.3749	346.9435
<i>Ln (d) =</i>	4.5778		<i>d =</i>	97.3034	<i>n =</i>	-0.6164

Fuente: Elaboración propia

Figura 5 Regresión potencial para T=1 año



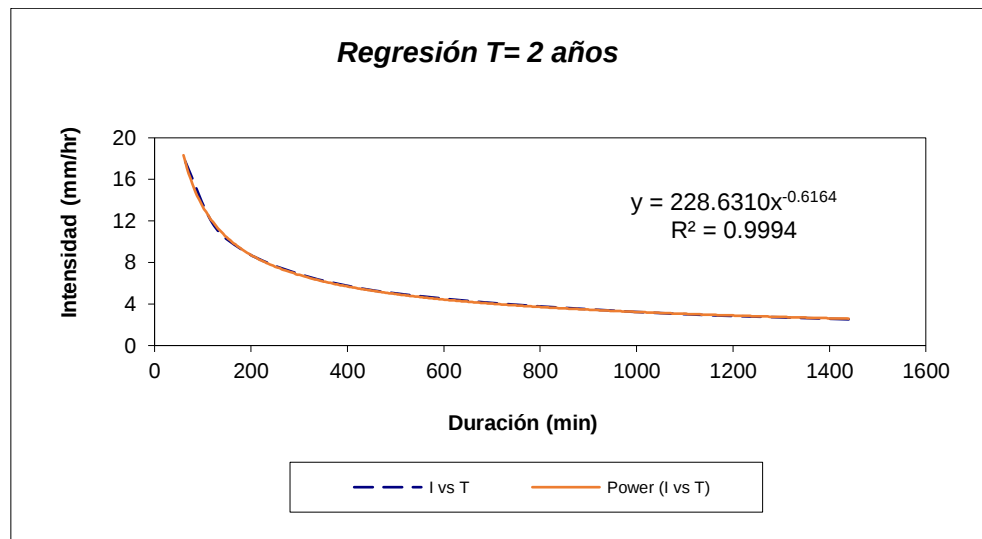
Fuente: Elaboración propia

Tabla 11 Regresión Potencial para T=2 años

<i>Periodo de retorno para T = 2 años</i>						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	1440	2.5198	7.2724	0.9242	6.7211	52.8878
2	1080	3.0574	6.9847	1.1176	7.8059	48.7863
3	720	4.0317	6.5793	1.3942	9.1728	43.2865
4	480	5.1405	6.1738	1.6371	10.1074	38.1156
5	360	6.1484	5.8861	1.8162	10.6903	34.6462
6	300	6.8943	5.7038	1.9307	11.0122	32.5331
7	240	7.8619	5.4806	2.0620	11.3012	30.0374
8	180	9.2730	5.1930	2.2271	11.5653	26.9668
9	120	11.7928	4.7875	2.4675	11.8131	22.9201
10	60	18.1428	4.0943	2.8983	11.8665	16.7637
10	4980	74.8625	58.1555	18.4749	102.0557	346.9435
<i>Ln (d) =</i>	<i>5.4321</i>	<i>d =</i>	<i>228.6310</i>	<i>n =</i>	<i>-0.6164</i>	

Fuente: Elaboración propia

Figura 6 Regresión Potencial para T=2 años



Fuente: Elaboración propia

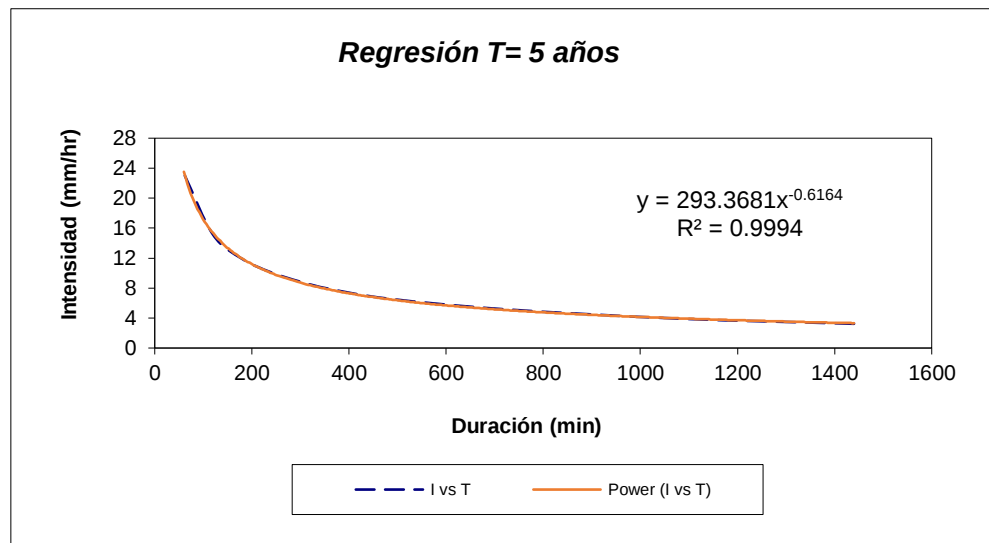
Tabla 12 Regresión Potencial para T=5 años

<i>Periodo de retorno para T = 5 años</i>						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	1440	3.2333	7.2724	1.1735	8.5342	52.8878
2	1080	3.9231	6.9847	1.3669	9.5473	48.7863
3	720	5.1733	6.5793	1.6435	10.8131	43.2865
4	480	6.5960	6.1738	1.8865	11.6466	38.1156

5	360	7.8893	5.8861	2.0655	12.1578	34.6462
6	300	8.8464	5.7038	2.1800	12.4343	32.5331
7	240	10.0880	5.4806	2.3113	12.6676	30.0374
8	180	11.8986	5.1930	2.4764	12.8600	26.9668
9	120	15.1320	4.7875	2.7168	13.0067	22.9201
10	60	23.2799	4.0943	3.1476	12.8873	16.7637
10	4980	96.0600	58.1555	20.9681	116.5550	346.9435
$Ln(d) =$		5.6814	$d =$	293.3681	$n =$	-0.6164

