

**UNIVERSIDAD NACIONAL HERMILO VALDIZAN**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA ACADEMICA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL**



TESIS

**ESTIMACION DE LAS INTENSIDADES MAXIMAS DE PRECIPITACION PARA  
DIFERENTES TIEMPOS DE DURACION Y PERIODOS DE RETORNO, Y SU  
CONCEPTUALIZACION EN MAPAS PARA LA REGION DE HUANUCO**

TESISTAS

**CARHUA MASGO, Javier**  
**VARGAS ALVARADO, Jaime Omero**

ASESOR

**ING. ZEVALLOS HUARANGA, Jorge**

TESIS PARA OBTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:  
**INGENIERO CIVIL**

HUÁNUCO – PERÚ

2018

## DEDICATORIA

A mí Huánuco y a la UNHEVAL por la formación académica y volcarle su conocimiento para solucionar problemas que aquejan al país, y a la familia que cada día estuvo a mi lado en lo bueno y en lo malo siempre dándome aliento de fuerza y voluntad.

A mi padre EVARISTO CARHUA ESPIRITU, y a mi madre MARCELINA MASGO GONZALES, gracias por entenderme, y darme el amor eterno.

A mis hijos y esposa, de pasar momentos maravillosos, verlos crecer cada día llenos de amor.

**Javier Carhua Masgo**

## DEDICATORIA

A DIOS, por darnos todo lo maravilloso que hay en este planeta, y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido y serán mi soporte y compañía durante toda mi existencia.

A mi padre LIZANDRO VARGAS CAJALEÓN y a mi madre CLOTILDE ALVARADO COTRINA, gracias por tanto amor, ejemplo, comprensión y apoyo.

A mi esposa, por su amor, comprensión y apoyo. A mi hija que es el motor y motivo para esforzarme cada día a ser una mejor persona y vea en mí un ejemplo.

A Mis hermanos, hermanas, familiares y amigos que de una u otra forma han contribuido en la culminación de mi carrera profesional, y por confiar en mí siempre.

**Jaime Omero Vargas Alvarado**

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestro asesor el ingeniero Jorge Zevallos Huaranga por brindarnos su ayuda incondicional durante la realización de nuestra investigación.

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI por la valiosa información entregada y su buena disposición en todo momento.

A los docentes de la Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura por todas las enseñanzas brindadas durante nuestra preparación académica dentro de las aulas.

## RESUMEN

El presente trabajo se centra en el conocimiento del comportamiento de las intensidades máximas de precipitación para diferentes tiempos de duración y periodos de retornos, Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF), el cual es una información de vital importancia para el desarrollo y el análisis de muchos proyectos de la ingeniería, constituyendo una de las herramientas más utilizadas en la estimación de caudales de diseño para obras hidráulicas como obras de drenaje en vías, obras de alcantarillados pluviales, control y evacuación de crecidas, diseño de conservación de suelos, protección de causes u otros, ya que permite obtener información de las lluvias esperadas en una zona o región.

Por tanto, este proyecto de investigación se basa en la elaboración de todos los procesos estadísticos necesarios, en el análisis de datos de precipitación para distribuciones extremas a través de la distribución de probabilidad gumbel, a fin de obtener las ecuaciones de las curvas IDF de todas las estaciones pluviométricas de la región de Huánuco para duraciones de 5, 10, 15, 30, 45 minutos, 1, 2, 3, 6, 12, 18, 24 horas, y para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años, a partir de las precipitaciones máximas en 24 horas mensuales obtenidas del servicio nacional de meteorología e hidrología (SENAMHI), estas curvas IDF fueron conceptualizadas en mapas tendenciales de intensidades máximas de precipitación para duraciones y tiempos de retorno mencionados líneas arriba, a través del uso de herramientas computacionales basadas en un sistema de información geográfico SIG, en nuestro caso el software ArcGis, mediante el método de interpolación espacial a través del método geo estadístico de Kriging.

**Palabras Clave:** Intensidad, Duración, Frecuencia, Gumbel, Precipitación, ArcGis, Interpolación, Kriging.

## SUMMARY

The present study focuses on the knowledge of the maximum precipitation intensity for different durations and returns periods, intensity-duration-frequency (IDF) curves, which is vital information For the development and analysis of many engineering projects, constituting one of the most used tools in the estimation of design flows for hydraulic works such as drainage works in roads, storm sewer works, control and Evacuation of floods, design of soil conservation, protection of causes or others, since it allows to obtain information of the expected rains in an area or region.

Therefore, this research project is based on the elaboration of all the necessary statistical processes, in the analysis of precipitation data for extreme distributions by means of distributing probability gumbel, in order to obtain the equations of The IDF curves of all pluviometric stations in the Huánuco region for durations of 5, 10, 15, 30, 45 minutes, 1, 2, 3, 6, 12, 18, 24 hours, and for return periods of 2, 5, 10, 25, 50, 100 and 500 years, from maximum rainfall in 24 hours per month Obtained from the National Meteorology and Hydrology Service (SENAMHI), these IDF curves were conceptualized in trend maps of maximum precipitation intensities for durations and return times mentioned above, through the use of Computational tools based on a geographic information system GIS, in our case the ArcGis software, using the spatial interpolation method through the Kriging Geo statistical method.

**Keywords:** Intensity, Duration, Frequency, Gumbel, Precipitation, ArcGis, Interpolation, Kriging.

## Contenido

INTRODUCCION .....	1
CAPITULO I: GENERALIDADES .....	3
TITULO DE LA INVESTIGACION.....	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
HIPÓTESIS .....	4
Hipótesis general.....	4
Hipótesis específicas .....	4
OBJETIVOS .....	5
Objetivo general .....	5
Objetivo específicos .....	5
JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA .....	5
LIMITACIONES Y ALCANCES .....	7
CAPITULO II: MARCO REFERENCIAL .....	8
MARCO HISTORICO .....	8
Antecedentes generales .....	8
Antecedentes internacionales .....	8
Antecedentes nacionales .....	11
Antecedentes regionales.....	17
MARCO TEORICO.....	17
Hidrología .....	17
El clima .....	18

Elementos del clima .....	18
Factores del clima .....	18
Precipitación.....	19
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL .....	34
ANÁLISIS DE TORMENTA .....	36
ELEMENTOS FUNDAMENTALES .....	36
CURVAS DE INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA. ....	39
ESTADÍSTICA APLICADA A LA HIDROLOGÍA. ....	40
Pruebas de bondad de ajuste .....	48
Aplicación de las curvas IDF. ....	51
Ecuaciones para las curvas IDF. ....	51
CAPITULO III: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION.....	54
TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACION.....	54
Tipo de investigación .....	54
Nivel de investigación.....	54
METODO DE LA INVESTIGACIÓN.....	55
FASES METODOLOGICAS. ....	55
INFORMACION METEDOLOGICA.....	57
Selección de las estaciones meteorológicas .....	57
Adquisición de datos de precipitación máxima de 24 horas (mm). ....	59
Revisión de los datos adquiridos de precipitación máxima de 24 horas (mm). ....	59

Estimación de los datos faltantes de precipitación.....	59
Análisis de Homogeneidad y/o Consistencia.....	61
Pruebas estadísticas de homogeneidad.....	62
Ajuste de los datos de precipitación a una función de distribución de probabilidad ..	65
Precipitaciones máximas probables para distintas frecuencias o periodo de retorno.	76
Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración y periodos de retorno. .....	78
Intensidad distribuida de precipitación para diferentes periodos de retorno.....	79
Determinación de las curvas IDF para diferentes periodos de retorno y tiempos de duración.....	79
CAPITULO IV: ANALISIS DE RESULTADOS .....	84
ANALISIS DE LOS REGISTROS PLUVIOMETRICOS .....	84
Análisis de los datos faltantes .....	84
ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES.....	85
DETECCION DE PRESENCIA DE DATOS ATIPICOS .....	86
PRUEBA DE HOMOGENEIDAD A ESCALA ANUAL .....	87
CALCULO DE LAS CURVAS DE INTENSIDADES MAXIMAS DE PRECIPITACION PARA DIFERENTES TIEMPOS DE DURACION Y PERIODOS DE RETORNO – CURVAS IDF .....	89
Obtención de las series de precipitaciones máximas en 24 horas anuales .....	89
Ajuste de los datos a una función de distribución de probabilidad.....	90
Precipitación máxima probable para distintas frecuencias o periodos de retorno .....	93

Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración y periodos de retorno	94
Intensidad distribuida de precipitación para diferentes periodos de retorno.....	95
Determinación de las curvas intensidad-duración-frecuencia, curvas IDF.....	96
Generación de mapas de intensidades máximas para diferentes periodos de retorno y tiempos de duración mediante el sistema de información geográfica SIG, usando el programa ArcGis.....	104
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	108
CONCLUSIONES .....	108
RECOMENDACIONES .....	109
Bibliografía .....	110
ANEXOS.....	112
ANEXO I: TABLAS DE DISTRIBUCION DE PROBABILIDAD .....	112

## Contenido de Tablas

Tabla 1. Tabla de lluvias .....	22
Tabla 2. Estaciones meteorológicas seleccionadas .....	58
Tabla 3. $V_{crit}$ para diferentes niveles de significación $\alpha$ .....	64
Tabla 4. Rango del Número de Secuencias “u” para un Registro Homogéneo .....	64
Tabla 5. Valores Críticos de $D_0$ del estadístico Smirnov-Kolmogorov $D$ , para varios valores de $N$ y niveles de significación $\alpha$ .....	68
Tabla 6. valores recomendados de riesgo admisible y periodo de retorno de obras de drenaje.....	76
Tabla 7. valores recomendados de periodo de retorno para drenaje pluvial.....	77
Tabla 8. Coeficientes de duración lluvias entre 48 horas y una hora.....	78
Tabla 9. Estaciones meteorológicas con datos completos .....	84
Tabla 10. Estaciones meteorológicas con datos incompletos .....	85
Tabla 11. Estaciones meteorológicas con datos Atípicos .....	86
Tabla 12. Estaciones meteorológicas que no pasaron las pruebas de homogeneidad.....	87
Tabla 13. Precipitación máxima en 24 horas anual - Estación CP Huánuco .....	89
Tabla 14. Ajuste de los datos a la Función de distribución Gumbel y cálculo de las pruebas de bondad de ajuste – Estacion CP Huánuco. ....	92
Tabla 15. Precipitación máxima probable para distintas frecuencias o periodos de retorno ajustada a la distribución Gumbel – Estación CP Huánuco.....	93
Tabla 16. Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración y periodos de retorno ajustada a la distribución Gumbel - Estación CP Huánuco.....	94
Tabla 17. Intensidad distribuida de precipitación para diferentes periodos de retorno ajustada a la distribución Gumbel – Estación CP Huánuco.....	95

Tabla 18. Ecuaciones matemáticas de las curvas IDF, para las estaciones pluviométricas de la región de Huánuco .....	97
Tabla 19. Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación CP Huánuco.....	98
Tabla 20. Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación CO Jacas Chico .....	98
Tabla 21. Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación CO Dos de Mayo.....	99
Tabla 22. Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación CO San Rafael.....	99
Tabla 23. Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación CO Chaglla.....	99
Tabla 24. Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación CO Carpish.....	100
Tabla 25. Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación CP Tingo María .....	100
Tabla 26. Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación MAP Tulumayo.....	101
Tabla 27. Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación CO Aucayacu .....	101
Tabla 28. Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación CO La Divisoria .....	101
Tabla 29. Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación CO Puerto Inca .....	102
Tabla 30. Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación CO Tuornavista .....	102
Tabla 31. Tabla de Distribucion Normal.....	112
Tabla 32. Tabla de valores de kt para la distribución gamma o pearson tipo III (asimetría positiva).....	113
Tabla 33. Tabla de valores de kt para la distribución gamma o pearson tipo III (asimetría negativa).....	114

## Contenido de Ecuaciones

<b>Ecuación 1.</b> Curvas IDF .....	5
<b>Ecuación 2:</b> Familia de curvas IDF. Fuente: IILA y SENAMHI.....	11
<b>Ecuación 3.</b> Intensidad .....	36
<b>Ecuación 4.</b> Periodo de Retorno.....	37
<b>Ecuación 5.</b> Probabilidad de excedencia.....	38
<b>Ecuación 6.</b> Probabilidad de no excedencia.....	38
<b>Ecuación 7.</b> Intensidad .....	39
<b>Ecuación 8.</b> Distribución normal. Función de densidad de probabilidad.....	41
<b>Ecuación 9.</b> Distribución normal. Variable estandarizada. ....	42
<b>Ecuación 10.</b> Distribución normal. Función de densidad.....	42
<b>Ecuación 11.</b> Distribución normal. Función de distribución acumulada. ....	42
<b>Ecuación 12.</b> Distribución normal. Función de distribución acumulada. ....	43
<b>Ecuación 13.</b> Distribución log normal. Función de densidad de probabilidad. ....	43
<b>Ecuación 14.</b> Distribución log normal. Función de densidad de probabilidad. ....	43
<b>Ecuación 15.</b> Distribución log normal. Función de distribución acumulada. ....	44
<b>Ecuación 16.</b> Distribución log normal. Función de distribución acumulada. ....	44
<b>Ecuación 17.</b> Distribución log normal. Función de densidad. ....	44
<b>Ecuación 18.</b> Distribución gamma. Función de densidad.....	45
<b>Ecuación 19.</b> Distribución gamma. Función acumulada.....	45
<b>Ecuación 20.</b> Distribución gamma. Factor de frecuencia.....	46
<b>Ecuación 21.</b> Distribución gamma. Media. ....	46
<b>Ecuación 22.</b> Distribución gamma. Desviación estándar.....	46
<b>Ecuación 23.</b> Distribución gamma. Coeficiente de asimetría. ....	47
<b>Ecuación 24.</b> Distribución Gumbel. Función de densidad de probabilidad. ....	47

<b>Ecuación 25.</b> Distribución Gumbel. Función de distribución acumulada.....	48
<b>Ecuación 26.</b> Distribución Gumbel. Parámetro de escala. ....	48
<b>Ecuación 27.</b> Distribución Gumbel. Parámetro de posición. ....	48
<b>Ecuación 28.</b> Prueba de Smirnov-Kolmogorov.....	49
<b>Ecuación 29.</b> Probabilidad empírica. Fuente: Weibull.....	49
<b>Ecuación 30.</b> Coeficiente de determinación R2 .....	50
<b>Ecuación 31.</b> Intensidad, duración y periodo de retorno. Aparicio 1997.....	52
<b>Ecuación 32.</b> Intensidad, duración y periodo de retorno modificado. Aparicio 1997.....	53
<b>Ecuación 33.</b> Intensidad, duración y frecuencia.....	55
<b>Ecuación 34.</b> Intensidad, duración y frecuencia.....	56
<b>Ecuación 35.</b> Método racional deductivo .....	61
<b>Ecuación 36.</b> Test de Mann-Kendall. ....	63
<b>Ecuación 37.</b> Periodo de retorno .....	65
<b>Ecuación 38.</b> Probabilidad de ocurrencia .....	65
<b>Ecuación 39.</b> Probabilidad de no ocurrencia.....	66
<b>Ecuación 40.</b> Distribución normal. Media aritmética .....	66
<b>Ecuación 41.</b> Distribución normal. Desviación estándar .....	67
<b>Ecuación 42.</b> Distribución normal. Variable estandarizada .....	67
<b>Ecuación 43.</b> Test de smirnov – kolgomorov. Delta teorico .....	68
<b>Ecuación 44.</b> Coeficiente de determinación R2 .....	69
<b>Ecuación 45.</b> Distribución log normal. Media aritmética .....	70
<b>Ecuación 46.</b> Distribución log normal. desviación estándar .....	70
<b>Ecuación 47.</b> Distribución log normal. Variable Estandarizada .....	71
<b>Ecuación 48.</b> Distribución gamma. Parámetro de forma .....	72
<b>Ecuación 49.</b> Distribución gamma. Parámetro de escala .....	72

<b>Ecuación 50.</b> Distribución gamma. Densidad de probabilidad .....	73
<b>Ecuación 51.</b> Distribución Gumbel. Parámetro de escala .....	74
<b>Ecuación 52.</b> Distribución Gumbel. Parámetro de posición .....	74
<b>Ecuación 53.</b> Distribución Gumbel. Función de distribución acumulada.....	75
<b>Ecuación 54.</b> Intensidad distribuida de lluvia .....	79
<b>Ecuación 55.</b> Curvas Intensidad, duración y frecuencia .....	79
<b>Ecuación 56.</b> Curvas Intensidad, duración y frecuencia .....	80
<b>Ecuación 57.</b> Curvas Intensidad, duración y frecuencia .....	80
<b>Ecuación 58.</b> Curvas Intensidad, duración y frecuencia .....	80
<b>Ecuación 59.</b> Recta de regresión lineal 1 .....	80
<b>Ecuación 60.</b> Ecuación normal 1 .....	81
<b>Ecuación 61.</b> Ecuación normal 2.....	81
<b>Ecuación 62.</b> Ecuación normal.....	81
<b>Ecuación 63.</b> Ecuación normal.....	81
<b>Ecuación 64.</b> Constantes de Regresión .....	81
<b>Ecuación 65.</b> Recta de regresión lineal 2 .....	82
<b>Ecuación 66.</b> Ecuación normal 3.....	82
<b>Ecuación 67.</b> Ecuación normal 4.....	82
<b>Ecuación 68.</b> Constantes de Regresión .....	82
<b>Ecuación 69.</b> Constantes de Regresión .....	82
<b>Ecuación 70.</b> Promedio aritmético .....	91
<b>Ecuación 71.</b> Desviación estándar.....	91

## Contenido de Figuras

<b>Figura 1.</b> Mapa de Regiones Pluviométricas del IILA. Fuente: IILA y SENAMHI .....	13
<b>Figura 2.</b> Parámetros por Región Pluviométrica. Fuente: IILA y SENAMHI.....	14
<b>Figura 3.</b> Parámetros por Región Pluviométrica. Fuente: IILA y SENAMHI.....	15
<b>Figura 4.</b> Formación de la precipitación en las nubes. Fuente: V.T. Chow, 1994.....	20
<b>Figura 5.</b> Llovizna. Fuente: CAHUANA, A. (2009). Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología. Trabajo para optar al diploma de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia... 21	21
<b>Figura 6.</b> Lluvia. Fuente: CAHUANA, A. (2009). Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología. Trabajo para optar al diploma de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia... 23	23
<b>Figura 7.</b> Escarcha. Fuente: CAHUANA, A. (2009). Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología. Trabajo para optar al diploma de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia... 23	23
<b>Figura 8.</b> Nieve. Fuente: CAHUANA, A. (2009). Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología. Trabajo para optar al diploma de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia... 24	24
<b>Figura 9.</b> Granizo. Fuente: CAHUANA, A. (2009). Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología. Trabajo para optar al diploma de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia... 25	25
<b>Figura 10.</b> Precipitación frontal o ciclónica. Fuente: Villón, M. (2004). Hidrología. ....	26
<b>Figura 11.</b> Precipitación Convectiva. Fuente: Villón, M. (2004). Hidrología. ....	27
<b>Figura 12.</b> Precipitación Orográfica. Fuente: Villón, M. (2004). Hidrología. ....	27
<b>Figura 13.</b> Pluviómetro Estándar (National Weather Service) .....	29
<b>Figura 14.</b> Pluviógrafo de Cubeta Basculante.....	30

<b>Figura 15.</b> Pluviógrafo de Balanza.....	31
<b>Figura 16.</b> Pluviógrafo de Flotador Automático .....	31
<b>Figura 17.</b> Curvas Intensidad - Duración - Frecuencia (I-D-F) .....	40
<b>Figura 18.</b> Función de densidad de la distribución normal .....	42
<b>Figura 19.</b> Función de densidad de la distribución Log Normal.....	44
<b>Figura 20.</b> Función de densidad de la distribución Gamma.....	46
<b>Figura 21.</b> Función de densidad de la distribución Gumbel .....	47
<b>Figura 22.</b> Distribución de las estaciones seleccionadas.....	88
<b>Figura 23.</b> Familia de curvas IDF, Estación CP Huánuco .....	103
<b>Figura 24.</b> Mapa raster de intensidades máximas de precipitación para un período de retorno de 100 años y una duración de 5 minutos, en mm/hora. ....	105
<b>Figura 25.</b> Mapa de intensidades máximas de precipitación para un período de retorno de 100 años y una duración de 5 minutos, en mm/hora.....	107

## INTRODUCCION

La precipitación es uno de los componentes del ciclo hidrológico, de manera que los ingenieros deben ser capaces de cuantificar las precipitaciones. Una de las herramientas para la cuantificación de las precipitaciones son las curvas intensidad, duración, frecuencia IDF, esta técnica aunque antigua en su concepto, es muy vigente y de amplio uso en ingeniería, para el diseño de obras hidráulicas como obras de drenaje en vías, obras de alcantarillados pluviales, control y evacuación de crecidas, diseño de conservación de suelos, protección de causes u otros, ya que permite obtener información de las lluvias esperadas en una zona o región, teniendo en cuenta tres variables importantes: la intensidad, duración, frecuencia o tiempo de retorno.

En el Capítulo I, se enuncia el título de la investigación, el planteamiento del problema, la hipótesis, los objetivos, la justificación e importancia, las limitaciones y alcances de la investigación.

El capítulo II, llamado Marco Referencial estructurado en: marco histórico que presenta antecedentes tanto internacionales, nacionales, regionales, presenta un marco teórico que refleja conceptos fundamentales de hidrología básica, así como todos los elementos teóricos necesarios que dan sustento a la conceptualización de Curvas Intensidad - Duración - Frecuencia.

En el capítulo III, hace referencia a la metodología empleada para la construcción de las curvas IDF, esta construcción se realizó, primero con la obtención de datos de precipitaciones máximas en 24 horas mensuales obtenidas del servicio nacional de meteorología e hidrología (SENAMHI) por un periodo de 15 años de 13 estaciones meteorológicas, estos datos fueron analizadas, estimadas como también tamizadas mediante pruebas estadísticas de los cuales 12 estaciones pluviométricas cumplieron con el requerimiento. Segundo, se realizó el análisis de Frecuencia, donde se encontró que la distribución de valores extremos tipo I o Gumbel, reflejado

en resultados de dos pruebas de bondad de ajuste: el coeficiente de determinación  $R^2$  y el test de Kolmogorov – Smirnov es la que mejor representaban a los datos obtenidos, a partir de estas, se obtuvieron los coeficientes de las ecuaciones de las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) para cada estación. Tercero, mediante el uso del sistema de información geográfica SIG, a través del programa ArcGis, mediante la interpolación geo estadística kriging se generaron los mapas de intensidades máximas de precipitación para tiempos de duración de 5, 10, 15, 30, 45 minutos, 1, 2, 3, 6, 12, 18 y 24 horas, con periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años para toda la región de Huánuco.

El capítulo IV, presenta los resultados obtenidos del procesamiento de la información. Finalmente, se plantean las conclusiones más importantes obtenidas y las recomendaciones necesarias que se propone para ampliar el conocimiento en esta área.

## **CAPITULO I: GENERALIDADES**

### **TITULO DE LA INVESTIGACION**

ESTIMACION DE LAS INTENSIDADES MAXIMAS DE PRECIPITACION PARA DIFERENTES TIEMPOS DE DURACION Y PERIODOS DE RETORNO, Y SU CONCEPTUALIZACION EN MAPAS PARA LA REGION DE HUANUCO.

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El conocimiento del comportamiento de las intensidades máximas de precipitación para diferentes periodos de retornos y tiempos de duración (Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia, IDF) es una información de vital importancia para el desarrollo, y el análisis de muchos proyectos de la ingeniería, el cual constituyen una de las herramientas más utilizadas en la estimación de caudales de diseño para todo tipo de obras hidráulicas tanto en zonas urbanas como rurales, así como en la estimación de las tormentas de diseño en sitios donde, debido a la falta de información de caudales, es necesario recurrir a los modelos precipitación-escorrentía para el cálculo de los caudales máximos.

Las intensidades máximas de precipitación en distintos intervalos de tiempo en un mismo sitio y con distintas probabilidades de excedencia o períodos de retorno, se resumen en las curvas IDF.

Las curvas IDF se determinan mediante análisis del mayor número posible de registros pluviográficas pertenecientes a la estación de estudio, En las cartas pluviográficas están consignados los perfiles de cada tormenta, es decir, la profundidad de precipitación acumulada en función del tiempo.

El problema que se presenta tanto en nuestro país, en las distintas regiones y en particular en la región de Huánuco, es que no se cuentan con registros pluviográficos, solo se cuenta con estaciones pluviométricas.

Además, estas estaciones pluviométricas son mínimas con respecto al área que cuenta la región de Huánuco, debido a ello la estimación de la precipitación es tarea complicada y por ende las estimaciones de las curvas intensidad – Duración – Frecuencia (IDF).

