UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis

Desarrollo de curvas de intensidad, duración y frecuencia por el método de Bell para la estación meteorológica Granja Kayra de la ciudad del Cusco

Asesor:

Ph.D. Vázquez Ramirez, Abbon Alex

Autor:

Zevallos Ustua, Miguel Angel

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

Abancay - Apurímac – Perú

2026

Acta de sustentación

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

Acta N°: 031

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Abancay, a **un** (01) día del mes de julio del 2026, siendo las 9:00 am horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° 0507-2026-EPIC-FI-UTEA-SA de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería:

Presidente	:	Mag. MALDONADO MENDIVIL, Ángel
Dictaminante	:	Dra. VERA TEVES, Rosa Marina
Replicante	:	Mag. SAAVEDRA ORE, Danilo

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

☒ Tesis ☐ Trabajo de suficiencia profesional

Titulada: ***Desarrollo de curvas de intensidad, duración y frecuencia por el método de Bell para la estación meteorológica Granja Kayra de la Ciudad del Cusco.***

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br.: **ZEVALLOS USTUA, Miguel Angel**

Para optar el Tituló Profesional de:

Ingeniero Civil

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO(S) ☒ o DESAPROBADO(S) ☐:

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller	Nota	Detalle (**)
Br. ZEVALLOS USTUA, Miguel Angel	11	APROBADO

Siendo las 10:34 horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mag. MALDONADO MENDIVIL, Ángel (.....)

Dictaminante: Dra. VERA TEVES, Rosa Marina (.....)

Replicante: Mag. SAAVEDRA ORE, Danilo (.....)

Nota: **Desaprobado:** 0-10; **Aprobado:** 11-20
(**): 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

Reporte de similitud

miguel angel zevallos ustua

TESIS CON DEPOSITO

Desarrollo de curvas de intensidad, duración y frecuencia por el método de Bell para la estación meteorológica Granja Kayra de la ciuda...

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::3117:608444838

Fecha de entrega
17 jul 2026, 11:54 GMT-5

Fecha de descarga
17 jul 2026, 11:59 GMT-5

Nombre del archivo
TESIS CON DEPOSITO.pdf

Tamaño del archivo
4.6 MB

104 páginas

23.226 palabras

117.093 caracteres

20% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

19% Fuentes de Internet
8% Publicaciones
0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Metadatos

Datos del Autor		
Apellidos y nombres	:	Zevallos ustua Miguel Angel
Tipo de Documento de Identidad	:	Documento Nacional de Identidad (DNI)
Número de Documento de Identidad	:	75093242
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0001-5229-5512
Datos del Asesor		
Apellidos y nombres	:	Ph.D. Vásquez Ramírez Abbon Alex
Tipo de Documento de Identidad	:	Documento Nacional de Identidad (DNI)
Número de Documento de Identidad	:	06532658
URL ORCID	:	https://orcid.org/0000-0001-7299-5367
Datos de la investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ingeniería Civil
Línea de Investigación	:	Gestión de la Infraestructura para el Desarrollo Sostenible
Rango de años en que se realizó la investigación	:	2025-2026
Fuente de financiamiento	:	Recursos propios
Porcentaje de similitud	:	20%
URL de OCDE		https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

Dedico la presente tesis a Dios Por haberme otorgado dirección y fortaleza en este camino.

A mi madre valentina por su esfuerzo y sacrificio que gracia a ella vengo cumpliendo los objetivos trazados.

A mi hermano José Luis por su apoyo y acompañamiento en cada uno de los pasos que doy en ser cada día mejor persona.

Miguel Angel Zevallos Ustua.

Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios por orientarme en la dirección correcta y darme la fortaleza para avanzar a pesar de los obstáculos.

También expreso mi más sincera gratitud a mi asesor de tesis cuya amplia experiencia y apoyo constante hicieron posible el desarrollo y culminación de este estudio.

Asimismo, agradezco a mi madre y mi hermano, por el respaldo necesario durante toda la etapa universitaria hasta la culminación de mi tesis.

Miguel Angel Zevallos Ustua.

Resumen

El objetivo fundamental de esta investigación titulada "Desarrollo de curvas de utilizando Intensidad, Duración y frecuencia por el método de Bell para la estación meteorológica Granja Kayra de la ciudad del Cusco" consiste en elaborar las gráficas que relacionan Intensidad, Duración y Frecuencia pluviométrica para dicha estación meteorológica. El trabajo se enmarcó dentro de un alcance descriptivo con orientación práctica. El procedimiento metodológico implicó recopilar registros pluviométricos máximos diarios de la estación Granja Kayra correspondientes al período 1990-2020. Seguidamente, se realizó un tratamiento estadístico de frecuencias sobre estos valores extremos de precipitación, ajustándolos mediante la distribución de Gumbel y seleccionando las frecuencias de ocurrencia más relevantes según las características de la zona estudiada. Los hallazgos ratificaron la aplicabilidad del procedimiento de Bell, demostrada mediante un elevado índice de determinación ($R^2 = 0.99$), asegurando así la fiabilidad del ajuste modelado. Mediante esta técnica se logró calcular las magnitudes pluviométricas para diversos lapsos temporales (5, 10, 15, 30, 60 y 120 minutos) e intervalos de recurrencia (2, 5, 10, 25, 50 y 100 años). La expresión matemática generalizada derivada para la construcción de los diagramas IDF adopta la siguiente estructura: $I=68.437 \cdot t^{0.3359}$.

Palabras clave: Curvas IDF, Método de Bell, precipitación.

Abstract

This research entitled "Development of IDF Curves Using Bell's Method for the Granja Kayra Meteorological Station in the City of Cusco" aimed to construct Intensity-Duration-Frequency (IDF) diagrams for this observatory. The investigation was conducted under a descriptive and applied research approach. The methodological framework encompassed gathering daily maximum precipitation records from the Granja Kayra facility spanning 1990–2020. Subsequently, a statistical frequency assessment of extreme rainfall values was performed, applying the Gumbel probabilistic model and determining the most appropriate recurrence intervals for the geographic zone under investigation. The findings validated the applicability of Bell's technique, demonstrated through an elevated determination coefficient ($R^2 = 0.99$), thereby confirming robust model adjustment. Through this analytical approach, precipitation magnitudes were calculated across various time spans (5, 10, 15, 30, 60, and 120 minutes) and recurrence periods (2, 5, 10, 25, 50, and 100 years). The generalized mathematical expression derived for characterizing the IDF diagrams takes the following form: $I=68.437 \cdot t^{0.3359}$.

Keywords: IDF Curves, Bell’s Method, precipitation.

Índice

Acta de sustentación ii

Reporte de similitud iii

Metadatos iv

Dedicatoria v

Agradecimientos vi

Resumen vii

Abstract viii

Índice ix

Índice de tablas xii

Índice de figuras xiv

Índice de anexos xv

I. Introducción xvi

II. Planteamiento del problema 18

2.1 Descripción y formulación del problema 18

2.1.1 Problema general 20

2.1.2 Problemas específicos 20

2.2 Objetivos 20

2.2.1 Objetivo General 20

2.2.2 Objetivos Específicos 20

2.3 Justificación e importancia 21

2.4 Hipótesis 22

2.5 Variables 23

III. Marco Teórico 24

3.1 Antecedentes 24

3.1.1 Antecedentes internacionales 24

3.1.2 Antecedentes nacionales 27

3.1.3 Antecedentes locales 28

3.2 Bases teóricas 29

3.2.1 Precipitación máxima anual registrada 29

3.2.2 Curvas de Intensidad Duración y Frecuencia (IDF) 30

3.2.3 Estimación tradicional de las curvas IDF 31

3.2.4 Ecuación de Bell 32

3.2.5 Distribuciones de probabilidad 33

3.2.6 Análisis de confiabilidad 41

3.3 Definición de términos 41

IV. Metodología 44

4.1 Tipo y nivel de investigación 44

4.1.1 Tipo de investigación 44

4.1.2 Nivel de investigación 44

4.1.3 Diseño de investigación 44

4.1.4 Enfoque de investigación 45

4.2 Ámbito temporal y espacial 45

4.3 Población y muestra 45

4.4 Instrumentos 46

4.5 Procedimientos 47

4.6 Análisis de datos 48

4.7 Consideraciones éticas 49

V. Resultados y discusión 50

5.1 Resultados 50

5.2 Discusiones 82

VI. Conclusiones 84

VII. Recomendaciones 86

VIII. Referencias 88

IX. Anexos ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Índice de tablas

Tabla 1 Datos de precipitación máxima 24 h expresado en mm de la estación Kayra 50

Tabla 2 Test para detectar datos dudosos 51

Tabla 3 Valores Kn para la prueba de datos dudosos 52

Tabla 4 Datos de precipitación máxima 24 horas - Distribución Gumbel 54

Tabla 5 Precipitación máxima 24 horas para diferentes periodos de retorno- Distribución Gumbel 57

Tabla 6 Datos de precipitación máxima 24 horas - Distribución Gamma de 2 parámetros 58

Tabla 7 Precipitación máxima 24 horas para diferentes periodos de retorno- Distribución Gamma de 2 parámetros 61

Tabla 8 Datos de precipitación máxima 24 horas - Distribución Gamma de 2 parámetros 62

Tabla 9 Precipitación máxima 24 horas para diferentes periodos de retorno- Distribución Logaritmo Normal de 2 parámetros..... 65

Tabla 10 Resumen de valor del delta teórico por cada distribución probabilística 66

Tabla 11 Precipitación máxima por tiempos de duración 67

Tabla 12 Precipitación máxima por tiempos de duración 68

Tabla 13 Valores de duración de la precipitación para un periodo de retorno de 2 años 69

Tabla 14 Valores de duración de la precipitación para un periodo de retorno de 5 años 70

Tabla 15 Valores de duración de la precipitación para un periodo de retorno de 10 años .. 72

Tabla 16 Valores de duración de la precipitación para un periodo de retorno de 20 años .. 73

Tabla 17 Valores de duración de la precipitación para un periodo de retorno de 25 años .. 75

Tabla 18 Valores de duración de la precipitación para un periodo de retorno de 30 años .. 76

Tabla 19 Valores de duración de la precipitación para un periodo de retorno de 50 años .. 78

Tabla 20 Valores de duración de la precipitación para un periodo de retorno de 100 años 79

Tabla 21 Resumen de término constante y coeficiente de regresión potencial para cada periodo de tiempo 81

Tabla 22 Regresión potencial para distintos periodos de retorno 81

Índice de figuras

Figura 1 Grafica de valores para detectar valores atípicos 53

Figura 2 Ajuste de datos a la distribución Gumbel 55

Figura 3 Función de riesgo acumulativa de la distribución Gumbel 56

Figura 4 Ajuste de datos a la distribución Gamma de 2 parámetros 59

Figura 5 Función de riesgo acumulativa de la distribución Gamma de 2 parámetros 60

Figura 6 Ajuste de datos a la distribución Logaritmo Normal de 2 parámetros 63

Figura 7 Función de riesgo acumulativa de la distribución Logaritmo Normal de 2 parámetros 64

Figura 8 Curva IDF para un periodo de retorno de 2 años 70

Figura 9 Curva IDF para un periodo de retorno de 5 años 71

Figura 10 Curva IDF para un periodo de retorno de 10 años 73

Figura 11 Curva IDF para un periodo de retorno de 20 años 74

Figura 12 Curva IDF para un periodo de retorno de 25 años 76

Figura 13 Curva IDF para un periodo de retorno de 30 años 77

Figura 14 Curva IDF para un periodo de retorno de 50 años 79

Figura 15 Curva IDF para un periodo de retorno de 100 años 80

Figura 16 Representación matemática de las curvas Intensidad – Duración – Periodo de retorno 80

Figura 17 Relación entre el ajuste de regresión potencial y los distintos periodos de retorno 82

Índice de anexos

Anexo 1. Matriz de consistencia ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 2. Operacionalización de variables ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 3. Solicitud de datos al SENAMHI..... **¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 4. Carta dirigida al director del SENAMHI-cusco solicitando datos .....**¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 5. Respuesta Del SENAMHI Y Proporción De Datos**¡Error! Marcador no definido.**

Anexo 6. Tabla de datos proporcionados por el SENAMHI**¡Error! Marcador no definido.**

I. Introducción

El análisis de las precipitaciones intensas es esencial en la ingeniería civil, ya que constituye la base para el diseño hidráulico y la planificación de sistemas de drenaje pluvial. Una deficiente estimación de las lluvias de diseño incrementa el riesgo de inundaciones y daños a la infraestructura, principalmente en zonas urbanas con condiciones geomorfológicas complejas (Tucci, 2007).

Las curvas de Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) constituyen una herramienta técnica indispensable para estimar la magnitud de eventos de precipitación extrema, ya que permiten relacionar la intensidad de la lluvia con su duración y su período de retorno. No obstante, la confiabilidad de estas curvas depende de la disponibilidad de información hidrometeorológica específica y representativa del área de estudio. En el caso de la ciudad del Cusco, y particularmente de la estación meteorológica Granja Kayra, se evidencia la ausencia o insuficiencia de estudios actualizados que desarrollen curvas IDF propias, lo que limita su aplicación directa en el diseño de obras hidráulicas y obliga al uso de información generalizada que no siempre refleja las condiciones reales de la zona. (Perez Sanchez & Senent Aparicio, 2017).

La ciudad del Cusco, ubicada en la región andina del sur del Perú, presenta una alta variabilidad climática y una topografía accidentada que incrementa su vulnerabilidad frente a eventos de precipitación intensa. Esta situación se ve agravada por el crecimiento urbano acelerado y la limitada capacidad de los sistemas de drenaje existentes, lo cual incrementa el riesgo de inundaciones y daños a la infraestructura urbana. En este contexto, resulta necesario generar información hidrológica específica que permita caracterizar adecuadamente el régimen de lluvias extremas y sirva como base técnica para una adecuada planificación y gestión del riesgo.

La presente investigación aborda esta problemática mediante el desarrollo de curvas Intensidad–Duración–Frecuencia aplicando el método de Bell, el cual permite estimar intensidades de precipitación a partir de registros de precipitación máxima diaria, constituyéndose en una alternativa adecuada para estaciones que no cuentan con registros pluviográficos continuos. El estudio se delimita espacialmente a la estación meteorológica Granja Kayra, ubicada en el distrito de San Sebastián, provincia y departamento del Cusco, y temporalmente al análisis de los registros de precipitación correspondientes al período comprendido entre los años 1990 y 2020, proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

El objetivo del estudio es desarrollar curvas IDF representativas para la estación Granja Kayra, que contribuyan al diseño adecuado de obras hidráulicas y a la mitigación de riesgos asociados a eventos extremos de precipitación en la ciudad del Cusco. La estructura de la tesis comprende siete capítulos: el Capítulo I presenta la introducción; el Capítulo II desarrolla el planteamiento del problema; el Capítulo III expone el marco teórico; el Capítulo IV describe la metodología; el Capítulo V presenta los resultados y su discusión; y los Capítulos VI y VII contienen las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio.

II. Planteamiento del problema

2.1 Descripción y formulación del problema

En los últimos años, a nivel internacional, la ocurrencia de eventos de precipitación intensa se ha intensificado, generando impactos negativos en la infraestructura urbana y evidenciando deficiencias en los sistemas de drenaje de numerosas ciudades. Esta situación ha puesto de manifiesto la importancia de contar con información hidrológica confiable, en particular con curvas de Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF), las cuales permiten estimar lluvias de diseño y reducir la incertidumbre en el planeamiento de obras hidráulicas. (World Meteorological Organization, 2009).

En el ámbito nacional, el Perú presenta una gran diversidad climática y geográfica que condiciona el comportamiento de las precipitaciones en cada región. Sin embargo, en gran parte del territorio existe una limitada disponibilidad de estaciones con registros pluviográficos continuos, lo que restringe el desarrollo de curvas IDF específicas. Como resultado, en el diseño de infraestructuras hidráulicas se emplean con frecuencia curvas generalizadas o extrapoladas de otras zonas, las cuales no siempre representan adecuadamente las condiciones locales, afectando la eficiencia y seguridad de las obras. (SENAMHI Perú, 2018).

A nivel regional, la región Cusco se caracteriza por una topografía accidentada y una marcada estacionalidad de las lluvias. Durante la temporada húmeda se presentan eventos de alta intensidad que ocasionan inundaciones, deterioro de vías y deficiencias en los sistemas de drenaje urbano. Pese a esta problemática recurrente, los estudios hidrológicos orientados al desarrollo de curvas IDF para estaciones específicas de la región son aún limitados, lo que reduce la disponibilidad de información técnica para la toma de decisiones en proyectos de infraestructura.

En el ámbito local, la estación meteorológica Granja Kayra, ubicada en el distrito de San Sebastián de la ciudad del Cusco, no cuenta con curvas Intensidad–Duración–Frecuencia elaboradas a partir de sus propios registros históricos. Esta ausencia de información específica se constituye en una limitación técnica para el diseño adecuado de obras hidráulicas locales, tales como sistemas de drenaje pluvial y estructuras de control de escorrentías. La problemática se ve agravada por la falta de registros pluviográficos de corta duración, lo que dificulta la aplicación de métodos tradicionales para la estimación de lluvias intensas.

Entre las principales causas del problema se identifican la insuficiencia de datos pluviográficos continuos, la escasa aplicación de metodologías alternativas que permitan aprovechar los registros diarios disponibles y la carencia de estudios hidrológicos focalizados en la estación Granja Kayra. A ello se suma el crecimiento urbano progresivo y la variabilidad climática, factores que incrementan la demanda de información hidrológica confiable.

Las consecuencias de esta situación se reflejan en el dimensionamiento inadecuado de obras hidráulicas, el incremento del riesgo de inundaciones urbanas, mayores costos por mantenimiento y rehabilitación de infraestructura, así como limitaciones en la planificación urbana y la gestión del riesgo frente a eventos extremos de precipitación. Frente a ello, surge la necesidad de desarrollar curvas IDF específicas para la estación meteorológica Granja Kayra, empleando el método de Bell como una alternativa técnica viable que permita generar información hidrológica representativa para la ciudad del Cusco.

2.1.1 Problema general

¿Cómo se desarrollan las curvas de Intensidad–Duración y Frecuencia (IDF) a partir del análisis de las precipitaciones máximas anuales mediante la aplicación del método de Bell en la estación meteorológica Granja Kayra de la ciudad del Cusco?

2.1.2 Problemas específicos

- PE1: ¿Cuál es el comportamiento en el análisis estadístico de las precipitaciones máximas anuales registradas en la estación meteorológica Granja Kayra de la ciudad del cusco?
- PE2: ¿Cuáles son las intensidades de la precipitación máxima anual registradas para la estimación de las diferentes duraciones de lluvia y períodos de retorno en la estación meteorológica Granja Kayra de la ciudad del cusco?
- PE3: ¿Cómo se desarrollan las curvas de Intensidad – Duración y Frecuencia (IDF) de acuerdo a la intensidad de precipitación, aplicando el método de Bell para la estación meteorológica Granja Kayra de la ciudad del Cusco?

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo General

Desarrollar las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) a partir del análisis de la precipitación máxima anual, mediante la aplicación del método de Bell, para la estación meteorológica Granja Kayra de la ciudad del Cusco

2.2.2 Objetivos Específicos

- **OE1:** Analizar estadísticamente los datos de precipitación para identificar patrones y valores extremos.
- **OE2:** Estimar las intensidades de precipitación para diferentes duraciones de lluvia y períodos de retorno en la estación meteorológica Granja Kayra de la ciudad del Cusco.

- **OE3:** Desarrollar las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) mediante la aplicación del método de Bell para la estación meteorológica Granja Kayra de la ciudad del Cusco.

2.3 Justificación e importancia

La presente tesis es importante y necesaria debido a la limitada disponibilidad de información hidrológica local confiable para la estimación de lluvias extremas en la ciudad del Cusco, específicamente en el ámbito de la estación meteorológica Granja Kayra. La ausencia de curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) desarrolladas con metodologías adecuadas restringe el correcto diseño de obras hidráulicas y la gestión del riesgo frente a eventos de precipitación intensa.

Desde el enfoque teórico, el estudio contribuye al conocimiento hidrológico aplicado al analizar el comportamiento de las precipitaciones máximas en una zona andina caracterizada por alta variabilidad climática. La aplicación del método de Bell permite fortalecer la comprensión de la relación entre la intensidad, duración y frecuencia de la lluvia, reduciendo el vacío de conocimiento existente a nivel local.

En el ámbito metodológico, la investigación demuestra la viabilidad del método de Bell como una alternativa técnica para la elaboración de curvas IDF a partir de registros pluviométricos históricos, especialmente en contextos con información limitada. El procedimiento empleado puede servir como referencia para estudios similares en otras localidades.

Desde el punto de vista práctico, los resultados proporcionan curvas IDF específicas que pueden ser utilizadas en el diseño de sistemas de drenaje pluvial, alcantarillado y otras infraestructuras hidráulicas, mejorando la precisión de las lluvias de diseño y la seguridad de las obras.