Fuente: Elaboración propia

Figura 7 Regresión Potencial para T=5 años

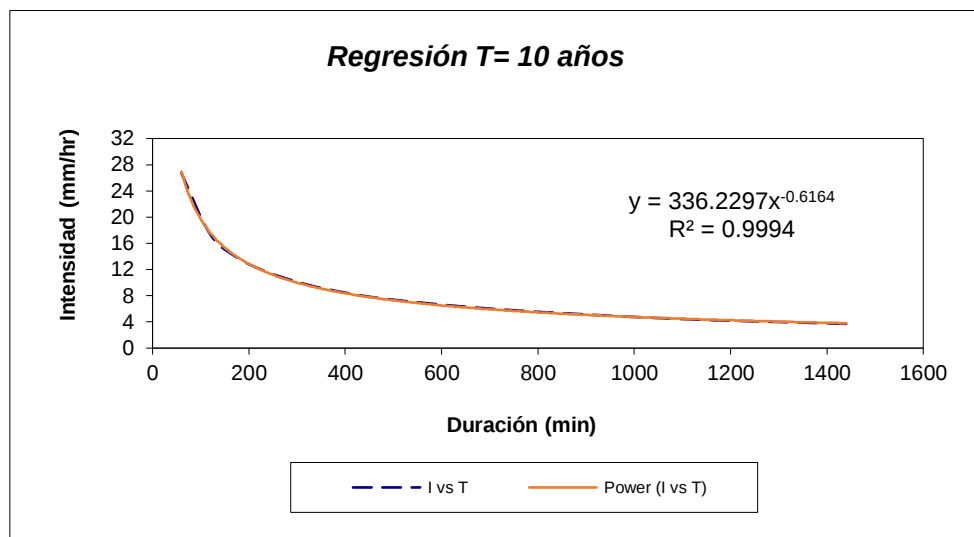


Fuente: Elaboración propia

Tabla 13 Regresión Potencial para T=10 años

<i>Periodo de retorno para T = 10 años</i>						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	1440	3.7057	7.2724	1.3099	9.5260	52.8878
2	1080	4.4963	6.9847	1.5032	10.4998	48.7863
3	720	5.9292	6.5793	1.7799	11.7103	43.2865
4	480	7.5597	6.1738	2.0228	12.4885	38.1156
5	360	9.0420	5.8861	2.2019	12.9605	34.6462
6	300	10.1389	5.7038	2.3164	13.2121	32.5331
7	240	11.5619	5.4806	2.4477	13.4150	30.0374
8	180	13.6371	5.1930	2.6128	13.5681	26.9668
9	120	17.3428	4.7875	2.8532	13.6596	22.9201
10	60	26.6812	4.0943	3.2840	13.4457	16.7637
10	4980	110.0945	58.1555	22.3317	124.4854	346.9435
$Ln(d) =$		5.8178	$d =$	336.2297	$n =$	-0.6164

Figura 8 Regresión Potencial para T=10 años



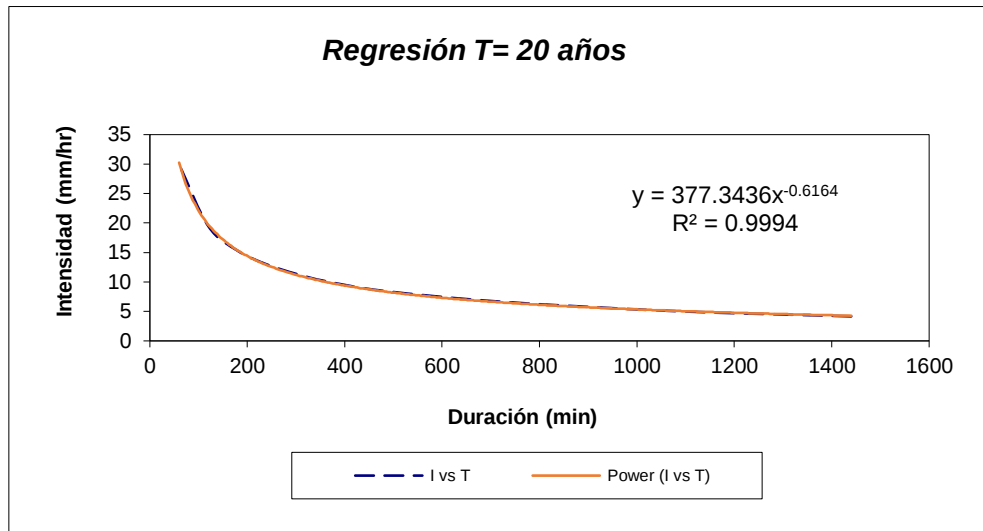
Fuente: Elaboración propia

Tabla 14 Regresión Potencial para T=20 años

<i>Periodo de retorno para T = 20 años</i>						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	1440	4.1589	7.2724	1.4252	10.3649	52.8878
2	1080	5.0461	6.9847	1.6186	11.3055	48.7863
3	720	6.6542	6.5793	1.8952	12.4693	43.2865
4	480	8.4841	6.1738	2.1382	13.2007	38.1156
5	360	10.1476	5.8861	2.3172	13.6395	34.6462
6	300	11.3786	5.7038	2.4317	13.8701	32.5331
7	240	12.9756	5.4806	2.5631	14.0473	30.0374
8	180	15.3046	5.1930	2.7282	14.1672	26.9668
9	120	19.4634	4.7875	2.9685	14.2118	22.9201
10	60	29.9437	4.0943	3.3993	13.9180	16.7637
10	4980	123.5568	58.1555	23.4853	131.1943	346.9435
Ln (d) =	5.9332	d =	377.3436	n =	-0.6164	

Fuente: Elaboración propia

Figura 9 Regresión Potencial para T=20 años



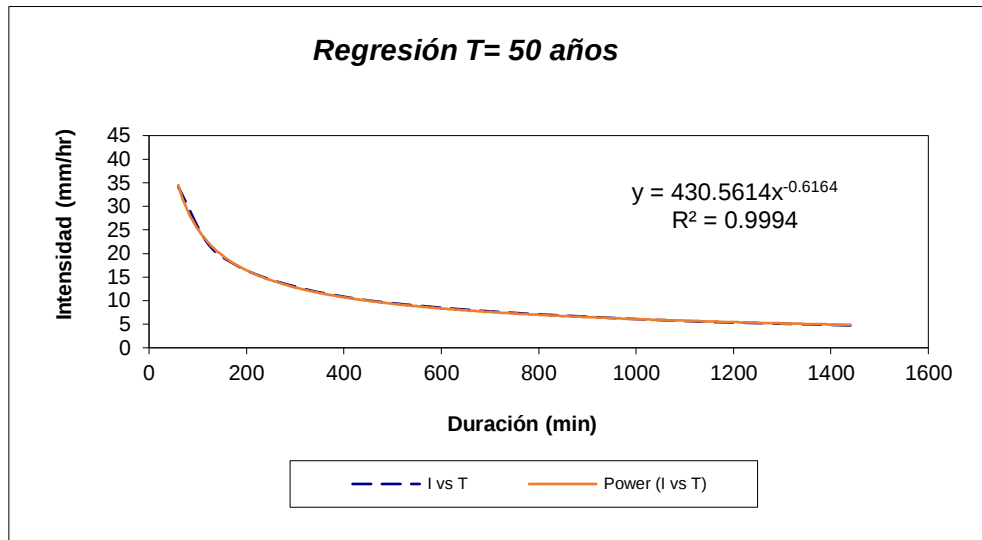
Fuente: Elaboración propia

Tabla 15 Regresión Potencial para T=50 años

Periodo de retorno para T = 50 años						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	1440	4.7454	7.2724	1.5572	11.3244	52.8878
2	1080	5.7577	6.9847	1.7505	12.2271	48.7863
3	720	7.5926	6.5793	2.0272	13.3373	43.2865
4	480	9.6806	6.1738	2.2701	14.0153	38.1156
5	360	11.5787	5.8861	2.4492	14.4161	34.6462
6	300	12.9834	5.7038	2.5637	14.6226	32.5331
7	240	14.8056	5.4806	2.6950	14.7704	30.0374
8	180	17.4630	5.1930	2.8601	14.8523	26.9668
9	120	22.2084	4.7875	3.1005	14.8435	22.9201
10	60	34.1668	4.0943	3.5313	14.4582	16.7637
10	4980	140.9823	58.1555	24.8047	138.8670	346.9435
Ln (d) =	6.0651	d =	430.5614	n =	-0.6164	