## **HIPÓTESIS**

### **Hipótesis general**

Mejora y facilita las condiciones de diseños de los proyectos de obras hidráulicas en la Región de Huánuco, con la estimación de las intensidades máximas de precipitación para diferentes tiempos de duración y periodos de retornos, y su conceptualización en mapas de Intensidades máximas de precipitación.

### **Hipótesis específicas**

Con la obtención de datos de precipitación máxima en 24 horas del SENAMHI, se obtiene las ecuaciones de las curvas IDF para cada una de las estaciones pluviométricas de la Región de Huánuco.

Con la conceptualización en mapas de las intensidades máximas de precipitación para diferentes tiempos de duración y periodos de retorno, se facilita la búsqueda de la intensidad máxima en cualquier punto de la Región de Huánuco.

## OBJETIVOS

### Objetivo general

Estimar la intensidad máxima de precipitación para diferentes tiempos de duración y periodos de retorno (curvas IDF), y conceptualizarlo mediante mapas de intensidades de precipitación, a fin de mejorar y facilitar las condiciones de diseños de los proyectos de obras hidráulicas en la Región de Huánuco.

### Objetivo específicos

Obtener datos de precipitación máxima en 24 horas del SENAMHI.

Determinar las ecuaciones de las curvas IDF para cada una de las estaciones pluviométricas usando métodos estadísticos. Ver ecuación 1

$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$$

**Ecuación 1.** Curvas IDF

Donde:

I: intensidad (mm/hr)

T: periodo de Retorno (Años)

t: Duración de la Lluvia (Minutos)

K,m,n: Parámetros de Ajuste

Dibujar las curvas IDF para cada una de las estaciones pluviométricas.

Conceptualizar mediante mapas las intensidades máximas de precipitación.

## JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

La Región de Huánuco al igual que las otras regiones del país está realizando acciones importantes en la planeación y ejecución de proyectos de infraestructura relacionados con los

recursos hídricos. Sin embargo, la escasez de información de intensidades máximas de precipitaciones pluviales para fines de diseño, así como la operación de obras de infraestructura relacionadas con los recursos hídricos es aún un peldaño difícil de escalar.

A consecuencia de ello es importante aprovechar la información de las precipitaciones máximas en 24 horas generados por las estaciones pluviométricas existentes en el área de estudio, para que mediante métodos empíricos se pueda estimar, como cuantificar las intensidades máximas de precipitación para diferentes periodos de retorno y tiempo de duración, luego representarlo mediante mapas de intensidades máximas de precipitación, a fin de mejorar y facilitar cualquier dimensionamiento de estructuras hidráulicas, dentro de la Región de Huánuco.

Por tanto, la importancia de la investigación se basa en los siguientes criterios:

**Social:** con la obtención de registros de intensidades máximas de lluvia se generarán curvas IDF, que servirán para los futuros diseños de obras hidráulicas en general, mejorando así la calidad de vida de la población de la región de Huánuco.

**Técnica:** la obtención de curvas intensidad duración frecuencia en la región de Huánuco, proveerá una de las herramientas fundamentales para todo profesional en la planificación y desarrollo de proyectos de infraestructuras hidráulicas, estudios hidrológicos entre otros.

**Económica:** Con datos obtenidos el profesional podrá estimar, también cuantificar las intensidades máximas de precipitación para diferentes periodos de retorno y tiempo de duración, para el dimensionamiento apropiado de infraestructuras hidráulicas, que resulte en una obra funcional, confiable y económica.

## **LIMITACIONES Y ALCANCES**

El estudio se desarrollará en la Región de Huánuco, en donde se determinarán intensidades máximas de precipitación para diferentes periodos de retorno y tiempos de duración (curvas IDF), luego se representará mediante mapas de intensidades máximas de precipitación. El análisis se basará en los registros de precipitaciones máximas en 24 horas de las estaciones pluviométricas, para un periodo de 15 años, de las estaciones meteorológicas siguientes: Estación de San Rafael, Estación de Huánuco, Estación de Canchan, Estación de Jacas Chico, Estación de Dos de Mayo, Estación de Jacas Grande, Estación de Chaglla, Estación de Carpish, Estación de Tingo María, Estación de Cachicoto, Estación de Aucayacu, Estación de Tulumayo, Estación de la Divisoria, Estación de Puerto Inca y Estación de Tournavista, desde el 2001 hasta el 2016.

## **CAPITULO II: MARCO REFERENCIAL**

### **MARCO HISTORICO**

#### **Antecedentes generales**

El Sistema Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) cuenta con estaciones meteorológicas e hidrológicas a lo largo de todo el territorio nacional, sin embargo dichas estaciones son mínimas con respecto a la extensión de nuestro territorio, donde la gran mayoría de estas estaciones meteorológicas solo cuentan con estaciones pluviométricas para el registro de precipitaciones pluviales, por lo que se recurre a cálculos empíricos para la estimación de las curvas intensidad duración y frecuencia (IDF), dichas curvas son una herramienta fundamental de diseño para el cálculo de caudales máximos asociados a un cierto periodo de retorno o nivel dado de probabilidad de no excedencia, usados en la ingeniería para el diseño de estructuras hidráulicas.

Actualmente la Región de Huánuco cuenta con estaciones Meteorológicas dentro de los cuales se cuenta con pluviómetros para el registro de precipitaciones, este instrumento solo mide la cantidad de precipitación caída en intervalos de tiempo, a comparación de un pluviógrafo que mide la cantidad de precipitación caída y el tiempo en que esta ha caído dando registro de intensidad de precipitación más confiables.

También es preciso mencionar que las estaciones meteorológicas con registros que cuenta en la Región de Huánuco son en total 13, esta cantidad de estaciones con respecto al área de dicha Región son limitadas.

#### **Antecedentes internacionales**

PIZARRO TAPIA, Roberto.

ARAVENA GARRIDO, Dayanna

MACAYA PÉREZ, Karina

ABARZA MARTÍNEZ, Alejandro

CORNEJO ESPINOZA, Mariela

LABRA LORCA, Mauricio

PAVEZ VIDAL, Marcelo

ROMÁN ARELLANO, Leonardo

«Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia Para la Zona Centro Sur de Chile». En: Trabajo de Investigación Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO Para América Latina y el Caribe, con La Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Talca - Chile. Año 2005”.

Con este trabajo de investigación se contribuye a la adecuada utilización de los recursos hídricos en el país chileno, presentando las Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia, construidas para 40 estaciones, pertenecientes a la red de estaciones pluviográficas de la Dirección General de Aguas (DGA), distribuidas entre las regiones de Coquimbo y de la Araucanía, así como las expresiones matemáticas que las modelan, cuya finalidad es facilitar la lectura de las intensidades. Asimismo, también se presenta la metodología utilizada para la elaboración de dichas curvas, así como también la caracterización de las intensidades máximas de precipitación en sentido latitudinal.

El informe está compuesto por seis capítulos muy importantes, el capítulo uno presenta estado del arte – características de las precipitaciones en Chile, y definiciones de las curvas intensidad – duración - frecuencia, el capítulo dos presenta la descripción de la zona de estudio, el capítulo tres presenta la construcción gráfica y matemática de las curvas IDF, con ello el capítulo cuatro nos refleja la presentación gráfica y matemática de las curvas IDF, el capítulo cinco nos presenta

las tablas de extensión de las curvas IDF, el capítulo seis nos presenta el análisis de las intensidades máximas de precipitación.

Llegando a las conclusiones siguientes:

A partir de los resultados numéricos, del análisis gráfico propuesto por Témiz (1978) y el método analítico de Bernard (1939), todos aplicados a las regiones en estudio, se demuestra la factibilidad de generar curvas IDF en las regiones del centro del país, a partir de registros pluviográficos de diversa longitud, Esta metodología dio excelentes niveles de ajuste (sobre el 90%) para 39 de las 40 estaciones, exceptuando a la estación de San Javier (con un  $R^2$  de 70%). Esto hace posible la estimación de intensidades máximas de precipitación, para una duración y periodo de retorno determinado, con un alto grado de precisión.

En cuanto a la función de distribución de Gumbel utilizada para el diseño de las curvas IDF, ésta resulta ser apropiada al momento de trabajar con datos extremos como es el caso de las intensidades máximas de precipitación.

En relación a la variabilidad de las intensidades, ésta fue mayor en la Región de Coquimbo, ubicada más al norte de la zona de estudio, donde los coeficientes de variación fluctuaron entre 39,1% y 53,3%; mientras que, para la Región de la Araucanía, localizada en el extremo sur de la zona de estudio, los coeficientes de variación oscilaron entre 20,1% y 29,6%.

A su vez, y como producto de la comparación entre las precipitaciones e intensidades, se verifica que no necesariamente mayores volúmenes de lluvia generan mayores intensidades, lo que queda de manifiesto al comparar las estaciones de la región de Coquimbo, con algunas de las estaciones ubicadas en la región del Maule o de la Araucanía. Las estaciones señaladas, que se ubican en los extremos de la zona de estudio, denotan una tendencia que señala que no existe mucha diferencia en cuanto a los montos de intensidad máxima en 1 hora, independiente del

periodo de retorno. Asimismo, si se comparan las precipitaciones medias anuales, en la zona norte precipita un monto casi tres veces menor que en la zona sur, lo que demuestra que las precipitaciones de la zona norte caen en montos menores, pero con una alta intensidad.

Finalmente, las estaciones ubicadas en la región de Coquimbo, al norte de la zona en estudio, y como era de esperar, fueron las que presentaron probabilidades más bajas de superar los 15 mm/h; lo mismo ocurre para la probabilidad de superar los 25 mm/h, donde las probabilidades son casi de 0%. Sin embargo, llama la atención que algunas estaciones ubicadas en el extremo sur de la zona de estudio, específicamente la región de la Araucanía y para la probabilidad de 25 mm/h, presentan valores similares con la región de Coquimbo. Asimismo, también llama la atención que en general en casi todas las regiones, aquellas estaciones que se ubican cercanas a embalses o lagos, son las que denotan mayores probabilidades, para ambos valores de intensidad.

### **Antecedentes nacionales**

ING. JULIO MALLAUPOMA R.

EDGAR RODRIGUEZ Z.

“Convenio de Cooperación Entre el Instituto Ítalo Latinoamericano (IILA), el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)”. Año 1983.

En marco a este convenio se desarrollaron una familia de curvas de Intensidad–duración–frecuencia, para las distintas regiones del Perú, que tiene la siguiente formulación:

$$i(t, T) = a((1 + k \text{Log} T) * (t + b))^{n-1}$$

**Ecuación 2:** Familia de curvas IDF. Fuente: IILA y SENAMHI

Para una duración de la tormenta de  $t < 3$  horas

Donde:

I: intensidad de la lluvia en (mm/h)

a: parámetro de intensidad (mm)

K: parámetro de frecuencia (adimensional)

b: parámetro (hora)

n: parámetro de duración (adimensional)

t: duración (hora)

T: tiempo de retorno.

Teniendo como finalidad proporcionar a los ingenieros elementos y mapas necesarios que se detalla a continuación.



Figura 1. Mapa de Regiones Pluviométricas del IILA. Fuente: IILA y SENAMHI

INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS  
 CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES EN HIDROLOGÍA Y METEOROLOGÍA  
**TABLA 3.a**  
**Subdivisión el Territorio en Zonas y Subzonas Pluviométricas y Valores de los Parámetros  $K'_g$  y  $\epsilon_g$  que definen la distribución de probabilidades de  $h_g$  en cada punto**

ZONA	$K'_g$	Subzona	$\epsilon_g$
123	$K'_g = 0.553$	123 <sub>1</sub>	$\epsilon_g = 85.0$
		123 <sub>2</sub>	$\epsilon_g = 75.0$
		123 <sub>3</sub>	$\epsilon_g = 100 - 0.022 Y$
		123 <sub>4</sub>	$\epsilon_g = 70 - 0.019 Y$
		123 <sub>5</sub>	$\epsilon_g = 24.0$
		123 <sub>6</sub>	$\epsilon_g = 30.5$
		123 <sub>7</sub>	$\epsilon_g = -2 + 0.006 Y$
		123 <sub>8</sub>	$\epsilon_g = 26.6$
		123 <sub>9</sub>	$\epsilon_g = 23.3$
		123 <sub>10</sub>	$\epsilon_g = 6 + 0.005 Y$
		123 <sub>11</sub>	$\epsilon_g = 1 + 0.005 Y$
		123 <sub>12</sub>	$\epsilon_g = 75.0$
		123 <sub>13</sub>	$\epsilon_g = 70$
4	$K'_g = 0.861$	4 <sub>1</sub>	$\epsilon_g = 20$
5 a	$K'_g = 11. \epsilon_g^{-0.08}$	5 a <sub>1</sub>	$\epsilon_g = -7.6 + 0.006 Y$ (Y>2300)
		5 a <sub>2</sub>	$\epsilon_g = 32 - 0.177 D_c$
		5 a <sub>3</sub>	$\epsilon_g = -13 + 0.010 Y$ (Y>2300)
		5 a <sub>4</sub>	$\epsilon_g = 3.8 + 0.0053 Y$ (Y>1500)
		5 a <sub>5</sub>	$\epsilon_g = -8 + 0.007 Y$ (Y>2300)
		5 a <sub>6</sub>	$\epsilon_g = 1.4 + 0.0067$
		5 a <sub>7</sub>	$\epsilon_g = -2 + 0.007 Y$ (Y>2000)
		5 a <sub>8</sub>	$\epsilon_g = 24 + 0.0025 Y$
		5 a <sub>9</sub>	$\epsilon_g = 9.4 + 0.0067 Y$
		5 a <sub>10</sub>	$\epsilon_g = 18.8 + 0.0028 Y$
		5 a <sub>11</sub>	$\epsilon_g = 32.4 + 0.004 Y$
		5 a <sub>12</sub>	$\epsilon_g = 19.0 + 0.005 Y$
		5 a <sub>13</sub>	$\epsilon_g = 23.0 + 0.0143 Y$
		5 a <sub>14</sub>	$\epsilon_g = 4.0 + 0.010 Y$
5b	$K'_g = 130. \epsilon_g^{-1.4}$	5 b <sub>1</sub>	$\epsilon_g = 4 + 0.010$ (Y>1000)
		5 b <sub>2</sub>	$\epsilon_g = 41.0$
		5 b <sub>3</sub>	$\epsilon_g = 23.0 + 0.143 Y$
		5 b <sub>4</sub>	$\epsilon_g = 32.4 + 0.004 Y$
		5 b <sub>5</sub>	$\epsilon_g = 9.4 + 0.0067 Y$
6	$K'_g = 5.4 . \epsilon_g^{-0.8}$	6 <sub>1</sub>	$\epsilon_g = 30 - 0.50 D_c$
9	$K'_g = 22.5 . \epsilon_g^{-0.08}$	9 <sub>1</sub>	$\epsilon_g = 61.5$
		9 <sub>2</sub>	$\epsilon_g = -4.5 + 0.323 D_m$ (30≤D <sub>m</sub> ≤110)
		9 <sub>3</sub>	$\epsilon_g = 31 + 0.475(D_m - 110)$ (L <sub>m</sub> > 110)
10	$K'_g = 1.45$	10 <sub>1</sub>	$\epsilon_g = 12.5 + 0.95 D_m$

Y : Altitud en manm  
 D<sub>c</sub> : Distancia a la cordillera en km  
 D<sub>m</sub> : Distancia al mar en km

Figura 2. Parámetros por Región Pluviométrica. Fuente: IILA y SENAMHI

**TABLA 3.b**  
**Valores de los parámetros a y n que junto con K, definen las curvas de probabilidad**  
**Pluviométrica en cada punto de las subzonas**

SUBZONA	ESTACION	N° TOTAL DE ESTACIONES	VALOR DE n	VALOR DE a
I23 <sub>1</sub>	321-385	2	0.357	32.2
I23 <sub>3</sub>	384-787-805	3	0.405	$a = 37.85 - 0.0083 Y$
I23 <sub>13</sub>	244-193	2	0.432	
I23 <sub>5</sub>	850-903	2	0.353	9.2
I23 <sub>6</sub>	840-913-918 958	4	0.380	11
I23 <sub>8</sub>	654-674-679 709-713-714 732-745-752	9	0.232	14.0
I23 <sub>9</sub>	769	1	0.242	12.1
I23 <sub>10</sub>	446-557-594 653-672-696 708-711-712 715-717-724 757-773	14	0.254	$a = 3.01 + 0.0025 Y$
I23 <sub>11</sub>	508-667-719 750-771	5	0.286	$a = -.46 + 0.0023 Y$
5 a <sub>2</sub>	935-968	2	0.301	$a = 14.1 - 0.078 D_c$
5 a <sub>5</sub>	559	1	0.303	$a = -2.6 + 0.0031 Y$
5 a <sub>10</sub>	248	1	0.434	$a = 5.80 + 0.0009 Y$

**Figura 3.** Parámetros por Región Pluviométrica. Fuente: IILA y SENAMHI.

CHEREQUE MORAN, Wendor

“Hidrología Para Estudiantes de Ingeniería Civil”. En: Libro Publicado por la Pontificia Universidad Católica del Perú.

EL autor del libro en el capítulo 11 trata “Acerca de la Hidrología en el Perú”, el presente capítulo trata de modo específico los aspectos relevantes de la hidrología en el Perú.

El capítulo presenta la descripción del estudio de la hidrología en el Perú, dicha publicación consta de tres volúmenes y una carpeta, la carpeta contiene tres anexos como un juego de 10 planos. En los volúmenes se indican las metodologías adoptadas para elaborar los datos disponibles y las conclusiones deducidas; en los anexos se indican los pasos a seguir en la solución de problemas específicos que se presenta en la práctica.

También dicho capítulo presenta un título de nombre apéndice 1 inundaciones, huaycos y sequías, que fue un trabajo realizado por el ing. Rosendo Chávez Días, publicado en la revista el ingeniero civil, número 26 (setiembre – octubre 1983) y 29 (marzo – abril 1984), el trabajo fue publicado con ocasión de los desastres naturales ocurridos en ese entonces en el territorio peruano, Dicho apéndice consta de dos partes.

La primera parte consta de dos títulos; El título uno trata del clima de la costa peruana que consta de varios subtítulos como la cordillera de los andes y la corriente marina fría, la corriente del niño y su incidencia, periodicidad y frecuencia; El título dos trata de cuencas lluvias y escorrentías que consta de varios subtítulos como isoyeta 250 mm/año, cuenca semi árida, zonificación de la cuencas.

La segunda parte consta de tres títulos, el título uno trata de decisiones inmediatas, el segundo se refiere a persistencia indeclinable de acciones siguiendo una ruta clara y definida y el tercer título trata del planteamiento integral.

Teniendo como finalidad proporcionar a los ingenieros elementos necesarios para evaluar:

Los recursos hidrológicos disponibles en las diferentes zonas del país e identificar las posibilidades que existen para su mejor aprovechamiento.

Las máximas avenidas que puedan verificarse a lo largo de todos los cursos de agua que atraviesan las diferentes zonas del país e identificar las posibilidades para reducir los daños que ellas puedan provocar, por medio de adecuadas capacidades de embalses.

### **Antecedentes regionales**

“convenio de Cooperación Entre el Instituto Ítalo Latinoamericano (IILA), el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)”. Año 1983.

Donde se desarrollaron una familia de curvas de Intensidad–duración–frecuencia, para las distintas regiones del Perú, dentro de este trabajo está incluido la región de Huánuco.

## **MARCO TEORICO**

### **Hidrología**

Existen muchas definiciones de hidrología, sin embargo, la más completa es propuesta por la U.S. Federal Council for Science and Technology (1962).

“Hidrología es la ciencia natural que estudia el agua, su ocurrencia, su circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas, físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos”.

Asimismo, es importante mencionar la definición que plantea la Organización Meteorológica Mundial (OMM), por que destaca la importancia de la hidrología en relación con los recursos hidráulicos de la tierra y su aprovechamiento.

“Hidrología es la ciencia que trata de los procesos que rigen el agotamiento y recuperación de los recursos de agua en las áreas continentales de la tierra y en las diversas fases del ciclo hidrológico”.

### **El clima**

Corresponde al promedio de los eventos meteorológicos que ocurren a diario en una región. Este récord histórico ayuda a caracterizar el comportamiento meteorológico de un área geográfica a largo plazo. La palabra "clima" deriva de una voz griega que significa inclinación, aludiendo seguramente a la inclinación del eje terrestre. Como se sabe las estaciones tienen lugar debido al movimiento de traslación de la tierra alrededor del sol, con su eje de rotación inclinado con respecto al plano de traslación.

Son numerosas las definiciones que existen de clima, pero todas ellas aluden al estado medio de la atmósfera. Para la Organización Meteorológica Mundial, clima es el "Conjunto fluctuante de condiciones atmosféricas caracterizado por los estados y la evolución del tiempo, en el curso de un período suficientemente largo”.

### **Elementos del clima**

Los elementos que permiten distinguir un clima de otro son: la temperatura, la precipitación, la presión, el viento y la radiación solar. Los dos primeros son los principales.

### **Factores del clima**

Los factores que condicionan el clima son: la latitud, altitud, y continentalidad. La latitud determina la intensidad de radiación solar, la altitud determina la temperatura. La continentalidad se refiere a la mayor o menor proximidad de un lugar a los mares. Muchas veces juegan un papel importante en el condicionamiento del clima las corrientes marinas.

Otros factores de importancia eventual son la orientación, los vientos dominantes, la naturaleza del terreno y la vegetación.

## **Precipitación**

### ***Definición.***

Se conoce como precipitación a la cantidad de agua que cae a la superficie terrestre y proviene de la humedad atmosférica, ya sea en estado líquido (llovizna y lluvia) o en estado sólido (escarcha, nieve, granizo). La precipitación es uno de los procesos meteorológicos más importantes para la Hidrología, y junto a la evaporación constituyen la forma mediante la cual la atmósfera interactúa con el agua superficial en el ciclo hidrológico del agua.

### ***Proceso de formación de la precipitación.***

A medida en que el vapor de agua va ascendiendo, se va enfriando y el agua se condensa de un estado de vapor a un estado líquido, formando la niebla, las nubes o los cristales de hielo.

Pero, para que esta formación se lleve a cabo, generalmente se requiere la presencia de núcleos de condensación, alrededor de los cuales las moléculas del agua se pueden unir.

Existen diversas partículas que pueden actuar como núcleos de condensación, con tamaños que varían desde 0.1 (aerosoles) hasta 10 mm de diámetro; entre estas partículas tenemos: algunos productos de la combustión, como óxidos de nitrógeno y sulfuro, partículas de sal producto de la evaporación de la espuma marina y algunas partículas de polvo que flotan en el aire.

Las gotas o cristales de hielo crecen rápidamente debido a la nucleación, pero el crecimiento después es más lento. Mientras que las partículas que constituyen las nubes tienden a asentarse, los elementos promedio pesan tan poco que sólo un leve movimiento hacia arriba del aire es necesario para soportarlo.

Constantemente hay gotas de agua que caen de las nubes, pero su velocidad de caída es tan pequeña, que no llegan a la tierra porque muchas veces vuelven a evaporarse antes de alcanzarla y ascienden de nuevo en forma de vapor. Al aumentar el vapor, o si la velocidad de caída supera los 3 m/s, las gotas de agua incrementan su peso, provocando lluvia (Figura 2.2); cuando este peso se hace mayor, aumenta la velocidad de caída con lo que la lluvia se intensifica y puede transformarse en una tormenta.



**Figura 4.** Formación de la precipitación en las nubes. Fuente: V.T. Chow, 1994.

### ***Clasificación.***

*De acuerdo a sus características físicas.*

La precipitación puede adquirir diversas formas como producto de la condensación del vapor de agua atmosférico, formado en el aire libre o en la superficie de la tierra, y de las condiciones locales, siendo las más comunes las que se detallan a continuación:

### *Llovizna.*

En algunas regiones es más conocida como garúa, consiste en pequeñas gotas de agua líquida cuyo diámetro fluctúa entre 0.1 y 0.5 mm; debido a su pequeño tamaño tienen un asentamiento lento y en ocasiones parecen que flotar en el aire. La llovizna usualmente cae de estratos bajos y rara vez excede de 1 mm/h.



**Figura 5.** Llovizna. Fuente: CAHUANA, A. (2009). Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología. Trabajo para optar al diploma de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia.

### *Lluvia.*

Es la forma de precipitación más conocida. Consiste de gotas de agua líquida comúnmente mayores a los 5 mm de diámetro. En algunos países suelen clasificarla según su intensidad como ligera, moderada o fuerte como se muestra en la tabla 1 y en la figura 6.