En el ámbito social, la investigación contribuye indirectamente a la reducción del riesgo de inundaciones y a la protección de la población. Finalmente, desde el enfoque ambiental, un diseño hidráulico adecuado favorece la mitigación de impactos negativos como la erosión y la degradación de cuerpos de agua, promoviendo un desarrollo urbano sostenible.

2.4 Hipótesis

Hipótesis general.

- El desarrollo de las curvas IDF mediante el método de Bell caracteriza un régimen de lluvias donde la intensidad es inversamente proporcional a la duración y directamente proporcional al periodo de retorno.

Hipótesis específicas.

- El análisis estadístico de la precipitación máxima anual identifica un patrón de alta variabilidad con presencia de valores extremos en las últimas décadas.
- Las mayores intensidades de precipitación estimada se concentran en duraciones cortas (menores a 30 minutos) y periodos de retorno elevados (50 y 100 años).
- Las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) obtenidas mediante el método de Bell representan adecuadamente la relación entre intensidad, duración y frecuencia de las precipitaciones en la estación meteorológica Granja Kayra.

2.5 Variables

variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	indicadores	medición
VI. Precipitación Máxima Anual.	Según Guarín y Sánchez (2022), la precipitación máxima anual corresponde al valor más alto de lluvia registrada en un día dentro de un año en una estación, y su análisis permite determinar las curvas IDF que describen el comportamiento extremo de las precipitaciones en una región.	Cantidad máxima de precipitación diaria (en mm) registrada en un año en una estación meteorológica, obtenida de registros diarios y analizada estadísticamente para determinar el comportamiento extremo de las lluvias y elaborar curvas IDF.	-Magnitud de la precipitación.	- Precipitación máxima anual registrada.	mm
			-Intensidad de precipitación.	-Intensidad máxima de lluvia	mm/h
			-duración de evento	-tiempo de duración de lluvia	minutos
			- Recurrencia	-Intervalo promedio entre eventos extremos	años
VD. Curvas de Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF).	Según lo establecido por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2011), las gráficas IDF constituyen una herramienta técnica para el dimensionamiento donde se define el vínculo existente entre la magnitud pluviométrica, su intervalo temporal y la probabilidad de ocurrencia de dicho evento.	las curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) se construyen a partir del procesamiento estadístico de los registros de precipitaciones máximas observadas en diferentes duraciones (por ejemplo, 5, 10, 30, 60, 120 minutos, hasta 24 horas) en una estación meteorológica.	-Intensidad de precipitación	- Intensidad estimada para distintas duraciones	mm/h
			-Duración	Intervalos de duración considerados.	minutos
			-Frecuencia	-Parámetros del método Bell	Adimensional
				- Periodo de retorno.	Años
			-Parámetros del modelo	-Coeficiente del método de Bell	adimensional
			-Análisis estadístico de precipitación.	-Desviación estándar	mm
				-Intensidad de precipitación	mm/hr

III. Marco Teórico

3.1 Antecedentes

3.1.1 Antecedentes internacionales

Hernández y González (2023) desarrollaron una investigación orientada a la estimación de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) a partir del análisis de registros históricos de precipitación máxima anual, con la finalidad de proporcionar información hidrológica confiable para el diseño de obras hidráulicas y sistemas de drenaje pluvial. Este estudio se alinea con el objetivo de analizar estadísticamente las precipitaciones máximas registradas en una estación meteorológica, a fin de establecer relaciones entre la intensidad de lluvia, la duración del evento y su frecuencia de ocurrencia. La metodología aplicada fue de enfoque cuantitativo y tipo aplicada, utilizando series históricas de precipitaciones máximas anuales, las cuales fueron depuradas y analizadas estadísticamente. Posteriormente, se ajustaron los datos a funciones de distribución de probabilidad, permitiendo estimar intensidades de precipitación para diferentes duraciones y períodos de retorno, en concordancia con el objetivo de desarrollar curvas IDF representativas de la zona de estudio. Los resultados obtenidos demostraron que la intensidad de precipitación disminuye conforme aumenta la duración del evento y se incrementa a medida que aumenta el período de retorno, lo cual permitió generar curvas IDF consistentes y técnicamente válidas, cumpliendo con el objetivo de proporcionar herramientas hidrológicas para el diseño de infraestructura hidráulica.Finalmente, los autores concluyeron que la elaboración de curvas IDF basadas en información pluviométrica local es fundamental para el diseño adecuado de sistemas de drenaje y obras hidráulicas, contribuyendo a la reducción del riesgo de inundaciones y a la toma de decisiones en la planificación territorial, lo que se vincula directamente con el objetivo de mejorar la gestión de aguas pluviales mediante información hidrológica confiable.

En el estudio desarrollado por Guarín Rivera y Sánchez Villa (2022) se realizó una investigación orientada a la construcción y evaluación de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) a partir de registros de precipitaciones máximas diarias, con el objetivo de estimar intensidades de precipitación para diferentes duraciones y períodos de retorno en zonas con limitada información pluviográficos, lo cual se vincula directamente con el objetivo de analizar estadísticamente la precipitación máxima para el desarrollo de curvas IDF representativas de una zona de estudio.La metodología aplicada fue de enfoque cuantitativo y tipo aplicada. Los autores utilizaron series históricas de precipitación máxima en 24 horas provenientes de estaciones meteorológicas, las cuales fueron sometidas a procesos de validación, análisis estadístico y ajuste a distribuciones de probabilidad para la estimación de eventos extremos. Posteriormente, se emplearon métodos empíricos y estadísticos, como la ecuación de Bell, para transformar precipitaciones diarias en intensidades asociadas a diferentes duraciones, permitiendo cumplir con el objetivo de determinar intensidades de lluvia para distintos períodos de retorno y desarrollar curvas IDF.Los resultados obtenidos evidenciaron que las intensidades de precipitación estimadas presentan un comportamiento coherente con la teoría hidrológica, disminuyendo con el incremento de la duración del evento y aumentando conforme se consideran mayores períodos de retorno. Asimismo, la regionalización de los parámetros permitió generar curvas IDF en áreas sin registros directos, contribuyendo al objetivo de proporcionar herramientas hidrológicas aplicables al diseño de obras hidráulicas y sistemas de drenaje pluvial. Finalmente , Guarín y Sánchez concluyeron que es posible obtener curvas IDF confiables a partir de información pluviométrica diaria mediante la aplicación de métodos estadísticos adecuados, destacando que estas curvas constituyen un insumo fundamental para el diseño hidrológico y la gestión de aguas pluviales. Esta conclusión se alinea con el objetivo de

mejorar la planificación y el diseño de infraestructura hidráulica mediante el uso de información hidrológica local y metodológicamente validada.

En el estudio realizado por Quispe Mamani (2018) se abordó la determinación de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) a partir de series de precipitación, con el objetivo de obtener expresiones de intensidad de lluvia para distintas duraciones y períodos de retorno que permitan apoyar la planificación y el diseño de obras hidráulicas y sistemas de drenaje. La metodología adoptada fue de enfoque cuantitativo y tipo aplicada. Se recopilaron datos pluviométricos históricos de pluviómetros de la estación meteorológica de Viacha (departamento de La Paz, Bolivia), y se procedió a la estimación de datos faltantes, análisis de precipitación anual y mensual, y cálculo de los parámetros de la ecuación de las curvas IDF. Estos pasos incluyeron la recolección y depuración de datos de precipitación, el análisis estadístico de la serie histórica y la obtención de los parámetros k, m y n que definen las curvas IDF para distintos valores de retorno. Los resultados mostraron que la precipitación promedio anual en la estación fue 573.29 ± 158.90 mm, con mayor concentración de lluvias en los meses de enero a marzo. A partir del análisis, se determinaron las constantes de las curvas IDF ($k = 21.142$; $m = 0.456$; $n = 0.401$), lo que permitió construir las curvas para períodos de retorno de 1, 5, 10, 25, 50 y 100 años, cumpliendo así con el objetivo de establecer relaciones entre intensidad, duración y frecuencia de la precipitación. Finalmente, se concluyó que la metodología aplicada permitió generar curvas IDF representativas de la estación estudiada, las cuales constituyen una herramienta técnica útil para el diseño hidrológico en la región. Estos resultados se alinean con el objetivo de proporcionar información hidrológica confiable mediante el análisis de precipitación máxima para la estimación de curvas IDF, lo que contribuye a la planificación y diseño de infraestructura hidráulica.

3.1.2 Antecedentes nacionales

En el estudio realizado por Zevallos Ruiz (2018) desarrolló una investigación orientada a la generación de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para el territorio peruano utilizando datos de precipitación simulados con el modelo estocástico de pulso rectangular de Bartlett-Lewis, con el objetivo de estimarlas para distintos períodos de retorno (5, 50, 100 y 200 años) en condiciones de limitada disponibilidad de datos horarios. La metodología utilizada fue de enfoque cuantitativo aplicado, basada en la simulación de datos pluviométricos horarios mediante el modelo BLRPM calibrado con información diaria observada y datos satelitales TRMM 3b42, para posteriormente aplicar la distribución Genera de Extremos (GEV) y estimar las intensidades asociadas a diferentes duraciones y períodos de retorno. Los resultados mostraron que las series simuladas con el modelo BLRPM capturan las principales características estadísticas de las curvas IDF, permitiendo construir curvas representativas para distintas zonas del Perú aplicando los datos diarios proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Se concluyó que es posible estimar curvas IDF confiables a nivel nacional aun con registros horarios limitados, mediante el uso de métodos de simulación estadística y datos diarios, lo cual constituye una contribución importante para el diseño hidrológico y la ingeniería civil en el contexto peruano.

En el estudio realizado por Vela Poma (2023) llevó a cabo un estudio con el propósito de comparar las curvas IDF generadas a partir de estaciones pluviométricas con las obtenidas usando el producto satelital grillado PISCO para el departamento de Puno, con el fin de evaluar la precisión y aplicabilidad de diferentes fuentes de datos para la estimación de curvas IDF en zonas con escasa cobertura de estaciones. La metodología consistió en recopilar datos de precipitación máxima de 24 horas de 22 estaciones pluviométricas proporcionadas por el SENAMHI y del producto grillado de precipitación PISCO pd, aplicar

análisis de frecuencia usando diversas distribuciones de probabilidad (Log-normal, Log Pearson III, Gumbel) y pruebas de bondad de ajuste, calcular precipitaciones máximas para diferentes períodos de retorno y duraciones, y finalmente construir y comparar las curvas IDF. Los resultados indicaron que las intensidades obtenidas a partir de datos de estaciones y del producto PISCO presentan variaciones significativas dependiendo de la ubicación geográfica, demostrando diferencias importantes en la estimación de curvas IDF según la fuente de datos utilizada. Se concluyó que la elección de la fuente de datos influye considerablemente en las curvas IDF generadas, y que se requiere un análisis cuidadoso de la calidad y representatividad de los datos pluviométricos para aplicaciones de diseño hidrológico en regiones como Puno.

3.1.3 Antecedentes locales

En el estudio realizado por Trauco Campos (2019) se evaluaron las precipitaciones máximas registradas en la estación meteorológica de Quillabamba (distrito de La Convención, Cusco) con el propósito de determinar intensidades de precipitación en función de su duración y frecuencia, lo cual se vincula directamente con los objetivos de analizar estadísticamente la precipitación máxima y desarrollar curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para la zona de estudio. La metodología empleada fue de enfoque cuantitativo y aplicada; se utilizaron datos históricos de precipitación máxima proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Los datos fueron sometidos a análisis estadístico y seleccionados mediante pruebas de ajuste y homogeneidad. Posteriormente, se aplicó la metodología de Bell para calcular las intensidades de precipitación para distintas duraciones y se comparó con los resultados obtenidos mediante el método IILA (Instituto Italo-Latino Americano) propuesto en la Norma OS.060 del Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú. Los resultados mostraron que las intensidades de precipitación estimadas mediante ambos métodos

presentan una relación sistémica y coherente con la variación de duración y frecuencia, permitiendo generar curvas de intensidad de precipitación aplicables al análisis hidrológico local. Además, la comparación entre métodos permitió identificar diferencias en la estimación de intensidades, lo cual aporta criterios técnicos para la selección metodológica en la generación de curvas IDF. Se concluyó que la aplicación de métodos estadísticos como Bell e IILA para el análisis de datos pluviométricos en Cusco es útil para estimar intensidades de precipitación y generar curvas IDF confiables, contribuyendo así al diseño de obras hidráulicas, sistemas de drenaje y la planificación de gestión del recurso hídrico en el ámbito local. Este estudio constituye un antecedente directo para investigaciones hidro-estadísticas relacionadas con la precipitación extrema en Cusco y la estimación de curvas IDF.

3.2 Bases teóricas

3.2.1 Precipitación máxima anual registrada

La precipitación máxima anual registrada (PMAR) corresponde al valor máximo de lluvia acumulada en un intervalo determinado (usualmente 24 horas) dentro de cada año hidrológico. Este indicador es fundamental en el análisis de eventos extremos y constituye la base para el desarrollo de estudios hidrológicos aplicados, como la construcción de curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) en la estación meteorológica Granja Kayra, ubicada en la ciudad del Cusco.

Según Ven Te Chow et al. (1994), la magnitud de la precipitación es un parámetro esencial para el diseño hidrológico, ya que determina la capacidad requerida de las obras de drenaje y control hidráulico.

De acuerdo con David R. Maidment (1993), la intensidad es uno de los factores más importantes en el análisis de lluvias extremas, especialmente en estudios orientados al diseño de sistemas de drenaje urbano.

La recurrencia o frecuencia hace referencia al intervalo de tiempo promedio en el cual un evento de determinada magnitud es igualado o superado, conocido como periodo de retorno (años). El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú señala que el análisis de recurrencia permite estimar probabilidades de ocurrencia de eventos extremos, siendo esencial para la gestión del riesgo de desastres en zonas vulnerables como Cusco.

3.2.2 Curvas de Intensidad Duración y Frecuencia (IDF)

Conforme a lo indicado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2011), las gráficas IDF representan un componente técnico para el dimensionamiento mediante el cual se determina la correlación entre la magnitud de la precipitación, el intervalo temporal del evento y la probabilidad con que este puede manifestarse.

Pulgarín (2009) sostiene que las curvas IDF permiten estimar tormentas de diseño en zonas donde la información pluviográficos es inexistente o limitada, facilitando la obtención de intensidades de precipitación necesarias para la aplicación de modelos lluvia–escorrentía y la posterior estimación de caudales máximos de diseño. Esta característica resulta especialmente relevante en regiones donde los registros históricos presentan discontinuidades o series cortas.

De manera complementaria, McCuen (1989) indica que las curvas IDF representan insumos fundamentales para numerosos métodos de diseño hidrológico, debido a que proporcionan las intensidades de lluvia asociadas a distintos períodos de retorno y duraciones, las cuales son empleadas en el dimensionamiento de sistemas de drenaje pluvial, obras de control de inundaciones y estructuras hidráulicas en general.

Desde el enfoque teórico, las curvas IDF establecen una relación funcional entre tres variables hidrológicas básicas: la intensidad de precipitación, la duración del evento y el período de retorno. Matemáticamente, esta relación se expresa como:

$$I = f(T, d)$$

Donde:

- I: es la intensidad expresada en mm/h,
- d: corresponde a la duración en horas o minutos
- T: representa el periodo de retorno.

3.2.3 Estimación tradicional de las curvas IDF

Según Pulgarín (2009), Hersh Field desarrolló, entre las décadas de 1960 y 1980, una de las contribuciones más importantes al estudio de las precipitaciones extremas mediante la elaboración de cartografías de isolíneas pluviométricas para el territorio de los Estados Unidos. Dichos mapas abarcaron duraciones de lluvia comprendidas entre 30 minutos y 24 horas, así como frecuencias de ocurrencia que variaron entre 1 y 100 años. Estos trabajos fueron inicialmente difundidos por el Weather Bureau a través del documento técnico Technical Paper No. 40 (TP-40), el cual posteriormente fue actualizado mediante el reporte Hidrometeorológica Report No. 35 (HYDRO-35), donde se incorporaron estimaciones para duraciones más cortas, desde 5 minutos hasta 1 hora, y períodos de retorno de entre 2 y 100 años.

La metodología aplicada por Hershfield se basó en el procesamiento estadístico de registros provenientes de aproximadamente 200 estaciones con monitoreo continuo, cuyas series temporales presentaban una longitud promedio cercana a los 40 años. A partir de estos datos, se derivaron valores y coeficientes adimensionales que permitieron transformar registros de estaciones con mediciones diarias en estimaciones correspondientes a duraciones menores. Dichos coeficientes fueron representados gráficamente y posteriormente asociados a cerca de 5000 estaciones de precipitación diaria consideradas en el análisis.

Una vez establecidos los coeficientes adimensionales, Hershfield aplicó un análisis de frecuencias utilizando las distribuciones de Gumbel y Lognormal, lo que permitió obtener coeficientes específicos para precipitaciones con duración de 24 horas. De este modo, el valor medio anual de la precipitación máxima diaria de una estación podía ser ajustado mediante un coeficiente asociado al período de retorno de interés. Posteriormente, un segundo coeficiente era empleado para desagregar dicha precipitación hasta alcanzar la intensidad correspondiente a intervalos temporales más cortos.

La principal contribución de Hershfield radica en haber demostrado la existencia de una relación relativamente estable entre las precipitaciones extremas diarias y aquellas de menor duración, independientemente de la frecuencia de ocurrencia. En particular, estableció que las precipitaciones máximas asociadas a duraciones de 5, 10, 15 y 30 minutos mantienen una relación empírica con la precipitación horaria, representada por coeficientes de 0,29; 0,45; 0,57 y 0,79, respectivamente. Si bien el propio Hershfield reconoció en 1984 que estos coeficientes presentan una dispersión considerable alrededor de los valores promedio, destacó su elevada utilidad práctica para la estimación de precipitaciones intensas en contextos con información.

Desde el punto de vista del presente estudio, estos aportes teóricos constituyen un sustento fundamental para el procesamiento y desagregación temporal de los valores máximos anuales de precipitación registrados en la estación meteorológica Granja Kayra, permitiendo la estimación de intensidades para distintas duraciones y la posterior construcción de curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) representativas del área de estudio.

3.2.4 Ecuación de Bell

Bell formuló una expresión matemática generalizada para vincular intensidad, duración e intervalo de recurrencia, incorporando las correlaciones existentes entre la altura

de precipitación y su frecuencia (CF), además de la relación entre dicha altura pluviométrica y el lapso temporal (CD), obteniéndose así la siguiente expresión matemática.

$$P_T^t = (a * LnT + b) * \left(a_1 * t^{b_1} + c\right) * P_{T_1}^{t_1}$$

Donde:

- P_T^t: La magnitud de la precipitación es un valor que se relaciona con un período de retorno y una duración específicos, independientemente de cuáles sean estos.
- $P_{T_1}^{t_1}$: Es lámina de precipitación para "T_1" años de período de retorno y "t_1" minutos de duración.
- T_1: Es el periodo de retorno.
- t_1: Es el periodo de duración de la precipitación.
- a, b, a_1, b_1, c: Son los coeficientes de la ecuación propios de cada zona en estudio

Con la información hidrológica de diferentes zonas del mundo. F.C. Bell, determinó los coeficientes a, b, a_1, b_1 y c; la que permitió definir la ecuación siguiente.

$$P_T^t = (0.21 * LnT + 0.52) * (0.54 * t^{0.25} - 0.50) * P_{10}^{60}$$

P_{10}^{60}= precipitación máxima de 60 minutos para un período de retorno de 10 años.

Válida para las condiciones de:

$$2años \leq T \leq 100años$$

$$5min. \leq t \leq 120min$$

3.2.5 Distribuciones de probabilidad

Según Mijares (1992), dado que la planificación y el diseño implican eventos futuros cuya magnitud o momento de ocurrencia no pueden preverse, es necesario recurrir al análisis de la probabilidad o la frecuencia para abordarlos adecuadamente.

En ese sentido, Khaliq et al. (2006), manifiesta que el análisis de frecuencias es una metodología utilizada para ajustar una distribución de probabilidad a un conjunto de observaciones, con el fin de determinar las probabilidades de eventos futuros de interés.

3.2.5.1 Distribución Gumbel

La distribución Gumbel presenta las funciones de probabilidad (1) y probabilidad acumulada (2), siguientes:

$$f(x) = \frac{1}{\propto} * e^{-\left(\frac{x-\mu}{\propto}\right)} * e^{-e^{-\left(\frac{x-\mu}{\propto}\right)}} \quad (1)$$

$$\mathrm{F(x)} = \mathrm{e}^{-\mathrm{e}^{-\left(\frac{\mathrm{x}-\mu}{\propto}\right)}} \quad (2)$$

Si hacemos $\mathrm{y} = \frac{\mathrm{x}-\mu}{\alpha}$, entonces $\mathrm{F(x)} = \mathrm{G(y)}$

Obtenemos: $\mathrm{G(y)} = \mathrm{e}^{-\mathrm{e}^{-\mathrm{y}}}$ (3)

A continuación, se detallan las fórmulas que se utilizan para obtener los valores de los parámetros de ajuste de la distribución.