Fuente: Elaboración propia

Figura 10 Regresión Potencial para T=50 años



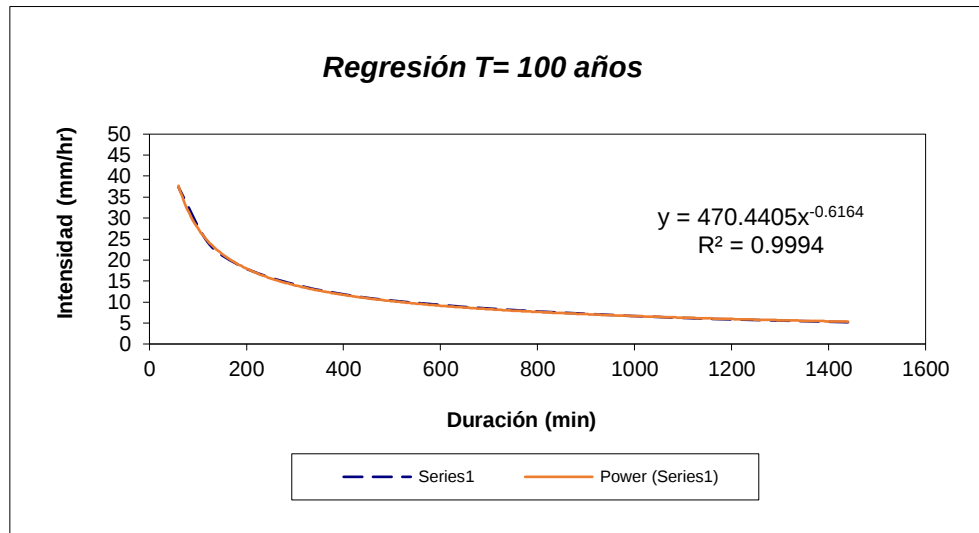
Fuente: Elaboración propia

Tabla 16 Regresión Potencial para T=100 años

<i>Periodo de retorno para T = 100 años</i>						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	1440	5.1849	7.2724	1.6458	11.9686	52.8878
2	1080	6.2910	6.9847	1.8391	12.8458	48.7863
3	720	8.2959	6.5793	2.1158	13.9201	43.2865
4	480	10.5772	6.1738	2.3587	14.5621	38.1156
5	360	12.6512	5.8861	2.5378	14.9375	34.6462
6	300	14.1859	5.7038	2.6522	15.1279	32.5331
7	240	16.1769	5.4806	2.7836	15.2558	30.0374
8	180	19.0805	5.1930	2.9487	15.3123	26.9668
9	120	24.2654	4.7875	3.1891	15.2676	22.9201
10	60	37.3314	4.0943	3.6198	14.8208	16.7637
10	4980	154.0403	58.1555	25.6905	144.0184	346.9435
Ln (d) =	6.1537	d =	470.4405	n =	-0.6164	

Fuente: Elaboración propia

Figura 11 Regresión Potencial para T=100 años



Fuente: Elaboración propia

Tabla 17 Resumen de coeficientes de regresión (n)

<i>Resumen de aplicación de regresión potencial</i>		
Periodo de Retorno (años)	Término cte. de regresión (d)	Coef. de regresión [n]
1	97.30338349	-0.61638609
2	228.63098418	-0.61638609
5	293.36812414	-0.61638609
10	336.22974375	-0.61638609
20	377.34363833	-0.61638609
50	430.56135764	-0.61638609
100	470.44054940	-0.61638609
Promedio =	319.12539727	-0.61638609

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo del término constante de regresión (K) y el coeficiente de regresión (m) del cambio de variable ($d = K * T_m$) se realizó otra regresión de potencial entre el periodo de retorno (T) y la constante (d).

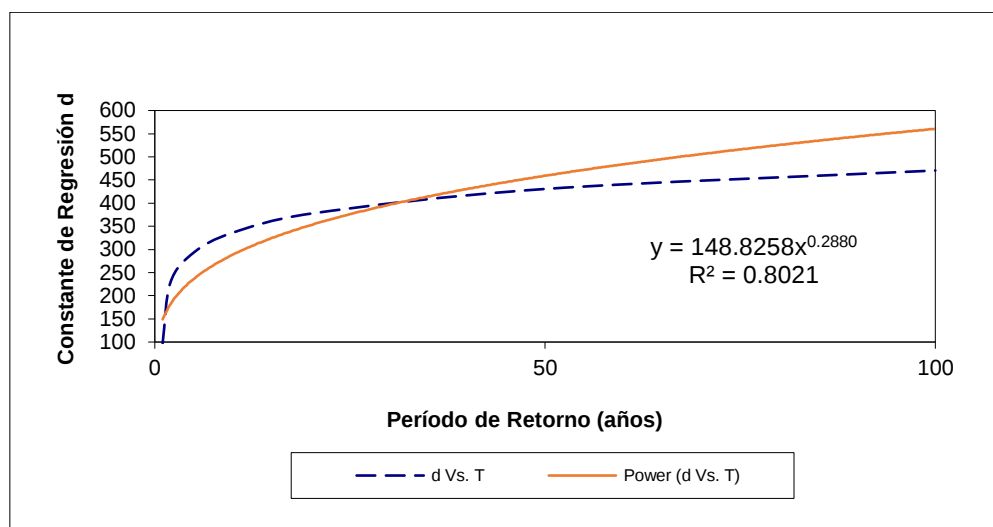
Tabla 18 Regresión potencial para coeficiente (k) y (m)

<i>Regresión potencial</i>						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	1	97.3034	0.0010	4.5778	0.0046	0.0000
2	2	228.6310	0.6931	5.4321	3.7653	0.4805

3	5	293.3681	1.6094	5.6814	9.1439	2.5903
4	10	336.2297	2.3026	5.8178	13.3960	5.3019
5	20	377.3436	2.9957	5.9332	17.7741	8.9744
6	50	430.5614	3.9120	6.0651	23.7268	15.3039
7	100	470.4405	4.6052	6.1537	28.3387	21.2076
7	188	2233.8778	16.1191	39.6611	96.1493	53.8586
Ln (K) = 5.0028		K = 148.8258	m = 0.2880			

Fuente: Elaboración propia

Figura 12 Regresión potencial para coeficiente (k) y (m)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 19 Resumen de coeficientes de regresión (k) y (m)

Termino constante de regresión (K) =	148.8258
Coef. de regresión (m) =	0.287959

Fuente: Elaboración propia

Los coeficientes (n), (k) y (m) son la base fundamental para reemplazar la ecuación de intensidad.