Tabla 1.  
*Tabla de lluvias*

<b>Intensidad</b>	<b>(mm/h)</b>	<b>observaciones</b>
Ligera	< 2.5	Las gotas se pueden identificar fácilmente unas de otras. Cuando existe una superficie expuesta seca, ésta tarda más de dos minutos en mojarse completamente.
Moderada	2.5-7.5	No se pueden identificar gotas individuales, se forman charcos con gran rapidez. Las salpicaduras de la precipitación se observan hasta cierta altura del suelo.
Fuerte	> 7.5	La visibilidad es escasa y las gotas que salpican sobre la superficie se levantan varios centímetros.

Fuente: CAHUANA, A. (2009). Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología. Trabajo para optar al diploma de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia



**Figura 6.** Lluvia. Fuente: CAHUANA, A. (2009). Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología. Trabajo para optar al diploma de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia.

### *Escarcha.*

Es un depósito blanco opaco de gránulos de hielo más o menos separados por el aire atrapado y formada por una rápida congelación efectuada sobre gotas de agua sobre congeladas en objetos expuestos, por lo que generalmente muestran la dirección predominante del viento. Su gravedad específica puede ser tan baja como 0.2 ó 0.3. como se muestra en la figura 7.



**Figura 7.** Escarcha. Fuente: CAHUANA, A. (2009). Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología. Trabajo para optar al diploma de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia.

### *Nieve.*

Está compuesta de cristales de hielo, de forma hexagonal ramificada, y a menudo aglomerada en copos de nieve, los cuales pueden alcanzar varios centímetros de diámetro. Aparece cuando las masas de aire cargadas de vapor de agua se encuentran con otras cuya temperatura es inferior a 0°C. La densidad relativa de la nieve recién caída varía sustancialmente, pero en promedio se asume como 0.1. como se muestra en la figura 8.



**Figura 8.** Nieve. Fuente: CAHUANA, A. (2009). Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología. Trabajo para optar al diploma de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia.

### *Granizo.*

Es la precipitación en forma de bolas de hielo, producida por nubes convectivas. El granizo se forma a partir de partículas de hielo que, en sus desplazamientos por la nube, van "atrapando" gotas de agua. Las gotas se depositan alrededor de la partícula de hielo y se congelan formando capas. Los granizos pueden ser esferoidales, cónicos o irregulares en forma, y su tamaño varía desde 5 hasta 125 mm de diámetro. Como se muestra en la figura 9.



**Figura 9.** Granizo. Fuente: CAHUANA, A. (2009). Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología. Trabajo para optar al diploma de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia.

***De acuerdo al mecanismo de formación.***

La precipitación puede clasificarse debido al elevamiento de la masa de aire que la genera en tres tipos de precipitación:

***Precipitación Ciclónica.***

Resulta del levantamiento del aire que converge en un área de baja presión o ciclón. Cuando se encuentran dos masas de aire, una caliente y una fría, en lugar de mezclarse, aparece una superficie de discontinuidad definida entre ellas, llamada frente. El aire frío al ser más pesado, se extiende debajo del aire caliente por lo que el aire caliente se eleva y su vapor de agua se puede condensar y producir precipitación. Si el aire caliente avanza hacia el aire frío, el borde es un frente caliente, el cual tiene una pendiente baja entre  $1/100$  y  $1/300$ , y el aire caliente fluye hacia arriba lentamente y por encima del aire frío. Las áreas de lluvia asociadas con estos frentes pueden ser muy grandes y la precipitación es generalmente ligera a moderada y casi continua

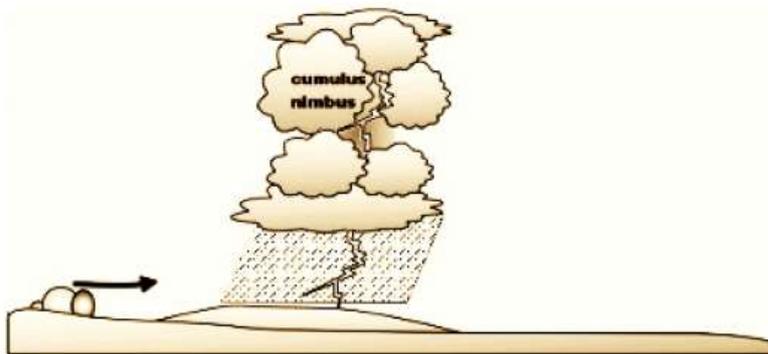
hasta el paso del frente. Si el aire frío avanza hacia el aire caliente, el borde de la masa de aire frío es un frente frío el cual tiene una pendiente casi vertical, con lo cual el aire caliente es forzado hacia arriba más rápidamente que en el frente caliente.



**Figura 10.** Precipitación frontal o ciclónica. Fuente: Villón, M. (2004). Hidrología.

#### *Precipitación Convectiva.*

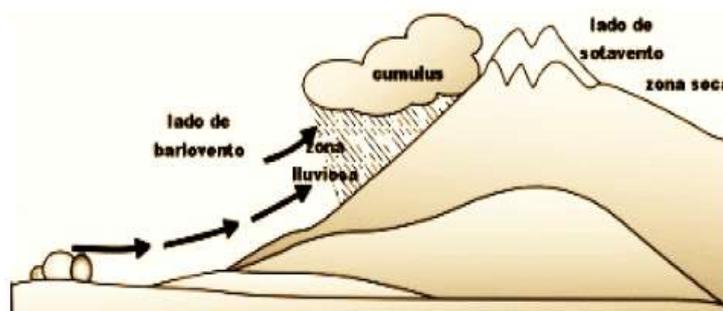
Se presenta cuando una masa de aire cálido tiende a elevarse, por ser menos pesado que el aire de la atmósfera circundante. La diferencia en temperatura puede ser resultado de un calentamiento diferencial en la superficie, enfriamiento diferencial en la parte superior de una capa de aire, o por la elevación mecánica cuando el aire se fuerza a pasar sobre una masa de un aire más denso (ciclones), o sobre una barrera montañosa. A medida que la masa se eleva, el aire se enfría pues cae su punto de precipitación. Esto genera la condensación de parte del vapor de agua dentro de la masa de aire, formando nubes. Estas nubes descargan lluvia con incremento en el calor latente a través del proceso de precipitación. Un claro ejemplo de este tipo de precipitación son las tormentas eléctricas al atardecer que se desarrollan en días calurosos de aire húmedo, precipitación desde el interior de encumbradas nubes en forma de yunque. La precipitación convectiva es puntual y su intensidad puede variar entre aquellas que corresponden a lloviznas y aguaceros.



**Figura 11.** Precipitación Convectiva. Fuente: Villón, M. (2004). Hidrología.

### *Precipitación Orográfica.*

Resulta del choque entre las corrientes oceánicas de aire que cruzan sobre la tierra y las barreras montañosas, generando la elevación mecánica del aire, el cual posteriormente se enfría bajo la temperatura de saturación y vierte humedad, este tipo de precipitación suele ser la que se presentan en la zona montañosa.



**Figura 12.** Precipitación Orográfica. Fuente: Villón, M. (2004). Hidrología.

### *Medición.*

La precipitación se mide en términos de la altura de lámina de agua (hp), y se expresa comúnmente en milímetros. Esta altura de lámina de agua, indica la altura del agua que se acumularía en una superficie horizontal, si la precipitación permaneciera en el punto caída.

En América Latina la precipitación es medida en milímetros y décimas, mientras que en los Estados Unidos la precipitación es medida en pulgadas y centésimas.

En el Perú, la precipitación es registrada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), mediante su red de estaciones meteorológicas distribuidas en todo el territorio peruano.

### ***Instrumentos de medición.***

Se han desarrollado gran variedad de instrumentos para obtener información de la precipitación. La información obtenida puede ser de diversa índole; se puede mencionar: la distribución del tamaño de las gotas de lluvia, el tiempo de inicio y de término de la precipitación, y la cantidad e intensidad de la precipitación, siendo esta última la que más interesa para la determinación de las tormentas de diseño. Existen básicamente dos tipos de medidores que registran la cantidad e intensidad de la lluvia, siendo ellos:

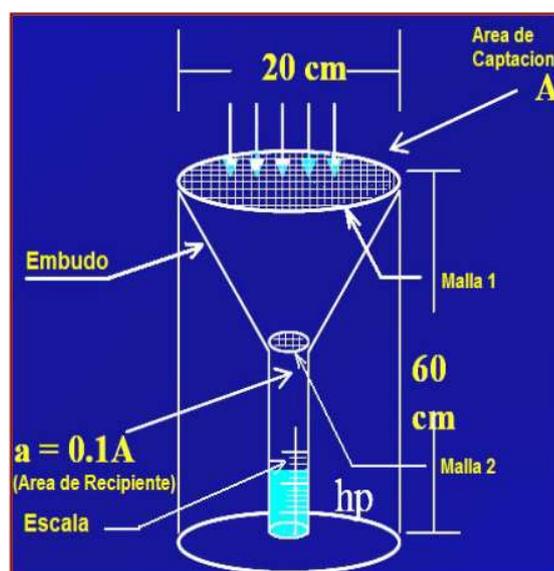
#### *Medidores sin registro o pluviómetros.*

Cualquier recipiente abierto de lados verticales, es apropiado para medir la lluvia, pero debido a la variación del viento y el efecto de salpicadura las medidas no son comparables a menos que los recipientes sean del mismo tamaño, forma y exposición similar. Por lo que hay patrones preestablecidos para los medidores estándar y para su instalación y operación.

El medidor estándar de la U.S. National Weather Service tiene un colector de 20.3 cm de diámetro. La lluvia pasa del colector hacia el interior de un tubo de medición cilíndrico dentro de un envase de demasías. El tubo de medición tiene un área de sección transversal igual a un décimo de la del colector, es decir que 0.1 mm de precipitación llenarán el tubo una altura de 1 mm. Con una vara de medición graduada, la lluvia puede ser medida con precisión de hasta 0,1

mm. Este tipo de medidores se emplea generalmente para la medición de la precipitación diaria, para ello un observador toma la lectura en la vara de medición a determinada hora todos los días.

Otro tipo de medidores sin registro son los medidores de almacenamiento, los cuales se emplean para medir la precipitación en todo un período de tiempo, por ejemplo, un mes o una estación, por lo que deben estar dotados de un mayor volumen de almacenamiento. Estos son ubicados en lugares remotos y de difícil acceso, en donde la toma de lecturas diarias es una labor muy complicada.



**Figura 13.** Pluviómetro Estándar (National Weather Service)

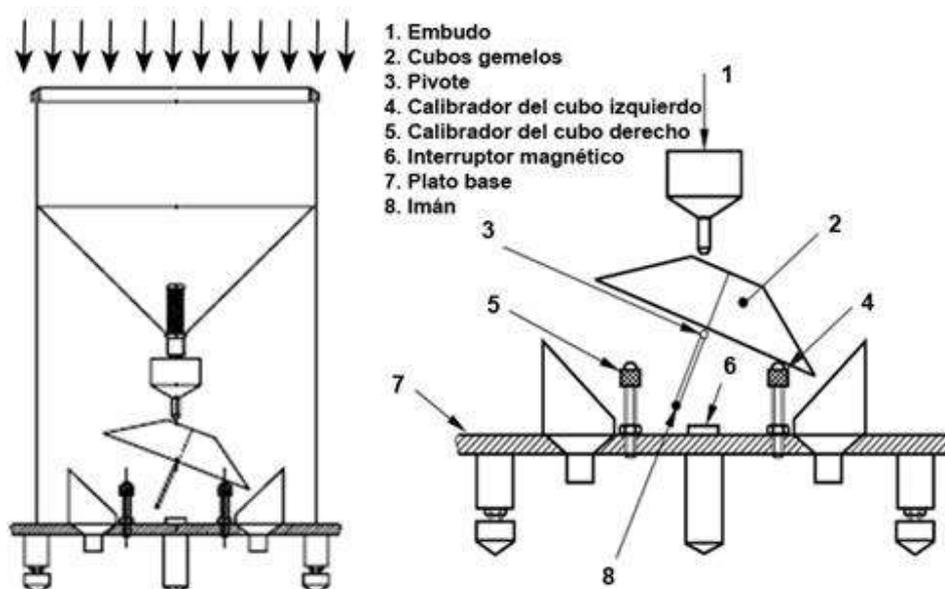
#### *Medidores con registro o pluviógrafos.*

Son instrumentos que registran la precipitación automáticamente y de manera continua en intervalos de tiempo de hasta una semana. Estos medidores son más costosos y más propensos a error, pero pueden ser la única forma posible para ciertos sitios remotos y de difícil acceso. Estos medidores tienen la gran ventaja que indican la intensidad de la precipitación, la cual es un factor de importancia en muchos problemas.

Tres tipos de medidores con registro son comúnmente empleados, el medidor de cubeta basculante, el de balanza y el medidor de flotador.

*Pluviógrafo de cubeta basculante.*

Este tipo de Pluviógrafo cuenta con un compartimiento bajo la boca del embudo, en el que hay dos cubetas, una de las cuales recibe el agua precipitada y al llenarse, se produce un desequilibrio que hace que la cubeta vuelque la cantidad de agua que contiene (equivalente a 0.1, 0.2 o 0.5 mm. de lluvia según los modelos), moviendo a la segunda cubeta al lugar de recolección del agua. En ese momento se acciona un circuito electrónico que marca o produce el registro correspondiente.



**Figura 14.** Pluviógrafo de Cubeta Basculante.

*Pluviógrafo de balanza.*

Pesa el agua o la nieve que cae en una cubeta situada sobre una plataforma con resorte o bascula. El aumento en peso se registra en una carta. El registro muestra valores acumulados de precipitación.



**Figura 15.** Pluviógrafo de Balanza.

*Pluviógrafo de flotador automático.*

El pluviógrafo de flotador automático, posee un compartimiento donde se aloja un flotador que sube verticalmente a medida que va acumulando lluvia. Este medidor está dotado de un sifón que cada cierto tiempo desaloja el agua almacenada. Estos pluviógrafos trabajan porque tienen un papel de tambor, que rota por el accionar de una máquina de reloj, sobre el cual un lapicero registra en uno y otro sentido el movimiento basculante, la variación del pesaje, o los cambios en el flotador.



**Figura 16.** Pluviógrafo de Flotador Automático

### ***Redes de medición.***

Cuando se desea instalar una red de estaciones para medir la precipitación, la pregunta que frecuentemente surge es la concerniente al número y tipo de medidores de lluvia que son necesarios para asegurar una evaluación más precisa de la precipitación caída. En respuesta a ello cabría señalar que, para determinar la densidad de la red de trabajo, hay que tener en cuenta lo siguiente:

El uso que se pretenda dar a los datos, ya que una red relativamente espaciada de estaciones podría ser suficiente para estudios de tormentas genéricas grandes o para la determinación de promedios anuales sobre grandes áreas planas, mientras que una red muy densa es requerida para determinar patrones de precipitación en las tormentas.

El tipo de precipitaciones de la zona, afecta la densidad de la red ya que, si las precipitaciones que se producen son de origen frontal, la red puede ser menos densa con respecto a las del tipo convectivo, que por lo general son más puntuales.

Los efectos orográficos, que generan mayores distorsiones en la precipitación que las que se pueden presentar en zonas planas, y por tanto necesitan de una red mucho más densa para su correcta evaluación.

La probabilidad de que el centro de una tormenta sea registrado por un medidor varía con la densidad de la red de estaciones. Una red de trabajo deberá ser planeada para producir una imagen representativa de la distribución de la precipitación sobre el área. Por otro lado, existen consideraciones importantes relacionadas con el costo de la instalación y el mantenimiento de la red y la accesibilidad para el observador del sitio donde se encuentre ubicado el medidor.

Las siguientes densidades mínimas de las redes para medir precipitaciones han sido recomendadas por la Organización Meteorológica Mundial para propósitos hidrometeorológicos generales:

Para regiones planas en zonas templadas, mediterráneas y tropicales, 600 a 900 Km<sup>2</sup> por estación.

Para regiones montañosas en zonas templadas, mediterráneas y tropicales, 100 a 250 Km<sup>2</sup> por estación.

Para pequeñas islas montañosas con precipitación irregular, 25 Km<sup>2</sup> por estación.

Para zonas áridas y polares, 1 500 a 10 000 Km<sup>2</sup> por estación.

#### ***Precisión en su estimación.***

La información sobre la diferencia entre la precipitación captada y la realmente caída es de interés climatológico, y la exactitud en su medición y evaluación es determinante para el análisis de las tormentas que se presentan en una zona específica.

La medición de la precipitación se ve afectada por dos tipos de errores, cuya evaluación es de mucha importancia para la obtención de valores representativos de la zona de estudio. Dichos errores se pueden subdividir en dos grupos, a saber:

#### ***Error en la medida puntual.***

El efecto de los vientos modifica la trayectoria de caída de las gotas de lluvia, haciendo que los valores registrados en los instrumentos de medición sean relativamente menores, por esto la precipitación medida puntualmente con pluviómetros es menor que la que realmente cae.

Para la estimación del error en la medición de la precipitación puntual se debe tener en cuenta que:

No en todos los sitios se toman valores cien por ciento representativos.

No se deben tomar mediciones si tenemos dudas con respecto a la precisión.

El conjunto de la precipitación es extremadamente grande en comparación con la muestra obtenida en el instrumento

El error en la medida puntual vendría a ser la suma de:

Errores debido a la combinación de factores meteorológicos e instrumentales como: evaporación o condensación en el pluviómetro durante el periodo comprendido entre el fin de la lluvia y su medida.

***Error netamente instrumental.***

Errores cometidos en la lectura del instrumento o corrección por accidentes imprevistos.

***Error en la evaluación espacial.***

Los errores de muestreo, en términos de la altura, se incrementan con el aumento del área media de precipitación y decrecen con el aumento en la densidad de la red, la duración de la precipitación y el tamaño del área. Por tanto, una red cualquiera tendería a producir menores errores promedio para precipitaciones mensuales que para tormentas.

Por otro lado, como las lluvias de verano tienen una gran variación espacial, los errores promedio tienden a ser mayores que para las de invierno.

La base para la evaluación de la precipitación caída en una zona son las medidas puntuales registradas en los distintos instrumentos que conforman la red de trabajo.

**DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL**

La precipitación no es uniforme pues varía en el espacio y el tiempo de acuerdo con el patrón general de circulación atmosférica y con factores locales propios de cada región. En términos generales, se puede decir que las mayores precipitaciones ocurren cerca del Ecuador y tienden a disminuir cuando aumenta la latitud.

Unos de estos factores locales pueden ser las barreras orográficas que a menudo ejercen más influencia en el clima de una región que lo que la cercanía a una fuente de humedad hace. Estos factores climáticos y geográficos determinan la cantidad de humedad atmosférica sobre una región, la frecuencia y clase de tormentas producidas sobre ella y así su precipitación.

Un caso especial para analizar es el fenómeno de El Niño, que afecta vastas áreas continentales de Asia, Oceanía, Europa y América, y particularmente el Perú, y la costa ecuatoriana. Dicha anomalía es producto de causas esencialmente meteorológicas como lo es el debilitamiento del Anticiclón del Pacífico Sur, lo que conlleva a que las aguas cálidas del norte fluyan hacia el sur en el área normalmente ocupada por el agua fría, y el desplazamiento hacia el sur de la Zona de Convergencia Intertropical, formada por los vientos alisios del sudeste y los que soplan del noreste; si a todo ello le sumamos la actividad convectiva tendremos las condiciones apropiadas para que se presenten lluvias torrenciales en todas las zonas directamente involucradas.

En el Perú las intensidades de la precipitación tienden a ser mayores en la sierra, en la selva y Amazonía, y van decreciendo al llegar a la costa en condiciones normales, sin El Niño.

En cuanto a la variación con respecto al tiempo podemos mencionar que, aunque en ocasiones algunos de los registros pluviométricos lleven a pensar que existe un aumento o disminución en la tendencia de los patrones de la precipitación, lo cierto es que ella tiende a volver a la media, ya que periodos extraordinariamente húmedos tienden a balancearse con periodos de sequía. Por otro lado, a lo largo del año suelen existir periodos estacionales en los cuales la precipitación es mayor; para el caso de Huánuco se puede observar que la precipitación tiende a presentarse en los meses de verano.

La variación de la precipitación dentro de una tormenta, es grande y depende de varios factores como son: la magnitud, la duración y el tipo de tormenta, por lo que no se puede aplicar un solo patrón para todos los casos.

### **ANÁLISIS DE TORMENTA**

Se entiende por tormenta al conjunto de lluvias que obedecen a una misma perturbación meteorológica y de características bien definidas. De acuerdo a esta definición una tormenta puede durar desde unos pocos minutos hasta varias horas y aún días; pueden abarcar extensiones de terrenos muy variables, desde pequeñas zonas hasta vastas regiones.

El análisis de las tormentas está íntimamente relacionado con los cálculos o estudios previos al diseño de obras de ingeniería. En efecto, las dimensiones de estas obras dependen principalmente de la intensidad que tenga la tormenta y de la frecuencia con que ellas se presenten en el lugar para el que se está diseñando la obra. Quiere decir entonces, que debemos conocer su intensidad por unidad de tiempo y el tiempo de duración que determina las dimensiones de la obra, y la frecuencia con que se presenta determinada tormenta, bien definida en sus características de intensidad y duración, que a su vez determina el coeficiente de seguridad que se da a la obra o la vida útil.

### **ELEMENTOS FUNDAMENTALES**

#### ***Intensidad.***

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

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

**Ecuación 3.** Intensidad

Donde:

P: es la lámina de precipitación en mm

D: es la duración de la lluvia, dada usualmente en horas.

***Duración.***

Es el tiempo que transcurre entre el comienzo y el fin de la tormenta, tomado en minutos u horas, dentro del total que dura la tormenta. Tiene mucha importancia en la determinación de las intensidades máximas.

***Frecuencia o Periodo de Retorno.***

La frecuencia se expresa en función del periodo de retorno (T), que es el intervalo de tiempo promedio (expresado en años) entre eventos de precipitación que igualan o exceden la magnitud de diseño (Chow et al, 1994).

En el diseño de las curvas IDF se debe considerar la frecuencia, la cual se expresa en función del período de retorno T, que se denomina al tiempo que transcurre entre dos sucesos iguales. (Pizarro, R.; Novoa, P. 1986).

Por otra parte, para Aparicio (1992), expresa que, el número de años en que se presenta un evento puntual, se llama período de retorno, intervalo de ocurrencia o frecuencia, y suele ser denotado mediante la ecuación:

$$T = \frac{1}{p}$$

**Ecuación 4.** Periodo de Retorno.

Donde:

T: periodo de retorno.

p: es la probabilidad que ocurra un evento cualquiera

***Probabilidad de excedencia y no excedencia.***

Pizarro et al (1986), afirma: que la probabilidad de excedencia, es la probabilidad asociada al período de retorno. En otras palabras, de que un evento sea igualado o superado en uno o más años.

Por otro lado, según Viessman y Lewis (2003), la probabilidad de excedencia se define como la probabilidad de que un cierto valor a asumir por la variable aleatoria sea superado. Se define por:

$$p = \frac{1}{T}$$

**Ecuación 5.** Probabilidad de excedencia

Donde:

p: es la probabilidad de excedencia

T: es el periodo de retorno.

La probabilidad de excedencia sirve para estimar riesgos en obras civiles en general, y poder tener una aplicación a largo plazo en el sector productivo. Además, dentro de las aplicaciones de la estadística, usadas comúnmente en la hidrología, está la determinación de la probabilidad o del período de recurrencia de determinado suceso.

Por consiguiente, la probabilidad de que un evento no ocurra en un año cualquiera se denomina probabilidad de no excedencia y se define como lo expresa la ecuación:

$$\bar{P} = 1 - \frac{1}{T}$$

**Ecuación 6.** Probabilidad de no excedencia

Donde:

$\bar{P}$ : probabilidad de no excedencia

T: periodo de retorno

## **CURVAS DE INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA.**

### ***Definición.***

Con respecto a las curvas intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), es importante señalar que estas son curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o periodo de retorno (Témez, 1978).

Según, Benítez (2002) las curvas IDF son la representación gráfica de la relación existente entre la intensidad, la duración y el periodo de retorno de la precipitación.