Parámetro de escala: $\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * S$ (4)

Parámetro de posición: $\mu = \bar{X} - 0.45 * S$ (5)

Media: $\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$ (6)

Desviación estándar: $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ (7)

Los eventos de diseño por esta distribución se obtienen mediante la expresión:

$$\mathrm{X} = \overline{\mathrm{X}} - \frac{\mathrm{S}}{\sigma_{\mathrm{N}}}\left(\overline{\mathrm{Y}}_{\mathrm{N}} + \mathrm{Ln}\left(\mathrm{Ln}\left(\frac{\mathrm{T}}{\mathrm{T}-1}\right)\right)\right) \quad \text{ó} \quad \mathrm{X} = \overline{\mathrm{X}} + \mathrm{K_T} * \mathrm{S} \quad (8); (9)$$

$\mathrm{K_T}$: Factor de frecuencia que se calcula mediante la siguiente expresión.

$$\mathrm{K_T} = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} * \left\{0.5772 + \ln\left[\ln\left(\frac{\mathrm{T}}{\mathrm{T}-1}\right)\right]\right\}$$

Donde:

- x: Variable aleatoria que representa el valor del evento hidrológico analizado (precipitación máxima, intensidad de lluvia, caudal máximo, etc.).
- f(x) : Función de densidad de probabilidad de la distribución de Gumbel.
- F(x) : Función de distribución acumulada de la distribución de Gumbel.

- μ: Parámetro de posición de la distribución de Gumbel.
- α: Parámetro de escala de la distribución de Gumbel.
- e: Base del logaritmo natural.
- y: Variable reducida de Gumbel, definida como $y = \frac{x-\mu}{\alpha}$
- G(y): Función de distribución acumulada expresada en términos de la variable reducida.
- $\bar{X}$: Media aritmética de la muestra de datos analizados.
- xi: Valor individual del evento hidrológico en la serie de datos.
- η : Número total de datos de la muestra.
- S : Desviación estándar muestral de la serie de datos.
- T: Período de retorno del evento (en años).
- KT : Factor de frecuencia de Gumbel asociado al período de retorno T.
- σN : Desviación estándar de la variable reducida de Gumbel.
- Y N: Valor medio de la variable reducida de Gumbel.
- 0.5772: Constante de Euler–Mascheroni.

3.2.5.2 Distribución Gamma de 2 parámetros

A continuación, se presentan las fórmulas de la función de densidad (10) y la probabilidad acumulada (11) de la distribución Gamma con dos parámetros.

$$f(x) = \frac{x^{\gamma-1} * e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\gamma} * \Gamma(\gamma)} \qquad (10)$$

$$F(x) = \int_0^x \left(\frac{x^{\gamma-1} * e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\gamma} * \Gamma(\gamma)} \right) dx \qquad (11)$$

Si hacemos $Y = \frac{x}{\beta}$, Y: Variable reducida

Obtenemos:

$$G(Y) = \int_0^Y \left(\frac{(Y)^{\gamma-1} * e^{-Y}}{\Gamma(\gamma)} \right) dY \qquad (12)$$

Estimación de Parámetros:

Parámetro de forma:

$$\gamma = \frac{(0.5000876+0.1648852*y-0.0544274y^2)}{y} \quad (13)$$

Donde: $$y = Ln(\overline{X}) - \overline{Ln(X)} \quad (14)$$

Parámetro de escala: $$\beta = \frac{\overline{X}}{\gamma} \quad (15)$$

$\Gamma(\gamma)$ = función gamma completa, definida como:

$$\Gamma(\gamma) = \int_0^{+\infty}\left(e^{-x} * X^{(\gamma-1)}\right)dx \quad (16)$$

Donde:

- x: Variable aleatoria que representa el evento hidrológico analizado (precipitación máxima, intensidad de lluvia, caudal máximo).
- f(x): Función de densidad de probabilidad de la distribución Gamma.
- F(x) : Función de distribución acumulada de la distribución Gamma
- γ: Parámetro de forma de la distribución Gamma.
- β: Parámetro de escala de la distribución Gamma.
- Γ(γ): Función Gamma completa.
- e: Base del logaritmo natural.
- Y: Variable reducida de la distribución Gamma.
- G(Y) : Función de distribución acumulada expresada en términos de la variable reducida.
- $\bar{X}$: Media aritmética de la muestra de datos.
- ln ($\bar{X}$) : Logaritmo natural de la media muestral.
- (lnX) $\bar{}$: Media aritmética de los logaritmos naturales de los datos.
- y: Variable auxiliar utilizada para la estimación del parámetro de forma.
- n : Número total de datos de la muestra.

3.2.5.3 Distribución Log Normal de 2 parámetros

La expresión para la función de densidad de la distribución Log-Normal de dos parámetros es la que se detalla a continuación:

$$F(x) = \frac{1}{x*\sigma_y*(\sqrt{2*\pi})} * e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{lnx-\mu_y}{\sigma_y}\right]^2} \qquad (17)$$

Si hacemos: $\mathrm{z} = \frac{\mathrm{lnx}-\mu_y}{\sigma_y}$

Se obtiene la distribución normal estándar:

$$\mathrm{F(z)} = \frac{1}{(\sqrt{2*\pi})} * \int_{-\infty}^{z} * \mathrm{e}^{-\frac{z^2}{2}}\,\mathrm{dz} \qquad (18)$$

Estimación de parámetros:

Media o parámetro de escala:

$$\mu_y = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^{n}(\mathrm{lnx_i}) \qquad (19)$$

Desviación estándar o parámetro de forma:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\mathrm{lnx_i}-\mu_y)^2}{n-1}} \qquad (20)$$

Los eventos de diseño por esta distribución se obtienen mediante la expresión:

$$Ln(X) = \mu_y + K * \sigma_y \qquad \rightarrow \qquad X = e^{(\mu_y+K*\sigma_y)} \qquad (21)$$

K: Factor de frecuencia que puede trabajarse en el campo original o en el campo transformado.

Campo transformado: Cuando se opera en el espacio transformado, se utilizan el promedio y la desviación típica de los logaritmos, de la siguiente forma:

$$Ln(X) = \mu_y + K * \sigma_y \qquad (22)$$

Con K con variable normal estandarizada para el T dado, μ_y media de los logaritmos y σ_y es la desviación estándar de los logaritmos.

Campo original: Si se trabaja con los X sin transformar el K se calcula como:

$$K_T = \frac{e^{\left\{K_* \sqrt{\left(\ln\left(1+C_v^2\right)\right)} - \left(\frac{ln\left(1+C_v^2\right)}{2}\right)\right\}} - 1}{C_v} \qquad (23)$$

K es la variable normal estandarizada para el T dado, $C_v = \frac{s}{\bar{x}}$ es el coeficiente de variación, $\bar{x}$ el primer término indica el promedio de la muestra de datos iniciales, mientras que el segundo constituye la desviación típica de dicha muestra.

Donde:

- x: Variable aleatoria positiva que representa el evento hidrológico analizado.
- F(x): Función de densidad de probabilidad de la distribución Log-Normal
- μy: Media de los logaritmos naturales de los datos (parámetro de escala).
- σy : Desviación estándar de los logaritmos naturales de los datos (parámetro de forma)
- lnx: Logaritmo natural de la variable x.
- z: Variable normal estandarizada.
- F(z): Función de distribución acumulada de la normal estándar.
- xi: Valor individual del evento hidrológico en la muestra.
- n: Número total de datos de la muestra.
- K: Factor de frecuencia asociado al período de retorno, obtenido de la distribución normal estándar.
- X: Valor de diseño estimado para un período de retorno determinado.
- Cv: Coeficiente de variación de la muestra, definido como.
- s: Desviación estándar muestral de los datos originales.
- $\bar{X}$: Media aritmética de la muestra de datos originales.
- KT : Factor de frecuencia en el campo original para un período de retorno T.

3.2.5.4 Distribución Log Pearson tipo III

La distribución Log Pearson Tipo III presenta la función de probabilidad (24), siguiente:

$$F(X) = \frac{1}{X*\beta*\Gamma(\gamma)} * \left(\frac{\ln(X)-X_0}{\beta}\right)^{\gamma-1} * e^{\left(-\frac{\ln(X)-X_0}{\beta}\right)} \qquad (24)$$

Variable Reducida: $y = \left(\frac{\ln(X)-X_0}{\beta}\right)$

Función Acumulada Reducida:

$$G(Y) = \int_0^Y \left(\frac{(Y)^{\gamma-1}*e^{(-Y)}}{\Gamma(\gamma)}\right) dY \qquad (25)$$

Parámetro de Posición:

$$x_0 = \bar{X}_{lnx} - \frac{2*S_{lnx}}{C_{S_{lnx}}} \qquad (26)$$

Parámetro de Forma: $\gamma = \frac{4}{C_{S_{lnx}}^2}$ (27)

Parámetro de Escala: $\beta = \frac{C_{S_{lnx}}*S_{lnx}}{2}$ (28)

Γ(γ) = función gamma completa, definida como:

$$\Gamma(\gamma) = \int_0^{+\infty}\left(e^{-x} * X^{(\gamma-1)}\right)dx \qquad (29)$$

Media: $\bar{X}_{lnx} = \frac{\sum lnx}{N}$ (30)

Desviación Estándar:

$$S_{lnx} = \sqrt{\frac{\sum(lnx-\bar{X}_{lnx})^2}{N-1}} \qquad (31)$$

Sesgo o Coeficiente de Asimetría:

$$C_{S_{lnx}} = \frac{N*\sum(lnx-\bar{X}_{lnx})^2}{(N-1)*(N-2)*S_{lnx}^2} \qquad (32)$$

Los eventos de diseño por esta distribución se obtienen mediante la expresión:

$$Ln(X) = \bar{X}_{lnx} + K * S_{lnx} \qquad \rightarrow \qquad X = e^{(\bar{X}_{lnx}+K*S_{lnx})} \qquad (33)$$

K: Factor de frecuencia que puede obtenerse por medio de la ecuación (34), que viene dada por la siguiente expresión:

$$K \approx z + (z^2 - 1) * \frac{C_S}{6} + \frac{1}{3} * (z^3 - 6 * z) * \left(\frac{C_S}{6}\right)^2 - (z^2 - 1) * \left(\frac{C_S}{6}\right)^3 + z * \left(\frac{C_S}{6}\right)^4 + \frac{1}{3} * \left(\frac{C_S}{6}\right)^5 (34)$$

Donde z es la variable normal estandarizada.

Este valor de K se encuentra tabulado de acuerdo al valor de C_S calculado con la muestra.

Donde:

- X: Variable aleatoria positiva que representa el evento hidrológico analizado (precipitación máxima, intensidad de lluvia o caudal máximo).
- F(X): Función de densidad de probabilidad de la distribución Log-Pearson Tipo III.
- G(Y): Función de distribución acumulada reducida.
- ln(X): Logaritmo natural de la variable hidrológica.
- x0: Parámetro de posición de la distribución Log-Pearson Tipo III.
- γ: Parámetro de forma de la distribución.
- β: Parámetro de escala de la distribución.
- e: Base del logaritmo natural.
- y: Variable reducida.
- Γ(γ) : Función Gamma completa.
- $\bar{X}$lnx: Media aritmética de los logaritmos naturales de los datos.
- Slnx: Desviación estándar de los logaritmos naturales de la muestra.
- CSlnx: Coeficiente de asimetría (sesgo) de los logaritmos naturales de los datos.
- xi: Valor individual del evento hidrológico observado.
- N: Número total de datos de la muestra.
- K: Factor de frecuencia asociado al período de retorno.

- z: Variable normal estandarizada correspondiente al período de retorno analizado.
- T: Período de retorno del evento (en años)

3.2.6 Análisis de confiabilidad

Según Ortiz (2015), los especialistas Kite (1988) y Mamdouh (1993) manifiestan la ausencia de acuerdo universal respecto al modelo de distribución óptimo para valores pluviométricos extremos, razón por la cual recomiendan que la selección del modelo apropiado recaiga en el juicio técnico del analista. Dicha determinación puede ejecutarse a través de métodos de verificación visual o fundamentándose en los resultados de pruebas estadísticas de bondad de ajuste, tales como Chi Cuadrado, Smirnov-Kolmogorov o Cramer-Von Mises. Dichos ensayos implican la obtención de un parámetro estimado y su posterior contrastación con valores críticos tabulados para determinar la pertinencia del ajuste realizado. En lo concerniente a la verificación visual, los registros empíricos de la serie temporal se grafican en contraste con la función de distribución probabilística teórica, permitiendo establecer de manera perceptual (y con cierto grado de subjetividad) la idoneidad o no del ajuste propuesto.

3.3 Definición de términos

- **Estación meteorológica.** Jiménez (2014) señala que las instalaciones meteorológicas constituyen espacios destinados a efectuar registros y monitoreos puntuales de diferentes parámetros atmosféricos mediante equipos especializados, permitiendo así caracterizar las condiciones climáticas en diversas zonas geográficas
- **Precipitación.** Villón (2002) señala que la precipitación representa cualquier manifestación de agua atmosférica que, al formarse en las masas nubosas, desciende hacia la tierra; según este concepto, puede manifestarse como lluvia, granizo, llovizna o nieve. Asimismo, desde la perspectiva de la hidrología aplicada a la ingeniería, constituye el origen fundamental de los recursos hídricos superficiales, siendo su

cuantificación y evaluación el fundamento inicial para investigaciones relacionadas con la gestión y regulación del recurso hídrico.

- **Medición de la precipitación.** Curo Salazar (2021) indica que la cantidad de lluvia se mide mediante la altura que alcanza la columna acuosa, expresándose comúnmente en milímetros. Este valor representa el volumen de agua que se almacenaría sobre una superficie plana y nivelada, asumiendo que el líquido precipitado no se infiltra ni escurre del sitio de caída.
- **Duración.** Curo Salazar (2021) señala que la duración se refiere al intervalo temporal comprendido desde el inicio hasta la finalización del evento pluviométrico. Asimismo, indica que el período de duración es un lapso específico, expresado en minutos u horas, seleccionado dentro del tiempo total del episodio lluvioso, siendo este parámetro fundamental para calcular los valores máximos de intensidad pluviométrica.
- **Frecuencia.** Bautista y Gregorio (2004) definen que el período de retorno es el intervalo con el que ocurre una tormenta con características específicas de intensidad y duración dentro de un período de tiempo relativamente largo, generalmente expresado en años.
- **Periodo de retorno.** Barriga Machado (2023) señala que el período de retorno constituye el lapso temporal medio durante el cual un fenómeno de intensidad x puede ocurrir nuevamente o ser excedido al menos una vez, siendo esta noción inversa a la frecuencia
- **Regresión lineal.** Laguna (2014) señala que el análisis de regresión lineal es un método estadístico utilizado para modelar cuantitativamente la relación existente entre una variable dependiente y uno o múltiples factores predictores.
- **Correlación.** Morales y Rodríguez (2016) señalan que el coeficiente de correlación es un indicador estadístico que cuantifica el grado de asociación o dependencia existente entre dos o más variables

- **Coeficiente de determinación.** Palma (2022) señala que el coeficiente de determinación es un indicador que cuantifica el grado en que un modelo de regresión logra describir las fluctuaciones de la variable respuesta a partir de las variables explicativas

IV. Metodología

4.1 Tipo y nivel de investigación

4.1.1 Tipo de investigación

La presente tesis es de tipo aplicada, debido a que utiliza fundamentos teóricos y métodos estadísticos existentes para dar solución a un problema práctico relacionado con la estimación de eventos hidrológicos extremos, específicamente en el desarrollo de curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF), orientadas al diseño y evaluación de obras hidráulicas. Este tipo de investigación se caracteriza por su finalidad práctica y su aporte directo a la solución de problemas reales de ingeniería, según Roberto Hernández Sampieri, Carlos Fernández Collado y María del Pilar Baptista Lucio (2014).

4.1.2 Nivel de investigación

La investigación es de nivel descriptivo porque se orienta a caracterizar y describir el comportamiento de la precipitación máxima anual y a desarrollar curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) para la estación meteorológica Granja Kayra, sin buscar explicar relaciones causales ni contrastar hipótesis. El estudio se basa en el análisis estadístico de registros pluviométricos históricos y en la aplicación del método de Bell para obtener estimaciones de intensidades de precipitación (Roberto Hernández Sampieri, Carlos Fernández Collado & María del Pilar Baptista Lucio, 2014).

4.1.3 Diseño de investigación

El diseño de la investigación es no experimental y longitudinal. Es no experimental porque las variables de estudio no son manipuladas deliberadamente, sino que son observadas y analizadas a partir de registros históricos de precipitación. Asimismo, es de diseño longitudinal porque analiza una serie histórica de registros pluviométricos correspondientes a diferentes años, lo que permite observar el comportamiento de la precipitación máxima a lo largo del tiempo. Este tipo de diseño se caracteriza por estudiar

un mismo fenómeno en distintos momentos temporales, sin manipular las variables, utilizando datos registrados en períodos sucesivos (Roberto Hernández Sampieri, Carlos Fernández Collado & María del Pilar Baptista Lucio, 2014).

4.1.4 Enfoque de investigación

El enfoque de la investigación es cuantitativo, ya que se fundamenta en la recolección y análisis de datos numéricos, el uso de modelos estadísticos y la aplicación de métodos matemáticos para la estimación de eventos extremos de precipitación, permitiendo obtener resultados objetivos y verificables (Roberto Hernández Sampieri et al., 2014).

4.2 Ámbito temporal y espacial

- **Temporal.** Esta tesis fue ejecutada desde febrero del 2025 a agosto del 2025 periodo durante el cual se obtuvo los datos brindados por el SENAMHI.
- **Espacial.** El ámbito espacial de esta tesis se centró en la estación meteorológica granja Kayra en el distrito de san Sebastián en la región del cusco.

4.3 Población y muestra

Población

En la presente investigación, la población está conformada por la serie histórica de registros hidrometeorológicos de precipitación máxima correspondientes a la estación meteorológica Granja Kayra de la ciudad del Cusco. Esta información comprende los datos válidos disponibles dentro del período de estudio, los cuales permiten analizar el comportamiento de las precipitaciones extremas y desarrollar las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF).

Desde el enfoque hidrológico y estadístico, el análisis de eventos extremos se sustenta en series temporales de máximos, debido a que estas permiten representar el comportamiento de la precipitación en función de su magnitud, duración y frecuencia. En ese sentido, la población no está constituida por personas ni por unidades sociales, sino por

registros históricos de precipitación, los cuales representan la información disponible para caracterizar el fenómeno estudiado (Chow, Maidment & Mays, 1988).

Muestra

En esta investigación no se determina una muestra mediante técnicas de muestreo probabilístico o no probabilístico, debido a que se trabaja con la totalidad de los registros válidos disponibles dentro del período de análisis. Por ello, los datos empleados constituyen una serie censal, ya que no se selecciona una parte de la información, sino que se analiza todo el conjunto de datos hidrometeorológicos registrados y validados para el estudio.

Asimismo, el propósito de la tesis no es realizar inferencias poblacionales a partir de una muestra, sino ajustar modelos probabilísticos, como Gumbel, Gamma de dos parámetros, Log-Normal de dos parámetros y Log-Pearson Tipo III, a los datos observados, con el fin de estimar cuantiles de precipitación para diferentes períodos de retorno. En este tipo de estudios, la validez del análisis depende principalmente de la longitud, consistencia y homogeneidad de la serie histórica, más que del tamaño muestral entendido de manera tradicional (Wilks, 2011).

Por tanto, metodológicamente se justifica que no exista una muestra separada de la población, debido a que la investigación utiliza todos los registros históricos disponibles como base de análisis. Este procedimiento es coherente con las prácticas empleadas en hidrología aplicada y análisis de frecuencias para la estimación de eventos extremos, donde los registros observados constituyen la fuente principal para el ajuste estadístico y la elaboración de curvas IDF (Haan, 2002).

4.4 Instrumentos

La presente tesis se desarrolló utilizando instrumentos y herramientas técnicas orientadas al registro, organización y procesamiento estadístico de la información pluviométrica. Debido a la naturaleza del estudio, no se aplicaron cuestionarios ni escalas de

medición, ya que la información analizada corresponde a registros históricos de precipitación proporcionados por una entidad oficial.

Los instrumentos empleados fueron los siguientes:

- **Registro de datos pluviométricos:** se utilizó la información de precipitación máxima mensual correspondiente al período 1990–2020, proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Estos datos constituyeron la base para el análisis hidrológico y la elaboración de las curvas IDF.
- **Software EasyFit:** se empleó para realizar el ajuste de distribuciones probabilísticas y evaluar la bondad de ajuste de los datos de precipitación máxima. Esta herramienta permitió comparar modelos estadísticos y seleccionar la distribución más adecuada para el análisis de frecuencia.
- **Hojas de cálculo Excel:** se utilizaron para organizar, depurar, tabular y procesar los datos pluviométricos. Asimismo, permitieron realizar cálculos complementarios, elaborar tablas y construir los gráficos necesarios para el desarrollo de las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF).