3.9. ESTIMACIÓN DE LAS CURVAS I-D-F

Reemplazando los valores de (K), (m) y el promedio de (n) obtenidos anteriormente, se deduce la siguiente ecuación:

$$I = \frac{148.8258 * T^{0.287959}}{D^{0.61639}}$$

Dónde:

I = Intensidad de precipitación (mm/hr)

T = Periodo de Retorno (años)

D = Tiempo de duración de precipitación (min)

Con esta ecuación estimada para la estación meteorológica de Tarija, se procedió al calculo de intensidades para periodos de retorno $T = 1,2,5,10,20,50$ y 100 años, con diferentes duraciones de tiempo de precipitación.

Tabla 20 Intensidades de lluvia (mm/hr) para la estación meteorológica Aeropuerto - Tarija

Tabla de intensidades - Tiempo de duración												
Frecuencia	Duración en minutos											
años	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
1	55.19	36.00	28.04	23.48	20.46	18.29	16.63	15.32	14.24	13.35	12.59	11.93
2	67.38	43.95	34.23	28.67	24.99	22.33	20.31	18.70	17.39	16.30	15.37	14.57
5	87.72	57.22	44.57	37.33	32.53	29.07	26.44	24.35	22.64	21.22	20.01	18.96
10	107.10	69.86	54.41	45.57	39.72	35.49	32.28	29.73	27.65	25.91	24.43	23.15
20	130.76	85.30	66.43	55.64	48.49	43.34	39.41	36.29	33.75	31.63	29.83	28.27
50	170.25	111.05	86.49	72.44	63.13	56.42	51.31	47.25	43.94	41.18	38.83	36.80
100	207.86	135.58	105.60	88.44	77.08	68.88	62.64	57.69	53.65	50.28	47.41	44.93

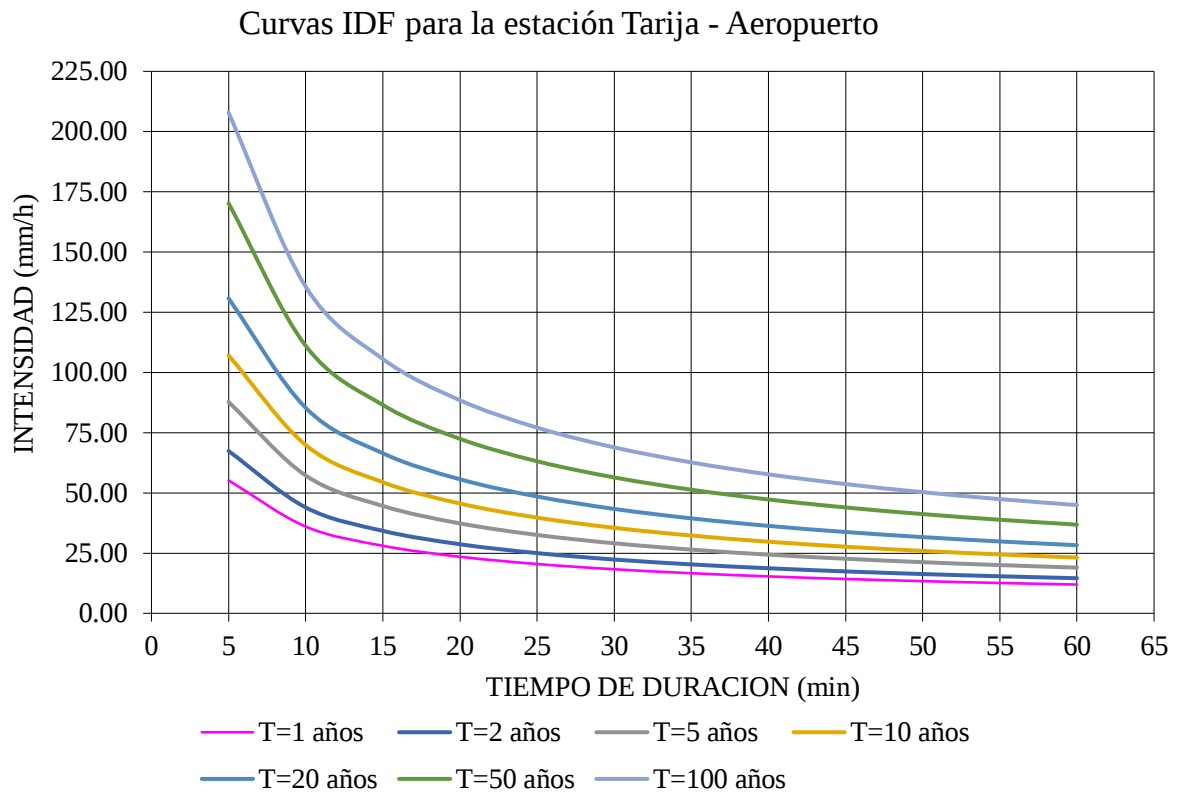
Fuente: Elaboración propia

Se puede visualizar que a menores tiempo de duración de lluvia el comportamiento de intensidades es altas en el valle central de Tarija, y estas van incrementando más, cuando se analiza para periodos de retornos de más años.

Por otra parte, se puede caracterizar en función de estos valores, el valle central de Tarija presenta precipitaciones recurrentes de corta duración, generando escorrentía directa, mismos que son causales de inundación y colapso de sistemas de drenaje.

En el grafico de las curvas IDF muestran que precipitaciones intensas de 5 hasta 15 minutos, son las más frecuentes y generan inestabilidad de los sistemas de alcantarillado pluvial, haciendo que el agua escurra y sea acumulada en partes bajas de la ciudad de Tarija.

Figura 13 Curvas IDF para la estación meteorológica de Tarija - Aeropuerto



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

Con el trabajo realizado, se ha podido destacar varias conclusiones, entre la más destacada es:

- Con las curvas IDF obtenidas, permite la estimación de caudales de crecida, solamente teniendo el valor del periodo de diseño que es característico de cada obra hidráulica en particular, y en función de condiciones lugar (área y tipo de superficie) se puede predecir la cantidad de agua que va escurrir en determinado lugar, de esta manera se optimiza tiempo en calcular, analizar la cantidad, calidad de información y su variación multitemporal que pueda tener en su base de datos, es por ello su importante función que cumplen las curvas IDF en estudiar eventos extremos.

Por otra parte, las curvas muestran que, a precipitaciones intensas de pequeñas duraciones, son las causales de provocar aumento de caudal de escurrimiento en el valle central de Tarija.