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

Por tanto, la intensidad se determinará de la siguiente manera:

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

**Ecuación 7.** Intensidad

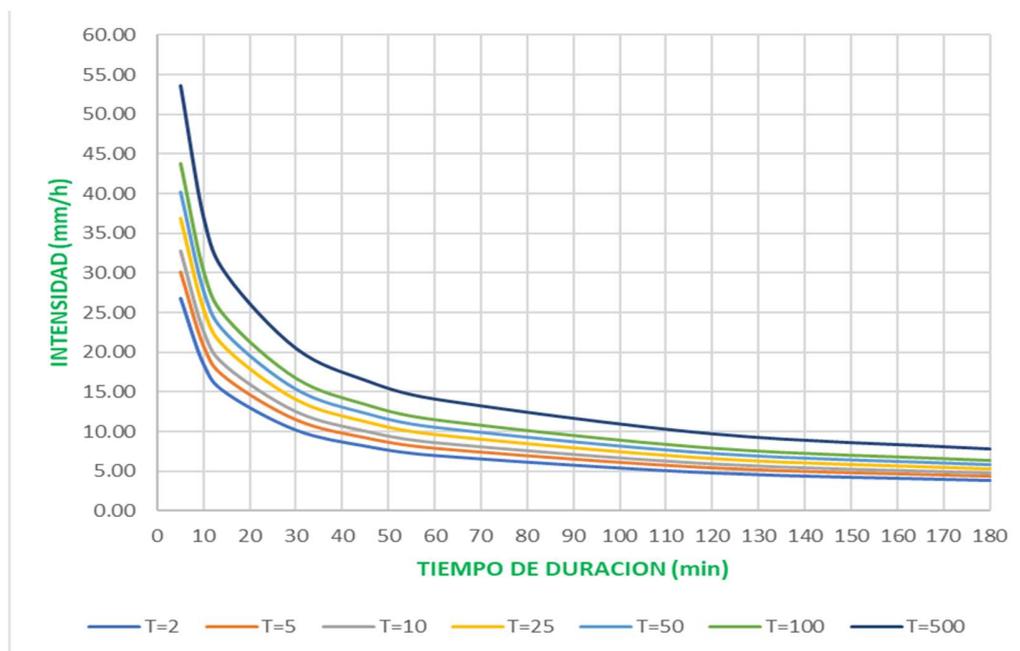
Donde:

I: intensidad máxima en mm/hora

P: precipitación o lámina de agua en mm.

T: tiempo en horas.

Las curvas para diferentes periodos de retomo determinan el gráfico Intensidad - Duración - Frecuencia, en la Figura 17, se muestra un ejemplo de un gráfico I-D-F.



**Figura 17.** Curvas Intensidad - Duración - Frecuencia (I-D-F)

## ESTADÍSTICA APLICADA A LA HIDROLOGÍA.

Debido a la cantidad de datos y la extensa información que en hidrología se requiere procesar, organizar y analizar de manera apropiada, es necesario auxiliarse de conceptos de probabilidad y estadística, ya que la información hidrometeorológica es de carácter aleatorio es decir regida por leyes del azar o de la probabilidad.

En este sentido es posible describir la variación de un grupo de datos u observaciones mediante la utilización de modelos matemáticos, en este caso las precipitaciones más intensas.

### *Distribuciones de probabilidad.*

Para Escalante y Reyes (2002). En estadística una distribución de probabilidad indica toda la gama de valores que pueden presentarse como resultado de un experimento, y describe que tan probable es un evento futuro. No es más que una función continua que representa la frecuencia de éxito por medio de una variable que toma los valores posibles de los eventos.

En estadística existen muchas funciones de distribución de probabilidad teóricas, las funciones de distribución de probabilidad teóricas más usadas en hidrología son las siguientes:

Distribución Normal

Distribución Log Normal

Distribución Gama de 2 y 3 parámetros

Distribución Gumbel

En lo referente a los estudios de avenidas y precipitaciones máximas e intensidades, la Organización Meteorológica Mundial OMM en 1981 llegó a la conclusión que las distribuciones de probabilidad más recomendadas son la Distribución Log Normal y la Distribución Gumbel.

*Distribución Normal.*

También denominada distribución gaussiana. Se dice que una variable aleatoria  $X$  tiene una distribución normal, cuando su función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{X}}{S}\right)^2\right]}$$

**Ecuación 8.** Distribución normal. Función de densidad de probabilidad

Donde:

$f(x)$ : función de densidad normal de la variable  $x$

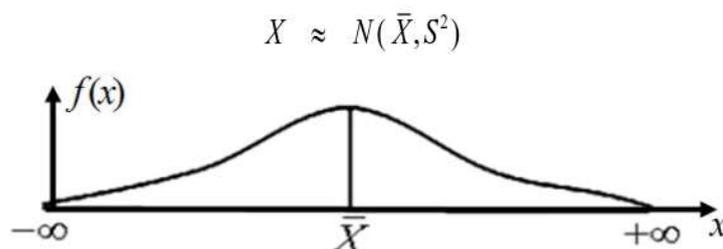
$x$ : variable independiente

$\bar{X}$ : parámetro de localización, igual a la media aritmética de  $x$

$S$ : parámetro de escala igual a la desviación estándar de  $x$

$e$ : base del logaritmo neperiano

Cuando la variable aleatoria se distribuye normalmente con media  $\bar{X}$  y varianza  $S^2$ , se denota de la siguiente forma:



**Figura 18.** Función de densidad de la distribución normal

Para su aplicación lo más fácil es la utilización de una tabla que relacione  $Z$  versus  $f(Z)$ , para lo cual se ha definido la variable estandarizada como:

$$Z = \frac{x - \bar{X}}{S}$$

**Ecuación 9.** Distribución normal. Variable estandarizada.

Donde la función de densidad de  $Z$ , es denominada función de densidad de la distribución normal estándar o estandarizada, que tiene la siguiente expresión:

$$f(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi S}} e^{\left[-\frac{Z^2}{2}\right]}$$

**Ecuación 10.** Distribución normal. Función de densidad.

Una característica importante de la distribución normal estándar es que tiene la media cero y la varianza igual a uno.

La función de distribución acumulada de la distribución normal es:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi S}} \int_{-\infty}^x e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{X}}{S}\right)^2\right]} dx$$

**Ecuación 11.** Distribución normal. Función de distribución acumulada.

O su equivalente

$$F(x) = F(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi S}} \int_{-\infty}^Z e^{\left[-\frac{Z^2}{2}\right]} dz$$

**Ecuación 12.** Distribución normal. Función de distribución acumulada.

Para el cálculo de la función de distribución acumulada se recurre a la tabla de la ley normal que está en función de la variable estandarizada  $Z$ , ver Tabla 31 del Anexo I.

*Distribución Log-Normal.*

Las variables de interés en hidrología son generalmente positivas, por lo que es usual que presenten distribuciones de frecuencia asimétricas, por lo que se propone aplicar una transformación logarítmica a la variable de interés y luego utilizar el modelo de distribución normal para la variable transformada, la distribución así obtenida se denomina log-normal, por ejemplo, si la variable aleatoria  $X$ , tiene una distribución log-normal, esto significa que  $Y=\ln X$ , tiene una distribución normal.

Se dice que una variable aleatoria  $X$  tiene una distribución log-normal, cuando su función de densidad de probabilidad se define como:

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right]}$$

**Ecuación 13.** Distribución log normal. Función de densidad de probabilidad.

Para  $0 < x < \infty$

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right]}$$

**Ecuación 14.** Distribución log normal. Función de densidad de probabilidad.

Para  $-\infty < y < \infty$

Donde:

$f(x)$ : función de densidad log-normal de la variable  $x$

$x$ : variable independiente

$\mu_y$ : media aritmética de los logaritmos naturales de  $x$

$\sigma_y$ : desviación estándar de los logaritmos naturales de  $x$

$y$ :  $\ln x$

$e$ : base del logaritmo neperiano

La función de distribución acumulada de la distribución log-normal se muestra a continuación.

$$F(x) = \int_0^x f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma_y} \int_0^x e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right]} dx$$

**Ecuación 15.** Distribución log normal. Función de distribución acumulada.

O su equivalente

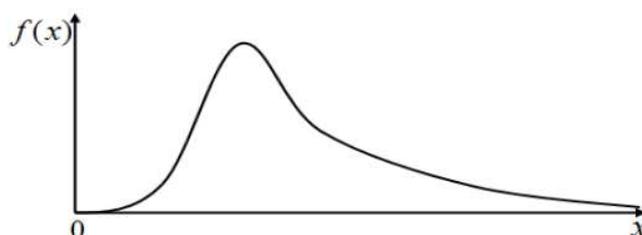
$$F(y) = \int_{-\infty}^y f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \int_{-\infty}^y e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right]} dy$$

**Ecuación 16.** Distribución log normal. Función de distribución acumulada.

Si:  $Z = \frac{y - \mu_y}{\sigma_y} = \frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}$  se obtiene distribución normal estándar.

$$F(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Z e^{\left[-\frac{Z^2}{2}\right]} dZ$$

**Ecuación 17.** Distribución log normal. Función de densidad.



**Figura 19.** Función de densidad de la distribución Log Normal.

Una vez realizada la transformación con la variable estandarizada  $Z$ , utilizar las tablas de la ley normal para el cálculo de la probabilidad o la función acumulada. Tabla 31 del Anexo I.

*Distribución Gama de 3 Parámetros o Pearson Tipo III.*

Este es una de las distribuciones más utilizadas en hidrología, se dice que una variable aleatoria  $X$ , tiene una distribución Gama o Pearson tipo III, si su función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{(x - x_0)^{\gamma-1} e^{-\frac{x-x_0}{\beta}}}{\beta^{\gamma} \Gamma(\gamma)}$$

Ecuación 18. Distribución gamma. Función de densidad

Para:  $x_0 = x = \infty$ ;  $-\infty \leq x_0 \leq \infty$ ;  $0 \leq \beta \leq \infty$ ;  $0 \leq \gamma \leq \infty$

La función de distribución acumulada de la distribución pearson tipo III es:

$$F(x) = \int_{x_0}^x \frac{(x - x_0)^{\gamma-1} e^{-\frac{(x-x_0)}{\beta}}}{\beta^{\gamma} \Gamma(\gamma)}$$

**Ecuación 19.** Distribución gamma. Función acumulada

Donde:

$f(x)$ : función de densidad de la variable  $x$

$F(x)$ : función de distribución acumulada

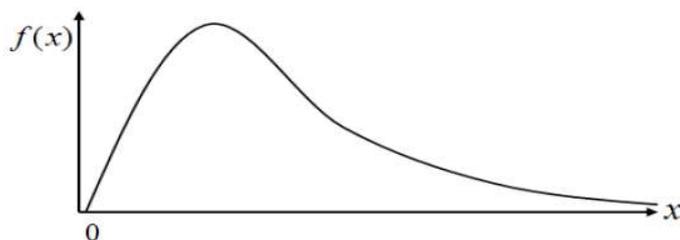
$x$ : variable aleatoria

$x_0$ : origen de la variable  $x$ , parámetro de posición

$\beta$ : parámetro de escala

$\gamma$ : parámetro de forma

$\Gamma_{\gamma}$ : función gama completa



**Figura 20.** Función de densidad de la distribución Gamma.

Para la aplicación de esta distribución, es recomendable utilizar el factor de frecuencia, donde se muestra que la mayoría de las funciones de frecuencias pueden ser generadas por:

$$X = \bar{X} + K * \sigma_x$$

**Ecuación 20.** Distribución gamma. Factor de frecuencia

Donde:

X: variable analizada, con una probabilidad dada.

$\bar{X}$ : Media de la serie de datos

$\sigma_x$ : Desviación Estándar de la serie de datos

K: Factor de frecuencia definido para cada distribución

Para la distribución Pearson tipo III, se deberá calcular la media, la desviación estándar y el coeficiente de asimetría.

Media:

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{N}$$

**Ecuación 21.** Distribución gamma. Media.

Desviación Estándar:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{(x_i - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

**Ecuación 22.** Distribución gamma. Desviación estándar.

Coefficiente de Asimetría:

$$C_x = g = \frac{N \sum (x_i - \bar{X})^3}{(N - 1)(N - 2)\sigma_x^3}$$

**Ecuación 23.** Distribución gamma. Coeficiente de asimetría.

Para determinar el factor de frecuencia, es necesaria la utilización de Tabla 32 y 33 del Anexo I, para lo cual es necesario calcular el coeficiente de asimetría y la probabilidad o período de retorno respectivo para la variable analizada.

*Distribución Gumbel o de valores extremos tipo I.*

La distribución Gumbel es también llamada distribución de Valores Extremos Tipo I o distribución doble exponencial. Se dice que una variable aleatoria X tiene una distribución Gumbel, cuando su función de densidad de probabilidad se define como:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{x-\mu}{\alpha}} - e^{-\frac{x-\mu}{\alpha}}$$

**Ecuación 24.** Distribución Gumbel. Función de densidad de probabilidad.

Donde:

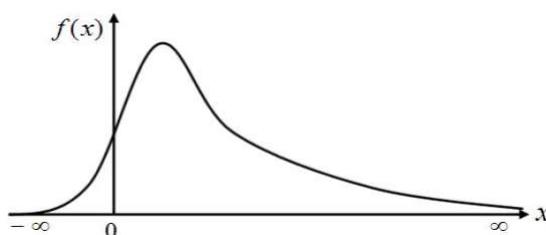
f(x): función de densidad de Gumbel de la variable x

x: variable independiente

$\alpha$ : es el parámetro de escala

$\mu$ : es el parámetro de posición, también llamado moda.

e: base del logaritmo neperiano



**Figura 21.** Función de densidad de la distribución Gumbel

La función de distribución acumulada de la distribución Gumbel es:

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\alpha}}}$$

**Ecuación 25.** Distribución Gumbel. Función de distribución acumulada

Donde:

F(x): es la función de distribución acumulada de la ley Gumbel.

Una forma de calcular  $\alpha$  y  $\mu$  es con las ecuaciones 26 y 27 respectivamente, y están en función de los parámetros de la media ( $\bar{X}$ ) y la desviación estándar (S) de la muestra.

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S = 0.78S$$

**Ecuación 26.** Distribución Gumbel. Parámetro de escala.

$$\mu = \bar{X} - 0.57721\alpha$$

**Ecuación 27.** Distribución Gumbel. Parámetro de posición.

Donde:

0.57721 es la constante de Euler.

### **Pruebas de bondad de ajuste**

Las pruebas de bondad de ajuste, consisten en comprobar gráfica y estadísticamente, si la frecuencia empírica de la serie analizada, se ajusta a una determinada función de probabilidad teórica seleccionada a priori, con los parámetros estimados con base en los valores muestrales.

Las pruebas estadísticas, tienen por objeto calificar el hecho de suponer que una variable aleatoria, se distribuya según una cierta función de probabilidades.

A continuación, se detallará la prueba de bondad de ajuste estadístico más utilizada en hidrología, la prueba de Smirnov – Kolmogorov y Coeficiente de determinación R2.

**Prueba de Smirnov-Kolmogorov.**

La prueba de ajuste de Smirnov-Kolmogorov, consiste en comparar las diferencias existentes entre la probabilidad empírica de los datos de la muestra y la probabilidad teórica, tomando el valor máximo del valor absoluto, de la diferencia entre el valor observado y el valor de la recta teórica del modelo, es decir:

$$D = \max|F(x) - P(x)|$$

**Ecuación 28.** Prueba de Smirnov-Kolmogorov.

Donde:

D: Estadístico de Smirnov-Kolmogorov, cuyo valor es igual a la diferencia máxima existente entre la probabilidad ajustada y la probabilidad empírica.

F(x): Probabilidad de la distribución teórica

P(x): Probabilidad experimental o empírica de los datos

Si  $D_0$  es un valor crítico para un nivel de significación  $\alpha$ , se tiene que:

$$P[\max|F(x) - P(x)| \leq 0] = \alpha \quad \text{ó} \quad P D \geq D_0 = \alpha$$

$$P D < D_0 = 1 - \alpha$$

El procedimiento para efectuar el ajuste, por el estadístico de Smirnov-Kolmogorov, es el siguiente:

Calcular la probabilidad empírica o experimental P(x) de los datos, para esto se puede utilizar la fórmula de Weibull, que se indica a continuación:

$$P_x = \frac{m}{N - 1}$$

**Ecuación 29.** Probabilidad empírica. Fuente: Weibull

Donde:

$P_x$ : Probabilidad empírica o experimental.

m: Número de orden.

N: Número de datos.

calcular la probabilidad teórica, utilizando la ecuación de la función F(x) acumulada de los modelos teóricos o tablas elaboradas para tal fin.

Calcular las diferencias  $F(x) - P(x)$ .

Seleccionar la máxima diferencia:  $D = \max|F(x) - P(x)|$

Calcular el valor crítico del estadístico D, es decir  $D_0$ , para un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$  y N igual al número de datos, los valores de  $D_0$  se muestran en la tabla 5.

Comparar el valor del estadístico D, con el valor crítico  $D_0$  de la Tabla 5, con los siguientes criterios de decisión:

Si:  $D < D_0$ : El ajuste es bueno, al nivel de significación seleccionado

$D \geq D_0$  El ajuste no es bueno, al nivel de significación seleccionado, siendo necesario probar con otra distribución.

Esta prueba de ajuste no requiere del conocimiento a priori de la función de distribución teórica, es aplicable a distribuciones de datos no agrupados y de cualquier distribución teórica.

### ***Coefficiente de determinación R<sup>2</sup>.***

Este coeficiente representa el porcentaje de variación de los datos reales expuesto por el modelo seleccionado, se encuentra definido por la siguiente expresión (Aguilera Navarro & Pizarro Tapia, 2007).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(F(x) - P(x))^2}{\sum(F(x) - \text{media}(F(x)))^2}$$

**Ecuación 30.** Coeficiente de determinación R<sup>2</sup>

Donde:

$R^2$ : Coeficiente de determinación

F(x): Probabilidad de la distribución teórica

$P(x)$ : Probabilidad experimental o empírica de los datos

Media( $F(x)$ ): Promedio de la probabilidad de la distribución teórica

### **Aplicación de las curvas IDF.**

Las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia, son una de las herramientas más útiles para el diseño hidrológico de caudales máximos, cuando se utilizan modelos lluvia-escorrentía como los hidrogramas unitarios o el método racional (Nanía, 2003). Es así como un gran número de proyectos hidrológicos, como el diseño de muros de protección, construcción de puentes, construcción de redes de drenaje, entre otros, se define en relación con la máxima precipitación que se podría esperar para un determinado período de retorno. A partir de estos eventos extremos, se fijan las dimensiones del proyecto y se establecen los criterios de predicción y de riesgo (Llamas, 1993; Asociación Catalana de Ingeniería Sin Fronteras, 2002)

Por otra parte, las curvas IDF son de gran ayuda en la construcción de obras de control de erosión y recuperación de suelos degradados. En obras como zanjas de infiltración, canales de desviación, diques de postes, gaviones y otras destinadas al control de cárcavas y procesos erosivos en laderas, se hace necesario conocer los máximos valores de intensidades de precipitación que se pueden alcanzar, con el fin de dimensionar dichas obras (Pizarro et al, 2005).

### **Ecuaciones para las curvas IDF.**

El planteamiento de las primeras ecuaciones matemáticas, que modelan a dichas curvas, data desde el inicio de los años treinta del siglo pasado, y fueron realizadas por Sherman en 1931 y Bernard en 1932 (Pereyra et al, 2004). Para Remenieras (1971), estos modelos han conducido a numerosos investigadores del mundo a generar diversas expresiones matemáticas que simulan las curvas IDF, las que se presentan a continuación:

$$I = \frac{K * T^m}{(D+b)^n}, \text{ Modelo Propuesto por Sherman, (1931)}$$

$$I = \frac{K * T^m}{D^n}, \text{ Modelo propuesto por Bernard, (1932)}$$

$$I = \frac{a}{D+b}, \text{ Modelo propuesto por Linsley et al, (1949), para duraciones entre 5 y 20 minutos.}$$

$$I = \frac{c}{D^n}, \text{ Modelo propuesto por Linsley et al, (1949), para duraciones superiores a 60 minutos.}$$

$$I = \frac{c}{D^{n+b}}, \text{ Modelo propuesto por Wenzel, (1982).}$$

$$I = i_1^T * \frac{a}{(D+b)^c}, \text{ Modelo propuesto por Chen (1983).}$$

$$I = \frac{K * T^m}{D^{n+b}}, \text{ Modelo Propuesto por Chow et al, (1994)}$$

Donde a, b, c, K, m, n y b son parámetros adimensionales,  $i_1^T$  es la intensidad media de la lluvia de una hora y período de retorno de T años, T es periodo de retorno, D es la duración e I la intensidad máxima de precipitación.

Aparicio (1997) plantea 2 métodos; el primero, llamado de intensidad – período de retorno, relaciona estas dos variables, y para cada duración por separado, mediante alguna de las funciones de distribución de probabilidad usadas en hidrología. El otro método relaciona simultáneamente la intensidad, la duración y el período de retorno en una familia de curvas, cuya ecuación es;

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

**Ecuación 31.** Intensidad, duración y periodo de retorno. Aparicio 1997

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

Por propia recomendación del autor y para facilidad de cálculo se modifica el modelo propuesto, eliminándose la constante c, que corresponde a un parámetro asociado a la duración y que para este caso tomó un valor cero, quedando expresado el modelo de la siguiente forma:

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

**Ecuación 32.** Intensidad, duración y periodo de retorno modificado. Aparicio 1997.

Donde:

I: Intensidad

D: Duración de Lluvia

T: Periodo de Retorno

K, m, n: Parámetros de ajuste, que se calcula mediante un análisis de regresiones.

La ecuación 32, será tomada para los cálculos de las curvas IDF en este estudio de tesis.

## CAPITULO III: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

### TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACION

#### **Tipo de investigación**

El presente estudio tiene como objetivo estimar las curvas IDF y conceptualizarlos en mapas de intensidades máximas de precipitación para la Región de Huánuco, por lo que se tipifica la investigación como Descriptiva, Analítica y Cuantitativa.

Descriptiva por que comprende la descripción, registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual y la composición o procesos de los fenómenos.

Analítica por que se analiza y contrasta la variable de precipitación máxima en 24 horas obtenidas de estaciones pluviométricas, para poder generar las curvas IDF y mapas de intensidades máximas de precipitación.

Cuantitativo por que se desarrolla y emplean modelos estadísticos y matemáticos para poder hallar las ecuaciones de las curvas IDF.

#### **Nivel de investigación**

El diseño de la investigación se basa en el análisis de las variables de precipitaciones máximas para las estaciones de la región de Huánuco, para un periodo de 15 años consecutivos.

Esta investigación es de nivel, no experimental, transeccional. No experimental porque no se pueden manipular variables, los registros pluviométricos a reunir se obtuvieron del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y transeccional ya que la recolección de registros se realizó en un solo tiempo.

Para Hernández et al (2010), en un estudio no experimental no se construye ninguna situación, sino que se observan situaciones ya existentes, no provocadas intencionalmente.

Los diseños de transeccionales descriptivos tienen como objetivo indagar la incidencia y los valores en los que se manifiesta una o más variables dentro del enfoque cuantitativo. El procedimiento consiste en medir o ubicar un grupo de personas, objetos, situaciones, contextos, fenómenos en una variable o concepto y proporcionar su descripción (Hernández et al, 2010).

## **METODO DE LA INVESTIGACIÓN**

El presente tema de Tesis, se desarrollará por el método estadístico ya que se tabulará los datos de precipitación máxima en 24 horas generadas por las estaciones pluviométricas obtenidas del SENAMHI, a fin de estimar las ecuaciones de las curvas IDF que se presenta a continuación.

$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$$

**Ecuación 33.** Intensidad, duración y frecuencia.

Donde:

I: intensidad (mm/hr)

T: Periodo de Retorno (Años)

T: duración de la Lluvia (Minutos)

K,m,n: parámetros de Ajuste.

## **FASES METODOLOGICAS.**

El proceso para la elaboración de las curvas intensidad duración frecuencia y su conceptualización en mapas de intensidades máximas para diferentes periodos de retornos y tiempos de duración, se desarrollará de la siguiente manera:

1) Selección de Estaciones Meteorológicas y Adquisición de datos de precipitación máxima en 24 horas por 15 años de las estaciones meteorológicas de la Región de Huánuco. Todos estos datos serán adquiridos del SENAMHI.

2) Revisión de los datos adquiridos del SENAMHI.

3) Estimación de los datos faltantes de precipitación de cada estación meteorológica.

Método Racional deductivo.

4) Análisis de Homogeneidad y/o Consistencia de datos de precipitación de cada estación meteorológica.

Test de Mann Kendall

Prueba de las secuencias

5) Ajuste de los datos de precipitación a una función de distribución de probabilidad de cada estación meteorológica.

Distribución Normal

Distribución Log Normal

Distribución Gamma

Distribución Gumbel

6) Pruebas de bondad de ajuste

Test de smirnov – kolgomorov

Coefficiente de determinación R<sup>2</sup>

7) Determinación de las curvas IDF para diferentes periodos de retorno y tiempos de duración de cada estación meteorológica, con la ecuación siguiente:

$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$$

**Ecuación 34.** Intensidad, duración y frecuencia.

Donde:

I: Intensidad (mm/hr)

T: Periodo de Retorno (Años)

t: Duración de la Lluvia (Minutos)

K,m,n: Parámetros de Ajuste

8) Generación de mapas de intensidades máximas para diferentes periodos de retorno y tiempos de duración mediante el programa Arcgis.