EasyFit es un software estadístico especializado en el ajuste de distribuciones de probabilidad y análisis de bondad de ajuste. En esta investigación se utilizó para evaluar la distribución que mejor representa la serie de precipitaciones máximas, mediante modelos como Gumbel, Gamma, Log-Normal y Log-Pearson Tipo III, facilitando la estimación de precipitaciones para distintos períodos de retorno.

4.5 Procedimientos

El procedimiento empleado en esta tesis comprendió los siguientes pasos:

1. Recolección de información: recopilación de datos de precipitación máxima mensual entre los años 1990 y 2020.

2. Depuración y control de calidad: revisar la consistencia del registro de datos (datos faltantes y análisis de datos atípicos)
3. Organización de la información: tabular la serie de máximas anuales en hojas de cálculo.
4. Aplicación del método Bell, con el propósito de realizar lo siguiente:
   - Emplear la ecuación general propuesta por Bell para estimar intensidades de precipitación a partir de las lluvias máximas anuales.
   - Calcular las intensidades para distintos periodos de retorno (ej. 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años).
   - Obtener valores de intensidad (mm/h) en función de duración y frecuencia.
5. Construcción de Curvas IDF, para ello se hizo:
   - Elaborar gráficos de Intensidad – Duración – Frecuencia.
   - Representar cada periodo de retorno con una curva distinta.

4.6 Análisis de datos

El análisis de datos se realizó a partir de los registros históricos de precipitación máxima de la estación meteorológica Granja Kayra. Inicialmente, la información fue organizada, depurada y revisada en hojas de cálculo, con la finalidad de verificar la consistencia de los datos, identificar posibles valores atípicos y seleccionar los registros válidos para el período de estudio. Posteriormente, se determinaron las precipitaciones máximas anuales y se aplicó el análisis estadístico de frecuencia mediante distribuciones probabilísticas como Gumbel, Gamma de dos parámetros, Log-Normal de dos parámetros y Log-Pearson Tipo III, utilizando el software EasyFit para evaluar la bondad de ajuste y seleccionar el modelo más adecuado.

A partir de los valores estimados para diferentes períodos de retorno, se aplicó el método de Bell para transformar las precipitaciones máximas en intensidades de lluvia

correspondientes a distintas duraciones, permitiendo elaborar las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF). Los resultados fueron presentados mediante tablas, gráficos y ecuaciones de ajuste, facilitando su interpretación y aplicación en el diseño hidráulico. La investigación adoptó un nivel de confianza del 95 %, equivalente a un nivel de significancia $\alpha = 0,05$, criterio ampliamente aceptado en estudios hidrológicos, ya que permite obtener estimaciones confiables para eventos extremos de precipitación y valores de diseño asociados a distintos períodos de retorno (Chow et al., 1988; Wilks, 2011).

4.7 Consideraciones éticas

El estudio se desarrolló respetando los principios éticos de integridad científica, transparencia y responsabilidad académica. Se emplearon únicamente datos hidrometeorológicos oficiales proporcionados por SENAMHI, sin intervención en personas ni manipulación de información. Asimismo, se citó adecuadamente a los autores consultados, se mantuvo la veracidad de los resultados obtenidos y se evitó cualquier alteración que pudiera afectar la confiabilidad del análisis, garantizando un uso responsable de la información técnica.

V. Resultados y discusión

5.1 Resultados

5.1.1 Del análisis estadístico de los datos de precipitación

En la siguiente tabla se presenta la serie histórica de precipitaciones máximas 24 horas (mm) a nivel mensual del periodo 1990 al 2020 de la estación meteorológica Kayra.

Tabla 1

Datos de precipitación máxima 24 h expresado en mm de la estación Kayra

Estación:	**Kayra**						Lat	13°33'24.29" S				Dpto:	Cusco
Parámetro:	Precip. max 24 hr (mm)						Lon:	71°52'30.61" W				Prov:	Cusco
							Altitud					Dist:	
Año	**Ene**	**Feb**	**Mar**	**Abr**	**May**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Set**	**Oct**	**Nov**	**Dic**	**Pmax24**
1990	26.5	20.3	11.3	8.9	3.6	9.3	0.0	3.6	5.3	14.0	14.5	19.5	**26.5**
1991	25.5	37.6	37.1	14.2	4.8	2.7	1.5	0.0	12.8	13.4	17.5	25.2	**37.6**
1992	13.9	18.8	21.2	6.8	0.0	19.1	0.0	14.0	5.2	16.2	22.6	15.4	**22.6**
1993	48.5	17.4	24.2	2.9	0.9	0.0	1.5	5.3	6.9	14.6	15.6	44.1	**48.5**
1994	39.6	30.0	20.4	12.3	8.6	0.0	0.0	0.0	10.5	17.4	7.1	28.3	**39.6**
1995	23.2	18.5	14.3	6.8	0.0	0.0	0.4	1.2	19.8	8.3	34.6	20.7	**34.6**
1996	24.6	17.3	31.3	7.4	6.0	0.0	0.0	3.0	S/D	S/D	S/D	S/D	**31.3**
1997	20.1	18.2	24.9	9.5	4.1	0.0	0.0	3.5	5.1	12.9	47.0	30.0	**47.0**
1998	35.9	23.1	4.9	11.7	1.0	1.9	1.5	3.3	11.1	18.9	14.1	S/D	**35.9**
1999	12.7	14.9	17.0	13.6	1.3	3.2	1.0	0.0	10.9	7.2	19.3	16.4	**19.3**
2000	25.5	24.9	22.6	5.7	0.8	4.5	1.5	2.4	4.9	9.5	17.3	11.4	**25.5**
2001	15.6	31.0	21.4	10.6	4.3	0.0	9.9	3.6	5.4	15.9	23.1	11.6	**31.0**
2002	21.2	25.1	13.5	8.1	5.7	1.0	6.9	2.4	2.6	15.2	26.7	23.5	**26.7**
2003	24.6	24.0	18.0	39.1	1.0	6.4	0.0	10.8	1.7	10.2	7.0	23.4	**39.1**
2004	24.5	30.8	12.6	6.4	1.4	12.6	8.0	4.9	7.3	14.7	11.0	25.2	**30.8**
2005	S/D	S/D	27.8	23.2	2.0	0.4	1.2	2.2	2.1	13.6	11.7	17.2	**27.8**
2006	37.3	51.6	26.4	30.2	0.2	4.0	0.0	5.4	S/D	15.0	12.6	15.3	**51.6**
2007	26.7	S/D	19.7	32.9	3.4	0.0	3.0	0.0	1.0	14.9	18.9	16.9	**32.9**
2008	25.6	27.9	11.2	5.6	2.8	1.0	0.0	2.0	8.3	11.2	24.5	S/D	**27.9**
2009	27.8	17.8	23.6	5.9	2.5	0.0	1.8	0.4	7.6	2.2	24.1	11.9	**27.8**
2010	41.2	25.7	25.7	5.1	1.3	0.0	1.4	2.6	3.0	18.6	10.9	35.9	**41.2**
2011	22.6	22.0	25.0	15.6	1.7	3.2	3.0	0.0	9.6	18.9	29.8	14.6	**29.8**
2012	14.8	39.5	8.1	28.4	3.4	1.2	0.0	0.0	10.3	9.2	30.7	24.3	**39.5**
2013	23.2	21.1	18.7	4.5	14.6	3.0	1.0	6.2	2.7	17.9	13.7	27.2	**27.2**
2014	31.1	21.9	8.8	16.9	4.4	0.0	1.4	3.0	S/D	S/D	S/D	35.6	**35.6**
2015	38.3	23.6	9.7	12.5	8.0	2.3	5.5	3.0	6.2	6.3	16.5	23.1	**38.3**
2016	19.1	24.2	9.0	5.4	3.0	0.0	4.5	0.5	2.9	22.7	12.8	14.5	**24.2**
2017	24.6	S/D	24.9	9.8	5.9	5.8	0.0	7.0	12.7	7.1	14.8	12.9	**24.9**
2018	20.1	27.7	33.9	12.5	0.2	11.6	5.1	3.3	4.5	20.0	13.6	23.0	**33.9**
2019	22.2	17.5	34.0	14.8	10.9	0.8	1.8	0.0	3.8	34.3	25.6	17.8	**34.3**
2020	26.7	20.2	S/D	S/D	S/D	S/D	8.2	1.0	3.3	2.7	17.0	22.6	**26.7**

Nota. en la tabla se presenta las precipitaciones máximas por mes y promedio Fuente: SENAMHI 2025.

De la serie de datos presentados en la tabla 2, se puede observar que la precipitación máxima anual presenta un valor de 51.60 mm y corresponde al año 2006, por el contrario, en el año 1999 se observó una precipitación mínima de 19.30 mm.

A fin de evaluar si existen dados dudosos en la serie histórica de precipitación máxima 24 horas en la estación meteorológica Kayra (ver figura 1), se aplicó el test de dados dudosos para ello se realizó lo siguiente;

- Transformar la serie de precipitaciones máximas 24 horas mediante logaritmo.
- Cálculo de la media, desviación estándar y coeficiente de asimetría de la serie transformada.
- Definición de umbrales de outliers (mínimo y máximo)

Tabla 2

Test para detectar datos dudosos

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	**P24hr**	**Log(P24hr)**
Número de datos (N)	31.00	31.000
Sumatoria	1019.60	46.679
Valor Máximo	51.60	1.713
Valor Mínimo	19.30	1.286
Media	32.89	1.506
Varianza	59.80	0.010
Desviación Estándar	7.73	0.100
Coeficiente de Variación	0.24	0.067
Coeficiente de Sesgo	0.64	0.1029

Nota. en la siguiente tabla se muestra datos para la descartarían de datos dudosos, como son datos de precipitación y datos logarítmicos y muestra.

Se considera: Aplicar pruebas para detectar datos dudosos altos y bajos

- N = 31.00

- Kn = 2.577
- Kn: Valor recomendado, varía según el valor de n, con una significancia del 10%.

Umbral de datos dudosos altos

$$xH = \bar{x} + Kn \cdot S \qquad xH = 1.76$$

Precipitación máxima aceptada:

$$PH = 10\text{^}xH \qquad PH = 58.15 \text{ mm}$$

Umbral de datos dudosos bajos

$$xL = \bar{x} - Kn \cdot S \qquad xL = 1.25$$

El valor tabulado (K_n) permitió calcular un límite inferior o superior dentro del cual deberían encontrarse los datos de la muestra, en este caso, de la serie histórica de precipitación máxima 24 h. En este estudio, el valor de (K_n) corresponde al valor de 2.577, debido a nuestro tamaño de muestra corresponde a 31 años (ver figura 2)

Tabla 3

Valores Kn para la prueba de datos dudosos

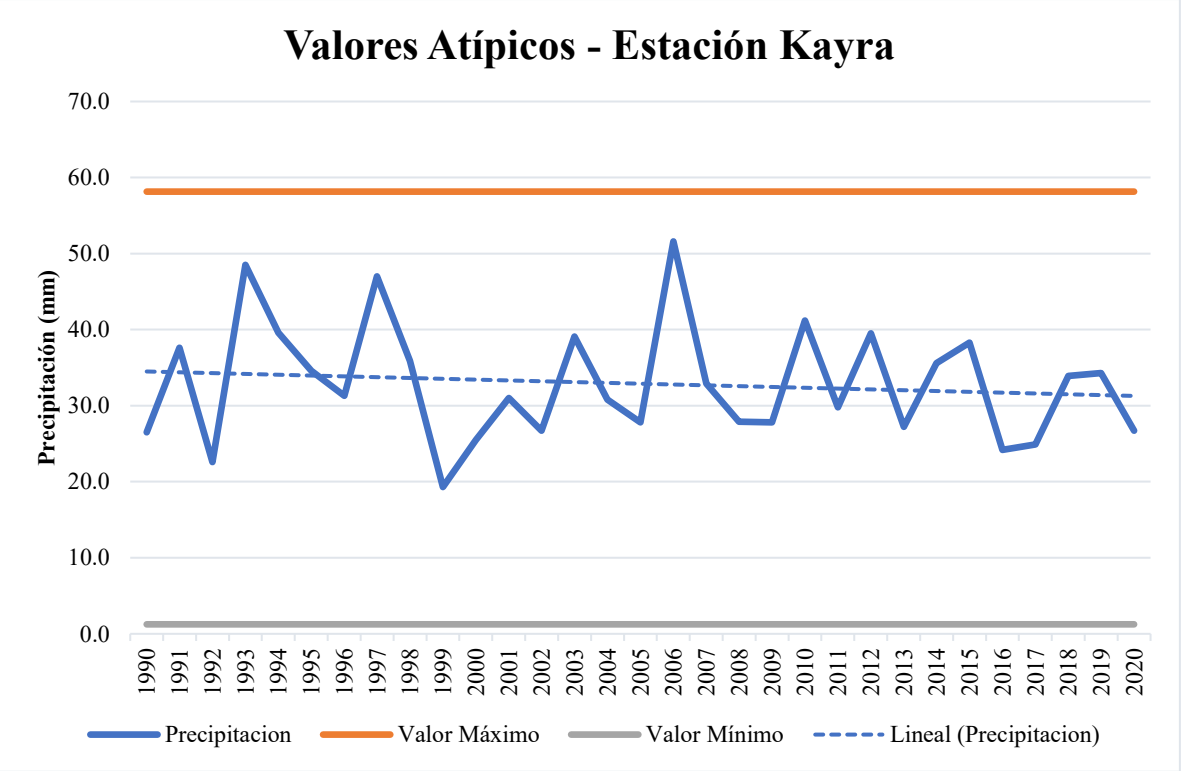
Tamaño de muestra n	Kn	Tamaño de muestra n	Kn	Tamaño de muestra n	Kn	Tamaño de muestra n	Kn
10	2.036	24	2.467	38	2.661	60	2.837
11	2.088	25	2.486	39	2.671	65	2.866
12	2.134	26	2.502	40	2.682	70	2.893
13	2.175	27	2.519	41	2.692	75	2.917
14	2.213	28	2.534	42	2.700	80	2.940
15	2.247	29	2.549	43	2.710	85	2.961
16	2.279	30	2.563	44	2.719	90	2.981
17	2.309	**31**	**2.577**	45	2.727	95	3.000
18	2.335	32	2.591	46	2.736	100	3.017
19	2.361	33	2.604	47	2.744	110	3.049
20	2.385	34	2.616	48	2.753	120	3.078
21	2.408	35	2.628	49	2.760	130	3.104
22	2.429	36	2.639	50	2.768	140	3.129
23	2.448	37	2.650	55	2.804	—	—

Nota. adaptado de U.S. Water Resources couneil, 1981.esta tabla contiene valores de K, de un lado con un nivel de significancia del 10%para la distribución normal.

Los hallazgos evidencian que el límite superior para identificar datos cuestionables alcanza 58.15 mm de precipitación máxima diaria, mientras que el límite inferior se establece en 1.24 mm. Al contrastar estos umbrales con los registros históricos disponibles, se confirma la ausencia de valores anómalos o sospechosos (ver figura 3).

Figura 1

Grafica de valores para detectar valores atípicos



Nota. cómo podemos ver en la figura 1 la precipitación se encuentra entre los valores máximo y mínimo y no sobre pasa por lo cual no existe datos atípicos.

5.1.2 Resultado del ajuste de distribución estadística de los datos de precipitación máxima 24 de la estación Kayra

Se realizó el ajuste estadístico pertinente a los valores de precipitaciones máximas en 24 horas, con el objetivo de establecer la distribución de probabilidad que mejor describe su comportamiento. Para este objetivo, se tomaron en cuenta las distribuciones estadísticas más relevantes utilizadas en la hidrología.:

- Distribución Gumbel.

- Distribución Gamma 2 parámetros.
- Distribución Log Normal 2 parámetros.
- Distribución Log Pearson tipo III.

5.1.2.1 Distribución Gumbel

Se utilizó la fórmula de Weibull para determinar la probabilidad empírica de las precipitaciones máximas ocurridas en un periodo de 24 horas. Asimismo, se calculó la probabilidad teórica utilizando la función de distribución Gumbel.

Tabla 4

Datos de precipitación máxima 24 horas - Distribución Gumbel

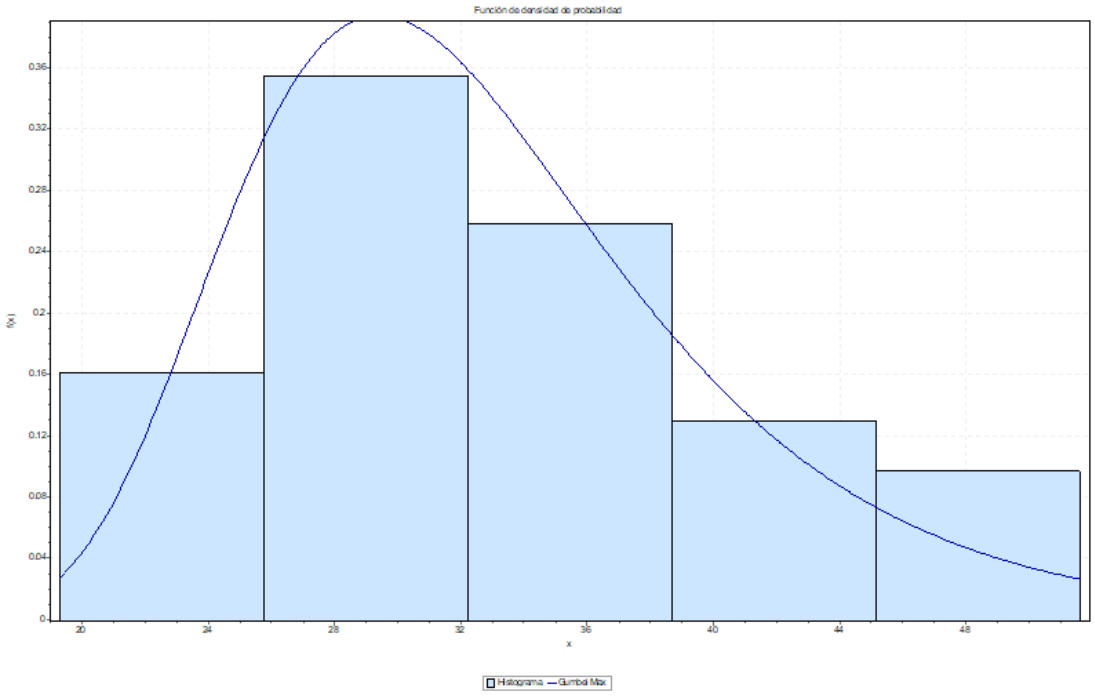
m	X	P(X)	G(Y) Ordinario	Delta
1	19.30	0.0313	0.0048	0.0265
2	22.60	0.0625	0.0453	0.0172
3	24.20	0.0938	0.0932	0.0005
4	24.90	0.125	0.1209	0.0041
5	25.50	0.1563	0.1477	0.0086
6	26.50	0.1875	0.1978	0.0103
7	26.70	0.2188	0.2086	0.0102
8	26.70	0.25	0.2086	0.0414
9	27.20	0.2813	0.2363	0.045
10	27.80	0.3125	0.2709	0.0416
11	27.80	0.3438	0.2709	0.0729
12	27.90	0.375	0.2768	0.0982
13	29.80	0.4063	0.3917	0.0146
14	30.80	0.4375	0.452	0.0145
15	31.00	0.4688	0.4638	0.0049
16	31.30	0.5	0.4815	0.0185
17	32.90	0.5313	0.5709	0.0396
18	33.90	0.5625	0.622	0.0595
19	34.30	0.5938	0.6412	0.0475
20	34.60	0.625	0.6552	0.0302
21	35.60	0.6563	0.6989	0.0427
22	35.90	0.6875	0.7112	0.0237
23	37.60	0.7188	0.7733	0.0545
24	38.30	0.75	0.7954	0.0454
25	39.10	0.7813	0.8183	0.0371
26	39.50	0.8125	0.8289	0.0164
27	39.60	0.8438	0.8315	0.0122
28	41.20	0.875	0.868	0.007
29	47.00	0.9063	0.9474	0.0411
30	48.50	0.9375	0.9587	0.0212
31	51.60	0.9688	0.9751	0.0063

Nota. cómo podemos ver en la tabla 4 se muestra datos de la media, la probabilidad esperada, distribución normal y el delta.

Por otro lado, de la tabla anterior se observa que la diferencia entre **P(X)** y **G(Y) Ordinario** nos da como resultado los valores Delta que suele representar la diferencia o error entre los valores observados y los estimados por la distribución ajustada. En otras palabras, es un indicador de ajuste, que mide cuánto se desvía la curva teórica (Gumbel) respecto a los datos reales. En esta situación, como el valor crítico tabular (0.2443) al 5% de significancia es mayor que el valor del delta teórico (0.0982), se concluye que la serie de datos es apropiada para la distribución Gumbel (ver Figura 4).

Figura 2

Ajuste de datos a la distribución Gumbel



Nota. en la figura 2 se muestra que entre 25.50 y 32.90 existen una probabilidad que ocurra esa precipitación.