También en cumplimientos de nuestros objetivos específicos se puede expresar las siguientes conclusiones secundarias:

- La base de datos del Senamhi para la estación meteorológica de Tarija, permitió analizar y seleccionar valores máximos de una base de datos de 79 años con 28093 registros, lo cual genera una confiabilidad en la información.
- La aplicación de estadística permitió analizar que los datos seleccionados para el trabajo, son los mas representativos para la aplicación de leyes de distribución.
- Los coeficientes aplicados en la relación para la lluvia de duración 24 Hrs, ofrecen una confiabilidad adicional al método estocástico aplicado, ya que son utilizados con el fin de evitar una subestimación en los niveles de precipitación horarios resultantes
- Las curvas IDF muestran que altas precipitaciones en el orden de 50 mm en duraciones pequeñas hasta 15 minutos son indicadores de alerta, por que donde existan zonas vulnerables de inundación son propensas a colapsar tanto sistemas de alcantarillas como otras infraestructuras circundantes a la zona.

4.2. RECOMENDACIONES

Bajo todas las consideraciones y conclusiones expuestas anteriormente, se puede mencionar las siguientes recomendaciones:

- Las aplicaciones de estas curvas IDF obtenidas, juegan un rol importante en la toma de decisiones, por que se diseñan obras de gran envergadura, y al tratar de infraestructuras ya sean privadas o del estado, se debe validar los datos a nivel horario mediante mediciones con equipos de última generación para mayor confiabilidad de registros.
- Los componentes electromecánicos de las estaciones que tienen pluviógrafo, donde los cuales registran la información en bandas pluviográficas, necesitan un control de calidad y mantenimiento periódicos y con más frecuencia con el objetivo de obtener información a nivel horario que sea confiable e ininterrumpida, esto permitiría distribuir, caracterizar y zonificar todas las áreas de nuestro país.
- Sí se implementarían estaciones automáticas en todos los municipios del país, sería un logro histórico ya que se podría analizar el comportamiento de precipitaciones a nivel horario, lo cual permitiría futuras investigaciones encontrar los coeficientes de desagregaciones para diferentes zonas de proyecto, esto con llevaría consigo una zonificación de precipitaciones en diferentes regiones y sería una base fundamental conocer donde tenemos fuentes de agua natural aptas para su uso con diferentes fines.

BIBLIOGRAFÍA.

- Aguilar, R. (2020). Tarija hacia un drenaje urbano sostenible. *Centro de Estudios y Proyectos SRL - Biblioteca Virtual*.
- Amaya M.R., Lopez C.M., & Seoane S.M. (2009). *Curvas IDF para diferentes categorías de análisis*. La Paz: UMSA.
- Béjar, M. V. (2011). *Hidrología*. Lima - Perú: Editorial Villón.
- Campos, A. D. (1992). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. México: Universidad Autónoma de San Luis.
- Edson Ramírez, Javier Mendoza, Edgar Salas, & Pierre Ribstein. (1995). Regimen espacial y temporal de las precipitaciones en la cuenca de La Paz. *Bull. Inst. fr. études andines*, 391 - 401.
- Gomez, G. M. (2006). Aplicaciones SIG en el Estudio Hidrológico e Hidráulico del Río Chapare para el Puente Alfonso Gumucio. *Universidad Privada Boliviana*, 15.
- Jacques, B., Robert , H., José, C., & Luis, C. (1993). Los regímenes hidrológicos de la cuenca amazónica de Bolivia. *Misión ORSTOM, c.P.* 9214, 127.
- Linsley, R., Kohler, M., & Paulhus, J. (1982). *Hidrología para Ingenieros*. México: McGraw-Hill. La Universidad de Michigan.
- Mamani, J. C. (2018). Curvas IDF para la estación meteorológica de Viacha, Departamento de La Paz. *Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 99 - 105.
- Mamani, J. C. (Junio de 2018). *Curvas IDF para la estación meteorológica de Viacha, Departamento de La Paz*. La Paz: Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales.
- Mamani, J. C. (2018). Curvas IDF para la estimación meteorológica de Viacha, Departamento de La Paz. *Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 99 - 105.
- Melina G. Valencia Viscarra, & José Luis Montaña Vargas. (2009). Determinación de curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) para la ciudad de Trinidad. *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología*.

- Nanía, L. S. (2003). *La cuenca y los procesos hidrológicos*. Chile: E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Riveros, C. M. (2012). *Estudio de cuencas altiplánicas endorreicas de la segunda región de Chile, caracterización, tipología y potencialidades de uso*. Santiago de Chile: repositorio.uchile.cl.
- Roche, M. A. (1993). El clima de Bolivia. *ORSTOM, B.P. 5045, 34032 Montpellier, Francia. Programa hidrológico y climatológico de la cuenca Amazónica de Bolivia.*, 81.
- Rodríguez, E. A. (2012). *Modelamiento y manejo de las interacciones entre la hidrología, la ecología y la economía en una cuenca hidrográfica para la estimación de caudales ambientales*. Bogotá D.C.- Colombia.: Maestría Tesis, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Minas.
- Sánchez, J. C. (2003). Cálculo de caudales de avenida. *E.T.S. Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid-España*, 13.
- URBANISMO, M. D. (1996). Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas de Lluvias en Sectores Urbanos . *Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas*, 12.
- Ven Te, C., David R., M., & Larry W., M. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá - Colombia: Mc Graw-Hill.

ANEXOS

ANEXO A: Datos de precipitación diaria de la estación Tarija – Aeropuerto

Se trabajó con un total de 28093 los cuales están en la siguiente base de datos en plataforma Drive, sin embargo los datos fueron extraídos de plataforma Senamhi que es de libre acceso, <https://drive.google.com/drive/folders/118na48y2xXePVdKD7Dto2ZqQ0qIYlqFe?usp=sharing>

Gestión	Mes	Día	Estación	Longitud	Latitud	Altura	Precipitación
1945	1	1	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	31.00
1945	1	2	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	43.00
1945	1	3	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	9.00
1945	1	4	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	1	5	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	1	6	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	10.00
1945	1	7	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	1	8	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	1	9	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	1	10	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	2.00
1945	1	11	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	1	12	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	1	13	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	1	14	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	1	15	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	11.00
1945	1	16	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	1.00
1945	1	17	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	1	18	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	55.00
1945	1	19	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	1	20	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	72.00
1945	1	21	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	1	22	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	1	23	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	39.00
1945	1	24	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	20.00
1945	1	25	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	2.00
1945	1	26	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	1.00
1945	1	27	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	1	28	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	1	29	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	1	30	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	2.00
1945	1	31	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	2	1	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	2	2	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00

1945	2	3	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	2	4	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	1.00
1945	2	5	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	2	6	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	2	7	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	2	8	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	2	9	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	13.00
1945	2	10	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	2	11	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	2	12	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	2	13	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	2	14	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	2	15	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	2	16	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	25.00
1945	2	17	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	2.00
1945	2	18	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	1.00
1945	2	19	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	2	20	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	2	21	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	2	22	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	13.00
1945	2	23	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	2	24	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	2	25	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	2	26	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	2	27	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	2	28	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	3	1	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	9.00
1945	3	2	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	6.00
1945	3	3	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	3	4	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	5.00
1945	3	5	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	9.00
1945	3	6	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	1.00
1945	3	7	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	1.00
1945	3	8	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	12.00
1945	3	9	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	1.00
1945	3	10	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	1.00
1945	3	11	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	3	12	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	7.00
1945	3	13	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	5.00
1945	3	14	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	3.00
1945	3	15	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	3	16	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	3	17	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	3	18	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	3	19	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	5.00