Interpolación kriging.

## **INFORMACION METEDOLOGICA**

### **Selección de las estaciones meteorológicas**

Para la selección de las estaciones se consideró el tipo, cantidad y principalmente la periodicidad de los datos, tomando como límite un período mínimo de 10 años de registro continuo.

Se observó que en la región de Huánuco existen 16 estaciones meteorológicas, de las cuales se tiene información de registros de precipitaciones mayores de 10 años de 13 estaciones pluviométricas.

A continuación, se muestran las estaciones meteorológicas seleccionadas con su respectiva ubicación geográfica.

Tabla 2.  
Estaciones meteorológicas seleccionadas

N°	ESTACION	COORDENADAS		ELEVACION (msnm)	PERIODO
		GEOGRAFICAS			
		LATITUD	LONGITUD		
1	CP HUANUCO	09° 57' 7.24" S	76° 14' 54.80" W	1,947.00	2002-2016
2	CO CANCHAN	09° 55' 15.43" S	76° 18' 34.62" W	1,968.00	2002-2016
3	CO JACAS CHICO	09° 53' 5.05" S	76° 30' 3.37" W	3,724.00	2002-2016
4	CO DOS DE MAYO	09° 43' 1.00" S	76° 46' 25.00" W	3,442.00	2002-2016
5	CO SAN RAFAEL	10° 19' 45.27" S	76° 10' 35.47" W	2,722.00	2002-2016
6	CO CHAGLLA	09° 51' 01" S	75° 54' 24" W	3,036.00	2002-2016
7	CO CARPISH	09° 42' 19.83" S	76° 05' 39.10" W	2,582.00	2002-2016
8	CP TINGO MARÍA	09° 18' 30.60" S	76° 00' 1.59" W	660.00	2002-2016
9	MAP TULUMAYO	09° 8' 49.40" S	76° 00' 33.97" W	628.00	2002-2016
10	CO AUCAYACU	08° 55' 47.53" S	76° 06' 42.15" W	586.00	2002-2016
11	CO LA DIVISORIA	09° 12' 03.27" S	75° 48' 50.15" W	1,691.00	2002-2016
12	CO PUERTO INCA	09° 22' 53.00" S	74° 57' 39.00" W	249.00	2002-2016

---

13	CO	08° 55' 38.98" S 74° 42' 31.74" W	213.00	2002-2016
	TOURNAVISTA			

---

Fuente: elaboración propia basado en datos del SENAMHI.

### **Adquisición de datos de precipitación máxima de 24 horas (mm).**

Los datos pluviométricos e información necesaria para el desarrollo de esta investigación, fueron adquiridos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

Los datos solicitados a dicha institución, son los registros de las precipitaciones máximas de 24 horas mensual de las 13 estaciones seleccionadas por un periodo de 15 años (2002 – 2016).

Ver anexo II.

### **Revisión de los datos adquiridos de precipitación máxima de 24 horas (mm).**

La información pluviométrica o pluviográfica antes de ser estudiada en su comportamiento debe ser revisada y analizada en tres aspectos importante: si los datos de la estación son completos, si es homogéneo y/o consistente y si es de extensión suficiente.

### **Estimación de los datos faltantes de precipitación**

Muchas veces las estaciones pueden dejar de registrar información en algunos periodos de tiempo, debido a fallas en los instrumentos o por ausencia del observador. Esta información dejada de registrar puede ser indispensable para el análisis de fenómenos que involucren la precipitación, por tanto, se han desarrollado algunos métodos sencillos para la estimación de la información pluviométrica faltante.

Entre los métodos de estimación de registros diarios y mensuales faltantes se tienen:

Método del promedio aritmético

Método de la relación normalizada

Método del U. S. Nacional Weather Service

Método Racional Deductivo.

De los métodos mencionados en general, los datos de precipitaciones faltantes son estimados en base a los registros de las estaciones cercanas. Para ello se utilizan los datos de las estaciones que si tienen los datos de registros completos (“estaciones índices”), y se seleccionan de modo que estén lo más cerca posible y sean de altitud parecida a la estación en estudio, a excepción del Método Racional Deductivo el cual no necesita tener registro de datos de otras estaciones para hallar los datos faltantes.

Por tanto, para la estimación de datos faltantes en la investigación se optará por el Método Racional Deductivo. Debido a que las estaciones dentro de la región en estudio se encuentran dispersas tanto en distancias y altitudes.

***Método racional deductivo.***

Cuando no es posible disponer de estaciones cercanas y circundantes a la estación incompleta, o bien las existentes no cuentan con observaciones de los datos faltantes (mensuales), se puede estimar el valor mensual faltante por medio de un simple promedio aritmético de los valores contenidos en el registro para ese mes, lo anterior se considera válido únicamente si es un solo año (o máximo dos) el faltante y tal promedio se realiza con diez datos (años) como mínimo (o 20 años en el caso de dos datos faltantes).

El desarrollo del método se puede sintetizar en los siguientes cuatro pasos.

*Paso 1).* Efectuar la suma de precipitaciones mensuales en todos los años completos y obtener la precipitación mensual promedio.

*Paso 2).* Calcular para todos los años completos los porcentajes mensuales de precipitación, los que serán igual a la lluvia mensual entre el promedio mensual calculado en el paso anterior y

por 100. Al sumar los porcentajes calculados y obtener su promedio deberán de obtenerse 1200 y 100, respectivamente.

*Paso 3).* Todos los porcentajes mensuales correspondientes a cada uno de los doce meses se suman y se divide tal suma entre el número de años completos, es decir se calcula el porcentaje promedio  $S_j$ , con  $j$  variando de 1 a 12, uno para enero y 12 para diciembre.

*Paso 4).* El método acepta la hipótesis que considera que los meses desconocidos tendrán un porcentaje igual al porcentaje promedio ( $S_j$ ). Se designan las siguientes variables:

$$P_i = \left( \frac{\sum P}{1200 - \sum S_i} \right) S_i$$

**Ecuación 35.** Método racional deductivo

Donde:

$i$ : cada uno de los meses desconocidos, como máximo pueden ser once.

$P_i$ : precipitación mensual desconocida en cada año incompleto, en mm.

$\sum S_i$ : suma de los porcentajes promedio de los meses cuya precipitación se desconoce, en porcentaje.

$\sum p$ : suma de las precipitaciones mensuales conocidas en los años incompletos, en mm.

$S_i$ : porcentaje promedio asignado a cada uno de los meses desconocidos o faltantes

Por lo tanto, de acuerdo a las variables anteriores se puede establecer la siguiente proporción, (campos Aranda, 1987). Ver anexo II.

### **Análisis de Homogeneidad y/o Consistencia**

Consiste en realizar un análisis de la información disponible, mediante criterios físicos y métodos estadísticos que permitan identificar, evaluar y eliminar los posibles errores sistemáticos que ha podido ocurrir, sea por causas naturales u ocasionadas por la intervención de la mano del hombre.

*Inconsistencia*, son los errores sistemáticos que se presentan como saltos y tendencias en las series maestras.

*No homogeneidad*, cambios de los datos originales con el tiempo. La No Homogeneidad en los datos de Precipitación, se produce por movimiento de la Estación, cambios en el medio ambiente que rodea la Estación.

Las causas principales de serie de precipitaciones no homogéneas se deben a:

1. Cambio en la localización del pluviómetro.
2. Cambio en la forma de exposición o reposición del aparato.
3. Cambio en el procedimiento de observación o reemplazo del operador.
4. Deforestación y reforestación en la zona.
5. Apertura de nuevas áreas de cultivo en los alrededores.
6. Desección de pantanos
7. Industrialización en áreas circundantes.

### **Pruebas estadísticas de homogeneidad**

El test o prueba estadística de homogeneidad presenta una hipótesis nula y una regla para aceptarla o rechazarla en base a su probabilidad de ocurrencia. Si dicha probabilidad es pequeña, se concluye que la serie es no homogénea, si es grande, se dice que la serie es homogénea.

#### ***Test de Mann-Kendall.***

La prueba de Homogeneidad de Mann-Kendall es un test no paramétrico, tiene una hipótesis nula sencilla y fácil de satisfacer.

Este test detecta cualquier forma de tendencia, ya sean lineales o en forma de saltos, siempre que den una tendencia global, este test no es adecuado para series que presentan un componente estacional.

La prueba de Homogeneidad de Mann-Kendall es en realidad un test estadístico que conduce a elegir alguna de las siguientes respuestas:

*Hipótesis nula:* Todos los valores de la serie son datos aleatorios de una sola población (Es una serie Homogénea).

*Hipótesis alternativa:* Es una serie no homogénea con tendencia monótona.

La prueba consiste en calcular un índice de desviación S de la serie, y a partir de este valor calcular el valor V mediante la relación:

$$V = \frac{S - 1}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}}$$

**Ecuación 36.** Test de Mann-Kendall.

Donde:

$$S = T - I$$

$$T = \sum_1^{n-1} S_i$$

$$I = \sum_1^{n-1} t_i$$

n: Número de registros

S: Índice de desviación calculado

$S_i$ : Número de valores de  $X_j > X_i$  para  $i < j < n$

$t_i$ : Número de valores de  $X_j < X_i$  para  $i < j < n$

Luego se elige un nivel de significancia  $\alpha$  o valor de confiabilidad en función al cual se definirá la condición de homogeneidad de la serie. Este índice se relaciona con un valor de  $V_{crit}$  a través de la función de distribución normal, que se muestra en la Tabla 31.

Tabla 3.  
*Vcrit para diferentes niveles de significación  $\alpha$*

$\alpha$	0.005	0.010	0.025	0.050	0.100
Vcrit	2.58	2.33	1.96	1.64	1.28

Fuente: Anónimo.

Se compara V y Vcrit: Si V es menor que Vcrit se acepta la hipótesis nula, es decir que la serie es homogénea con un nivel de significancia de  $\alpha$  %, de lo contrario se asume la hipótesis alternativa. Ver anexo II.

#### ***Prueba de las secuencias.***

Se realiza contando el número de secuencias u, arriba o abajo de la mediana de la serie. El valor de la mediana se obtiene ordenando la serie respecto de su magnitud y seleccionando el valor central (para n impar), o la media aritmética de los dos valores centrales (para n par).

Usándose el valor de la mediana como referencia, se marcan los registros de la serie como “A” si éste es mayor que la mediana, o “B” si es menor. Las secuencias o sucesiones de valores “A” o “B” son contabilizadas, y para concluir que la serie es homogénea, el número de secuencias u debe estar comprendido entre el rango de valores que se muestran de la tabla 4.

Tabla 4.  
*Rango del Número de Secuencias “u” para un Registro Homogéneo*

Nro de Datos N, (Años)	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Rango de U	5-6	5-10	6-11	7-12	8-13	9-14	9-16	10-17	11-18	12-19

Nro de Datos N, (Años)	32	34	36	38	40	50	60	70	80	100
Rango de U	13-20	14-21	15-22	16-23	16-25	22-30	26-36	31-41	35-47	45-47

Fuente: Campos Aranda, 1987.

Ver Anexo II.

### **Ajuste de los datos de precipitación a una función de distribución de probabilidad**

A partir de los registros de precipitación obtenidos, de la estimación de los datos faltantes, del análisis de homogeneidad de las precipitaciones máximas, se procede a ajustar los datos a una función de distribución de probabilidad. Las funciones de distribución empleadas fueron la Normal, Log Normal, Gamma y Gumbel.

#### ***Distribución Normal.***

Para ajustar los datos a la función de distribución normal se sigue el proceso siguiente:

1. Se ordenan los datos de las precipitaciones máximas de menor a mayor y se asigna el número de orden (M).

2. Se calcula el período de retorno y las probabilidades de ocurrencia y no ocurrencia, utilizando las siguientes formulas:

*Periodo de retorno*

$$T = \frac{N + 1}{M}$$

**Ecuación 37.** Periodo de retorno

Donde:

T: período de retorno.

M: es el orden asignado a los años.

N: son el número total de observaciones

También se sabe que la probabilidad de ocurrencia es el inverso del período de retorno.

*Probabilidad de ocurrencia.*

$$P(X > X_M) = \frac{M}{N + 1}$$

**Ecuación 38.** Probabilidad de ocurrencia

Donde:

$P(X > X_M)$ : Probabilidad de ocurrencia.

M: es el orden asignado a los años.

N: son el número total de observaciones

Y que la probabilidad de no ocurrencia está dada por:

*Probabilidad de no ocurrencia.*

$$P(X \leq X_M) = 1 - P(X > X_M) = 1 - \frac{M}{N + 1} = 1 - \frac{1}{T}$$

**Ecuación 39.** Probabilidad de no ocurrencia

Donde:

$P(X \leq X_M)$ : Probabilidad de no ocurrencia.

$P(X > X_M)$ : Probabilidad de ocurrencia.

M: es el orden asignado a los años.

N: son el número total de observaciones

T: periodo de retorno.

3. Se calcula las variables probabilísticas de la función de distribución normal

*Media Aritmética.*

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N}$$

**Ecuación 40.** Distribución normal. Media aritmética

Donde:

$\bar{X}$ : Media Aritmética X

$X_i$ : Variable Independiente

N: Número total de datos

*Desviación Estándar.*

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

**Ecuación 41.** Distribución normal. Desviación estándar

Donde:

S: Desviación estándar de X

$\bar{X}$ : Media Aritmética de X

$X_i$ : Variable Independiente

N: Número total de datos

*Variable Estandarizada.*

$$Z = \frac{X_i - \bar{X}}{S}$$

**Ecuación 42.** Distribución normal. Variable estandarizada

Donde:

Z: Variable Estandarizada

S: Desviación estándar de X

$\bar{X}$ : Media Aritmética de X

$X_i$ : Variable Independiente

Para el cálculo de la función de distribución acumulada se recurre a la tabla de la ley normal que está en función de la variable estandarizada Z, tabla 31 del anexo I.

4. Se realiza las pruebas de bondad de ajuste.

*Test de smirnov – kolgomorov.*

La prueba de ajuste de Sminov-Kolmogorov, consiste en comparar las diferencias existentes entre la probabilidad empírica de los datos de la muestra y la probabilidad teórica, tomando el

valor máximo del valor absoluto, de la diferencia entre el valor observado y el valor de la recta teórica del modelo.

*delta teórico:*

$$D = \max|F(x) - P(x)|$$

**Ecuación 43.** Test de smirnov – kolgomorov. Delta teorico

Donde:

D: Estadístico de Smirnov-Kolmogorov, cuyo valor es igual a la diferencia máxima existente entre la probabilidad ajustada y la probabilidad empírica.

F(x): Probabilidad de la distribución teórica

P(x): Probabilidad experimental o empírica de los datos

*Delta tabular:*

Se calcula el valor crítico del estadístico D, es decir  $D_0$ , para un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$  y N igual al número de datos, los valores de  $D_0$  se muestran a continuación en la tabla 5.

Tabla 5.

*Valores Críticos de  $D_0$  del estadístico Smirnov-Kolmogorov D, para varios valores de N y niveles de significación  $\alpha$*

TAMAÑO MUESTRAL	NIVEL DE SIGNIFICACION $\alpha$				
	0.20	0.15	0.10	0.05	0.01
1	0.900	0.925	0.950	0.975	0.995
2	0.684	0.726	0.776	0.842	0.929
3	0.565	0.597	0.642	0.708	0.828
4	0.494	0.525	0.564	0.624	0.733
5	0.446	0.474	0.510	0.565	0.669
6	0.410	0.436	0.470	0.521	0.618
7	0.381	0.405	0.438	0.486	0.577
8	0.358	0.381	0.411	0.457	0.543
9	0.339	0.360	0.388	0.432	0.514
10	0.322	0.342	0.368	0.410	0.490
11	0.307	0.326	0.352	0.391	0.468
12	0.295	0.313	0.338	0.375	0.450
13	0.284	0.302	0.325	0.361	0.433

14	0.274	0.292	0.314	0.349	0.418
15	0.266	0.283	0.304	0.338	0.404
16	0.258	0.274	0.295	0.328	0.392
17	0.250	0.266	0.286	0.318	0.381
18	0.244	0.259	0.278	0.309	0.371
19	0.237	0.252	0.272	0.301	0.363
20	0.231	0.246	0.264	0.294	0.356
25	0.210	0.220	0.240	0.270	0.320
30	0.190	0.200	0.220	0.240	0.290
35	0.180	0.190	0.210	0.230	0.270
N > 35	$\frac{1.07}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.14}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.22}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.36}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.63}{\sqrt{N}}$

Fuente: hidrología estadística. Máximo villon Béjar.

Se compara el valor del estadístico  $D$ , con el valor crítico  $D_0$  de la Tabla 5, con los siguientes criterios de decisión:

Si:  $D < D_0$ : El ajuste es bueno, al nivel de significación seleccionado

$D \geq D_0$  El ajuste no es bueno, al nivel de significación seleccionado, siendo necesario probar con otra distribución.

*Coefficiente de determinación  $R^2$ .*

Este coeficiente representa el porcentaje de variación de los datos reales expuesto por el modelo seleccionado, se encuentra definido por la siguiente expresión (Aguilera Navarro & Pizarro Tapia, 2007).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(F(x) - P(x))^2}{\sum(F(x) - \text{media}(F(x)))^2}$$

**Ecuación 44.** Coeficiente de determinación  $R^2$

Donde:

$R^2$ : Coeficiente de determinación

$F(x)$ : Probabilidad de la distribución teórica

$P(x)$ : Probabilidad experimental o empírica de los datos

Media( $F(x)$ ): Promedio de la probabilidad de la distribución teórica

Es importante mencionar que cuando el coeficiente de determinación alcance un valor mayor que 0.9 el ajuste será considerado como bueno (Askhar et al, 1993).

### ***Distribución Log Normal.***

Para ajustar los datos a la función de distribución log normal se sigue el proceso siguiente:

1. Se ordenan los datos de las precipitaciones máximas de menor a mayor y se asigna el número de orden ( $M$ ).
2. Se calcula el período de retorno y las probabilidades de ocurrencia y no ocurrencia, utilizando las ecuaciones 37, 38 y 39.
3. Se calcula las variables probabilísticas de la función de distribución log normal

### ***Media Aritmética***

$$\bar{X} = \frac{\sum \text{Ln}(X_i)}{N}$$

**Ecuación 45.** Distribución log normal. Media aritmética

Donde:

$\bar{X}$ : Media Aritmética X

$\text{Ln}(X_i)$ : Logaritmo natural de la variable Independiente

N: Número total de datos

### ***Desviación Estándar***

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{Ln}(X_i) - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

**Ecuación 46.** Distribución log normal. desviación estándar

Donde:

S: Desviación estándar de X

$\bar{X}$ : Media Aritmética de X

$\ln(X_i)$ : Logaritmo natural de la variable Independiente

N: Número total de datos

*Variable Estandarizada*

$$Z = \frac{\ln(X_i) - \bar{X}}{S}$$

**Ecuación 47.** Distribución log normal. Variable Estandarizada

Donde:

Z: Variable Estandarizada

S: Desviación estándar de X

$\bar{X}$ : Media Aritmética de X

$\ln(X_i)$ : Logaritmo natural de la variable Independiente

Para el cálculo de la función de distribución acumulada se recurre a la tabla de la ley normal que está en función de la variable estandarizada Z, ver Tabla 31 del anexo I.

4. Se realiza las pruebas de bondad de ajuste.

*Test de smirnov – kolgomorov.*

La prueba de ajuste de Sminov-Kolmogorov, consiste en comparar las diferencias existentes entre la probabilidad empírica de los datos de la muestra y la probabilidad teórica, tomando el valor máximo del valor absoluto, de la diferencia entre el valor observado y el valor de la recta teórica.

*delta teórico.*

ver ecuación 43.

*Delta tabular:*

Se calcula el valor crítico del estadístico D, es decir  $D_0$ , para un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$  y N igual al número de datos, los valores de  $D_0$  se muestran la tabla 5

Se compara el valor del estadístico D, con el valor crítico  $D_0$  de la Tabla C-4 del Anexo C, con los siguientes criterios de decisión:

Si:  $D < D_0$ : El ajuste es bueno, al nivel de significación seleccionado

$D \geq D_0$  El ajuste no es bueno, al nivel de significación seleccionado, siendo necesario probar con otra distribución.

*Coefficiente de determinación R<sup>2</sup>.*

Este coeficiente representa el porcentaje de variación de los datos reales expuesto por el modelo seleccionado, se encuentra definido por la ecuación 44.

### ***Distribución Gamma***

Para ajustar los datos a la función de distribución Gamma se sigue el proceso siguiente:

1. Se ordenan los datos de las precipitaciones máximas de menor a mayor y se asigna el número de orden (M).

2. Se calcula el período de retorno y las probabilidades de ocurrencia y no ocurrencia, utilizando las ecuaciones 37, 38 y 39.

3. Se calcula las variables probabilísticas de la función de distribución Gamma

*Parámetro de forma*

$$\gamma = \frac{\bar{X}^2}{S^2}$$

**Ecuación 48.** Distribución gamma. Parámetro de forma

*Parámetro de escala*

$$\beta = \frac{S^2}{\bar{X}}$$

**Ecuación 49.** Distribución gamma. Parámetro de escala

*Densidad de Probabilidad*

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

**Ecuación 50.** Distribución gamma. Densidad de probabilidad

para  $X > 0$

Donde:

$f(x)$ : Función de distribución gamma

$\gamma$ : Parámetro de forma de la distribución Gamma

$\beta$ : Parámetro de escala de la distribución Gamma

$\bar{X}$ : Media Aritmética de X

S: Desviación Estándar de X

4. Se realiza las pruebas de bondad de ajuste.

*Test de smirnov – kolgomorov.*

La prueba de ajuste de Sminov-Kolmogorov, consiste en comparar las diferencias existentes entre la probabilidad empírica de los datos de la muestra y la probabilidad teórica, tomando el valor máximo del valor absoluto, de la diferencia entre el valor observado y el valor de la recta teórica.

*delta teórico.*

ver ecuación 43.

*Delta tabular:*

Se calcula el valor crítico del estadístico D, es decir  $D_0$ , para un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$  y N igual al número de datos, los valores de  $D_0$  se muestran la tabla 5

Se compara el valor del estadístico  $D$ , con el valor crítico  $D_0$  de la Tabla C-4 del Anexo C, con los siguientes criterios de decisión:

Si:  $D < D_0$ : El ajuste es bueno, al nivel de significación seleccionado

$D \geq D_0$  El ajuste no es bueno, al nivel de significación seleccionado, siendo necesario probar con otra distribución.

*Coefficiente de determinación  $R^2$ .*

Este coeficiente representa el porcentaje de variación de los datos reales expuesto por el modelo seleccionado, se encuentra definido por la ecuación 44.

### ***Distribución Gumbel***

Para ajustar los datos a la función de distribución Gumbel se sigue el proceso siguiente:

1. Se ordenan los datos de las precipitaciones máximas de menor a mayor y se asigna el número de orden (M).
- . 2. Se calcula el período de retorno y las probabilidades de ocurrencia y no ocurrencia, utilizando las ecuaciones 37, 38 y 39.
3. Se calcula las variables probabilísticas de la función de distribución Gumbel.

*Parámetro de escala*

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

**Ecuación 51.** Distribución Gumbel. Parámetro de escala

*Parámetro de posición*

$$\mu = \bar{X} - 0.57721\alpha$$

**Ecuación 52.** Distribución Gumbel. Parámetro de posición

*Función de distribución acumulada*

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\alpha}}}$$

**Ecuación 53.** Distribución Gumbel. Función de distribución acumulada

Donde:

F(x): Función de distribución acumulada Gumbel

$\alpha$ : Parámetro de Escala

$\mu$ : es el parámetro de posición, también llamado moda

$\bar{X}$ : Media Aritmética de X

S: Desviación Estándar de X

e: base del logaritmo neperiano

4. Se realiza las pruebas de bondad de ajuste.

*Test de smirnov – kolgomorov.*

La prueba de ajuste de Sminov-Kolmogorov, consiste en comparar las diferencias existentes entre la probabilidad empírica de los datos de la muestra y la probabilidad teórica, tomando el valor máximo del valor absoluto, de la diferencia entre el valor observado y el valor de la recta teórica.

*delta teórico.*

ver ecuación 43.

*Delta tabular:*

Se calcula el valor crítico del estadístico D, es decir  $D_0$ , para un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$  y N igual al número de datos, los valores de  $D_0$  se muestran la tabla 5

Se compara el valor del estadístico D, con el valor crítico  $D_0$  de la Tabla C-4 del Anexo C, con los siguientes criterios de decisión:

Si:  $D < D_0$ : El ajuste es bueno, al nivel de significación seleccionado

$D \geq D_0$  El ajuste no es bueno, al nivel de significación seleccionado, siendo necesario probar con otra distribución.