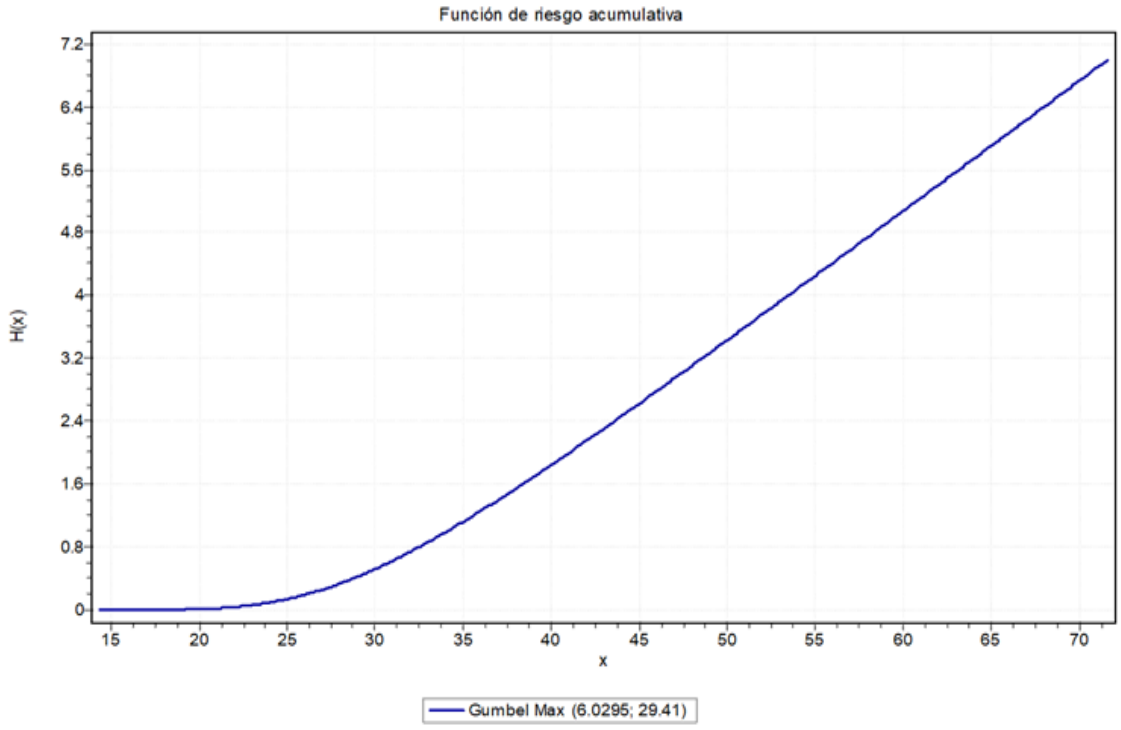
Los parámetros de esta función de distribución son las siguientes:

- Parámetro de posición (μ)= 29.41
- Parámetro de escala (alfa)= 6.0295

En la Figura 3 se muestra la intensidad acumulada del riesgo (Función de riesgo acumulada) de que suceda un evento de precipitación máxima 24 horas igual o menor a un valor x.

Figura 3

Función de riesgo acumulativa de la distribución Gumbel



Nota. en la figura 3 se muestra el desarrollo de la curva entre la precipitación vs la probabilidad acumulada.

De la Figura 3, en la zona baja (x< 25.00 mm) el valor de H(x) es casi cercano a 0 lo cual indica que la probabilidad acumulada de eventos pequeños es muy baja, es decir, hay poca probabilidad que la máxima precipitación en 24 horas sea menor de 25.00 mm.

En la zona media (x entre 30.00 mm a 50.00 mm) se ve que la curva inicia un crecimiento más rápido, en consecuencia, allí se concentra la mayor parte de la probabilidad de que ocurran las precipitaciones máximas más frecuentes.

Finalmente, en la zona alta (x> 55.00 mm) se observa que el valor de H(x) sigue aumentando, esto implica que la ocurrencia de eventos mayores a 55–60 mm es menos probable, pero aún posible, con riesgo acumulado creciente.

Con respecto al cálculo de la precipitación máxima en 24 horas para varios períodos de retorno, se utilizó la distribución de Gumbel para calcular la probabilidad de no excedencia. Los valores obtenidos para cada uno de los periodos de retorno analizados se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 5

Precipitación máxima 24 horas para diferentes periodos de retorno- Distribución Gumbel

T (años)	P max	P máx corr	Probabilidad de no excedencia (P)
2	31.62	41.11	0.50
5	38.45	49.99	0.80
10	42.98	55.87	0.90
20	47.32	61.52	0.95
25	48.70	63.31	0.96
30	50.46	65.60	0.97
50	52.94	68.82	0.98
100	57.15	74.30	0.99

Nota. en la tabla 5 se muestra el tiempo, precipitación máxima, precipitación máxima corregida y la probabilidad de no excedencia.

La Tabla 5 muestra que la precipitación máxima 24 horas, con una probabilidad de no excedencia del 99% y un período de retorno de 100 años, llega a los 57.15 mm. No obstante, al emplear el factor de ajuste que sugiere la Organización Meteorológica Mundial (OMM), se obtiene un valor corregido de 74.30 mm para la precipitación máxima.

5.1.2.2 Distribución Gamma de 2 parámetros

Se aplicó, la fórmula de Weibull para determinar la probabilidad empírica de las precipitaciones máximas ocurridas en un periodo de 24 horas. De igual modo, se calculó la probabilidad teórica utilizando la función de distribución Gamma de 2 parámetros. La tabla que sigue muestra los resultados obtenidos:

Tabla 6

Datos de precipitación máxima 24 horas - Distribución Gamma de 2 parámetros

m	X	P(X)	G(Y) Ordinario	Delta
1	19.30	0.0313	0.0189	0.0124
2	22.60	0.0625	0.0698	0.0073
3	24.20	0.0938	0.1135	0.0198
4	24.90	0.125	0.137	0.012
5	25.50	0.1563	0.1592	0.0029
6	26.50	0.1875	0.2001	0.0126
7	26.70	0.2188	0.2089	0.0099
8	26.70	0.25	0.2089	0.0411
9	27.20	0.2813	0.2315	0.0498
10	27.80	0.3125	0.26	0.0525
11	27.80	0.3438	0.26	0.0838
12	27.90	0.375	0.2648	0.1102
13	29.80	0.4063	0.3628	0.0435
14	30.80	0.4375	0.4169	0.0206
15	31.00	0.4688	0.4278	0.0409
16	31.30	0.5	0.4442	0.0558
17	32.90	0.5313	0.5307	0.0005
18	33.90	0.5625	0.5829	0.0204
19	34.30	0.5938	0.6032	0.0094
20	34.60	0.625	0.6181	0.0069
21	35.60	0.6563	0.6659	0.0096
22	35.90	0.6875	0.6796	0.0079
23	37.60	0.7188	0.751	0.0323
24	38.30	0.75	0.7772	0.0272
25	39.10	0.7813	0.8048	0.0235
26	39.50	0.8125	0.8176	0.0051
27	39.60	0.8438	0.8207	0.023
28	41.20	0.875	0.8654	0.0096
29	47.00	0.9063	0.9595	0.0532
30	48.50	0.9375	0.9714	0.0339
31	51.60	0.9688	0.9867	0.0179

Nota. cómo podemos ver en la tabla 6 se muestra el número de muestras, datos de la media, la probabilidad esperada, distribución normal y el delta.

De la tabla anterior se observa podemos afirmar, conociendo el valor de la diferencia entre P(X) y G(Y), que el valor delta teórico (0.1102) al 5% de significancia es menor que el valor del delta tabular (0.2443), en consecuencia, la serie de datos es apropiada para la distribución Gamma de 2 parámetros.

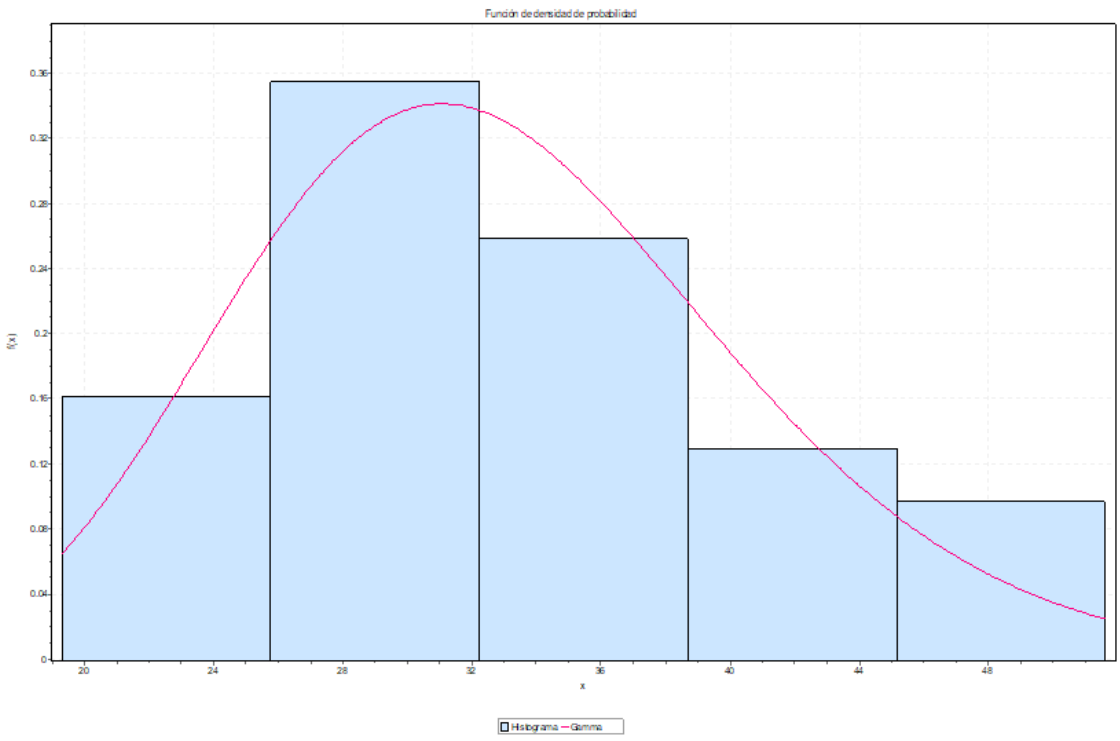
En la Figura 6, se puede observar como la serie de datos de precipitación máxima 24 horas (barras de color azul), distribuidos en diferentes intervalos de clase, se ajusta al comportamiento de la distribución Gamma de 2 parámetro (véase el trazo de línea color fucsia).

Cuando la curva se aproxima bien al contorno del histograma, significa que la distribución seleccionada describe adecuadamente el comportamiento de la variable.

Para nuestro caso, la curva Gamma de 2 parámetros parece tener un buen ajuste razonablemente a la forma del histograma.

Figura 4

Ajuste de datos a la distribución Gamma de 2 parámetros



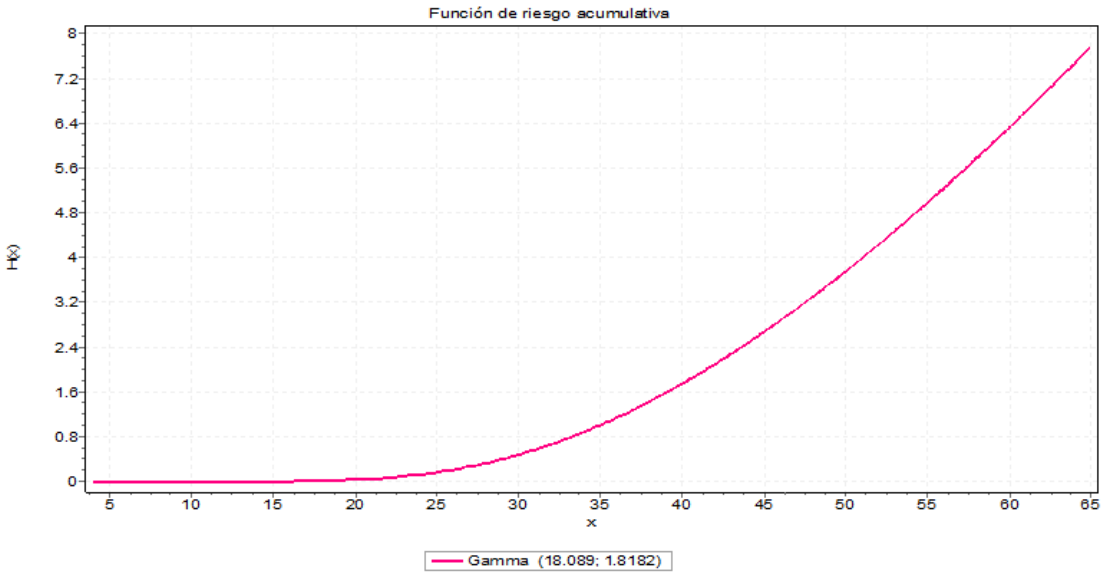
Nota. en la figura 4 se muestra cómo se ajusta la precipitación al comportamiento de la distribución gamma de 2 parámetros.

Esta función de distribución Gamma cuenta con los siguientes parámetros:

- Parámetro de forma (gamma)= 19.3925
- Parámetro de escala (beta)= 1.696

Figura 5

Función de riesgo acumulativa de la distribución Gamma de 2 parámetros



Nota. En la Figura 5 se muestra la intensidad acumulada del riesgo de que suceda un evento de precipitación máxima 24 horas igual o menor a un valor x.

De la Figura 7, en la zona baja (x< 20.00 mm) el valor de H(x) es casi cercano a 0 lo cual indica que la probabilidad acumulada de eventos pequeños es muy baja, es decir, hay poca probabilidad que la máxima precipitación en 24 horas sea menor de 20.00 mm.

En la zona media (x entre 25.00 mm a 40.00 mm) se ve que la curva inicia un crecimiento más rápido, en consecuencia, allí se concentra la mayor parte de la probabilidad de que ocurran las precipitaciones máximas más frecuentes.

Finalmente, en la zona alta (x> 40.00 mm) se observa que el valor de H(x) sigue aumentando, esto implica que la ocurrencia de eventos mayores a 55–60 mm es menos probable, pero aún posible, con riesgo acumulado creciente.

Respecto a la estimación de la lluvia extrema diaria para distintos intervalos de recurrencia, se aplicó el modelo probabilístico Gamma biparamétrico con el fin de cuantificar la probabilidad de no ser excedida. Las magnitudes resultantes correspondientes a cada intervalo de recurrencia examinado se exhiben en la tabla siguiente.

Tabla 7

Precipitación máxima 24 horas para diferentes periodos de retorno- Distribución Gamma de 2 parámetros

T (años)	P max	P máx corregido	Probabilidad de no excedencia (P)
2	32.29	41.98	0.50
5	39.16	50.91	0.80
10	43.11	56.04	0.90
20	46.56	60.53	0.95
25	47.60	61.88	0.96
30	48.89	63.56	0.97
50	50.65	65.85	0.98
100	53.50	69.55	0.99

Nota. en la tabla 7 se muestra el tiempo, precipitación máxima, precipitación máxima corregida y la probabilidad de no excedencia.

Se usa P máx corregido porque ajusta la lectura mecánica del pluviómetro, evitando subestimaciones y obteniendo una precipitación de diseño.

La Tabla 7 muestra que la precipitación máxima 24 horas, con una probabilidad de no excedencia del 99% y un período de retorno de 100 años, llega a los 53.50 mm. Sin embargo, al emplear el factor de ajuste que sugiere la Organización Meteorológica Mundial (OMM), se obtiene un valor corregido de 69.55 mm para la precipitación máxima.

5.1.2.3 Distribución Logaritmo Normal de 2 parámetros

Se implementó la expresión de Weibull con el objetivo de establecer la probabilidad empírica de los eventos pluviométricos extremos registrados en un lapso diario. Paralelamente, se estimó la probabilidad teórica mediante el empleo de la función de distribución Log Normal biparamétrica. Los hallazgos derivados se exponen en la tabla presentada a continuación:

Tabla 8

Datos de precipitación máxima 24 horas - Distribución Gamma de 2 parámetros

m	X	P(X)	G(Y) Ordinario	Delta
1	19.30	0.0313	0.0141	0.0171
2	22.60	0.0625	0.0655	0.003
3	24.20	0.0938	0.1123	0.0185
4	24.90	0.125	0.1376	0.0126
5	25.50	0.1563	0.1615	0.0053
6	26.50	0.1875	0.2056	0.0181
7	26.70	0.2188	0.2149	0.0038
8	26.70	0.25	0.2149	0.0351
9	27.20	0.2813	0.2391	0.0421
10	27.80	0.3125	0.2694	0.0431
11	27.80	0.3438	0.2694	0.0744
12	27.90	0.375	0.2745	0.1005
13	29.80	0.4063	0.3767	0.0296
14	30.80	0.4375	0.4319	0.0056
15	31.00	0.4688	0.4429	0.0258
16	31.30	0.5	0.4594	0.0406
17	32.90	0.5313	0.5453	0.014
18	33.90	0.5625	0.5961	0.0336
19	34.30	0.5938	0.6156	0.0219
20	34.60	0.625	0.6299	0.0049
21	35.60	0.6563	0.6754	0.0192
22	35.90	0.6875	0.6884	0.0009
23	37.60	0.7188	0.7553	0.0366
24	38.30	0.75	0.7797	0.0297
25	39.10	0.7813	0.8052	0.024
26	39.50	0.8125	0.8171	0.0046
27	39.60	0.8438	0.82	0.0237
28	41.20	0.875	0.8614	0.0136
29	47.00	0.9063	0.9512	0.0449
30	48.50	0.9375	0.9635	0.026
31	51.60	0.9688	0.9803	0.0116

Nota. cómo podemos ver en la tabla 8 se muestra el número de muestras, datos de la media, la probabilidad esperada, distribución normal y el delta.

De la tabla anterior se observa podemos afirmar, conociendo el valor de la diferencia entre P(X) y G(Y), que el valor delta teórico (0.1005) al 5% de significancia es menor que el valor del delta tabular (0.2443), en consecuencia, la serie de datos es apropiada para la distribución Gamma de 2 parámetros.

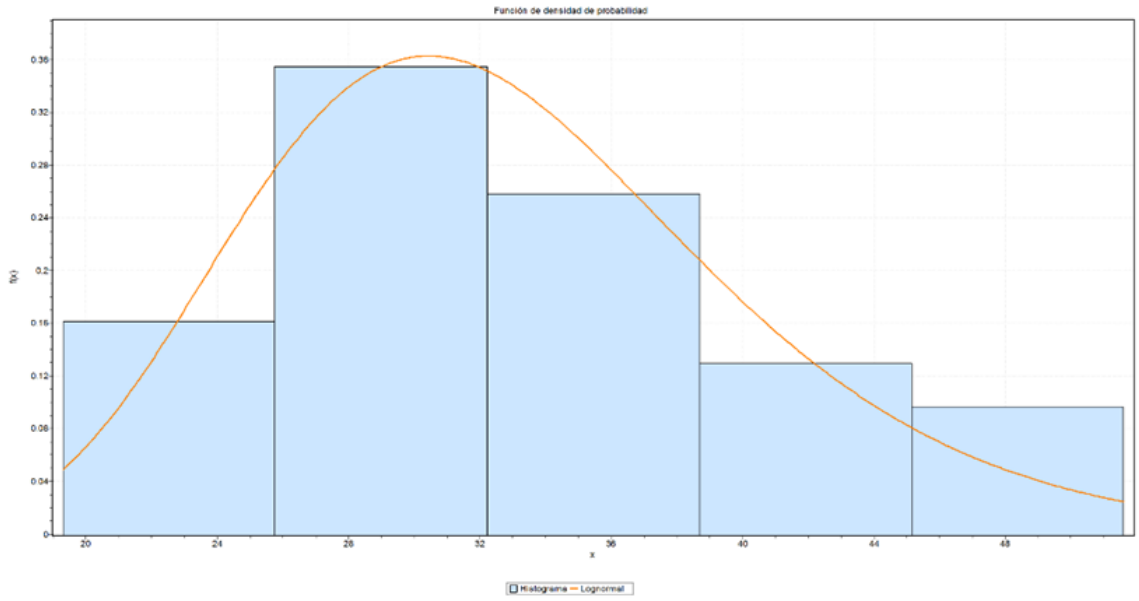
En la Figura 6, se puede observar como la serie de datos de precipitación máxima 24 horas (barras de color azul), distribuidos en diferentes intervalos de clase, se ajusta al comportamiento de la distribución Logaritmo Normal de 2 parámetro (véase el trazo de línea color naranja).

Cuando la curva se aproxima bien al contorno del histograma, significa que la distribución seleccionada describe adecuadamente el comportamiento de la variable.

Para nuestro caso, la curva Logaritmo Normal de 2 parámetros parece tener un buen ajuste razonablemente a la forma del histograma.

Figura 6

Ajuste de datos a la distribución Logaritmo Normal de 2 parámetros



Nota. en la figura 6 se muestra cómo se ajusta la precipitación al comportamiento de la distribución gamma de 2 parámetros.