1945	11	1	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	11	2	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	11	3	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	11	4	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	11	5	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	11	6	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	11	7	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	19.00
1945	11	8	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	11	9	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	11	10	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	11	11	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	11	12	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	11	13	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	11	14	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	1.00
1945	11	15	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	6.00
1945	11	16	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	8.00
1945	11	17	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	11	18	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	11	19	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	11	20	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	11	21	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	61.00
1945	11	22	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	3.00
1945	11	23	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	1.00
1945	11	24	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	1.00
1945	11	25	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	4.00
1945	11	26	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	1.00
1945	11	27	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	11	28	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	11	29	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	11	30	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	12	1	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	12	2	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	12	3	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	12	4	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	12	5	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	24.00
1945	12	6	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	12	7	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	12	8	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	12	9	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	12	10	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	12	11	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	5.00
1945	12	12	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	25.00
1945	12	13	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	12	14	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	4.00
1945	12	15	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	37.00

1945	12	16	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	12	17	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	12	18	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	35.00
1945	12	19	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	4.00
1945	12	20	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	12	21	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	10.00
1945	12	22	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	12	23	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	12	24	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	12	25	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	34.00
1945	12	26	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	15.00
1945	12	27	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	1.00
1945	12	28	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	27.00
1945	12	29	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	12	30	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
1945	12	31	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	0.00
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
2023	12	30	Tarija Aeropuerto	-64.7076	-21.5492	1875	44.40

ANEXO B: Selección de precipitaciones máximas mensuales en mm.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1945	72.00	25.00	38.00	6.00	0.00	0.00	9.00	12.00	26.00	47.00	61.00	37.00
1946	46.00	41.00	44.40	5.90	14.10	0.00	0.00	0.00	7.00	16.50	19.00	22.00
1947	72.50	41.40	15.80	13.20	5.50	0.00	0.00	6.50	3.70	14.20	30.00	36.20
1948	58.20	52.00	39.10	7.50	3.10	0.00	0.00	0.00	3.10	16.60	23.00	35.75
1949	57.00	35.00	51.00	7.20	0.00	0.00	0.00	0.00	15.50	6.40	31.00	35.30
1950	45.20	40.60	28.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.90	22.00	9.90	12.00
1951	55.20	27.00	9.90	38.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.50	0.00	55.00
1952	39.00	18.10	40.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.00	14.00	68.30	12.10
1953	38.20	34.00	35.20	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.00	8.75	41.40	23.50
1954	45.10	51.00	60.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.00	3.50	125.00	39.90
1955	15.00	56.00	37.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.10	21.00	16.30
1956	32.20	55.30	6.60	0.00	0.00	0.00	0.00	2.40	17.20	57.20	26.60	20.00
1957	54.20	35.20	40.20	4.50	0.00	0.00	0.00	3.10	4.00	30.00	7.30	32.00
1958	56.00	50.00	33.00	3.00	0.00	0.00	3.00	0.00	5.00	24.40	32.30	30.00
1959	24.60	51.00	13.00	23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.60	34.50	26.00	60.10

1960	44.30	48.60	46.00	11.60	0.00	0.00	0.00	0.00	6.60	14.00	42.60	54.00
1961	36.00	46.40	70.00	50.00	2.00	0.00	0.00	0.00	1.80	35.60	7.60	27.50
1962	35.00	37.00	20.00	23.00	0.00	0.00	0.60	0.00	0.00	14.50	25.30	31.20
1963	51.00	31.20	40.80	35.00	2.60	4.00	0.00	0.00	0.00	6.60	14.50	48.00
1964	52.00	17.00	25.30	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	3.50	11.00	40.00	19.40
1965	37.00	26.00	15.00	22.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.40	4.00	23.40
1966	32.50	14.00	40.30	13.50	11.10	0.00	0.00	0.00	0.00	11.00	23.20	106.00
1967	20.00	36.70	22.00	18.50	0.00	0.00	0.00	0.10	13.00	12.60	18.60	56.00
1968	49.00	55.00	25.00	14.00	9.00	0.00	0.00	34.00	4.00	7.00	32.30	11.00
1969	34.00	57.00	8.60	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.00	52.00	50.00
1970	37.00	30.00	83.30	43.00	1.40	0.00	0.00	0.00	23.00	20.00	3.00	67.50
1971	45.00	55.10	25.00	11.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	17.00	38.00	28.20
1972	26.00	29.00	26.60	11.60	6.00	22.00	0.00	1.00	2.40	10.20	18.00	45.00
1973	70.80	17.80	82.60	16.60	25.60	0.00	0.00	2.00	0.00	16.00	17.00	32.30
1974	48.50	42.60	19.00	19.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.10	11.00	42.30
1975	58.90	37.20	14.40	13.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.30	6.50	38.60	28.60
1976	40.60	19.40	40.60	0.00	1.00	0.00	0.00	2.70	3.50	1.00	28.00	26.20
1977	36.00	19.00	27.00	1.40	6.50	0.00	0.00	2.00	5.00	59.00	27.60	17.10
1978	34.60	31.00	13.00	35.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	17.60	26.00	49.00
1979	34.60	23.00	27.80	9.70	0.00	5.00	20.00	0.00	0.00	16.70	31.40	28.50
1980	21.60	31.80	29.00	7.00	6.00	0.00	0.00	3.00	0.00	10.00	16.60	39.70
1981	35.40	24.00	26.90	13.30	0.20	0.00	2.00	7.00	1.80	20.00	64.40	38.80
1982	36.00	13.50	18.40	23.50	2.40	0.00	0.00	0.00	0.20	16.30	8.70	41.00
1983	12.00	24.30	2.00	3.40	2.00	0.00	0.70	0.80	7.00	11.00	34.00	23.00
1984	19.20	51.20	38.80	1.00	0.00	0.00	0.00	19.60	0.60	14.80	20.00	59.00
1985	30.70	32.60	14.20	30.40	0.00	0.00	1.30	7.80	4.10	5.00	20.60	37.80
1986	19.80	40.50	25.00	17.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.80	13.00	37.50	42.00
1987	97.80	69.80	21.20	12.80	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	19.20	23.60	19.00
1988	37.20	13.60	39.40	4.00	0.30	0.60	1.00	0.00	1.00	10.00	4.40	29.80
1989	45.20	15.80	31.00	16.80	0.00	1.00	0.20	0.00	1.00	17.00	74.00	28.40
1990	27.20	44.00	13.00	3.20	0.00	0.00	0.00	1.00	2.00	8.20	41.60	37.40
1991	48.00	32.20	34.60	18.50	0.00	0.00	0.00	1.20	1.80	45.20	46.00	17.20
1992	68.10	23.50	34.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.50	18.80	25.00	17.50
1993	22.20	26.00	31.00	21.20	0.00	0.00	1.30	2.20	0.00	23.00	27.50	50.10
1994	38.20	26.50	13.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.40	12.90	26.20	29.00
1995	35.60	10.20	20.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	8.40	26.20	24.60	45.00
1996	44.00	35.60	52.00	0.80	8.20	1.00	0.00	4.40	8.20	3.00	37.00	38.40
1997	22.60	23.20	27.00	10.20	4.20	0.00	0.00	0.30	6.20	2.80	27.70	24.00
1998	39.00	17.70	48.00	6.90	1.40	0.30	0.00	0.40	0.40	15.40	26.90	37.70