*Coefficiente de determinación R<sup>2</sup>.*

Este coeficiente representa el porcentaje de variación de los datos reales expuesto por el modelo seleccionado, se encuentra definido por la ecuación 44.

### **Precipitaciones máximas probables para distintas frecuencias o periodo de retorno.**

Una vez realizado las pruebas de bondad de ajuste y el coeficiente de determinación R<sup>2</sup> demostrando que estos son adecuados, se procede al cálculo de precipitaciones máximas probables para distintas frecuencias o periodos de retorno, para lo cual se tomaron valores típicos de periodos de retorno para diferentes proyectos hidrológicos e hidráulicos, ver tablas 6 y 7.

Tabla 6.

*valores recomendados de riesgo admisible y periodo de retorno de obras de drenaje*

TIPO DE OBRA	RIESGO	VIDA UTIL (N)	PERIODO
	ADMISIBLE (**) (R)		DE RETORNO (T)
Puentes (*)	0.22	25	100
Alcantarillas de paso de quebradas importantes y badenes	0.39	25	50
Alcantarillas de paso quebradas menores y descarga de agua de cunetas	0.64	25	25

Drenaje de la plataforma (a nivel longitudinal)	0.64	25	25
Subdrenes	0.72	25	20
Defensas Ribereñas	0.22	25	100

(\*) - Para obtención de la luz y nivel de aguas máximas extraordinarias.

- Se recomienda un período de retorno T de 500 años para el cálculo de socavación.

(\*\*) - Vida Útil considerado n=25 años.

- Se tendrá en cuenta, la importancia y la vida útil de la obra a diseñarse.

- El Propietario de una Obra es El que define El riesgo admisible de falla y la vida útil de las obras.

Fuente: Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje.

Tabla 7.

*valores recomendados de periodo de retorno para drenaje pluvial*

TIPO DE OBRA	PERIODO DE RETORNO (T)
Sistema menor de drenaje	2 - 10
Sistema mayor de drenaje	25

Fuente: R.N.E. OS.060 Drenaje Pluvial Urbano

estas precipitaciones máximas serán corregidas multiplicando por un coeficiente de corrección por intervalo fijo.

*Corrección por intervalo fijo:* Según el estudio de miles de estaciones - año de datos de precipitación, realizado por L. L. Welss, los resultados de un análisis probabilístico llevado a cabo con precipitaciones máximas anuales tomadas en un único y fijo intervalo de observación, al ser incrementados en un 13% conducían a magnitudes más aproximadas a las obtenidas en el análisis basado en precipitaciones máximas verdaderas. Por tanto, el coeficiente de corrección por intervalo fijo será de 1.13.

**Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración y periodos de retorno.**

Una vez obtenidas las precipitaciones máximas para diferentes frecuencias o periodos de retorno y corregido por intervalo fijo, se procederá al cálculo de las precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración multiplicando por coeficientes de duración de lluvias entre 48 horas y una hora, dadas por el manual para el diseño de carreteras pavimentadas de bajo volumen de tránsito. Ver tabla 8.

Tabla 8.

*Coeficientes de duración lluvias entre 48 horas y una hora*

<b>DURACION DE LA PRECIPITACION</b>	<b>COEFICIENTE</b>
<b>EN HORAS</b>	
1	0.25
2	0.31
3	0.38
4	0.44
5	0.50
6	0.56
8	0.64
10	0.73
12	0.79
14	0.83
16	0.87
18	0.90
20	0.93
22	0.97

24	1.00
48	1.32

Fuente: Manual para el Diseño de Carreteras Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito

### **Intensidad distribuida de precipitación para diferentes periodos de retorno.**

Después de calculadas las precipitaciones máximas para diferentes frecuencias o periodos de retorno y para distintas duraciones o tiempos de duración, se procederá a calcular la intensidad distribuida de lluvia según periodos de retorno con la formula siguiente:

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

Ecuación 54. Intensidad distribuida de lluvia

Donde:

I: Intensidad (mm/hr)

P: Precipitación (mm)

t: Duración (hr)

### **Determinación de las curvas IDF para diferentes periodos de retorno y tiempos de duración.**

Una vez calculadas las intensidades distribuidas de lluvia según periodos de retorno, se procede a calcular las curvas IDF para diferentes periodos de retorno y tiempos de duración mediante un modelo que relaciona simultáneamente las tres variables (intensidad, duración y período de retorno) en una familia de curvas, cuya ecuación reducida es (Aparicio, 1994):

$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$$

**Ecuación 55.** Curvas Intensidad, duración y frecuencia

Donde:

I = Intensidad (mm/hr)

$T$  = Periodo de Retorno (Años)

$t$  = Duración de la Lluvia (Minutos)

$K, m, n$  = Parámetros de Ajuste, calculadas mediante un análisis de regresiones

***Procedimiento para el cálculo de los parámetros de ajuste  $K, m, n$ .***

1. Se realiza un cambio de variable de la siguiente forma:

$$d = K \cdot T^m$$

**Ecuación 56.** Curvas Intensidad, duración y frecuencia

Con lo que de la ecuación 56, se obtiene la siguiente expresión.

$$I = \frac{d}{t^n} \rightarrow I = d \cdot t^{-n}$$

**Ecuación 57.** Curvas Intensidad, duración y frecuencia

Tomando Ln a la ecuación 57, se obtiene la siguiente expresión.

$$\ln(I) = \ln(d) - n * \ln(t)$$

**Ecuación 58.** Curvas Intensidad, duración y frecuencia

2. Se realiza un cambio de variable a la ecuación 58, para obtener una recta de regresión lineal

$$Y = a_0 + a_1 X$$

**Ecuación 59.** Recta de regresión lineal 1

Donde:

$$Y = \ln(I)$$

$$X = \ln(t)$$

$$a_0 = \ln(d)$$

$$a_1 = -n$$

3. Se resuelve la ecuación 59, por el método de la recta de mínimos cuadrados obteniéndose las siguientes ecuaciones normales:

$$\sum Y = a_0 N + a_1 \sum X$$

**Ecuación 60.** Ecuación normal 1

$$\sum XY = a_0 \sum X + a_1 \sum X^2$$

**Ecuación 61.** Ecuación normal 2

Las constantes de  $a_0$  y  $a_1$  de las ecuaciones 60 y 61 también se pueden calcular empleando las siguientes expresiones:

$$a_0 = \frac{\sum Y \sum X^2 - \sum X \sum XY}{N \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

**Ecuación 62.** Ecuación normal

$$a_1 = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{N \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

**Ecuación 63.** Ecuación normal

4. Después de resolver las ecuaciones 62 y 63 se obtienen los valores de los parámetros  $d$  y  $n$
5. En función del cambio de variable realizado ecuación 56, se realiza otra regresión lineal por la recta de mínimos cuadrados entre el periodo de retorno ( $T$ ) y el término constante de regresión ( $d$ ), a fin obtener las constantes de regresión  $K$  y  $m$

A la ecuación 56, Se toma  $\ln$ .

$$\ln(d) = \ln(K) + m * \ln(T)$$

**Ecuación 64.** Constantes de Regresión

6. Luego realiza un cambio de variable a la ecuación 64, para obtener una nueva recta de regresión lineal

$$Y = a_0 + a_1X$$

**Ecuación 65.** Recta de regresión lineal 2

Donde:

$$Y = \text{Ln}(d)$$

$$X = \text{Ln}(T)$$

$$a_0 = \text{Ln}(K)$$

$$a_1 = m$$

7. Se resuelve la ecuación 65, por el método de la recta de mínimos cuadrados y se obtiene las siguientes ecuaciones normales:

$$\sum Y = a_0N + a_1 \sum X$$

**Ecuación 66.** Ecuación normal 3

$$\sum XY = a_0 \sum X + a_1 \sum X^2$$

**Ecuación 67.** Ecuación normal 4

Las constantes de  $a_0$  y  $a_1$  de las ecuaciones 66 y 67 también se pueden calcular empleando las siguientes formulas:

$$a_0 = \frac{\sum Y \sum X^2 - \sum X \sum XY}{N \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

**Ecuación 68.** Constantes de Regresión

$$a_1 = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{N \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

**Ecuación 69.** Constantes de Regresión

8. Después de resolver las ecuaciones 68 y 69 se obtienen los valores de los parámetros K y m

9. Habiendo calculado los parámetros  $K$ ,  $m$  y  $n$  de la ecuación 55, esta queda resuelta para poder generar una familia de curvas para diferentes periodos de retorno y tiempos de duración.

***Generación de mapas de intensidades máximas para diferentes periodos de retorno y tiempos de duración mediante el programa Arcgis.***

Una vez determinado las ecuaciones y generado las familias de curvas IDF para diferentes periodos de retorno y tiempos de duración de cada estación, se procede a generar los mapas de intensidades máximas para diferentes periodos de retorno y tiempos de duración a través de la interpolación por el método geo estadístico de Kriging, haciendo uso del programa de arcgis.

***Interpolación.***

En estadística la interpolación es usada para estimar valores desconocidos a partir de una serie de datos conocidos y ponderados. Cada técnica busca determinar una función que represente adecuadamente el fenómeno bajo estudio y así disminuir la cantidad de información a recolectar en campo (Murillo, Ortega, Carrillo, Pardo, & Rendón, 2015). Existen varios métodos para realizar la interpolación, en la presente investigación se seleccionó el método de método de interpelación Kriging.

## CAPITULO IV: ANALISIS DE RESULTADOS

### ANALISIS DE LOS REGISTROS PLUVIOMETRICOS

A partir de la información facilitada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Se procedió al análisis de las 13 estaciones meteorológicas de la región de Huánuco.

#### **Análisis de los datos faltantes**

De las 13 estaciones meteorológicas seleccionadas, 9 estaciones no tienen los datos completos en algunos meses para el periodo en estudio, por lo que se procedió a completar los datos faltantes de cada estación meteorológica incompleta, por el método racional deductivo mencionado en el capítulo III.

#### ***Estaciones meteorológicas con datos completos.***

Las estaciones meteorológicas con datos completos en el periodo de estudio son las que se describe en la siguiente tabla.

Tabla 9.  
*Estaciones meteorológicas con datos completos*

N°	ESTACION	COORDENADAS		ELEVACION (msnm)	PERIODO
		GEOGRAFICAS			
		LATITUD	LONGITUD		
1	CP HUANUCO	09° 57' 7.24" S	76° 14' 54.80" W	1,947.00	2002-2016
2	CO CANCHAN	09° 55' 15.43" S	76° 18' 34.62" W	1,968.00	2002-2016
3	CO JACAS CHICO	09° 53' 5.05" S	76° 30' 3.37" W	3,724.00	2002-2016
7	CO CARPISH	09° 42' 19.83" S	76° 05' 39.10" W	2,582.00	2002-2016

Fuente: elaboración propia basado en datos del SENAMHI.

***Estaciones meteorológicas con datos incompletos.***

Las estaciones meteorológicas con datos incompletos en algunos meses del periodo de estudio son las que se describen en la siguiente tabla.

Tabla 10.  
*Estaciones meteorológicas con datos incompletos*

N°	ESTACION	COORDENADAS		ELEVACION (msnm)	PERIODO
		GEOGRAFICAS			
		LATITUD	LONGITUD		
4	CO DOS DE MAYO	09° 43' 1.00" S	76° 46' 25.00" W	3,442.00	2002-2016
5	CO SAN RAFAEL	10° 19' 45.27" S	76° 10' 35.47" W	2,722.00	2002-2016
6	CO CHAGLLA	09° 51' 01" S	75° 54' 24" W	3,036.00	2002-2016
8	CP TINGO MARÍA	09° 18' 30.60" S	76° 00' 1.59" W	660.00	2002-2016
9	MAP TULUMAYO	09° 8' 49.40" S	76° 00' 33.97" W	628.00	2002-2016
10	CO AUCAYACU	08° 55' 47.53" S	76° 06' 42.15" W	586.00	2002-2016
11	CO LA DIVISORIA	09° 12' 03.27" S	75° 48' 50.15" W	1,691.00	2002-2016
12	CO PUERTO INCA	09° 22' 53.00" S	74° 57' 39.00" W	249.00	2002-2016
13	CO TOURNAVISTA	08° 55' 38.98" S	74° 42' 31.74" W	213.00	2002-2016

Fuente: elaboración propia basado en datos del SENAMHI.

**ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES**

Una vez analizadas los registros pluviométricos de cada estación se procede a la estimación de los datos faltantes por el método racional deductivo visto en el capítulo III.

Del total de las 13 estaciones meteorológicas usadas para el presente trabajo de tesis, 9 estaciones meteorológicas (ver tabla 10) no cuentan con datos completos en algunos meses, por lo que a estas estaciones se les estimaran los datos faltantes mediante el método mencionado.

Para el cálculo de datos faltantes ver el anexo II.

### DETECCION DE PRESENCIA DE DATOS ATIPICOS

Una vez completado todos los datos faltantes de las 9 estaciones meteorológicas, se procede a la detección de presencia de datos atípicos para las precipitaciones máximas en 24 horas anuales de las 13 estaciones meteorológicas seleccionadas para este trabajo de investigación.

la detección de datos atípicos se realizó mediante el *diagrama de caja y bigotes*, teniendo en cuenta de que, si las series de las estaciones en estudio tenían uno o más valores atípicos, estos se remueven y se realiza el test nuevamente, y si luego de ellas seguían existiendo datos atípicos, la serie era descartada.

De las 13 estaciones analizadas, 4 estaciones presentaron valores atípicos en sus series de datos, dichos datos atípicos fueron removidos y/o eliminados y recalculado para realizar nuevamente el test del diagrama de caja y bigotes donde la nueva serie de datos paso dicho test. A continuación, se presentan las estaciones meteorológicas con presencia de datos atípicos.

Tabla 11.  
*Estaciones meteorológicas con datos Atípicos*

N°	ESTACION	COORDENADAS		ELEVACION (msnm)	PERIODO
		GEOGRAFICAS			
		LATITUD	LONGITUD		
4	CO DOS DE MAYO	09° 43' 1.00" S	76° 46' 25.00" W	3,442.00	2002-2016
10	CO AUCAYACU	08° 55' 47.53" S	76° 06' 42.15" W	586.00	2002-2016

12	CO PUERTO INCA	09° 22' 53.00" S	74° 57' 39.00" W	249.00	2002-2016
13	CO TOURNAVISTA	08° 55' 38.98" S	74° 42' 31.74" W	213.00	2002-2016

Fuente: elaboración propia basado en datos del SENAMHI.

De las 4 estaciones con presencia de datos atípicos, todos estos pasaron dicha prueba en segunda fase, por lo que para el presente estudio las 13 estaciones meteorológicas pasan el test de detección de presencia de datos atípicos.

Para el cálculo de detección de presencia de datos atípicos ver el anexo II.

### PRUEBA DE HOMOGENEIDAD A ESCALA ANUAL

Las 13 estaciones meteorológicas fueron sometidas a las pruebas de homogeneidad de sus series de datos anuales por el **test de mann-kendall y la prueba de las secuencias**, descritas en el capítulo III.

De las 13 estaciones meteorológicas, solo 1 estación no pasó ninguna de las 2 pruebas de homogeneidad, el cual representa el 7.69% del total de estaciones.

A continuación, se presenta la estación meteorológica que no pasó las pruebas de homogeneidad.

Tabla 12.

*Estaciones meteorológicas que no pasaron las pruebas de homogeneidad*

N°	ESTACION	COORDENADAS		ELEVACION (msnm)	PERIODO
		GEOGRAFICAS			
		LATITUD	LONGITUD		
2	CO CANCHAN	09° 55' 15.43" S	76° 18' 34.62" W	1,968.00	2002-2016

Fuente: elaboración propia basado en datos del SENAMHI.

Por tanto, la estación CO Canchan fue descartada para los cálculos venideros debido a que no pasó las 2 pruebas de homogeneidad a que fue sometida.

Para el cálculo de las pruebas de homogeneidad a escala anual ver el II.

De esta manera se concluye que de las 13 estaciones pluviométricas de las cuales se partió este trabajo, 12 estaciones pasaron las pruebas representando estas el 92.31% del total.

En la Figura 22 se puede observar la distribución espacial de las estaciones que pasaron las pruebas.

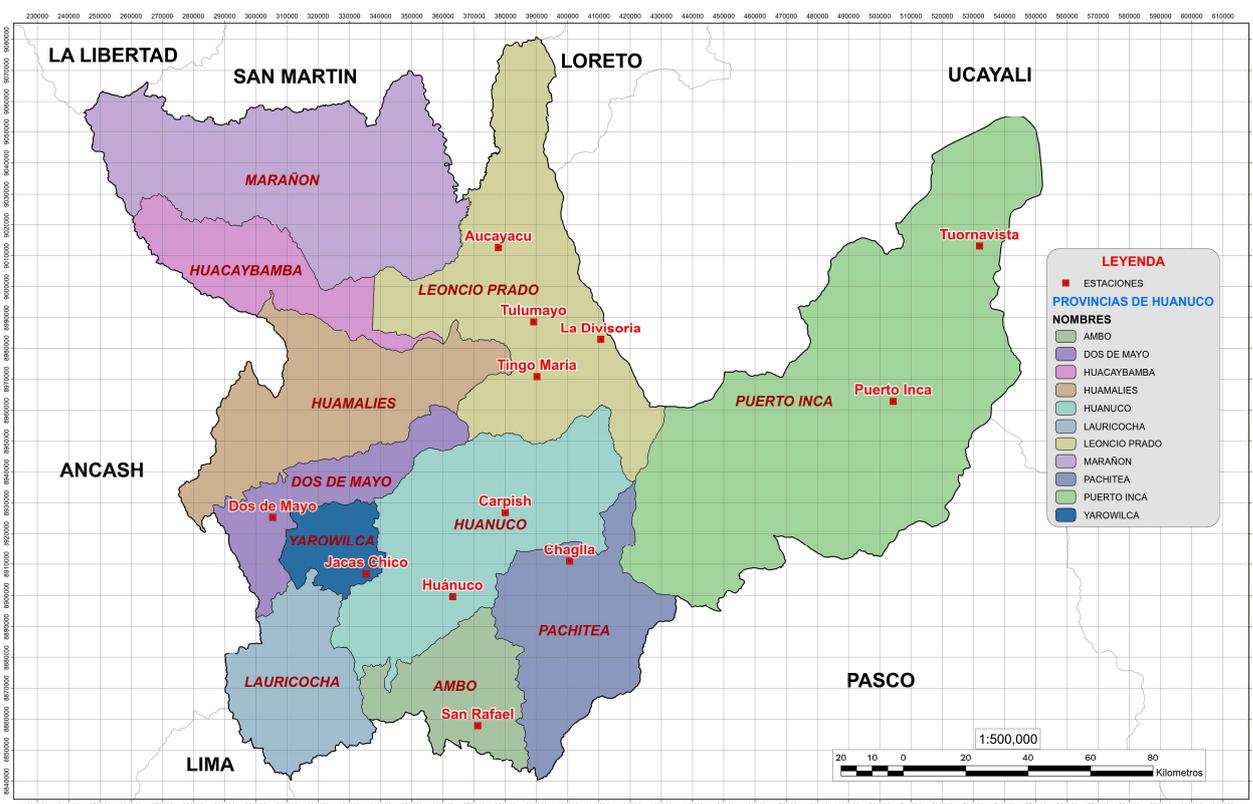


Figura 22. Distribución de las estaciones seleccionadas

**CALCULO DE LAS CURVAS DE INTENSIDADES MAXIMAS DE PRECIPITACION  
PARA DIFERENTES TIEMPOS DE DURACION Y PERIODOS DE RETORNO –  
CURVAS IDF**

Luego de realizar las diferentes pruebas a las estaciones meteorológicas y de las cuales 12 estaciones pasaron dichas pruebas, se procede al cálculo de las ecuaciones para las curvas IDF de cada estación.

En este ítem se procederá a analizar el resultado solo de la estación CO Huánuco a manera de ejemplo, debido a que las demás estaciones tienen el mismo criterio de cálculo, los resultados se verán en las hojas de cálculo del anexo II.

Para el cálculo de las ecuaciones de las curvas IDF se procedió de la siguiente manera:

**Obtención de las series de precipitaciones máximas en 24 horas anuales**

*Tabla 13.*

*Precipitación máxima en 24 horas anual - Estación CP Huánuco*

<b>PRECIPITACION MAXIMA EN 24 HORAS (mm)</b>	
<b>- ANUAL</b>	
<b>AÑO</b>	<b>ESTACION - HUANUCO</b>
2002	27.20
2003	23.00
2004	17.60
2005	25.50
2006	28.00
2007	27.30
2008	33.10

2009	19.60
2010	22.60
2011	35.40
2012	30.70
2013	19.90
2014	24.80
2015	31.70
2016	18.00

Fuente: elaboración propia basado en datos del SENAMHI.

### **Ajuste de los datos a una función de distribución de probabilidad**

A las series de datos obtenidos en el paso anterior es necesario la aplicación del análisis de frecuencia y para esto se requiere de una función de distribución de probabilidades.

Para este trabajo de tesis se empleará la *distribución de probabilidad de Gumbel*, debido a que varios autores recomiendan esta distribución y que han sido empleada con buenos resultados en el estudio de eventos meteorológicos de valores máximos, obteniéndose ajustes muy precisos para valores máximos diarios y anuales (Mintegui et al, 1993). A su vez, Stol (1971), citado por Dickinson (1977), señala que la función de Gumbel resulta ser la más adecuada para representar lluvias anuales extremas.

La aplicación de la función de distribución de Gumbel en estudios que contemplen eventos de valores extremos no sólo es avalada por los autores mencionados anteriormente. La literatura especializada en el tema cita siempre a la función de distribución de Gumbel debido a la calidad de ajuste que presenta en eventos máximos (Témez, 1978; Pizarro, 1986; Linsley et al, 1988; Ponce, 1989; Chow et al, 1994; Monsalve, 1999).

***Calculo de las variables probabilísticos de las series de precipitaciones máximas en 24 horas anuales para la distribución de probabilidad Gumbel.***

*Promedio aritmético.*

Se calculó el promedio aritmético de la serie de datos con la ecuación 70. Por tanto, el promedio aritmético de la serie de datos de la estación CO Huánuco es 25.6267 mm

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}$$

**Ecuación 70.** Promedio aritmético

*Desviación estándar.*

Se calculó la desviación estándar de la serie de datos con la ecuación 71. Por tanto, la desviación estándar de la serie de datos de la estación CO Huánuco es 5.5637 mm

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

**Ecuación 71.** Desviación estándar

*Parámetro de escala  $\alpha$ .*

Se calculó el parámetro de escala  $\alpha$  de la serie de datos con la ecuación 51. Por tanto, el parámetro de escala  $\alpha$  de la serie de datos de la estación CO Huánuco es 4.3380 mm

*Parámetro de posición  $\mu$ .*

Se calculó el parámetro de posición  $\mu$  de la serie de datos con la ecuación 52. Por tanto, el parámetro de posición  $\mu$  de la serie de datos de la estación CO Huánuco es 23.1228 mm

***Ajuste de los datos a la Función de distribución Gumbel y cálculo de las pruebas de bondad de ajuste.***

El siguiente paso, luego de calcular las variables probabilísticas de la serie de datos de precipitación, estas se ajustan a la distribución de probabilidad de Gumbel, definida por la Ecuación 53, del capítulo III.

Luego de ajustada los datos a la función de Gumbel, se lleva acabo las pruebas de bondad de ajuste, utilizándose como medidas de bondad el test de Kolmogorov – Smirnov con la ecuación 43 y el coeficiente de Determinación de ajuste R<sup>2</sup> con la ecuación 44 del capítulo III.

Tabla 14.