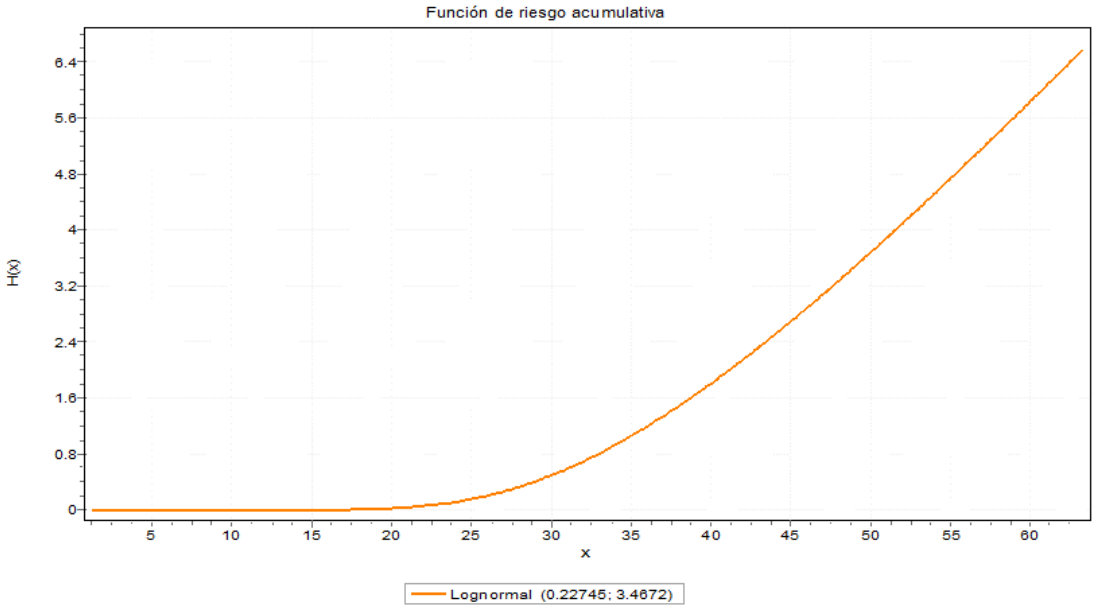
Esta función de distribución Logaritmo Normal cuenta con los siguientes parámetros:

- Parámetro de escala (μy)= 3.4672
- Parámetro de forma (Sy)= 0.22745

En la Figura 7 se muestra la intensidad acumulada del riesgo (Función de riesgo acumulada) de que suceda un evento de precipitación máxima 24 horas igual o menor a un valor x.

Figura 7

Función de riesgo acumulativa de la distribución Logaritmo Normal de 2 parámetros



Nota. En la Figura 7 se muestra la intensidad acumulada del riesgo de que suceda un evento de precipitación máxima 24 horas igual o menor a un valor x.

De la Figura 7, en la zona baja (x< 25.00 mm) el valor de H(x) es casi cercano a 0 lo cual indica que la probabilidad acumulada de eventos pequeños es muy baja, es decir, hay poca probabilidad que la máxima precipitación en 24 horas sea menor de 25.00 mm.

En la zona media (x entre 30.00 mm a 50.00 mm) se ve que la curva inicia un crecimiento más rápido, en consecuencia, allí se concentra la mayor parte de la probabilidad de que ocurran las precipitaciones máximas más frecuentes.

Finalmente, en la zona alta (x> 50.00 mm) se observa que el valor de H(x) sigue aumentando, esto implica que la ocurrencia de eventos mayores a 55–60 mm es menos probable, pero aún posible, con riesgo acumulado creciente.

En relación a la determinación de la lluvia máxima diaria para diversos intervalos de recurrencia, se empleó el modelo de distribución Gamma biparamétrico para estimar la probabilidad de no superación. Las magnitudes determinadas para cada uno de los intervalos de recurrencia evaluados se presentan en la tabla subsiguiente.

Tabla 9

Precipitación máxima 24 horas para diferentes periodos de retorno- Distribución Logaritmo Normal de 2 parámetros

T (años)	P max	P máx corr	Probabilidad de no excedencia (P)
2	32.04	41.65	0.50
5	38.81	50.45	0.80
10	42.89	55.76	0.90
20	46.59	60.57	0.95
25	47.72	62.04	0.96
30	49.16	63.91	0.97
50	51.13	66.47	0.98
100	54.40	70.72	0.99

Nota. en la tabla 9 se muestra el tiempo, precipitación máxima, precipitación máxima corregida y la probabilidad de no excedencia.

La Tabla 9 evidencia que la lluvia máxima diaria, asociada a una probabilidad de no superación del 99% y un intervalo de recurrencia de 100 años, alcanza los 54.40 mm. Sin embargo, al aplicar el coeficiente de corrección recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), se determina una magnitud ajustada de 70.72 mm para la precipitación extrema.

En resumen, se analizó el ajuste de los datos de precipitación máxima en 24 horas a tres distribuciones probabilísticas. No obstante, los resultados de la distribución Log-Pearson Tipo III revelaron que la serie de datos no se ajustaba correctamente a esa distribución; por lo tanto, no se tomó en cuenta en este estudio.

En esta etapa, que se refiere a la elección de la distribución más adecuada para los datos de precipitaciones máximas en 24 horas, el criterio principal fue aquella que mostró el valor más bajo de Delta teórico. Con este método, se logró establecer la función de probabilidad más representativa para proseguir con el desarrollo de las curvas IDF a través del procedimiento de F. Bell.

Tabla 10

Resumen de valor del delta teórico por cada distribución probabilística

Distribución Gumbel	Distribución Gamma de 2 parámetros	Distribución Logaritmo Normal de 2 parámetros
0.0982	0.1102	0.1005

Nota: en la tabla 10 se muestra los resultados de delta teórico por cada distribución probabilista.

A partir de esta contrastación, se estableció que el modelo probabilístico que mejor se ajusta a los registros de lluvia máxima diaria corresponde al esquema de Gumbel, debido a que exhibió el menor valor de Delta teórico. Por consiguiente, se seleccionó este modelo estadístico como fundamento para la elaboración de los diagramas IDF utilizando la técnica de F. Bell.

5.1.3 Resultado del desarrollo de las curvas IDF para distintos periodos de retorno

Los valores de precipitación máxima probable que se lograron con la distribución Gumbel (Tabla 11), teniendo en cuenta diferentes periodos de retorno, fueron utilizados para desarrollar las curvas IDF por medio del método de F. Bell.

Es importante señalar que la metodología de F. Bell posibilita determinar la precipitación extrema vinculada a una frecuencia específica y un intervalo temporal de lluvia, empleando como referencia base el valor pluviométrico correspondiente a sesenta minutos de duración con una frecuencia de diez años. La tabla 10 muestra los registros de precipitación máxima según los distintos intervalos temporales analizados.

Tabla 11

Precipitación máxima por tiempos de duración

horas	min	Precipitación máxima Pmax (mm) por tiempos de duración							
		2 años	**5 años**	**10 años**	**20 años**	**25 años**	**30 años**	**50 años**	**100 años**
2.00	120	9.042	13.8344	17.8398	22.2234	23.7195	25.2521	28.625	33.9308
1.83	110	8.7719	13.421	17.3068	21.5594	23.0108	24.4976	27.7698	32.9171
1.67	100	8.4827	12.9785	16.7361	20.8485	22.2521	23.6899	26.8541	31.8317
1.58	95	8.3298	12.7447	16.4346	20.4729	21.8512	23.2631	26.3703	31.2582
1.5	90	8.1708	12.5014	16.1209	20.0822	21.4341	22.819	25.867	30.6616
1.33	80	7.8318	11.9827	15.4521	19.249	20.5448	21.8723	24.7938	29.3894
1.17	70	7.4594	11.4129	14.7172	18.3336	19.5678	20.8322	23.6147	27.9918
1.00	60	7.0446	10.7783	13.8989	17.3142	18.4798	19.6738	22.3016	26.4354
0.92	55	6.8175	10.4308	13.4507	16.7559	17.8839	19.0394	21.5825	25.5829
0.75	45	6.312	9.6574	12.4535	15.5136	16.558	17.6279	19.9824	23.6863
0.67	40	6.027	9.2213	11.8911	14.813	15.8102	16.8318	19.08	22.6166
0.5	30	5.365	8.2085	10.5851	13.186	14.0737	14.9831	16.9844	20.1325
0.33	20	4.5093	6.8992	8.8967	11.0828	11.8289	12.5932	14.2753	16.9213
0.25	15	3.9526	6.0475	7.7985	9.7147	10.3687	11.0387	12.5131	14.8325
0.17	10	3.233	4.9466	6.3787	7.9461	8.4811	9.0291	10.2351	12.1322

Nota. En la tabla 11 se presenta los valores de precipitación máxima por tiempos de duración, como son (2,5,10,20,25,30,50,100) años.

De otra parte, en la tabla 12 se presenta los cálculos de la intensidad de lluvia (mm/h) para distintos periodos de retorno.

Tabla 12

Precipitación máxima por tiempos de duración

horas	min	Intensidad de la lluvia (mm/h) según periodo de retorno							
		2 años	**5 años**	**10 años**	**20 años**	**25 años**	**30 años**	**50 años**	**100 años**
2.00	120	4.521	6.9172	8.9199	11.1117	11.8597	12.626	14.3125	16.9654
1.83	110	4.7847	7.3206	9.4401	11.7597	12.5514	13.3623	15.1471	17.9548
1.67	100	5.0896	7.7871	10.0417	12.5091	13.3512	14.2139	16.1125	19.099
1.58	95	5.2609	8.0493	10.3797	12.9303	13.8007	14.6925	16.6549	19.742
1.5	90	5.4472	8.3343	10.7473	13.3881	14.2894	15.2127	17.2446	20.441
1.33	80	5.8739	8.9871	11.589	14.4367	15.4086	16.4042	18.5953	22.0421
1.17	70	6.3938	9.7825	12.6148	15.7145	16.7724	17.8561	20.2412	23.993
1.00	60	7.0446	10.7783	13.8989	17.3142	18.4798	19.6738	22.3016	26.4354
0.92	55	7.4372	11.379	14.6735	18.2791	19.5097	20.7703	23.5445	27.9087
0.75	45	8.416	12.8766	16.6047	20.6848	22.0774	23.5039	26.6432	31.5817
0.67	40	9.0405	13.832	17.8367	22.2195	23.7154	25.2477	28.62	33.9249
0.5	30	10.73	16.417	21.1701	26.3721	28.1475	29.9662	33.9687	40.265
0.33	20	13.5278	20.6976	26.6901	33.2485	35.4868	37.7797	42.8259	50.764
0.25	15	15.8105	24.1902	31.1938	38.8588	41.4748	44.1547	50.0524	59.3299
0.17	10	19.3982	29.6794	38.2724	47.6767	50.8864	54.1743	61.4103	72.7931

Nota. en la tabla 12 se muestra el tiempo en horas y minutos y la intensidad según su periodo de retorno (2,5,10,20,25,30,50,100) años.

La tabla 13 presenta los intervalos temporales de precipitación (x, expresados en minutos) junto con la magnitud promedio de intensidad (y, expresada en mm/h) correspondiente a un intervalo de recurrencia de T = 2 años. Se implementó una conversión logarítmica (ln x y ln y) con el propósito de establecer una relación lineal entre la intensidad y el lapso temporal, facilitando así el ajuste de un modelo regresivo logarítmico. Las columnas ln x * ln y y $(\ln x)^2$ representan cálculos intermedios requeridos para determinar los coeficientes de la expresión matemática de ajuste.

Tabla 13

Valores de duración de la precipitación para un periodo de retorno de 2 años

Periodo de retorno para T = 2 años						
Nº	X	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	120	4.5210	4.7875	1.5087	7.2231	22.9201
2	110	4.7847	4.7005	1.5654	7.3582	22.0945
3	100	5.0896	4.6052	1.6272	7.4935	21.2076
4	95	5.2609	4.5539	1.6603	7.5608	20.7378
5	90	5.4472	4.4998	1.6951	7.6277	20.2483
6	80	5.8739	4.3820	1.7705	7.7584	19.2022
7	70	6.3938	4.2485	1.8553	7.8823	18.0497
8	60	7.0446	4.0943	1.9523	7.9932	16.7637
9	55	7.4372	4.0073	2.0065	8.0407	16.0587
10	45	8.4160	3.8067	2.1301	8.1087	14.4907
11	40	9.0405	3.6889	2.2017	8.1218	13.6078
12	30	10.7300	3.4012	2.3730	8.0712	11.5681
13	20	13.5278	2.9957	2.6047	7.8031	8.9744
14	15	15.8105	2.7081	2.7607	7.4760	7.3335
15	10	19.3982	2.3026	2.9652	6.8276	5.3019
15	940	128.7760	58.7821	30.6769	115.3465	238.5590
Ln (d) =	4.3718	*d =*	79.1833	*n =*	-0.5937	

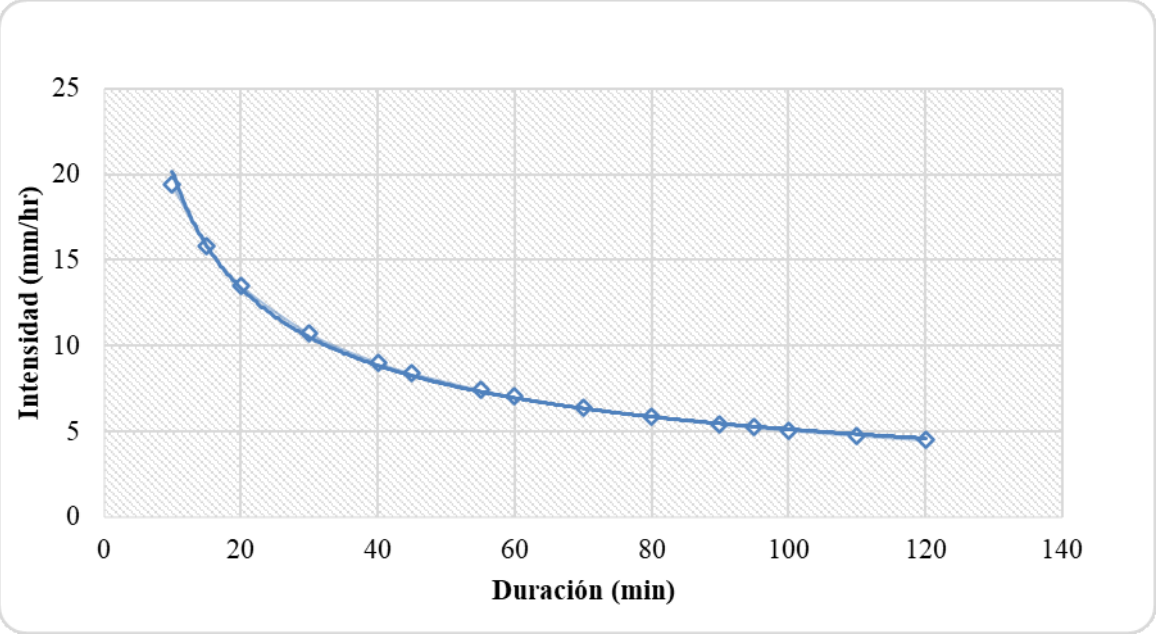
Nota. en la tabla 13 se muestra la duración, intensidad media el periodo de retorno y la aplicación de los logaritmos para linealizar la intensidad y duración.

En la parte inferior de la tabla se resumen los parámetros del modelo:

- Ln(d) = 4.3718
- d = 79.1833
- n = –0.5937 (pendiente de la regresión).

Figura 8

Curva IDF para un periodo de retorno de 2 años



Nota. exhibe el diagrama intensidad-duración-frecuencia correspondiente a un intervalo de recurrencia bienal.

En la figura 8, la curva muestra como la intensidad de precipitación (mm/h) disminuye a medida que aumenta la duración. Al inicio, para eventos cortos (5-15 minutos, sin embargo, conforme la duración tiene a incrementar (60 – 120 minutos), la intensidad decrece a valores alrededor de 4-5 mm/h.

Tabla 14

Valores de duración de la precipitación para un periodo de retorno de 5 años

Periodo de retorno para T = 5 años						
Nº	X	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	120	6.9172	4.7875	1.9340	9.2590	22.9201
2	110	7.3206	4.7005	1.9907	9.3572	22.0945
3	100	7.7871	4.6052	2.0525	9.4520	21.2076
4	95	8.0493	4.5539	2.0856	9.4975	20.7378
5	90	8.3343	4.4998	2.1204	9.5413	20.2483
6	80	8.9871	4.3820	2.1958	9.6220	19.2022
7	70	9.7825	4.2485	2.2806	9.6891	18.0497
8	60	10.7783	4.0943	2.3775	9.7344	16.7637

9	55	11.3790	4.0073	2.4318	9.7449	16.0587
10	45	12.8766	3.8067	2.5554	9.7276	14.4907
11	40	13.8320	3.6889	2.6270	9.6906	13.6078
12	30	16.4170	3.4012	2.7983	9.5176	11.5681
13	20	20.6976	2.9957	3.0300	9.0771	8.9744
14	15	24.1902	2.7081	3.1859	8.6277	7.3335
15	10	29.6794	2.3026	3.3905	7.8068	5.3019
15	940	197.0280	58.7821	37.0559	140.3449	238.5590
Ln (d) =	4.7970	d =	121.1509	n =	-0.5937	

Nota. En la tabla 14, se presenta los valores para un periodo de retorno de 5 años

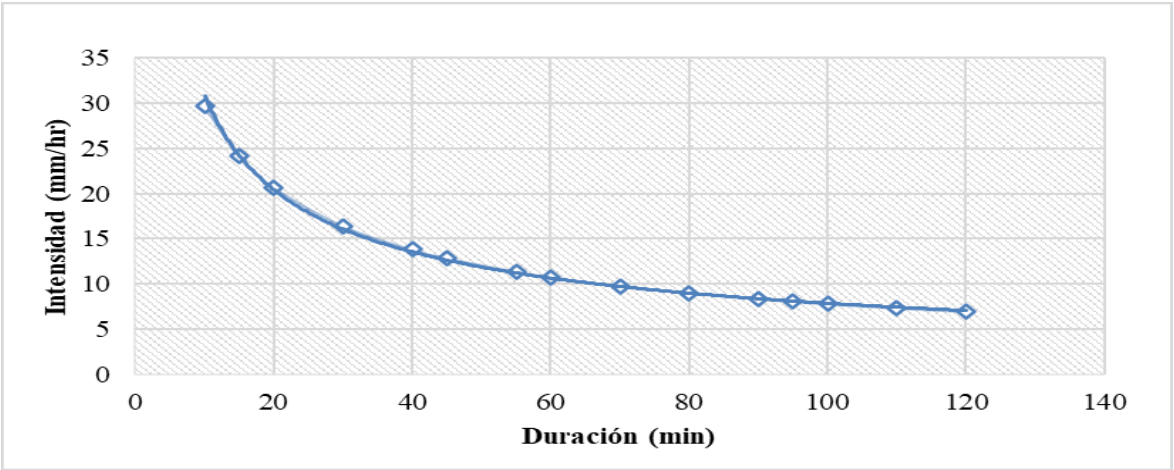
En la parte inferior de la tabla se resumen los parámetros del modelo:

- Ln(d) = 4.7970
- d = 121.1509
- n = –0.5937 (pendiente de la regresión).

En la figura 9, la curva muestra como la intensidad de precipitación (mm/h) disminuye a medida que aumenta la duración. Al inicio, para eventos cortos (5-10 minutos), la intensidad es cercana a 30 mm/h), sin embargo, conforme la duración tiene a incrementar (60 – 120 minutos), la intensidad decrece a valores alrededor de 5-10 mm/h.

Figura 9

Curva IDF para un periodo de retorno de 5 años



Nota. presenta el diagrama intensidad-duración-frecuencia asociado a un intervalo de recurrencia quinquenal.

Tabla 15

Valores de duración de la precipitación para un periodo de retorno de 10 años

Periodo de retorno para T = 10 años						
Nº	X	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	120	8.9199	4.7875	2.1883	10.4764	22.9201
2	110	9.4401	4.7005	2.2450	10.5524	22.0945
3	100	10.0417	4.6052	2.3067	10.6229	21.2076
4	95	10.3797	4.5539	2.3399	10.6554	20.7378
5	90	10.7473	4.4998	2.3747	10.6855	20.2483
6	80	11.5890	4.3820	2.4501	10.7362	19.2022
7	70	12.6148	4.2485	2.5349	10.7694	18.0497
8	60	13.8989	4.0943	2.6318	10.7755	16.7637
9	55	14.6735	4.0073	2.6860	10.7639	16.0587
10	45	16.6047	3.8067	2.8097	10.6955	14.4907
11	40	17.8367	3.6889	2.8813	10.6286	13.6078
12	30	21.1701	3.4012	3.0526	10.3825	11.5681
13	20	26.6901	2.9957	3.2843	9.8389	8.9744
14	15	31.1938	2.7081	3.4402	9.3163	7.3335
15	10	38.2724	2.3026	3.6447	8.3923	5.3019
15	940	254.0726	58.7821	40.8701	155.2917	238.5590
Ln (d) =	5.0513	d =	156.2272	n =	-0.5937	

Nota. En la tabla 15, se presenta los valores de precipitación para un periodo de retorno de 10 años.