1999	23.70	74.70	52.00	4.50	2.40	1.40	0.00	0.00	20.00	28.00	5.00	31.00
2000	78.00	34.20	23.30	5.40	0.10	0.00	0.00	0.70	0.00	3.00	14.60	25.20
2001	22.20	37.00	15.30	5.60	0.00	0.10	0.00	1.20	5.40	47.60	14.40	82.00
2002	15.40	25.00	29.50	6.50	0.40	0.00	0.00	0.30	0.00	20.20	60.00	35.70
2003	23.80	7.80	21.80	0.30	1.60	0.00	0.00	0.00	1.50	8.60	21.60	48.80
2004	17.40	21.80	26.30	9.40	0.70	0.00	0.00	5.20	5.20	52.40	43.00	34.70
2005	35.00	41.50	54.20	5.40	0.00	0.00	0.20	0.20	2.20	1.20	28.40	24.30
2006	49.50	24.40	23.40	7.60	1.80	0.00	0.00	0.00	1.30	13.20	17.80	19.40
2007	48.30	16.20	28.90	4.30	0.00	0.00	0.00	0.20	12.40	34.20	20.80	28.60
2008	20.30	18.30	16.40	18.10	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20	30.80	33.00	38.60
2009	20.20	16.80	20.70	11.80	0.20	0.00	0.00	0.50	11.90	1.60	22.60	43.20
2010	26.70	75.20	49.20	13.20	2.70	0.00	0.00	0.10	0.00	0.40	1.60	49.60
2011	40.00	41.60	52.00	10.20	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50	29.30	6.50	35.80
2012	41.40	26.40	36.50	16.40	0.10	0.00	1.00	0.00	0.40	9.60	25.90	30.90
2013	29.20	19.30	2.00	1.20	0.10	1.80	0.00	7.20	0.00	11.80	20.20	24.10
2014	67.30	15.10	21.50	7.40	0.40	2.10	1.00	0.00	5.00	28.70	24.30	24.20
2015	39.90	58.80	29.80	10.60	0.00	0.90	1.00	0.00	0.00	15.80	19.20	50.60
2016	29.70	35.60	6.80	1.50	1.00	0.00	0.00	7.00	2.30	13.40	12.20	15.50
2017	25.20	26.70	57.30	13.30	0.00	0.00	0.00	0.00	11.70	4.20	8.20	47.20
2018	42.90	17.80	13.20	6.50	5.80	0.00	0.10	0.80	19.20	32.60	56.20	47.90
2019	40.10	47.30	29.70	55.00	1.30	0.00	11.10	0.10	0.00	29.90	15.20	32.20
2020	87.20	15.00	26.70	1.90	0.00	0.00	0.00	0.00	14.20	32.30	14.20	23.70
2021	25.40	20.60	15.80	11.20	0.00	0.00	0.10	0.00	6.20	0.40	68.40	13.70
2022	42.90	20.70	16.90	22.20	1.10	0.00	0.00	1.00	0.20	0.60	0.70	75.80
2023	23.70	33.80	15.20	18.70	0.10	0.10	0.00	0.30	1.90	55.30	17.40	44.40

ANEXO C: Precipitación máximas a nivel anual expresadas en mm

Año	Máximo
1945	72.00
1946	46.00
1947	72.50
1948	58.20
1949	57.00
1950	45.20
1951	55.20
1952	68.30
1953	41.40
1954	125.00
1955	56.00

1956	57.20
1957	54.20
1958	56.00
1959	60.10
1960	54.00
1961	70.00
1962	37.00
1963	51.00
1964	52.00
1965	37.00
1966	106.00
1967	56.00
1968	55.00
1969	57.00
1970	83.30
1971	55.10
1972	45.00
1973	82.60
1974	48.50
1975	58.90
1976	40.60
1977	59.00
1978	49.00
1979	34.60
1980	39.70
1981	64.40
1982	41.00
1983	34.00
1984	59.00
1985	37.80
1986	42.00
1987	97.80
1988	39.40
1989	74.00
1990	44.00
1991	48.00
1992	68.10
1993	50.10
1994	38.20
1995	45.00
1996	52.00
1997	27.70
1998	48.00
1999	74.70
2000	78.00

2001	82.00
2002	60.00
2003	48.80
2004	52.40
2005	54.20
2006	49.50
2007	48.30
2008	38.60
2009	43.20
2010	75.20
2011	52.00
2012	41.40
2013	29.20
2014	67.30
2015	58.80
2016	35.60
2017	57.30
2018	56.20
2019	55.00
2020	87.20
2021	68.40
2022	75.80
2023	55.30

ANEXO D: Análisis de calidad de datos en función de estadística probabilística

Posición	Máxima diaria (mm)	Probabilidad de Excedencia P	Periodo de retorno T	Log T	Probabilidad de no Excedencia q	Variable reducida y	Prob ($x \leq X_t$)
n							
1	125.00	0.01	141.29	2.15	0.99	4.95	99.29
2	106.00	0.02	50.72	1.71	0.98	3.92	98.03
3	97.80	0.03	30.91	1.49	0.97	3.41	96.76
4	87.20	0.04	22.22	1.35	0.96	3.08	95.50
5	83.30	0.06	17.35	1.24	0.94	2.82	94.24
6	82.60	0.07	14.23	1.15	0.93	2.62	92.97
7	82.00	0.08	12.06	1.08	0.92	2.45	91.71
8	78.00	0.10	10.47	1.02	0.90	2.30	90.44
9	75.80	0.11	9.24	0.97	0.89	2.17	89.18
10	75.20	0.12	8.28	0.92	0.88	2.05	87.92
11	74.70	0.13	7.49	0.87	0.87	1.94	86.65
12	74.00	0.15	6.84	0.84	0.85	1.85	85.39
13	72.50	0.16	6.30	0.80	0.84	1.76	84.13
14	72.00	0.17	5.83	0.77	0.83	1.67	82.86