*Ajuste de los datos a la Función de distribución Gumbel y cálculo de las pruebas de bondad de ajuste – Estacion CP Huánuco.*

<b>DISTRIBUCION DE PROBABILIDAD GUMBEL</b>						
<b>MUESTRA</b>	<b>Xi</b>	<b>P(x)</b>	<b>F(x)</b>	<b>SMIRNOV- KOLMOGOROV</b>	<b>COEF. DE DETERMINACION R<sup>2</sup></b>	
<b>(M)</b>						
1	17.60	0.0625	0.0281	0.0344	0.0012	0.2343
2	18.00	0.1250	0.0385	0.0865	0.0075	0.2244
3	19.60	0.1875	0.1051	0.0824	0.0068	0.1657
4	19.90	0.2500	0.1222	0.1278	0.0163	0.1521
5	22.60	0.3125	0.3237	0.0112	0.0001	0.0355
6	23.00	0.3750	0.3575	0.0175	0.0003	0.0239
7	24.80	0.4375	0.5070	0.0695	0.0048	0.0000
8	25.50	0.5000	0.5610	0.0610	0.0037	0.0024
9	27.20	0.5625	0.6766	0.1141	0.0130	0.0270

10	27.30	0.6250	0.6827	0.0577	0.0033	0.0291
11	28.00	0.6875	0.7226	0.0351	0.0012	0.0443
12	30.70	0.7500	0.8400	0.0900	0.0081	0.1075
13	31.70	0.8125	0.8707	0.0582	0.0034	0.1285
14	33.10	0.8750	0.9046	0.0296	0.0009	0.1540
15	35.40	0.9375	0.9427	0.0052	0.0000	0.1853
<b>DELTA TEORICO</b>				<b>0.1278</b>		
<b>DELTA TABULAR</b>				<b>0.338</b>	<b>R2</b>	<b>0.9533</b>
<b>COMPROBACION</b>				<b>SE ACEPTA</b>		

Fuente: elaboración propia.

### Precipitación máxima probable para distintas frecuencias o periodos de retorno

Una vez que se realiza las pruebas de bondad de ajuste y estas son aceptadas a la función de distribución Gumbel, se procede al cálculo de las precipitaciones máximas probable para distintas frecuencias o periodos de retorno establecidos en la tabla 6 y tabla 7 del capítulo III.

Tabla 15.

*Precipitación máxima probable para distintas frecuencias o periodos de retorno ajustada a la distribución Gumbel – Estación CP Huánuco*

<b>DISTRIBUCION GUMBEL</b>				
<b>Periodo de Retorno T (Años)</b>	<b>Variable Reducida YT</b>	<b>Precipitación XT'(mm)</b>	<b>Prob. de no ocurrencia F(XT)</b>	<b>Corrección por intervalo fijo XT (mm)</b>
2	0.3665	24.7127	0.5000	27.9254
5	1.4999	29.6295	0.8000	33.4814

10	2.2504	32.8849	0.9000	37.1599
25	3.1985	36.9980	0.9600	41.8078
50	3.9019	40.0494	0.9800	45.2559
100	4.6001	43.0783	0.9900	48.6784
500	6.2136	50.0775	0.9980	56.5875

Fuente: elaboración propia.

### Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración y periodos de retorno

Luego de calculada la precipitación máxima probable para distintas frecuencias o periodos de retorno se procede a calcular las precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración y periodos de retorno usando los coeficientes de la tabla 8 del capítulo III, para la transformación de precipitaciones máximas en 24 horas a precipitaciones de diferentes tiempos de duración.

Tabla 16.

*Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración y periodos de retorno ajustada a la distribución Gumbel - Estación CP Huánuco*

PRECIPITACIONES MAXIMAS PARA DIFERENTES TIEMPOS DE DURACION Y PERIODOS DE RETORNO - DISTRIBUCION GUMBEL								
Tiempo de Duración	Cociente	Precipitación máxima Pd (mm) por tiempos de duración						
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
24 hr	X24	27.9254	33.4814	37.1599	41.8078	45.2559	48.6784	56.5875
22 hr	X22 = 97%	27.0876	32.4769	36.0451	40.5536	43.8982	47.2181	54.8899
20 hr	X20 = 93%	25.9706	31.1377	34.5587	38.8812	42.0879	45.2710	52.6264
18 hr	X18 = 90%	25.1328	30.1332	33.4439	37.6270	40.7303	43.8106	50.9288
16 hr	X16 = 87%	24.2951	29.1288	32.3291	36.3728	39.3726	42.3502	49.2312

14 hr	X14 = 83%	23.1780	27.7895	30.8427	34.7005	37.5624	40.4031	46.9677
12 hr	X12 = 79%	22.0610	26.4503	29.3563	33.0282	35.7521	38.4560	44.7042
10 hr	X10 = 73%	20.3855	24.4414	27.1267	30.5197	33.0368	35.5353	41.3089
8 hr	X8 = 64%	17.8722	21.4281	23.7824	26.7570	28.9637	31.1542	36.2160
6 hr	X6 = 56%	15.6382	18.7496	20.8096	23.4124	25.3433	27.2599	31.6890
5 hr	X5 = 50%	13.9627	16.7407	18.5800	20.9039	22.6279	24.3392	28.2938
4 hr	X4 = 44%	12.2872	14.7318	16.3504	18.3954	19.9126	21.4185	24.8985
3 hr	X3 = 38%	10.6116	12.7229	14.1208	15.8870	17.1972	18.4978	21.5033
2 hr	X2 = 31%	8.6569	10.3792	11.5196	12.9604	14.0293	15.0903	17.5421
1 hr	X1 = 25%	6.9813	8.3703	9.2900	10.4519	11.3140	12.1696	14.1469

Fuente: elaboración propia.

### Intensidad distribuida de precipitación para diferentes periodos de retorno

Una vez calculadas las precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración y periodos de retorno se proceden a calcular la Intensidad distribuida de precipitación para diferentes periodos de retorno con la ecuación 54 del capítulo III.

Tabla 17.

*Intensidad distribuida de precipitación para diferentes periodos de retorno ajustada a la distribución Gumbel – Estación CP Huánuco*

INTENSIDAD DISTRIBUIDA DE PRECIPITACION PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO - DISTRIBUCION GUMBEL								
Tiempo de duración		Intensidad de la lluvia (mm /hr) por Periodo de Retorno						
Hr	min	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años

24 hr	1440	1.1636	1.3951	1.5483	1.7420	1.8857	2.0283	2.3578
22 hr	1320	1.2313	1.4762	1.6384	1.8433	1.9954	2.1463	2.4950
20 hr	1200	1.2985	1.5569	1.7279	1.9441	2.1044	2.2635	2.6313
18 hr	1080	1.3963	1.6741	1.8580	2.0904	2.2628	2.4339	2.8294
16 hr	960	1.5184	1.8205	2.0206	2.2733	2.4608	2.6469	3.0769
14 hr	840	1.6556	1.9850	2.2031	2.4786	2.6830	2.8859	3.3548
12 hr	720	1.8384	2.2042	2.4464	2.7523	2.9793	3.2047	3.7253
10 hr	600	2.0386	2.4441	2.7127	3.0520	3.3037	3.5535	4.1309
8 hr	480	2.2340	2.6785	2.9728	3.3446	3.6205	3.8943	4.5270
6 hr	360	2.6064	3.1249	3.4683	3.9021	4.2239	4.5433	5.2815
5 hr	300	2.7925	3.3481	3.7160	4.1808	4.5256	4.8678	5.6588
4 hr	240	3.0718	3.6829	4.0876	4.5989	4.9781	5.3546	6.2246
3 hr	180	3.5372	4.2410	4.7069	5.2957	5.7324	6.1659	7.1678
2 hr	120	4.3284	5.1896	5.7598	6.4802	7.0147	7.5452	8.7711
1 hr	60	6.9813	8.3703	9.2900	10.4519	11.3140	12.1696	14.1469

Fuente: elaboración propia.

### **Determinación de las curvas intensidad-duración-frecuencia, curvas IDF**

Una vez calculadas las intensidades distribuidas de precipitación para diferentes periodos de retorno, se procederá a la determinación de las curvas IDF para diferentes periodos de retorno y tiempos de duración con la ecuación 55 propuesta en el capítulo III, para resolver la ecuación 55 se hará uso de las regresiones múltiples usando las ecuaciones 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68 y 69 a fin de encontrar los parámetros de ajuste k,m,n que rige la ecuación 55.

*Ecuaciones matemáticas de las curvas IDF.*

Tabla 18.

*Ecuaciones matemáticas de las curvas IDF, para las estaciones pluviométricas de la región de Huánuco*

Estación	Ubicación geográfica		Ecuación matemática	Ajustes	
	Latitud	Longitud		Smirnov-kolmogorov	Coef. Determ. R2
CP Huánuco	09° 57' 7.24"	76° 14' 54.80"	$I = \frac{58.4465 * T^{0.1255}}{t^{0.5377}}$	Se Acepta	97.2%
CO Jacas Chico	09° 53' 5.05"	76° 30' 3.37"	$I = \frac{84.2314 * T^{0.1088}}{t^{0.5377}}$	Se Acepta	97.03%
CO Dos de Mayo	09° 43' 1.00"	76° 46' 25.00"	$I = \frac{60.2305 * T^{0.1053}}{t^{0.5377}}$	Se Acepta	96.99%
CO San Rafael	10° 19' 45.27"	76° 10' 35.47"	$I = \frac{68.6106 * T^{0.1339}}{t^{0.5377}}$	Se Acepta	97.28%
CO Chaglla	09° 51' 01"	75° 54' 24"	$I = \frac{82.0920 * T^{0.1299}}{t^{0.5377}}$	Se Acepta	97.25%
CO Carpish	09° 42' 19.83"	76° 05' 39.10"	$I = \frac{153.3189 * T^{0.1280}}{t^{0.5377}}$	Se Acepta	97.23%
CP Tingo María	09° 18' 30.60"	76° 00' 1.59"	$I = \frac{234.2204 * T^{0.1403}}{t^{0.5377}}$	Se Acepta	97.34%
MAP Tulumayo	09° 48' 19.40"	76° 00' 33.97"	$I = \frac{232.3455 * T^{0.1147}}{t^{0.5377}}$	Se Acepta	97.09%
CO Aucayacu	08° 55' 47.53"	76° 06' 42.15"	$I = \frac{210.5477 * T^{0.0856}}{t^{0.5377}}$	Se Acepta	96.77%
CO La Divisoria	09° 12' 03.27"	75° 48' 50.15"	$I = \frac{218.6250 * T^{0.1047}}{t^{0.5377}}$	Se Acepta	96.99%
CO Puerto Inca	09° 22' 53.00"	74° 57' 39.00"	$I = \frac{267.9550 * T^{0.1260}}{t^{0.5377}}$	Se Acepta	97.21%

CO Tuornavista	08° 55' 38.98"	74° 42' 31.74"	$I = \frac{230.3821 * T^{0.0835}}{t^{0.5377}}$	Se Acepta	96.74%
----------------	----------------	----------------	--	-----------	--------

Fuente: elaboración propia.

I: Intensidad de precipitación (mm/hr)

T: Periodo de retorno (años)

t: Duración (min)

### *Tablas de las curvas IDF.*

Tabla 19.

*Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación CP Huánuco*

Frecuencia años	Duración en minutos											
	5	10	15	30	45	60	120	180	360	720	1080	1440
2	26.83	18.48	14.86	10.24	8.23	7.05	4.86	3.91	2.69	1.85	1.49	1.28
5	30.10	20.74	16.67	11.49	9.24	7.91	5.45	4.38	3.02	2.08	1.67	1.43
10	32.84	22.62	18.19	12.53	10.08	8.63	5.95	4.78	3.29	2.27	1.82	1.56
25	36.84	25.38	20.40	14.06	11.30	9.68	6.67	5.36	3.69	2.55	2.05	1.75
50	40.19	27.68	22.26	15.33	12.33	10.56	7.28	5.85	4.03	2.78	2.23	1.91
100	43.84	30.20	24.28	16.73	13.45	11.52	7.94	6.38	4.40	3.03	2.44	2.09
500	53.65	36.95	29.71	20.47	16.46	14.10	9.71	7.81	5.38	3.71	2.98	2.55

Fuente: elaboración propia.

Tabla 20.

*Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación CO Jacas Chico*

Frecuencia años	Duración en minutos											
	5	10	15	30	45	60	120	180	360	720	1080	1440
2	38.23	26.33	21.17	14.59	11.73	10.05	6.92	5.57	3.83	2.64	2.12	1.82
5	42.23	29.09	23.39	16.11	12.96	11.10	7.65	6.15	4.24	2.92	2.35	2.01
10	45.54	31.37	25.23	17.38	13.97	11.97	8.25	6.63	4.57	3.15	2.53	2.17
25	50.31	34.66	27.87	19.20	15.44	13.22	9.11	7.33	5.05	3.48	2.80	2.39
50	54.26	37.37	30.05	20.70	16.65	14.26	9.82	7.90	5.44	3.75	3.01	2.58
100	58.50	40.30	32.41	22.32	17.95	15.38	10.59	8.52	5.87	4.04	3.25	2.78
500	69.70	48.01	38.61	26.59	21.38	18.32	12.62	10.15	6.99	4.82	3.87	3.32

Fuente: elaboración propia.

Tabla 21.  
Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación CO Dos de Mayo

Frecuencia años	Duración en minutos											
	5	10	15	30	45	60	120	180	360	720	1080	1440
2	27.27	18.78	15.10	10.40	8.37	7.17	4.94	3.97	2.73	1.88	1.51	1.30
5	30.03	20.69	16.63	11.46	9.21	7.89	5.44	4.37	3.01	2.07	1.67	1.43
10	32.30	22.25	17.89	12.33	9.91	8.49	5.85	4.70	3.24	2.23	1.79	1.54
25	35.58	24.51	19.71	13.57	10.92	9.35	6.44	5.18	3.57	2.46	1.98	1.69
50	38.27	26.36	21.20	14.60	11.74	10.06	6.93	5.57	3.84	2.64	2.13	1.82
100	41.17	28.36	22.80	15.71	12.63	10.82	7.45	5.99	4.13	2.84	2.29	1.96
500	48.77	33.60	27.02	18.61	14.96	12.82	8.83	7.10	4.89	3.37	2.71	2.32

Fuente: elaboración propia.

Tabla 22.  
Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación CO San Rafael

Frecuencia años	Duración en minutos											
	5	10	15	30	45	60	120	180	360	720	1080	1440
2	31.68	21.83	17.55	12.09	9.72	8.33	5.74	4.61	3.18	2.19	1.76	1.51
5	35.82	24.68	19.84	13.67	10.99	9.42	6.49	5.22	3.59	2.47	1.99	1.70
10	39.31	27.08	21.77	15.00	12.06	10.33	7.12	5.72	3.94	2.72	2.18	1.87
25	44.44	30.61	24.61	16.96	13.63	11.68	8.05	6.47	4.46	3.07	2.47	2.11
50	48.76	33.59	27.01	18.60	14.96	12.82	8.83	7.10	4.89	3.37	2.71	2.32
100	53.50	36.85	29.63	20.41	16.42	14.06	9.69	7.79	5.37	3.70	2.97	2.55
500	66.37	45.72	36.76	25.32	20.36	17.44	12.02	9.66	6.66	4.59	3.69	3.16

Fuente: elaboración propia.

Tabla 23.  
Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación CO Chaglla

Frecuencia años	Duración en minutos											
	5	10	15	30	45	60	120	180	360	720	1080	1440
2	37.81	26.04	20.94	14.43	11.60	9.94	6.85	5.50	3.79	2.61	2.10	1.80
5	42.59	29.34	23.59	16.25	13.07	11.19	7.71	6.20	4.27	2.94	2.37	2.03

<b>10</b>	46.60	32.10	25.81	17.78	14.30	12.25	8.44	6.78	4.67	3.22	2.59	2.22
<b>25</b>	52.49	36.16	29.08	20.03	16.11	13.80	9.50	7.64	5.26	3.63	2.92	2.50
<b>50</b>	57.44	39.57	31.82	21.92	17.62	15.10	10.40	8.36	5.76	3.97	3.19	2.73
<b>100</b>	62.85	43.30	34.82	23.98	19.28	16.52	11.38	9.15	6.30	4.34	3.49	2.99
<b>500</b>	77.47	53.37	42.91	29.56	23.77	20.36	14.03	11.28	7.77	5.35	4.30	3.69

Fuente: elaboración propia.

Tabla 24.

*Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación CO Carpish*

Frecuencia años	Duración en minutos											
	5	10	15	30	45	60	120	180	360	720	1080	1440
<b>2</b>	70.51	48.57	39.06	26.91	21.63	18.53	12.77	10.27	7.07	4.87	3.92	3.36
<b>5</b>	79.29	54.62	43.92	30.25	24.33	20.84	14.36	11.54	7.95	5.48	4.40	3.77
<b>10</b>	86.64	59.68	47.99	33.06	26.58	22.77	15.69	12.61	8.69	5.99	4.81	4.12
<b>25</b>	97.42	67.11	53.96	37.17	29.89	25.61	17.64	14.18	9.77	6.73	5.41	4.64
<b>50</b>	106.46	73.33	58.97	40.62	32.66	27.98	19.28	15.50	10.68	7.35	5.91	5.07
<b>100</b>	116.33	80.14	64.44	44.39	35.69	30.58	21.06	16.94	11.67	8.04	6.46	5.54
<b>500</b>	142.94	98.47	79.18	54.54	43.86	37.57	25.88	20.81	14.34	9.88	7.94	6.80

Fuente: elaboración propia.

Tabla 25.

*Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación CP Tingo María*

Frecuencia años	Duración en minutos											
	5	10	15	30	45	60	120	180	360	720	1080	1440
<b>2</b>	108.65	74.84	60.18	41.46	33.33	28.56	19.67	15.82	10.90	7.51	6.04	5.17
<b>5</b>	123.56	85.11	68.44	47.14	37.91	32.48	22.37	17.99	12.39	8.54	6.86	5.88
<b>10</b>	136.18	93.81	75.43	51.96	41.78	35.79	24.66	19.83	13.66	9.41	7.57	6.48
<b>25</b>	154.87	106.68	85.78	59.09	47.52	40.71	28.04	22.55	15.53	10.70	8.60	7.37
<b>50</b>	170.69	117.58	94.55	65.13	52.37	44.86	30.91	24.85	17.12	11.79	9.48	8.12
<b>100</b>	188.13	129.59	104.21	71.78	57.72	49.45	34.06	27.39	18.87	13.00	10.45	8.95
<b>500</b>	235.81	162.44	130.61	89.97	72.35	61.98	42.69	34.33	23.65	16.29	13.10	11.22

Fuente: elaboración propia.

Tabla 26.  
*Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación MAP Tulumayo*

Frecuencia años	Duración en minutos											
	5	10	15	30	45	60	120	180	360	720	1080	1440
2	105.88	72.94	58.65	40.40	32.49	27.83	19.17	15.42	10.62	7.31	5.88	5.04
5	117.62	81.02	65.15	44.88	36.09	30.91	21.30	17.12	11.80	8.13	6.53	5.60
10	127.35	87.73	70.54	48.59	39.07	33.47	23.06	18.54	12.77	8.80	7.07	6.06
25	141.46	97.45	78.36	53.98	43.40	37.18	25.61	20.60	14.19	9.77	7.86	6.73
50	153.17	105.51	84.84	58.44	47.00	40.26	27.73	22.30	15.36	10.58	8.51	7.29
100	165.85	114.25	91.87	63.28	50.89	43.59	30.03	24.15	16.63	11.46	9.21	7.89
500	199.48	137.41	110.49	76.11	61.20	52.43	36.12	29.04	20.01	13.78	11.08	9.49

Fuente: elaboración propia.

Tabla 27.  
*Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación CO Aucayacu*

Frecuencia años	Duración en minutos											
	5	10	15	30	45	60	120	180	360	720	1080	1440
2	94.03	64.77	52.08	35.88	28.85	24.71	17.02	13.69	9.43	6.50	5.22	4.47
5	101.70	70.05	56.33	38.80	31.20	26.73	18.41	14.81	10.20	7.03	5.65	4.84
10	107.91	74.33	59.77	41.17	33.11	28.36	19.54	15.71	10.82	7.46	5.99	5.14
25	116.71	80.40	64.65	44.53	35.81	30.68	21.13	16.99	11.70	8.06	6.48	5.55
50	123.84	85.31	68.60	47.25	38.00	32.55	22.42	18.03	12.42	8.56	6.88	5.89
100	131.41	90.52	72.79	50.14	40.32	34.54	23.79	19.13	13.18	9.08	7.30	6.25
500	150.81	103.89	83.53	57.54	46.27	39.64	27.31	21.96	15.12	10.42	8.38	7.18

Fuente: elaboración propia.

Tabla 28.  
*Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación CO La Divisoria*

Frecuencia años	Duración en minutos											
	5	10	15	30	45	60	120	180	360	720	1080	1440
2	98.94	68.15	54.80	37.75	30.36	26.00	17.91	14.40	9.92	6.84	5.50	4.71
5	108.90	75.01	60.32	41.55	33.41	28.62	19.72	15.85	10.92	7.52	6.05	5.18
10	117.09	80.66	64.86	44.68	35.93	30.78	21.20	17.05	11.74	8.09	6.50	5.57
25	128.88	88.78	71.39	49.18	39.54	33.88	23.34	18.76	12.93	8.90	7.16	6.13

<b>50</b>	138.58	95.46	76.76	52.88	42.52	36.42	25.09	20.18	13.90	9.57	7.70	6.60
<b>100</b>	149.01	102.65	82.54	56.86	45.72	39.17	26.98	21.69	14.94	10.29	8.28	7.09
<b>500</b>	176.35	121.48	97.68	67.29	54.11	46.35	31.93	25.68	17.69	12.18	9.80	8.39

Fuente: elaboración propia.

Tabla 29.

*Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación CO Puerto Inca*

Frecuencia años	Duración en minutos											
	5	10	15	30	45	60	120	180	360	720	1080	1440
<b>2</b>	123.07	84.77	68.17	46.96	37.76	32.35	22.28	17.92	12.34	8.50	6.84	5.86
<b>5</b>	138.13	95.15	76.51	52.70	42.38	36.31	25.01	20.11	13.85	9.54	7.67	6.57
<b>10</b>	150.73	103.83	83.49	57.51	46.25	39.62	27.29	21.95	15.12	10.41	8.37	7.17
<b>25</b>	169.18	116.54	93.71	64.55	51.91	44.47	30.63	24.63	16.97	11.69	9.40	8.05
<b>50</b>	184.62	127.18	102.26	70.44	56.64	48.53	33.43	26.88	18.52	12.75	10.26	8.79
<b>100</b>	201.47	138.78	111.59	76.87	61.81	52.95	36.48	29.33	20.21	13.92	11.19	9.59
<b>500</b>	246.76	169.98	136.68	94.15	75.71	64.86	44.68	35.93	24.75	17.05	13.71	11.74

Fuente: elaboración propia.

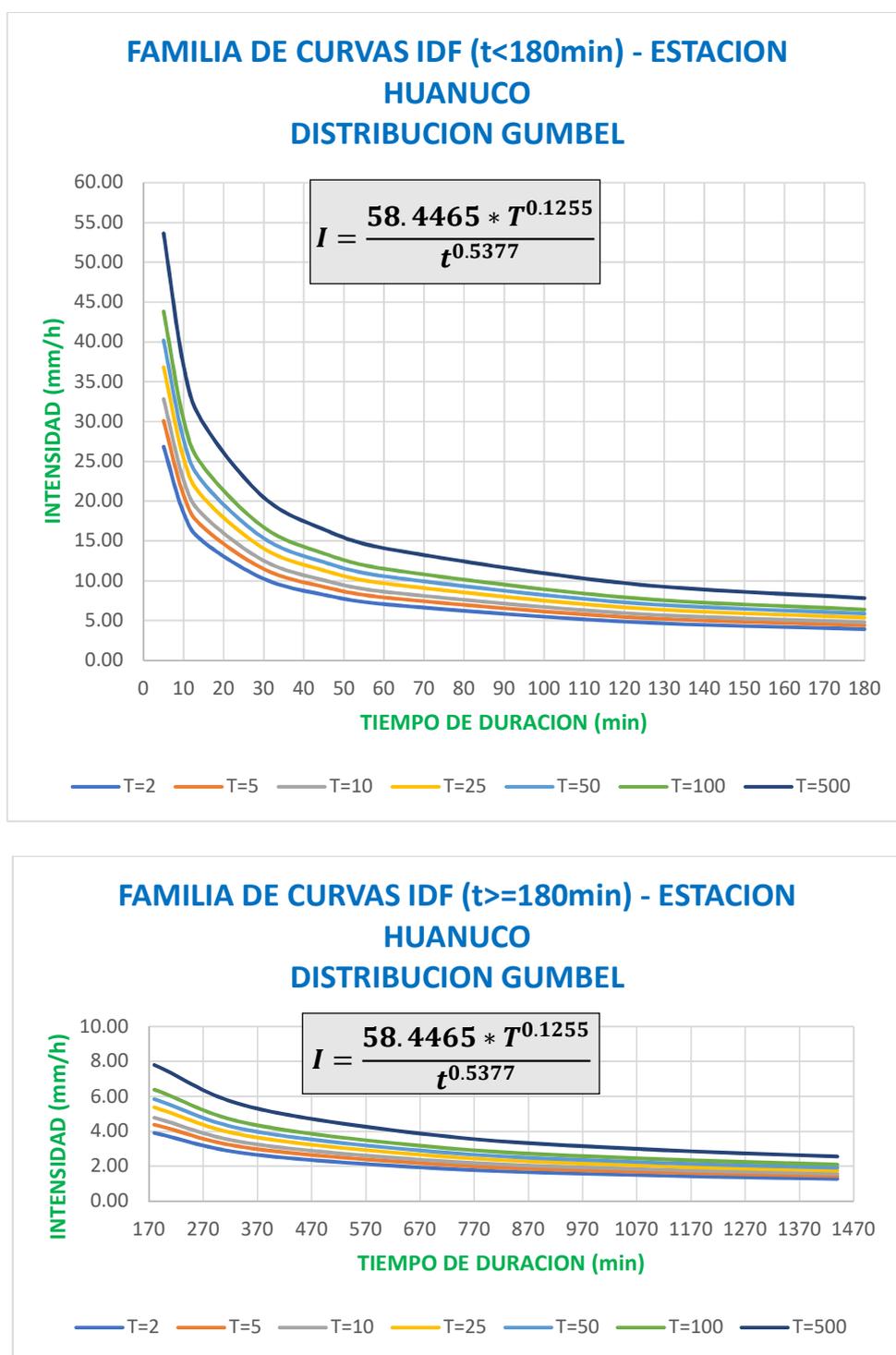
Tabla 30.