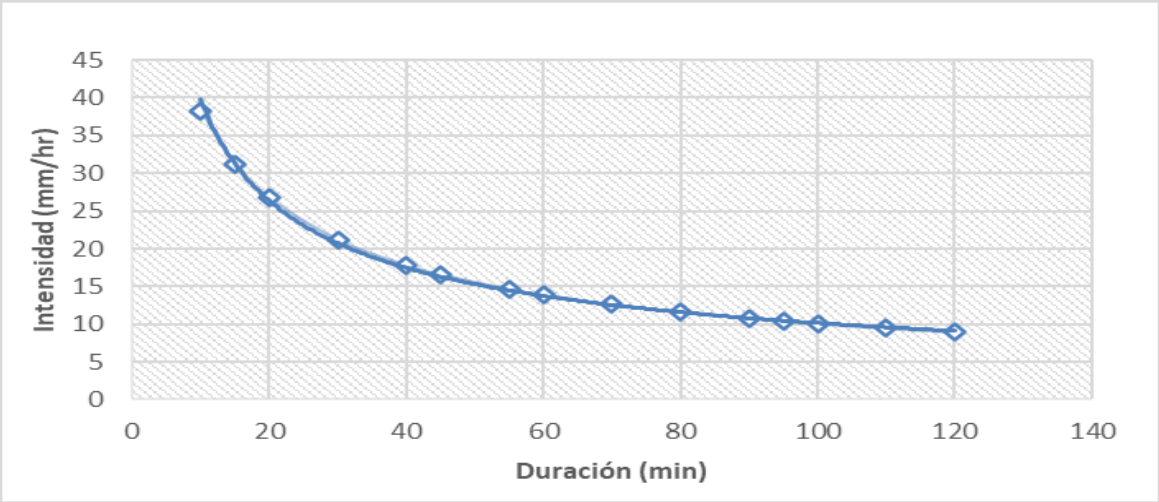
En la parte inferior de la tabla se resumen los parámetros del modelo:

- Ln(d) = 5.0513
- d = 156.2272
- n = –0.5937 (pendiente de la regresión).

En la figura 10, la curva muestra como la intensidad de precipitación (mm/h) disminuye a medida que aumenta la duración. Al inicio, para eventos cortos (5-10 minutos), la intensidad es cercana a 40 mm/h), sin embargo, conforme la duración tiene a incrementar (60 – 120 minutos), la intensidad decrece a valores alrededor de 5-8 mm/h.

Figura 10

Curva IDF para un periodo de retorno de 10 años



Nota. exhibe el diagrama que relaciona intensidad, duración y frecuencia correspondiente a un intervalo de recurrencia de una década.

Tabla 16

Valores de duración de la precipitación para un periodo de retorno de 20 años

Periodo de retorno para T = 20 años						
Nº	**x**	**y**	**ln x**	**ln y**	**ln x*ln y**	**(lnx)^2**
1	120	11.1117	4.7875	2.4080	11.5283	22.9201
2	110	11.7597	4.7005	2.4647	11.5852	22.0945
3	100	12.5091	4.6052	2.5265	11.6348	21.2076
4	95	12.9303	4.5539	2.5596	11.6560	20.7378
5	90	13.3881	4.4998	2.5944	11.6742	20.2483
6	80	14.4367	4.3820	2.6698	11.6990	19.2022
7	70	15.7145	4.2485	2.7546	11.7028	18.0497
8	60	17.3142	4.0943	2.8515	11.6751	16.7637
9	55	18.2791	4.0073	2.9058	11.6443	16.0587
10	45	20.6848	3.8067	3.0294	11.5319	14.4907
11	40	22.2195	3.6889	3.1010	11.4391	13.6078
12	30	26.3721	3.4012	3.2723	11.1298	11.5681
13	20	33.2485	2.9957	3.5040	10.4971	8.9744
14	15	38.8588	2.7081	3.6599	9.9113	7.3335
15	10	47.6767	2.3026	3.8644	8.8982	5.3019
15	940	316.5039	58.7821	44.1658	168.2070	238.5590
Ln (d) =	5.2710	d =	194.6157	n =	-0.5937	

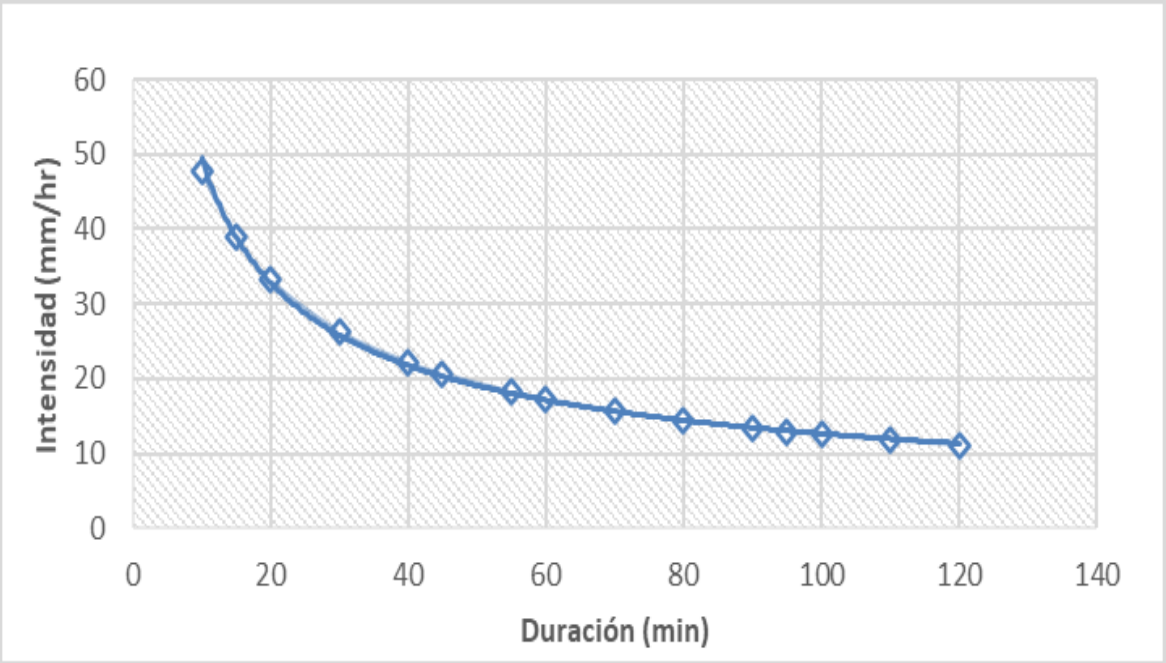
Nota. En la tabla 16, se presenta los valores de precipitación para un periodo de retorno de 20 años.

En la parte inferior de la tabla se resumen los parámetros del modelo:

- Ln(d) = 5.2710
- d = 194.6157
- n = –0.5937 (pendiente de la regresión).

Figura 11

Curva IDF para un periodo de retorno de 20 años



Nota. En dicho gráfico se evidencia cómo la tasa pluviométrica (expresada en mm/h) experimenta una reducción conforme

medida que aumenta la duración. Al inicio, para eventos cortos (5-10 minutos), la intensidad es cercana a 50 mm/h), sin embargo, conforme la duración tiene a incrementar (60 – 120 minutos), la intensidad decrece a valores alrededor de 10-20 mm/h.

Tabla 17

Valores de duración de la precipitación para un periodo de retorno de 25 años

Periodo de retorno para T = 25 años						
Nº	**x**	**y**	**ln x**	**ln y**	**ln x*ln y**	**(lnx)^2**
1	120	11.8597	4.7875	2.4731	11.8402	22.9201
2	110	12.5514	4.7005	2.5298	11.8914	22.0945
3	100	13.3512	4.6052	2.5916	11.9348	21.2076
4	95	13.8007	4.5539	2.6247	11.9527	20.7378
5	90	14.2894	4.4998	2.6595	11.9673	20.2483
6	80	15.4086	4.3820	2.7349	11.9845	19.2022
7	70	16.7724	4.2485	2.8197	11.9796	18.0497
8	60	18.4798	4.0943	2.9167	11.9419	16.7637
9	55	19.5097	4.0073	2.9709	11.9054	16.0587
10	45	22.0774	3.8067	3.0946	11.7799	14.4907
11	40	23.7154	3.6889	3.1661	11.6794	13.6078
12	30	28.1475	3.4012	3.3375	11.3514	11.5681
13	20	35.4868	2.9957	3.5692	10.6922	8.9744
14	15	41.4748	2.7081	3.7251	10.0877	7.3335
15	10	50.8864	2.3026	3.9296	9.0482	5.3019
15	940	337.8112	58.7821	45.1431	172.0368	238.5590
Ln (d) =	5.3362	d =	207.7174	n =	-0.5937	

Nota. En la tabla 17, se presenta los valores de precipitación para un periodo de retorno de 25 años.

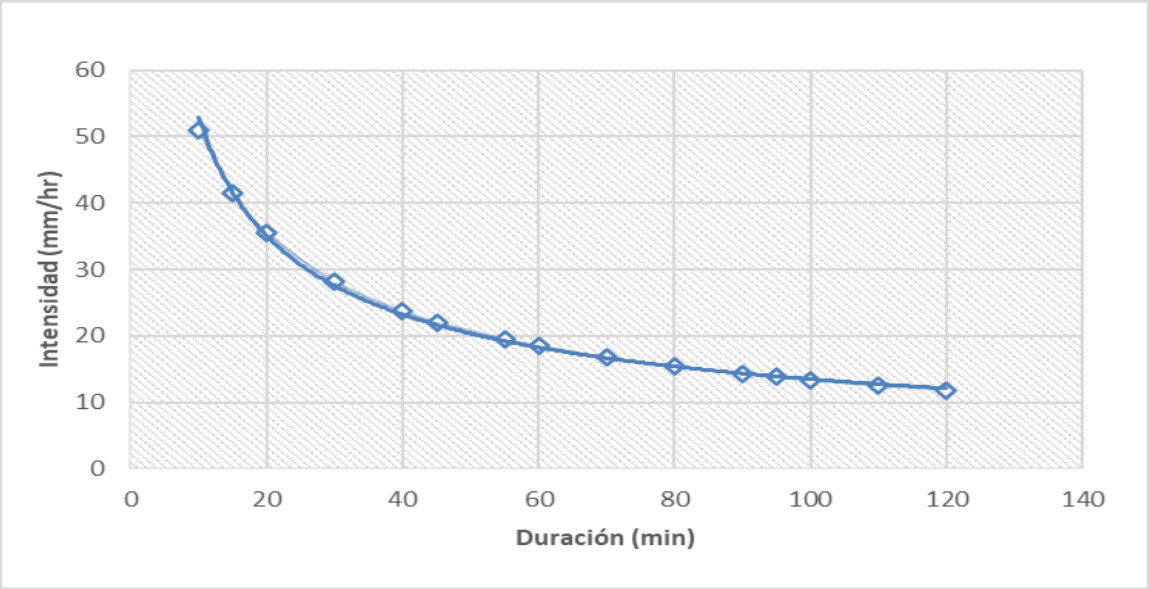
En la parte inferior de la tabla se resumen los parámetros del modelo:

- Ln(d) = 5.3362
- d = 207.7174
- n = –0.5937 (pendiente de la regresión).

En la figura 12, la curva muestra como la intensidad de precipitación (mm/h) disminuye a medida que aumenta la duración. Al inicio, para eventos cortos (5-10 minutos), la intensidad es cercana a 52 mm/h), sin embargo, conforme la duración tiene a incrementar (60 – 120 minutos), la intensidad decrece a valores alrededor de 12-18 mm/h.

Figura 12

Curva IDF para un periodo de retorno de 25 años



Nota. en la figura 12 se muestra la curva IDF para un periodo de retorno de 25 años.

Tabla 18

Valores de duración de la precipitación para un periodo de retorno de 30 años

Periodo de retorno para T = 30 años						
Nº	**x**	**y**	**ln x**	**ln y**	**ln x*ln y**	**(lnx)^2**
1	120	12.6260	4.7875	2.5358	12.1399	22.9201
2	110	13.3623	4.7005	2.5924	12.1857	22.0945
3	100	14.2139	4.6052	2.6542	12.2231	21.2076
4	95	14.6925	4.5539	2.6873	12.2378	20.7378
5	90	15.2127	4.4998	2.7221	12.2491	20.2483
6	80	16.4042	4.3820	2.7975	12.2589	19.2022
7	70	17.8561	4.2485	2.8823	12.2456	18.0497
8	60	19.6738	4.0943	2.9793	12.1982	16.7637
9	55	20.7703	4.0073	3.0335	12.1563	16.0587
10	45	23.5039	3.8067	3.1572	12.0183	14.4907
11	40	25.2477	3.6889	3.2287	11.9104	13.6078
12	30	29.9662	3.4012	3.4001	11.5643	11.5681
13	20	37.7797	2.9957	3.6318	10.8798	8.9744
14	15	44.1547	2.7081	3.7877	10.2573	7.3335
15	10	54.1743	2.3026	3.9922	9.1924	5.3019
15	940	359.6384	58.7821	46.0822	175.7172	238.5590
Ln (d) =	5.3988	d =	221.1388	n =	-0.5937	

Nota. La información contenida en el cuadro 18 muestra los volúmenes de lluvia proyectados para un intervalo de recurrencia de 30 años.

En el segmento inferior del mismo cuadro aparecen consolidados los parámetros característicos del modelo aplicado.

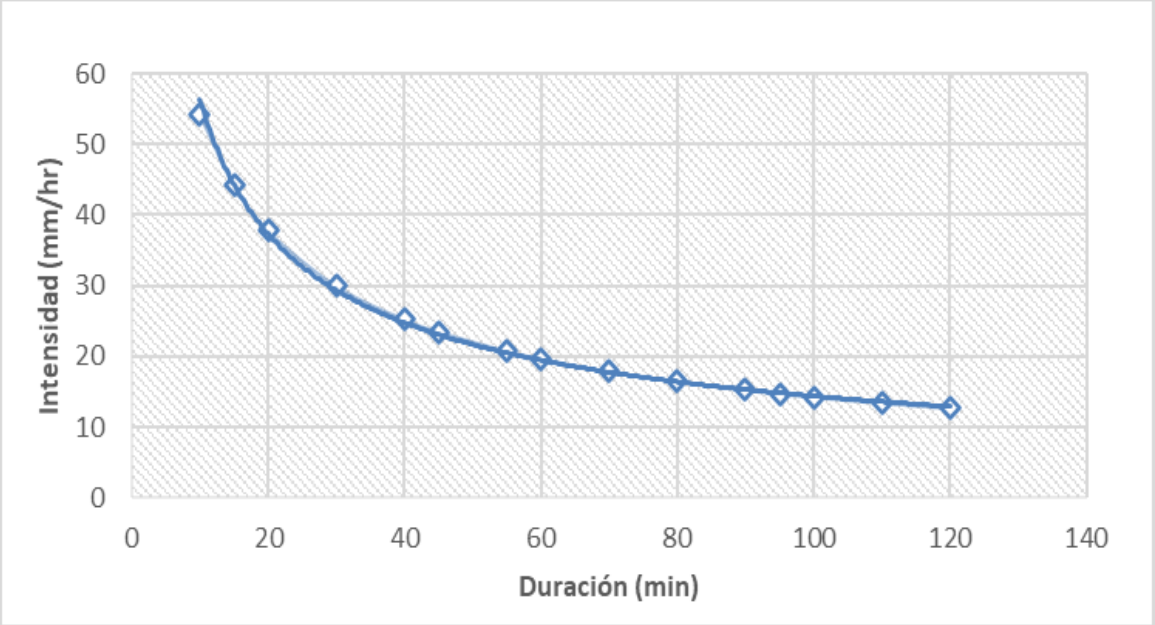
La identificación de la función probabilística óptima se realizó mediante la aplicación de técnicas de verificación estadística, específicamente el procedimiento que minimiza las desviaciones cuadráticas y el contraste desarrollado por Kolmogorov-Smirnov.

- Ln(d) = 5.3988
- d = 221.1388
- n = –0.5937 (pendiente de la regresión).

En la figura 13, la curva muestra como la intensidad de precipitación (mm/h) disminuye a medida que aumenta la duración. Al inicio, para eventos cortos (10-20 minutos), la intensidad es cercana a 55 mm/h), sin embargo, conforme la duración tiene a incrementar (60 – 120 minutos), la intensidad decrece a valores alrededor de 12-20 mm/h.

Figura 13

Curva IDF para un periodo de retorno de 30 años



Nota. en la figura 13 se muestra la curva IDF para un periodo de retorno de 30 años

Tabla 19

Valores de duración de la precipitación para un periodo de retorno de 50 años

Periodo de retorno para T = 50 años						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	120	14.3125	4.7875	2.6611	12.7401	22.9201
2	110	15.1471	4.7005	2.7178	12.7750	22.0945
3	100	16.1125	4.6052	2.7796	12.8005	21.2076
4	95	16.6549	4.5539	2.8127	12.8087	20.7378
5	90	17.2446	4.4998	2.8475	12.8132	20.2483
6	80	18.5953	4.3820	2.9229	12.8083	19.2022
7	70	20.2412	4.2485	3.0077	12.7783	18.0497
8	60	22.3016	4.0943	3.1047	12.7115	16.7637
9	55	23.5445	4.0073	3.1589	12.6587	16.0587
10	45	26.6432	3.8067	3.2825	12.4955	14.4907
11	40	28.6200	3.6889	3.3541	12.3729	13.6078
12	30	33.9687	3.4012	3.5254	11.9907	11.5681
13	20	42.8259	2.9957	3.7571	11.2554	8.9744
14	15	50.0524	2.7081	3.9131	10.5968	7.3335
15	10	61.4103	2.3026	4.1176	9.4811	5.3019
15	940	407.6749	58.7821	47.9628	183.0868	238.5590
Ln (d) =	5.5242	d =	250.6761	n =	-0.5937	

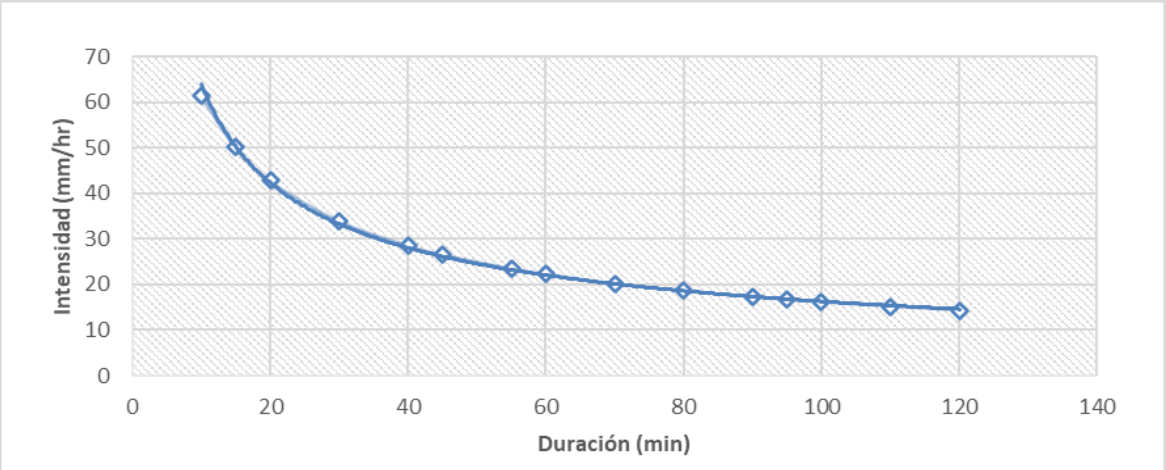
Nota. En la tabla 19, se presenta los valores de precipitación para un periodo de retorno de 50 años. En la parte inferior de la tabla se resumen los parámetros del modelo:

- Ln(d) = 5.5242
- d = 250.6761
- n = –0.5937 (pendiente de la regresión).

En la figura 16, la curva muestra como la intensidad de precipitación (mm/h) disminuye a medida que aumenta la duración. Al inicio, para eventos cortos (5-10 minutos), la intensidad es cercana a 60 mm/h), sin embargo, conforme la duración tiene a incrementar (60 – 120 minutos), la intensidad decrece a valores alrededor de 12-22 mm/h.

Figura 14

Curva IDF para un periodo de retorno de 50 años



*Nota. e*n la figura 14 se muestra la curva IDF para un periodo de retorno de 50 años.