15	70.00	0.18	5.43	0.74	0.82	1.59	81.60
16	68.40	0.20	5.08	0.71	0.80	1.52	80.33
17	68.30	0.21	4.78	0.68	0.79	1.45	79.07
18	68.10	0.22	4.51	0.65	0.78	1.38	77.81
19	67.30	0.23	4.26	0.63	0.77	1.32	76.54
20	64.40	0.25	4.04	0.61	0.75	1.26	75.28
21	60.10	0.26	3.85	0.59	0.74	1.20	74.01
22	60.00	0.27	3.67	0.56	0.73	1.15	72.75
23	59.00	0.29	3.51	0.54	0.71	1.09	71.49
24	59.00	0.30	3.36	0.53	0.70	1.04	70.22
25	58.90	0.31	3.22	0.51	0.69	0.99	68.96
26	58.80	0.32	3.10	0.49	0.68	0.94	67.69
27	58.20	0.34	2.98	0.47	0.66	0.89	66.43
28	57.30	0.35	2.87	0.46	0.65	0.85	65.17
29	57.20	0.36	2.77	0.44	0.64	0.80	63.90
30	57.00	0.37	2.68	0.43	0.63	0.76	62.64
31	57.00	0.39	2.59	0.41	0.61	0.72	61.38
32	56.20	0.40	2.51	0.40	0.60	0.68	60.11
33	56.00	0.41	2.43	0.39	0.59	0.63	58.85
34	56.00	0.42	2.36	0.37	0.58	0.59	57.58
35	56.00	0.44	2.29	0.36	0.56	0.55	56.32
36	55.30	0.45	2.22	0.35	0.55	0.52	55.06
37	55.20	0.46	2.16	0.34	0.54	0.48	53.79
38	55.10	0.47	2.11	0.32	0.53	0.44	52.53
39	55.00	0.49	2.05	0.31	0.51	0.40	51.26
40	55.00	0.50	2.00	0.30	0.50	0.37	50.00
41	54.20	0.51	1.95	0.29	0.49	0.33	48.74
42	54.20	0.53	1.90	0.28	0.47	0.29	47.47
43	54.00	0.54	1.86	0.27	0.46	0.26	46.21
44	52.40	0.55	1.82	0.26	0.45	0.22	44.94
45	52.00	0.56	1.78	0.25	0.44	0.19	43.68
46	52.00	0.58	1.74	0.24	0.42	0.15	42.42
47	52.00	0.59	1.70	0.23	0.41	0.12	41.15
48	51.00	0.60	1.66	0.22	0.40	0.08	39.89
49	50.10	0.61	1.63	0.21	0.39	0.05	38.62
50	49.50	0.63	1.60	0.20	0.37	0.02	37.36
51	49.00	0.64	1.56	0.19	0.36	-0.02	36.10
52	48.80	0.65	1.53	0.19	0.35	-0.05	34.83
53	48.50	0.66	1.51	0.18	0.34	-0.09	33.57
54	48.30	0.68	1.48	0.17	0.32	-0.12	32.31
55	48.00	0.69	1.45	0.16	0.31	-0.16	31.04
56	48.00	0.70	1.42	0.15	0.30	-0.19	29.78
57	46.00	0.71	1.40	0.15	0.29	-0.23	28.51
58	45.20	0.73	1.37	0.14	0.27	-0.26	27.25
59	45.00	0.74	1.35	0.13	0.26	-0.30	25.99

60	45.00	0.75	1.33	0.12	0.25	-0.33	24.72
61	44.00	0.77	1.31	0.12	0.23	-0.37	23.46
62	43.20	0.78	1.29	0.11	0.22	-0.41	22.19
63	42.00	0.79	1.26	0.10	0.21	-0.45	20.93
64	41.40	0.80	1.24	0.10	0.20	-0.49	19.67
65	41.40	0.82	1.23	0.09	0.18	-0.53	18.40
66	41.00	0.83	1.21	0.08	0.17	-0.57	17.14
67	40.60	0.84	1.19	0.08	0.16	-0.61	15.87
68	39.70	0.85	1.17	0.07	0.15	-0.65	14.61
69	39.40	0.87	1.15	0.06	0.13	-0.70	13.35
70	38.60	0.88	1.14	0.06	0.12	-0.75	12.08
71	38.20	0.89	1.12	0.05	0.11	-0.80	10.82
72	37.80	0.90	1.11	0.04	0.10	-0.85	9.56
73	37.00	0.92	1.09	0.04	0.08	-0.91	8.29
74	37.00	0.93	1.08	0.03	0.07	-0.98	7.03
75	35.60	0.94	1.06	0.03	0.06	-1.05	5.76
76	34.60	0.96	1.05	0.02	0.04	-1.13	4.50
77	34.00	0.97	1.03	0.01	0.03	-1.23	3.24
78	29.20	0.98	1.02	0.01	0.02	-1.37	1.97
79	27.70	0.99	1.01	0.00	0.01	-1.60	0.71

ANEXO E: Distribución de probabilidades mediante Gumbell

Nº	Año	Precipitación (mm)	
		x_i	$(x_i - \bar{x})^2$
1	1945	72.00	245.378
2	1946	46.00	106.821
3	1947	72.50	261.293
4	1948	58.20	3.477
5	1949	57.00	0.442
6	1950	45.20	123.998
7	1951	55.20	1.289
8	1952	68.30	143.151
9	1953	41.40	223.067
10	1954	125.00	4714.821
11	1955	56.00	0.113
12	1956	57.20	0.747
13	1957	54.20	4.560
14	1958	56.00	0.113
15	1959	60.10	14.172
16	1960	54.00	5.454
17	1961	70.00	186.720
18	1962	37.00	373.859

19	1963	51.00	28.467
20	1964	52.00	18.796
21	1965	37.00	373.859
22	1966	106.00	2466.568
23	1967	56.00	0.113
24	1968	55.00	1.783
25	1969	57.00	0.442
26	1970	83.30	727.087
27	1971	55.10	1.526
28	1972	45.00	128.492
29	1973	82.60	689.827
30	1974	48.50	61.394
31	1975	58.90	6.577
32	1976	40.60	247.604
33	1977	59.00	7.100
34	1978	49.00	53.809
35	1979	34.60	472.429
36	1980	39.70	276.738
37	1981	64.40	65.037
38	1982	41.00	235.176
39	1983	34.00	498.872
40	1984	59.00	7.100
41	1985	37.80	343.563
42	1986	42.00	205.505
43	1987	97.80	1719.309
44	1988	39.40	286.809
45	1989	74.00	312.037
46	1990	44.00	152.163
47	1991	48.00	69.480
48	1992	68.10	138.405
49	1993	50.10	38.881
50	1994	38.20	328.894
51	1995	45.00	128.492
52	1996	52.00	18.796
53	1997	27.70	819.989
54	1998	48.00	69.480
55	1999	74.70	337.257
56	2000	78.00	469.353
57	2001	82.00	658.669
58	2002	60.00	13.429
59	2003	48.80	56.783
60	2004	52.40	15.488
61	2005	54.20	4.560
62	2006	49.50	46.723
63	2007	48.30	64.568

64	2008	38.60	314.546
65	2009	43.20	172.540
66	2010	75.20	355.872
67	2011	52.00	18.796
68	2012	41.40	223.067
69	2013	29.20	736.332
70	2014	67.30	120.222
71	2015	58.80	6.074
72	2016	35.60	429.959
73	2017	57.30	0.930
74	2018	56.20	0.018
75	2019	55.00	1.783
76	2020	87.20	952.621
77	2021	68.40	145.554
78	2022	75.80	378.869
79	2023	55.30	1.072
79	Suma	4450.5	22935.2