*Intensidades de precipitación (mm/h) - Estación CO Tuornavista*

Frecuencia años	Duración en minutos											
	5	10	15	30	45	60	120	180	360	720	1080	1440
<b>2</b>	102.74	70.77	56.91	39.20	31.52	27.00	18.60	14.96	10.30	7.10	5.71	4.89
<b>5</b>	110.91	76.40	61.44	42.32	34.03	29.15	20.08	16.15	11.12	7.66	6.16	5.28
<b>10</b>	117.52	80.96	65.10	44.84	36.06	30.89	21.28	17.11	11.79	8.12	6.53	5.59
<b>25</b>	126.87	87.40	70.28	48.41	38.93	33.35	22.97	18.47	12.72	8.77	7.05	6.04
<b>50</b>	134.44	92.61	74.47	51.30	41.25	35.34	24.34	19.57	13.48	9.29	7.47	6.40
<b>100</b>	142.45	98.13	78.90	54.35	43.71	37.44	25.79	20.74	14.29	9.84	7.91	6.78
<b>500</b>	162.95	112.25	90.26	62.18	50.00	42.83	29.50	23.72	16.34	11.26	9.05	7.75

Fuente: elaboración propia

*Gráficos de las familias de curvas IDF.*



**Figura 23.** Familia de curvas IDF, Estación CP Huánuco

Para los demás gráficos de la familia de curvas IDF de las demás estaciones ver el anexo II.

**Generación de mapas de intensidades máximas para diferentes periodos de retorno y tiempos de duración mediante el sistema de información geográfica SIG, usando el programa ArcGis**

***Interpolación de la información puntual utilizando SIG.***

Con los valores de intensidades de precipitación estimados para los distintos periodos de retorno y tiempos de duración en cada una de las estaciones pluviométricas se utilizarán técnicas de análisis espacial para poder interpolar la información puntual con el objeto de generar grillas de información pluviométrica.

En este proceso se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG), el cual es definido como un sistema asistido por computadora para la adquisición, almacenamiento, procesamiento, análisis y visualización de datos geográficos. En la actualidad, se encuentran disponibles una gran variedad de herramientas y paquetes computacionales para asistir estas tareas. El paquete computacional elegido fue el ArcGis versión 10.5, el cual permite generar un archivo vectorial o de tipo raster georreferenciado. Utilizando esta herramienta se realizó la interpolación espacial de los valores de intensidades máximas de precipitación estimados para los distintos periodos de retorno y tiempos de duración, a través del método geo estadístico de Kriging. Específicamente este método permite generar archivos raster a partir de la totalidad de los archivos vectoriales anteriormente creados con la información de intensidades máximas de precipitación estimados para los distintos periodos de retorno y tiempos para cada localización.

La figura 35 muestra el mapa raster interpolado por el método Kriging para la intensidad máxima de precipitación estimada para un período de retorno de 100 años y una duración de 5 minutos, en mm/hora.

Para mayor detalle y ver los demás mapas ir al anexo III.

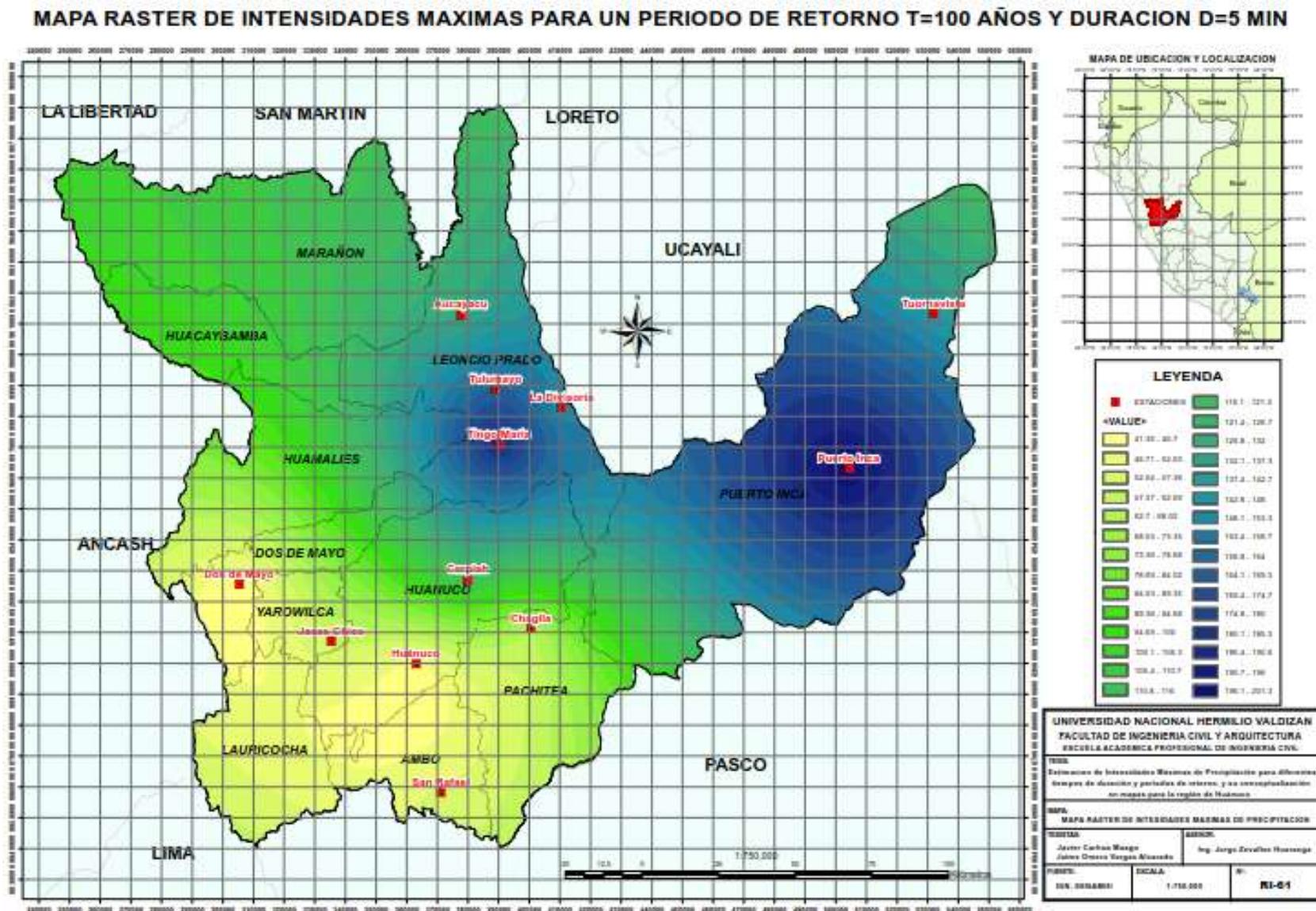


Figura 24. Mapa raster de intensidades máximas de precipitación para un período de retorno de 100 años y una duración de 5 minutos, en mm/hora.

***Generación de Mapas tendenciales de Intensidades máximas de precipitación para distintos periodos de retorno y tiempos de duración.***

En base a las interpolaciones obtenidas por el método de Kriging de las intensidades máximas de precipitación para distintos periodos de retorno y tiempos de duración, se generó una imagen de superficie tendencial que suaviza las variaciones locales observadas. Esta imagen tendencial se construyó en base a realizar un ajuste exponencial sobre la superficie obtenida anteriormente aplicando el método de Kriging.

La figura 36, muestra el mapa interpolado por el método Kriging para la intensidad máxima de precipitación estimada para un período de retorno de 100 años y una duración de 5 minutos, en mm/hora.

Para mayor detalle y ver los demás mapas ir al anexo III.

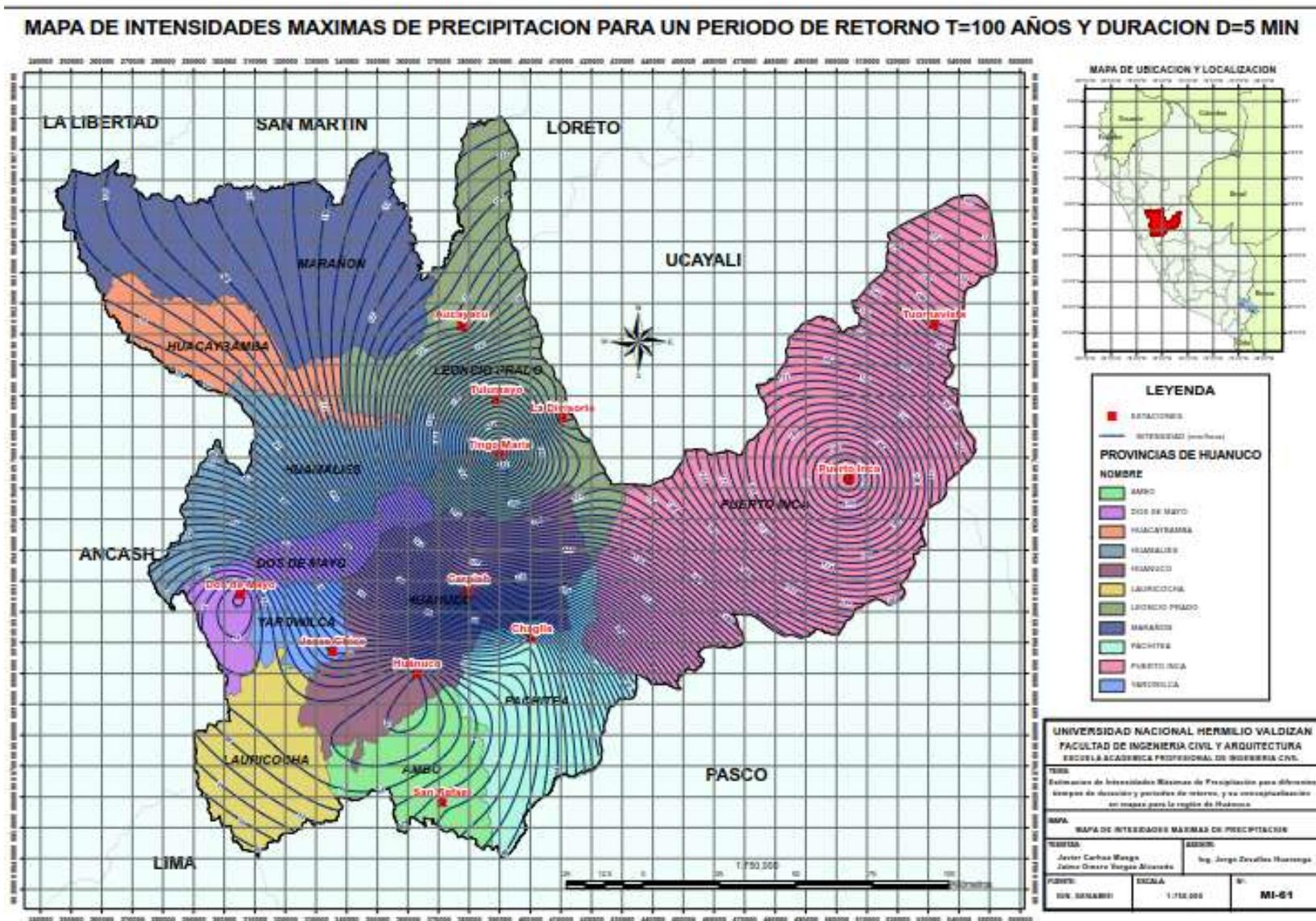


Figura 25. Mapa de intensidades máximas de precipitación para un período de retorno de 100 años y una duración de 5 minutos, en mm/hora.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

Se recopilaron y procesaron registros de 13 estaciones pluviométricas en la región de estudio, de las cuales se realizó una verificación exhaustiva de las hipótesis estadísticas para todas las estaciones pluviométricas, dando como resultado que los registros de 12 estaciones verificaron estas pruebas.

De las alternativas de función de distribución de probabilidad y de métodos de ajuste, se adoptó por la función de distribución GUMBEL con parámetros estimados por el método de bondad de ajuste, con el test de Kolmogorov – Smirnov y el coeficiente de Determinación de ajuste  $R^2$  para el diseño de las curvas IDF, ésta resulta ser apropiada al momento de trabajar con datos extremos como es el caso de las intensidades máximas de precipitación. Obteniéndose un total de 12 ecuaciones de curvas IDF.

El avance en el uso de herramientas computacionales basadas en un sistema de información geográfico SIG, en nuestro caso el software ArcGis, ha sido de gran ayuda para el tratamiento de la información, así como la obtención de mapas tendenciales de intensidades máximas de precipitación asociadas a diferentes períodos de retorno y tiempos de duración, mediante el método de interpolación espacial a través del método geo estadístico de Kriging.

Al momento de analizar las intensidades máximas de precipitación, se observó que para los distintos periodos de retornos las intensidades máximas de precipitaciones tienen un efecto más adverso cuando el tiempo de duración es la menor posible, por tanto, las intensidades máximas de precipitación más fuertes se dan en la primera hora del evento.

Con la presente investigación se pretende establecer la información sobre eventos de intensidades máximas de precipitación en la región Huánuco. De tal forma que considerando los

resultados de la investigación se pueda mejorar la calidad en la realización de estudios hídricos a la vez que ejecutar cualquier obra hidráulica con una mayor fiabilidad frente a eventos máximos.

## **RECOMENDACIONES**

Se proporciona un estudio actualizado de eventos máximos de precipitación. A la vez que se recomienda el uso de las ecuaciones encontradas en este estudio a fin de estimar intensidades en zonas con poca o deficiente información meteorológica.

Las ecuaciones halladas en este estudio, se recomienda que deben ser actualizadas, revisadas y/o complementadas en un plazo no menor de 5 años, con el fin de añadirle nueva información que podría modificar los resultados.

Se recomienda el incremento de puntos de monitoreo en la región, especialmente en las provincias de Lauricocha, Huamalies, Huacaybamba y Marañón, Esto a fin de conocer la ocurrencia de eventos extremos en dichas provincias.

Es de sumo interés, el impulsar diferentes estudios hidrometeorológicos en la región, pues permitirán mejorar el conocimiento científico de las lluvias y la manera en cómo se presentan. De tal forma que se recomienda emprender investigaciones posteriores, las cuales permitan ampliar y completar la información obtenida por la presente investigación, profundizando en la forma en la que se procesan los datos, así como en los usos de distintos métodos de interpolación estadística.

### Bibliografía

- Aparicio Mijares, F. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Balderas, México: Limusa.
- Cahuana Andía, A., & Yugar Morales, W. (2009). *Material de Apoyo Didáctico para la Enseñanza y Aprendizaje de la Asignatura de Hidrología civ-233*. Cochabamba, Bolivia: Universidad Mayor de San Simón, Facultad de Ciencias y Tecnología, Carrera de Ingeniería Civil.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Manual de Hidrología Aplicada*. Santa Fé de Bogota, Colombia: Mc Graw-Hill.
- Chow, V., Maidment, D., Saldarriaga, L., Juan, G., & Others. (1994). *Hidrología Aplicada*.
- Estrella Roldán, D. R. (2016). *Determinación de Curvas de Frecuencia y Zonificación de Intensidades en la Cuenca Media Alta del Río Paute*. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil.
- Linsley, R., Kohler, M., & Paulhus, P. (1988). *Hidrología para Ingenieros* (Segunda ed.). D.F. México: Mc Graw-Hill, Latinoamericana.
- Mallaupoma R., J., & Rodriguez Z., E. (1983). *Convenio de Cooperación Entre el Instituto Ítalo Latinoamericano (IILA), el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)*.
- Marquez Marquez, A., & Melara Benavides, R. C. (2014). *Propuesta de Actualización de Curvas Intensidad – Duración - Frecuencia en la Zona Oriental de el Salvador*. San Miguel, El Salvador, Centro America: Universidad de el Salvador, Facultad Multidisciplinaria Oriental, Departamento de Ingeniería y Arquitectura.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú. (2008). *Manual para el Diseño de Carreteras Pavimentadas de Bajo Volúmen de Transito*. Lima.

Minsiterio de Transportes y Comunicaciones del Perú. (2008). *Manual de Hidrologia, Hidráulica y Drenaje*. Lima.

Torres Quintana, E. A. (2016). *Determinación de Curvas IDF en la Región de Antofagasta*. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil.

Villón Bejar, M. (2002). *Hidrología* (Segunda ed.). Lima, Perú: Villón.

Villón Bejar, M. (2002). *Hidrología Estadística* (Segunda ed.). Lima, Perú: Villón.

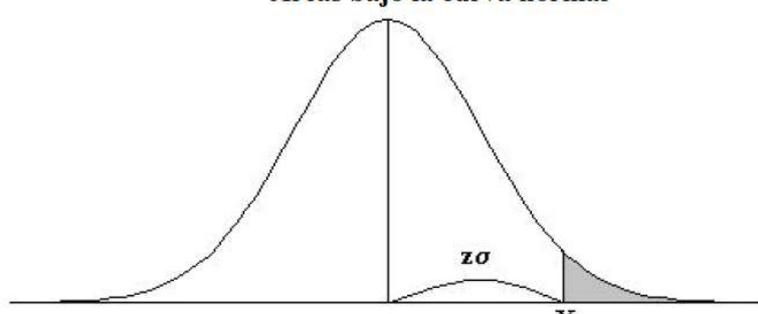
## ANEXOS

## ANEXO I: TABLAS DE DISTRIBUCION DE PROBABILIDAD

Tabla 31.

Tabla de Distribucion Normal

**Áreas bajo la curva normal**



**Ejemplo:**

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

$P [Z > 1] = 0.1587$   
 $P [Z > 1.96] = 0.0250$

Desv. normal x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
1.0	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
2.0	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0064
2.5	0.0062	0.0060	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054	0.0052	0.0051	0.0049	0.0048
2.6	0.0047	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0036
2.7	0.0035	0.0034	0.0033	0.0032	0.0031	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0026
2.8	0.0026	0.0025	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0019
2.9	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014
3.0	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010

Fuente: Dra. J. Marín Fernández. Tablas Estadísticas

Tabla 32.

*Tabla de valores de kt para la distribución gamma o pearson tipo III (asimetría positiva)*

Coeficiente de asimetría $C_r$ o $C_w$	Periodo de retorno en años						
	2	5	10	25	50	100	200
	Probabilidad de excedencia						
	0.50	0.20	0.10	0.04	0.02	0.01	0.005
3.0	-0.396	0.420	1.180	2.278	3.152	4.051	4.970
2.9	-0.390	0.440	1.195	2.277	3.134	4.013	4.909
2.8	-0.384	0.460	1.210	2.275	3.114	3.973	4.847
2.7	-0.376	0.479	1.224	2.272	3.093	3.932	4.783
2.6	-0.368	0.499	1.238	2.267	3.071	3.889	4.718
2.5	-0.360	0.518	1.250	2.262	3.048	3.845	4.652
2.4	-0.351	0.537	1.262	2.256	3.023	3.800	4.584
2.3	-0.341	0.555	1.274	2.248	2.997	3.753	4.515
2.2	-0.330	0.574	1.284	2.240	2.970	3.705	4.444
2.1	-0.319	0.592	1.294	2.230	2.942	3.656	4.372
2.0	-0.307	0.609	1.302	2.219	2.912	3.605	4.298
1.9	-0.294	0.627	1.310	2.207	2.881	3.553	4.223
1.8	-0.282	0.643	1.318	2.193	2.848	3.499	4.147
1.7	-0.268	0.660	1.324	2.179	2.815	3.444	4.069
1.6	-0.254	0.675	1.329	2.163	2.780	3.388	3.990
1.5	-0.240	0.690	1.333	2.146	2.743	3.330	3.910
1.4	-0.225	0.705	1.337	2.128	2.706	3.271	3.828
1.3	-0.210	0.719	1.339	2.108	2.666	3.211	3.745
1.2	-0.195	0.732	1.340	2.087	2.626	3.149	3.661
1.1	-0.180	0.745	1.341	2.066	2.585	3.087	3.575
1.0	-0.164	0.758	1.340	2.043	2.542	3.022	3.489
0.9	-0.148	0.769	1.339	2.018	2.498	2.957	3.401
0.8	-0.132	0.780	1.336	1.993	2.453	2.891	3.312
0.7	-0.116	0.790	1.333	1.967	2.407	2.824	3.223
0.6	-0.099	0.800	1.328	1.939	2.359	2.755	3.132
0.5	-0.083	0.808	1.323	1.910	2.311	2.686	3.041
0.4	-0.066	0.816	1.317	1.880	2.261	2.615	2.949
0.3	-0.050	0.824	1.309	1.849	2.211	2.544	2.856
0.2	-0.033	0.830	1.301	1.818	2.159	2.472	2.763
0.1	-0.017	0.836	1.292	1.785	2.107	2.400	2.670
0.0	0	0.842	1.282	1.751	2.054	2.326	2.576

Fuente: U.S. Water Resources Council (1981)

Tabla 33.

*Tabla de valores de kt para la distribución gamma o pearson tipo III (asimetría negativa)*

Coeficiente de asimetría $C_s$ o $C_w$	Periodo de retorno en años						
	2	5	10	25	50	100	200
	Probabilidad de excedencia						
	0.50	0.20	0.10	0.04	0.02	0.01	0.005
-0.1	0.017	0.846	1.270	1.716	2.000	2.252	2.482
-0.2	0.033	0.850	1.258	1.680	1.945	2.178	2.388
-0.3	0.050	0.853	1.245	1.643	1.890	2.104	2.294
-0.4	0.066	0.855	1.231	1.606	1.834	2.029	2.201
-0.5	0.083	0.856	1.216	1.567	1.777	1.955	2.108
-0.6	0.099	0.857	1.200	1.528	1.720	1.880	2.016
-0.7	0.116	0.857	1.183	1.488	1.663	1.806	1.926
-0.8	0.132	0.856	1.166	1.448	1.606	1.733	1.837
-0.9	0.148	0.854	1.147	1.407	1.549	1.660	1.749
-1.0	0.164	0.852	1.128	1.366	1.492	1.588	1.664
-1.1	0.180	0.848	1.107	1.324	1.435	1.518	1.581
-1.2	0.195	0.844	1.086	1.282	1.379	1.449	1.501
-1.3	0.210	0.838	1.064	1.240	1.324	1.383	1.424
-1.4	0.225	0.832	1.041	1.198	1.270	1.318	1.351
-1.5	0.240	0.825	1.018	1.157	1.217	1.256	1.282
-1.6	0.254	0.817	0.994	1.116	1.166	1.197	1.216
-1.7	0.268	0.808	0.970	1.075	1.116	1.140	1.155
-1.8	0.282	0.799	0.945	1.035	1.069	1.087	1.097
-1.9	0.294	0.788	0.920	0.996	1.023	1.037	1.044
-2.0	0.307	0.777	0.895	0.959	0.980	0.990	0.995
-2.1	0.319	0.765	0.869	0.923	0.939	0.946	0.949
-2.2	0.330	0.752	0.844	0.888	0.900	0.905	0.907
-2.3	0.341	0.739	0.819	0.855	0.864	0.867	0.869
-2.4	0.351	0.725	0.795	0.823	0.830	0.832	0.833
-2.5	0.360	0.711	0.771	0.793	0.798	0.799	0.800
-2.6	0.368	0.696	0.747	0.764	0.768	0.769	0.769
-2.7	0.376	0.681	0.724	0.738	0.740	0.740	0.741
-2.8	0.384	0.666	0.702	0.712	0.714	0.714	0.714
-2.9	0.390	0.651	0.681	0.683	0.689	0.690	0.690
-3.0	0.396	0.636	0.666	0.666	0.666	0.667	0.667

Fuente: U.S. Water Resources Council (1981).