Tabla 20

Valores de duración de la precipitación para un periodo de retorno de 100 años

Periodo de retorno para T = 100 años						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	120	16.9654	4.7875	2.8312	13.5542	22.9201
2	110	17.9548	4.7005	2.8879	13.5743	22.0945
3	100	19.0990	4.6052	2.9496	13.5836	21.2076
4	95	19.7420	4.5539	2.9827	13.5831	20.7378
5	90	20.4410	4.4998	3.0175	13.5784	20.2483
6	80	22.0421	4.3820	3.0930	13.5534	19.2022
7	70	23.9930	4.2485	3.1778	13.5007	18.0497
8	60	26.4354	4.0943	3.2747	13.4078	16.7637
9	55	27.9087	4.0073	3.3289	13.3402	16.0587
10	45	31.5817	3.8067	3.4526	13.1428	14.4907
11	40	33.9249	3.6889	3.5241	13.0002	13.6078
12	30	40.2650	3.4012	3.6955	12.5691	11.5681
13	20	50.7640	2.9957	3.9272	11.7648	8.9744
14	15	59.3299	2.7081	4.0831	11.0573	7.3335
15	10	72.7931	2.3026	4.2876	9.8726	5.3019
15	940	483.2399	58.7821	50.5134	193.0823	238.5590
Ln (d) =	5.6942	d =	297.1404	n =	-0.5937	

Nota. En la tabla 20, se presenta los valores de precipitación para un periodo de retorno de 100 años

En la parte inferior de la tabla se resumen los parámetros del modelo:

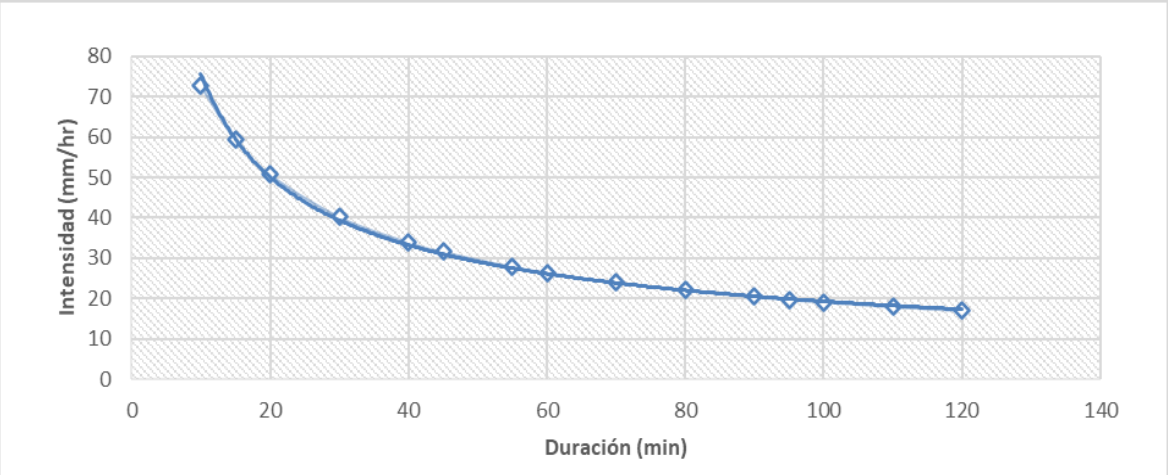
- Ln(d) = 5.6942

- d = 297.1404
- n = –0.5937 (pendiente de la regresión).

En la figura 17, la curva muestra como la intensidad de precipitación (mm/h) disminuye a medida que aumenta la duración. Al inicio, para eventos cortos (5-10 minutos), la intensidad es cercana a 72 mm/h), sin embargo, conforme la duración tiene a incrementar (60 – 120 minutos), la intensidad decrece a valores alrededor de 12-28 mm/h.

Figura 15

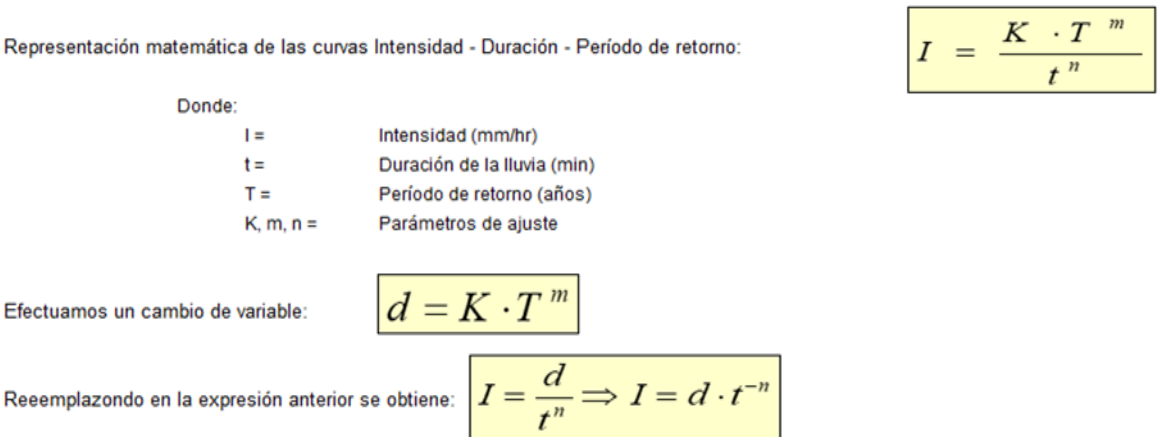
Curva IDF para un periodo de retorno de 100 años



Nota. en la figura 15 se muestra la curva IDF para un periodo de retorno de 100 años.

Figura 16

Representación matemática de las curvas Intensidad – Duración – Periodo de retorno



Nota. En la figura 16, se estable la relación matemática de las curvas Intensidad – Duración – Periodo de retorno.

Tabla 21

Resumen de término constante y coeficiente de regresión potencial para cada periodo de tiempo

Periodo de Retorno (años)	Término ctte. de regresión (d)	Coef. de regresión [n]
2	79.18334487000	-0.59371139152
5	121.15094282055	-0.59371139152
10	156.22723599477	-0.59371139152
20	194.61570532237	-0.59371139152
25	207.71740709729	-0.59371139152
30	221.13876372794	-0.59371139152
50	250.67607614869	-0.59371139152
100	297.14037970245	-0.59371139152
Promedio =	190.98123196051	-0.59371139152

Nota. En la tabla 21, se presenta el resumen de los términos constantes de la regresión potencial empleada en el presente estudio.

Mediante la transformación de variables, se efectúa un ajuste de tipo potencial entre la frecuencia de ocurrencia (T) y el parámetro constante derivado del análisis de regresión, con el propósito de determinar los coeficientes de la expresión matemática correspondiente.

Tabla 22

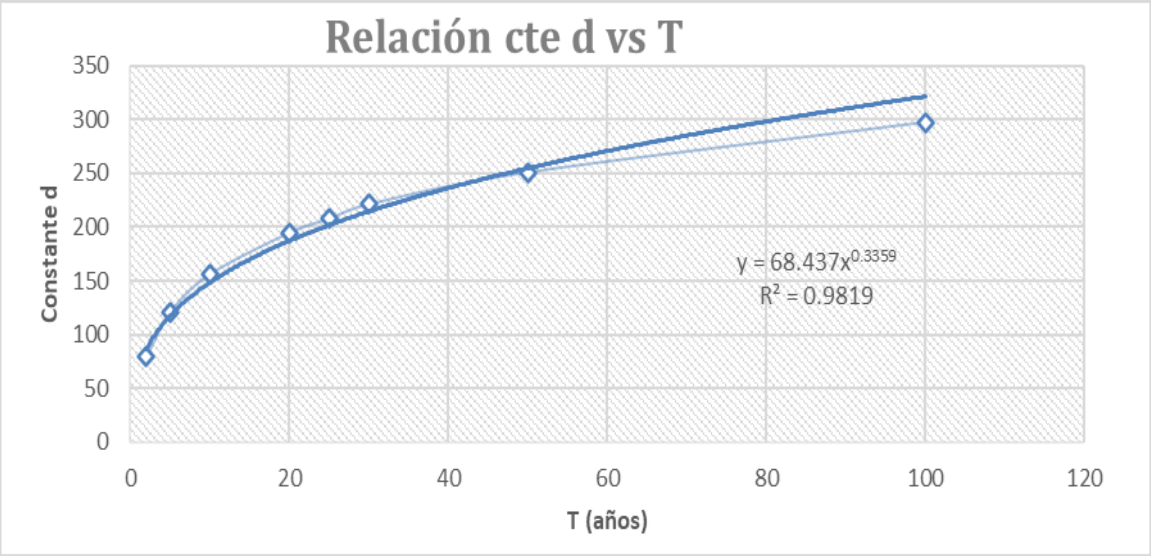
Regresión potencial para distintos periodos de retorno

Nº	T	d	ln T	ln d	ln T*ln d	(lnT)^2
1	2	79.1833	0.6931	4.3718	3.0303	0.4805
2	5	121.1509	1.6094	4.7970	7.7205	2.5903
3	10	156.2272	2.3026	5.0513	11.6311	5.3019
4	20	194.6157	2.9957	5.2710	15.7906	8.9744
5	25	207.7174	3.2189	5.3362	17.1765	10.3612
6	30	221.1388	3.4012	5.3988	18.3624	11.5681
7	50	250.6761	3.9120	5.5242	21.6106	15.3039
8	100	297.1404	4.6052	5.6942	26.2228	21.2076
8	242.0000	1527.8499	22.7382	41.4445	121.5447	75.7879
Ln (K) =	4.2259	*K =*	68.4369	*m =*	0.3359	

Nota. En la tabla 22, se presenta la regresión potencial para los distintos periodos de retorno empleados en esta investigación.

Figura 17

Relación entre el ajuste de regresión potencial y los distintos periodos de retorno



Nota. En la Figura 17 se muestra la relación obtenida mediante el ajuste de regresión potencial para los distintos periodos de retorno.

El índice de determinación (R^2 = 0.9819) evidencia que el modelo describe con elevada precisión la fluctuación de los valores pluviométricos extremos diarios, ratificando así la idoneidad del ajuste matemático para caracterizar los distintos intervalos de recurrencia.

5.2 Discusiones

En esta investigación se logró construir los diagramas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para el observatorio Granja Kayra mediante la aplicación del procedimiento de Bell. Los hallazgos obtenidos, que exhiben un coeficiente de ajuste de R^2=0.98, muestran coherencia con trabajos análogos efectuados por diversos investigadores, confirmando así la pertinencia de la técnica implementada.

Como referencia, Paredes (2015), en su análisis sobre el cálculo de intensidades pluviométricas en la demarcación del Río Illpa en Puno, identificó igualmente una elevada correspondencia y precisión al emplear técnicas estadísticas para determinar intensidades de

proyecto. Similar a lo observado en este estudio, la confiabilidad de los hallazgos de Paredes (2015) estuvo condicionada por la calidad temporal y extensión de los registros disponibles. La concordancia entre ambos resultados fortalece la legitimidad del planteamiento metodológico utilizado en esta investigación.

Paralelamente, el trabajo de Pérez-Sánchez y Senent-Aparicio (2016) desarrollado en la zona hidrográfica del río Segura en España, si bien empleando un esquema distinto, enfatiza también la necesidad de disponer de series cronológicas de lluvia para la determinación exacta de los diagramas IDF. A diferencia de su enfoque, que priorizó eventos de precipitación breves, el presente análisis contempló un espectro más extenso de intervalos temporales, facilitando así una mayor versatilidad en el dimensionamiento de estructuras. Pese a las variaciones metodológicas, ambas investigaciones convergen en reconocer la trascendencia de los diagramas IDF para la administración del drenaje urbano y la prevención de anegamientos.

Los resultados derivados de este estudio representan, adicionalmente, un aporte significativo a las directrices de hidrología y evacuación pluvial del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) del Perú (2011), las cuales establecen la obligatoriedad de emplear información regional para el planeamiento de infraestructuras. Al producir los diagramas IDF particulares para el centro de monitoreo Granja Kayra, esta investigación aporta información específica susceptible de ser directamente incorporada en iniciativas constructivas de la zona cusqueña, solucionando la carencia de datos localizados que frecuentemente se manifiesta en el ejercicio profesional.

En conclusión, la elevada correlación y el ajuste preciso de la información al esquema de Bell no solamente ratifican la eficiencia del procedimiento, sino que además posicionan este trabajo en armonía con los descubrimientos y sugerencias de otros especialistas en el ámbito hidrológico.

VI. Conclusiones

De acuerdo con el análisis y los resultados obtenidos en la presente investigación, se formulan las siguientes conclusiones:

De acuerdo al objetivo general

La aplicación del método de Bell permitió desarrollar curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) para la estación meteorológica Granja Kayra de la ciudad del Cusco, cumpliéndose el objetivo general de la investigación. El alto coeficiente de correlación obtenido ($R^2 = 0,99$) evidencia un adecuado ajuste entre el modelo aplicado y los datos observados, confirmando la confiabilidad de las curvas IDF generadas. Los resultados constituyen un aporte técnico para la estimación de intensidades de precipitación de diseño y el apoyo al diseño de obras hidráulicas. Como limitación, los resultados dependen de la calidad y longitud de los registros pluviométricos disponibles. El estudio permite la actualización futura de las curvas IDF y su aplicación en otras estaciones similares.

De acuerdo al Objetivo específico 1

Se desarrollaron las intensidades de precipitación para la zona de estudio considerando duraciones de 5 a 120 minutos y períodos de retorno de 2 a 100 años, cumpliéndose el objetivo específico de la investigación. Los resultados presentados evidencian una relación coherente entre intensidad, duración y frecuencia, validando el procedimiento estadístico aplicado. Estas estimaciones constituyen un insumo técnico relevante para la planificación y diseño de obras hidráulicas. Como limitación, los valores obtenidos dependen de la disponibilidad y calidad de los registros pluviométricos, permitiendo su actualización futura

De acuerdo al Objetivo específico 2

Se estimaron las intensidades de precipitación máxima para diferentes duraciones de lluvia y períodos de retorno en la estación meteorológica Granja Kayra, a partir del análisis

estadístico de los registros pluviométricos y la aplicación del método de Bell. Los resultados obtenidos permitieron determinar valores de intensidad representativos para eventos de corta duración, los cuales muestran que la intensidad disminuye conforme aumenta el tiempo de duración de la lluvia y se incrementa a medida que el período de retorno es mayor. En ese sentido, se cumplió el objetivo específico planteado, generándose información técnica confiable para el análisis hidrológico y el diseño de obras hidráulicas en la zona de estudio.

De acuerdo al objetivo específico 3

Se elaboraron las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) para períodos de retorno de 2 a 100 años, cuyos resultados se presentan en las Tablas 12 a 19. Los resultados muestran que, a mayor período de retorno, se estiman intensidades de precipitación más elevadas, en concordancia con la teoría hidrológica. Las curvas IDF permiten evaluar con mayor precisión la respuesta hidrológica ante eventos extremos. Asimismo, contribuyen a reducir la incertidumbre en el dimensionamiento de sistemas de drenaje y obras hidráulicas. Por ello, constituyen una herramienta clave para la gestión del riesgo hídrico y la planificación de infraestructuras.

VII. Recomendaciones

Para fortalecer y dar continuidad a los hallazgos de esta investigación, se proponen las siguientes recomendaciones:

De acuerdo al objetivo general

Se recomienda que las entidades encargadas del monitoreo hidrometeorológico y del diseño de obras hidráulicas mantengan actualizados los registros pluviométricos de la estación Granja Kayra mediante su revisión y depuración continua. Asimismo, se sugiere reestimar las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) cada diez años aplicando el método de Bell. Estas curvas actualizadas deben ser utilizadas como criterio técnico en el diseño de sistemas de drenaje y alcantarillado. Su aplicación permitirá reducir la incertidumbre en la estimación de intensidades de diseño. De esta manera, se fortalecerá la planificación y gestión del riesgo frente a eventos extremos de precipitación.

De acuerdo al objetivo específico 1

Se recomienda aplicar, además del método de Bell, distribuciones probabilísticas complementarias como Gumbel y Log-Pearson Tipo III para el análisis de precipitaciones máximas. Esta comparación debe realizarse mediante pruebas de ajuste estadístico. Su aplicación permitirá contrastar y validar las intensidades estimadas. Asimismo, fortalecerá la confiabilidad de los resultados en estudios futuros

De acuerdo al objetivo específico 2

Se recomienda que el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), en coordinación con las autoridades locales de la región del Cusco, promueva la instalación y mantenimiento de estaciones meteorológicas automáticas, especialmente pluviógrafos. Estas estaciones deben ubicarse estratégicamente y operar con registro continuo para generar información detallada y en tiempo real. La disponibilidad de estos datos permitirá mejorar el análisis estadístico de las precipitaciones y la actualización de las curvas Intensidad–

Duración–Frecuencia (IDF). Asimismo, fortalecerá la planificación hidráulica y la gestión del riesgo frente a eventos extremos

De acuerdo al objetivo específico 3

Se recomienda que las entidades responsables de los estudios hidrológicos actualicen periódicamente las **curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF)** construidas para distintos períodos de retorno, empleando registros pluviométricos recientes y validados. Esta actualización debe realizarse mediante la revisión de las duraciones y períodos de retorno utilizados, garantizando su representatividad frente a las condiciones meteorológicas actuales. Asimismo, se sugiere fortalecer la red de estaciones y observatorios climáticos locales para mejorar la precisión de las curvas IDF. Estas acciones permitirán disponer de herramientas confiables para el diseño hidráulico y la gestión del riesgo en el ámbito regional.

VIII. Referencias

Alba, A. (2016). *Cambios en el Perú*.

Aparicio, F. J. (1997). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa.

Bell, F. C. (1969). Generalized rainfall–duration–frequency relationships. *Journal of the Hydraulics Division, 95*(1), 311–327.

Burroughs, W. J. (2003). *Weather cycles: Real or imaginary?* Cambridge University Press.

Chow, V. T. (1964). *Handbook of applied hydrology*. McGraw-Hill.

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.

Chowdhury, J. U., Stedinger, J. R., & Lu, L. H. (1991). Goodness-of-fit tests for regional generalized extreme value flood distributions. *Water Resources Research, 27*(7), 1765–1776.

Dingman, S. L. (2015). *Physical hydrology* (3rd ed.). Waveland Press.

Guarín, L., & Sánchez, J. (2022). *Evaluación de métodos de construcción de curvas IDF a partir de precipitaciones máximas en 24 horas para la región Caribe, Colombia*. Universidad Tecnológica de Bolívar.

Haan, C. T. (2002). *Statistical methods in hydrology* (2nd ed.). Iowa State Press.

Hernández, D., & González, R. (2023). *Estimación de curvas intensidad–duración–frecuencia en la finca El Plantel*. Universidad Nacional Agraria.

Hershfield, D. M. (1961). *Rainfall frequency atlas of the United States*. U.S. Weather Bureau.

Khaliq, M. N., Ouarda, T. B. M. J., Ondo, J.-C., Gachon, P., & Bobée, B. (2006). Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydro-meteorological observations: A review. *Journal of Hydrology, 329*(3), 534–552. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.004

Koutsoyiannis, D. (2004). Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Theoretical investigation. *Hydrological Sciences Journal, 49*(4), 575–590.

Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. H. (1982). *Hydrology for engineers* (3rd ed.). McGraw-Hill.

McCuen, R. H. (1989). *Hydrologic analysis and design*. Prentice Hall.

Mijares, A. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2011). *Manual de hidrología, hidráulica y drenaje*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2015). *Portal institucional*.

Ortiz, P. (2015). *Probabilidad y estadística*. Universidad de Cuenca.

Paredes, R. (2015). *Generación de intensidades de precipitación máxima en estaciones sin información pluviométrica (cuenca del río Illpa–Puno)* Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano

Pérez-Sánchez, J., & Senent-Aparicio, J. (2016). Curvas intensidad–duración–frecuencia de tormentas de corta duración en la cuenca del río Segura, España. *Agrociencia, 51*(6), 607–616.

Pilgrim, D. H., & Cordery, I. (1993). Flood runoff. En D. R. Maidment (Ed.), *Handbook of hydrology* (pp. 9.1–9.42). McGraw-Hill.

Pulgarín, G. (2009). *Fórmulas regionales para la estimación de curvas intensidad–frecuencia–duración basadas en las propiedades de escala de la lluvia (región andina colombiana)*. Universidad Nacional de Colombia.

Quispe, J. C. (2018). Curvas IDF para la estación meteorológica de Viacha, departamento de La Paz. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales, 5*(1), 99–105.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2018). *Atlas climático del Perú*.

Subramanya, K. (2013). *Engineering hydrology* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

Tucci, C. (2007). *Hidrología: ciencia y aplicación*. Universidad Federal de Rio Grande do Sul.

Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac. (s.f.). *Página institucional*.

Viessman, W., Lewis, G. L., & Knapp, J. W. (1989). *Introduction to hydrology* (3rd ed.). Harper & Row.

World Meteorological Organization. (2009). *Guide to hydrological practices* (6th ed., No. 168).

Zevallos Ruiz, J. A. (2018). *Estimación de curvas de intensidad–duración–frecuencia de precipitaciones para el Perú usando precipitaciones horarias simuladas con el modelo de pulso rectangular de Bartlett–Lewis*,Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes