

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTIMACIÓN DE LAS INTENSIDADES Y DURACIONES PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO DE LA PRECIPITACIÓN EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDROMETEOROLÓGICA DE LA UCV.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Abraham Salcedo.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela por el T.S.U.:
Bastidas Pacheco, Alvaro Antonio
Para optar al título de Ingeniero Hidrometeorologista.

Caracas, 2010.

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERÍA

ACTA

Los suscritos, miembros del Jurado designado por el Consejo de la Facultad de Ingeniería para examinar el Trabajo Especial de Grado Presentado por ALVARO BASTIDAS No. C.I. N°. 15.416.952, bajo el título **“ESTIMACIÓN DE LAS INTENSIDADES Y DURACIONES PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO DE LA PRECIPITACIÓN EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDROMETEOROLÓGICA DE LA UCV.”**a los fines de optar al Título de Ingeniero Hidrometeorologista dejamos constancia de lo siguiente. El trabajo fue presentado en el Salón de conferencias del Departamento de Ingeniería Sanitaria el día martes 27 de julio de 2010, recibiendo la máxima calificación. Adicionalmente recomendamos que se le otorgue Mención Honorífica al considerar que el trabajo representa un aporte significativo en la determinación de las Intensidades y duraciones para diferentes períodos de retorno de la precipitación en el área de la influencia de la estación meteorológica del Departamento de Ingeniería Hidrometeorológica de la U.C.V.

En fe de lo cual se levanta la presente acta, en original y tres copias, en Caracas a los 28 días del mes de julio de 2010.



Prof. ABRAHAM SALCEDO
Tutor



Prof. MARCO POLO RIVERO
Jurado



Prof. VALDEMAR ANDRADE
Jurado

DEDICATORIA

*Siempre han estado conmigo, he sentido su apoyo
Su amistad, cariño y comprensión
Me han hecho dar un paso al frente
Muchas gracias Ruby (mamá), Alvaro (Papá), Camilo (Hermano).*

Alvaro Bastidas

AGRADECIMIENTOS

A todas las personas que colaboraron en la realización de este trabajo, muchas gracias por su solida y oportuna mano amiga, Alexander Salcedo, Lic Palacio, al profesor Amador, Abraham Salcedo profesor y tutor de este trabajo, y muy especial a la profesora Lesly Bravo. Por su valioso aporte.

Bastidas P. Alvaro A.

ESTIMACIÓN DE LAS INTENSIDADES Y DURACIONES PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO DE LA PRECIPITACIÓN EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDROMETEOROLÓGICA DE LA UCV

Tutor Académico: Prof. Abraham Salcedo.

Trabajo Especial de Grado. Caracas. UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil (Hidrometeorología), 2010, 146 Pág.

Palabras Clave: Eventos extremos, periodo de retorno, series de excedencias, series anuales, Gumbel, distribución General de Valores Extremos, distribución General de Pareto, curvas IDF, intensidad de precipitación.

Resumen: La estimación de la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos en climatología e hidrología (eventos de precipitación extrema y crecidas) es un tema de primer interés, tanto teórico como práctico. Por un lado, la obtención de estadísticos sobre el carácter más o menos extremo de las precipitaciones ayuda a caracterizar el clima o el régimen hídrico de un lugar. Por otro lado, los sucesos extremos de precipitación son un importante factor de riesgo para la actividad humana, y en ocasiones llegan a convertirse en verdaderas catástrofes con saldo en vidas humanas. Es por ello que el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos de intensidades de precipitación es parte importante en el diseño y planificación de cualquier obra civil o infraestructura. Aunque la bibliografía es abundante en trabajos sobre el tema, en la práctica el método clásico de series de máximos anuales ajustados a una distribución Gumbel sigue

siendo predominante. En este trabajo se expone el uso de series anuales y series de excedencias, esta ultima permiten utilizar más información de las series originales. Se explica la utilización de las distribuciones bi- y triparamétricas más utilizadas en la bibliografía (Gumbel, General de Valores Extremos, y General de Pareto), y se comparan los resultados obtenidos a partir de los datos de precipitación del pluviógrafo de la estación meteorológica UCV. Finalmente se obtienen las curvas de intensidad duración y frecuencia para diferentes periodo de retorno de la estación de estudio.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN.....	iii
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS / FIGURAS.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPITULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Marco referencial.....	5
1.3 Objetivos.....	7
1.3.1 General.....	7
1.3.2 Específicos.....	7

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Características de la precipitación.....	9
2.2 Mecanismos físicos responsables de la distribución anual de la precipitación en Venezuela.....	10
2.3 Zona de convergencia intertropical (ITCZ).....	11
2.3.1 Desplazamiento.....	11
2.3.2 Su influencia sobre Venezuela.....	12
2.4 Medida de la precipitación.....	12
2.4.1 Unidades en que se mide la precipitación.....	13

2.4.2	Aparatos de medida y registro.....	13
2.4.3	Descripción del Pluviógrafo.....	13
2.5	Lluvia de diseño.....	14
2.6	Duración.....	14
2.7	Magnitud e intensidad.....	15
2.8	Hietograma de la tormenta.....	16
2.9	Variación espacial.....	16
2.10	Probabilidad de ocurrencia.....	16
2.11	Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia de las Lluvias.....	17
2.11.1	Obtención de las curvas IDF.....	18
2.12	Análisis de eventos extremos.....	18
2.12.1	Análisis de frecuencia de variables aleatorias de valores máximos.....	19
2.12.2	Desarrollo de funciones de distribución específicas.....	29
2.13	El Rol de la teoría de Valores Extremos.....	21
2.13.1	Formulación del Modelo.....	22
2.13.2	Tipos de Distribuciones Extremas.....	24
2.14	R-Project.....	25
2.14.1	Historia.....	25
2.14.2	Características.....	26
2.14.3	Extensión y paquetes.....	27
2.15	Desarrollo del sistema de Vectorización.....	27
2.15.1	Digitalización.....	27
2.15.2	Control y carga de imagen de bandas digitalizadas.....	28
2.15.3	Vectorización.....	28

CAPITULO III

MÉTODO

3.1 Selección de la estación.....	31
3.2 Recolección de la información.....	31
3.3 Características de la precipitación en la estación meteorológica UCV.....	32
3.3.1 Precipitación y distribución anual de las llluvias de 1965 a 2009.....	33
3.3.2 Precipitación y distribución mensual de las llluvias de 1965 a 2009.....	33
3.3.3 Distribución de las precipitaciones a lo largo del día.....	33
3.3.4 Duración de las precipitaciones.....	33
3.3.5 Altura de agua de las precipitaciones.....	34
3.4 Selección de las Intensidades máximas.....	34
3.5 Tratamiento de la información requerida.....	34
3.6 Ajuste de los datos en función de la distribución generalizada De Extremos y Pareto.....	36
3.6.1 Distribución generalizada de extremos (DGE).....	36
3.6.2 Nivel y periodo de retorno para la distribución Generalizada de Extremos.....	38
3.6.3 Inferencias en la Distribución Generalizada De Extremos.....	38
3.6.4 Distribución Generalizada de Pareto (DGP).....	39
3.6.5 Inferencias en la Distribución Generalizada De Pareto.....	42
3.7 Método de Gumbel.....	43
3.8 Pruebas de Ajustes.....	44
3.8.1 Kolmogorv-Smirnov.....	45

CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Precipitación y distribución anual de las lluvias de 1965 a 2009, estación meteorológica UCV.....	47
4.2 precipitación y distribución mensual de las lluvias de 1965 a 2009.....	54
4.3 Distribución de las precipitaciones a lo largo del día.....	53
4.4 Duraciones de las precipitaciones.....	55
4.5 Cantidad de agua de las precipitaciones.....	56
4.6 Análisis exploratorio de los datos.....	58
4.7 Prueba de datos dudosos.....	61
4.8 Ajuste de la Distribución Generalizada de Extremos (DGE).....	63
4.8.1 Intensidad para 5 minutos.....	63
4.8.2 Intensidad para 10 minutos.....	65
4.8.3 Intensidad para 20 minutos.....	67
4.8.4 Intensidad para 30 minutos.....	69
4.8.5 Intensidad para 45 minutos.....	71
4.8.6 Intensidad para 60 minutos.....	73
4.8.7 Intensidad para 2 horas.....	75
4.8.8 Intensidad para 3 horas.....	77
4.8.9 Intensidad para 6 horas.....	79
4.9 Resumen general de las intensidades con la DGE.....	81
4.10 Ajuste de la Distribución Generalizada de Extremos (DGE).....	82
4.10.1 Intensidad para 5 minutos.....	82
4.10.2 Intensidad para 10 minutos.....	85
4.10.3 Intensidad para 20 minutos.....	88
4.10.4 Intensidad para 30 minutos.....	91
4.10.5 Intensidad para 45 minutos.....	93
4.10.6 Intensidad para 60 minutos.....	97

4.10.7 Intensidad para 2 horas.....	100
4.10.8 Intensidad para 3 horas.....	103
4.10.9 Intensidad para 6 horas.....	106
4.11 Resumen de las intensidades para la DGP.....	109
4.12 Prueba de bondad de ajuste.....	110
4.13 Análisis de resultados.....	111

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.....	120
5.2 Recomendaciones.....	122
 BIBLIOGRAFÍA.....	 123
 ANEXOS.....	 125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1	Precipitaciones Mensuales de 1965 a 2010.....	51
Tabla 4.2	Descriptivos de las Precipitaciones Mensuales de 1965 a 2009.....	52
Tabla 4.3	Promedios Mensuales de precipitación.....	53
Tabla 4.4	Prueba de detección de valores dudosos serie de máximos.....	62
Tabla 4.5	Prueba de detección de valores dudosos serie de excedencias.....	62
Tabla 4.6	Intensidades para 5 minutos de Duración DGE.....	64
Tabla 4.7	Intensidades para 10 minutos de Duración DGE.....	66
Tabla 4.8	Intensidades para 20 minutos de Duración DGE.....	68
Tabla 4.9	Intensidades para 30 minutos de Duración DGE.....	70
Tabla 4.10	Intensidades para 45 minutos de Duración DGE.....	72
Tabla 4.11	Intensidades para 60 minutos de Duración DGE.....	74
Tabla 4.12	Intensidades para 2 horas de Duración DGE.....	76
Tabla 4.13	Intensidades para 3 horas de Duración DGE.....	78
Tabla 4.14	Intensidades para 6 horas de Duración DGE.....	80
Tabla 4.15	Resumen de las intensidades para la DGE	81
Tabla 4.16	Intensidades para 5 minutos de Duración DGP.....	85
Tabla 4.17	Intensidades para 10 minutos de Duración DGP.....	88
Tabla 4.18	Intensidades para 20 minutos de Duración DGP.....	91
Tabla 4.19	Intensidades para 30 minutos de Duración DGP.....	94
Tabla 4.20	Intensidades para 45 minutos de Duración DGP.....	97
Tabla 4.21	Intensidades para 60 minutos de Duración DGP.....	100
Tabla 4.22	Intensidades para 2 horas de Duración DGP.....	103
Tabla 4.23	Intensidades para 3 horas de Duración DGP.....	106
Tabla 4.24	Intensidades para 6 horas de Duración DGP.....	108
Tabla 4.25	Resumen de las intensidades para la DGP	109
Tabla 4.26	Prueba de Kolmogorov para la DGE.	110
Tabla 4.27	Prueba de Kolmogorov para la DGP.	111
Tabla 4.28	Resumen de las intensidades para Gumbel Factor Frecuencia.....	115

Tabla A.1 Estadística descriptiva Intensidades serie total.....	140
Tabla A.2 Estadística descriptiva Intensidades máximas.....	140

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 2.1 Desplazamiento de ITCZ.....	11
Figura 2.2 Pluviógrafo tipo Hellmann.....	14
Figura 2.3 Datos de la muestra ejemplo y su función densidad F.....	21
Figura A.1 Bandas diarias.....	126
Figura A.2 Bandas semanales.....	126
Figura A.3 Análisis exploratorio de los datos series de máximos (Intensidad para 5 minutos).....	126
Figura A.4 Análisis exploratorio de los datos series de máximos (Intensidad para 10 minutos).....	127
Figura A.5 Análisis exploratorio de los datos series de máximos (Intensidad para 20 minutos).....	127
Figura A.6 Análisis exploratorio de los datos series de máximos (Intensidad para 30 minutos).....	127
Figura A.7 Análisis exploratorio de los datos series de máximos (Intensidad para 45 minutos).....	128
Figura A.8 Análisis exploratorio de los datos series de máximos (Intensidad para 60 minutos).....	128
Figura A.9 Análisis exploratorio de los datos series de máximos (Intensidad para 2 horas).....	128
Figura A.10 Análisis exploratorio de los datos (Intensidad para 3 horas).....	129
Figura A.11 Análisis exploratorio de los datos series de máximos (Intensidad para 6 horas).....	129
Figura A.12 Análisis exploratorio de los datos serie de excedencias (Intensidad para 5 minutos).....	129
Figura A.13 Análisis exploratorio de los datos serie de excedencias (Intensidad para 10 minutos).....	130
Figura A.14 Análisis exploratorio de los datos serie de excedencias	

(Intensidad para 20 minutos).....	130
Figura A.15 Análisis exploratorio de los datos serie de excedencias	
(Intensidad para 30 minutos).....	130
Figura A.16 Análisis exploratorio de los datos serie de excedencias	
(Intensidad para 45 minutos).....	131
Figura A.17 Análisis exploratorio de los datos serie de excedencias	
(Intensidad para 1 hora).....	131
Figura A.18 Análisis exploratorio de los datos serie de excedencias	
(Intensidad para 2 horas).....	131
Figura A.19 Análisis exploratorio de los datos serie de excedencias	
(Intensidad para 3 horas).....	132
Figura A.20 Análisis exploratorio de los datos serie de excedencias	
(Intensidad para 6 horas).....	132
Figura A.21 Records Globales de precipitación.....	141

ÍNDICE DE GRÁFICAS.

Gráfica 4.1 Precipitación Anual.....	48
Gráfica 4.2 Fluctuación de la precipitación Anual.....	49
Gráfica 4.3 Distribución promedio Mensual de las precipitaciones.....	52
Gráfica 4.4 Precipitación promedio Mensual Vs. Porcentaje Acumulado.....	53
Gráfica 4.5 Hora de inicio de las Lluvias.....	54
Gráfica 4.6 Duración de las Lluvias.....	55
Gráfica 4.7 Altura (mm) de las Lluvias.....	56
Gráfica 4.8 Precipitación máxima diaria observada.....	57
Gráfica 4.9 Precipitación Vs. Duración.....	58
Gráfica 4.10 AED series de máximos anuales para intensidad de 5 minutos.....	59
Gráfica 4.11 AED series de Excedencias para intensidad de 5 minutos.....	60
Gráfica 4.12 Series de tiempo para intensidades maximas de 5 minutos.....	61

Gráfica 4.13 Series de tiempo para intensidades de 5 minutos.....	61
Gráfica 4.14 Diagnóstico DGE para Intensidad de 5 min.....	63
Gráfica 4.15 Diagnóstico DGE para Intensidad de 10 min.....	65
Gráfica 4.16 Diagnóstico DGE para Intensidad de 20 min.....	67
Gráfica 4.17 Perfil de log-verosimilitud del parámetro de forma para Intensidad de 20 min.....	68
Gráfica 4.18 Diagnóstico DGE para Intensidad de 30 min.....	69
Gráfica 4.19 Perfil de log-verosimilitud del parámetro de forma para Intensidad de 30 min.....	70
Gráfica 4.20 Diagnóstico DGE para Intensidad de 45 min.....	71
Gráfica 4.21 Perfil de log-verosimilitud del parámetro de forma para Intensidad de 45 min.....	72
Gráfica 4.22 Diagnóstico DGE para Intensidad de 60 min.....	73
Gráfica 4.23 Perfil de log-verosimilitud del parámetro de forma para Intensidad de 60 min.....	74
Gráfica 4.24 Diagnóstico DGE para Intensidad de 2 Horas.....	75
Gráfica 4.25 Perfil de log-verosimilitud del parámetro de forma para Intensidad de 2 Horas.....	76
Gráfica 4.26 Diagnóstico DGE para Intensidad de 3 Horas.....	77
Gráfica 4.27 Perfil de log-verosimilitud del parámetro de forma para Intensidad de 3 Horas.....	78
Gráfica 4.28 Diagnóstico DGE para Intensidad de 3 Horas.....	79
Gráfica 4.29 Perfil de log-verosimilitud del parámetro de forma para Intensidad de 6 Horas.....	80
Gráfica 4.30 Curvas de Intensidad duración y frecuencia estación UCV modelo DGE	81
Gráfica 4.31 Media de los Excesos para la intensidad de 5 minutos.....	82
Gráfica 4.32 Variación de los parámetros para la intensidad de 5 minutos.....	83
Gráfica 4.33 Diagnóstico DGP para Intensidad de 5 minutos.....	84

Gráfica 4.34 Media de los Excesos para la intensidad de 10 minutos.....	85
Gráfica 4.35 Variación de los parámetros para la intensidad de 10 minutos.....	86
Gráfica 4.36 Diagnóstico DGP para Intensidad de 10 minutos.....	87
Gráfica 4.37 Media de los Excesos para la intensidad de 20 minutos.....	88
Gráfica 4.38 Variación de los parámetros para la intensidad de 20 minutos.....	89
Gráfica 4.39 Diagnóstico DGP para Intensidad de 20 minutos.....	90
Gráfica 4.40 Media de los Excesos para la intensidad de 30 minutos.....	91
Gráfica 4.41 Variación de los parámetros para la intensidad de 30 minutos.....	92
Gráfica 4.42 Diagnóstico DGP para Intensidad de 30 minutos.....	93
Gráfica 4.43 Media de los Excesos para la intensidad de 45 minutos.....	94
Gráfica 4.44 Variación de los parámetros para la intensidad de 45 minutos.....	95
Gráfica 4.45 Diagnóstico DGP para Intensidad de 45 minutos.....	96
Gráfica 4.46 Media de los Excesos para la intensidad de 60 minutos.....	97
Gráfica 4.47 Variación de los parámetros para la intensidad de 60 minutos.....	98
Gráfica 4.48 Diagnóstico DGP para Intensidad de 60 minutos.....	99
Gráfica 4.49 Media de los Excesos para la intensidad de 2 horas.....	100
Gráfica 4.50 Variación de los parámetros para la intensidad de 2 horas.....	101
Gráfica 4.51 Diagnóstico DGP para Intensidad de 2 horas.....	102
Gráfica 4.52 Media de los Excesos para la intensidad de 3 horas.....	103
Gráfica 4.53 Variación de los parámetros para la intensidad de 3 horas.....	104
Gráfica 4.54 Diagnóstico DGP para Intensidad de 2 horas.....	105
Gráfica 4.55 Media de los Excesos para la intensidad de 6 horas.....	106
Gráfica 4.56 Variación de los parámetros para la intensidad de 6 horas.....	107
Gráfica 4.57 Diagnóstico DGP para Intensidad de 6 horas.....	108
Gráfica 4.58 Curvas de Intensidad duración y frecuencia	
Estación UCV modelo DGP	109
Gráfica 4.59 Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia INOS.....	112
Gráfica 4.60 Curvas ID FINOS Vs. Curvas IDF Distribución Generalizada de extremos.....	113

Grafica 4.61 Curvas ID FINOS Vs. Curvas IDF Distribución Generalizada de Pareto.....	113
Grafica 4.59 Ajuste de los modelos propuestos respectos a los datos para una duración de 5 minutos.....	116
Grafica 4.60 Ajuste de los modelos propuestos respectos a los datos para una duración de 10 minutos.....	116
Grafica 4.61 Ajuste de los modelos propuestos respectos a los datos para una duración de 20 minutos.....	117
Grafica 4.62 Ajuste de los modelos propuestos respectos a los datos para una duración de 30 minutos.....	117
Grafica 4.63 Ajuste de los modelos propuestos respectos a los datos para una duración de 45 minutos.....	118
Grafica A.1 Intensidades para 10 minutos (series de excedencias).....	132
Grafica A.2 Intensidades para 20 minutos (series de excedencias).....	133
Grafica A.3 Intensidades para 30 minutos (series de excedencias).....	133
Grafica A.4 Intensidades para 45 minutos (series de excedencias).....	133
Grafica A.5 Intensidades para 1 hora (series de excedencias).....	134
Grafica A.6 Intensidades para 2 horas (series de excedencias).....	134
Grafica A.7 Intensidades para 3 horas (series de excedencias).....	134
Grafica A.8 Intensidades para 6 horas (series de excedencias).....	135
Grafica A.9 Intensidades máximas para 5 minutos.....	135
Grafica A.10 Intensidades máximas para 10 minutos.....	135
Grafica A.11 Intensidades máximas para 20 minutos.....	136
Grafica A.12 Intensidades máximas para 30 minutos.....	136
Grafica A.13 Intensidades máximas para 45 minutos.....	136
Grafica A.14 Intensidades máximas para 1 Hora.....	137
Grafica A.15 Intensidades máximas para 2 Horas.....	137
Grafica A.16 Intensidades máximas para 3 Horas.....	137
Grafica A.17 Intensidades máximas para 6 Horas.....	138

Grafica A.18 Ajuste de los modelos propuestos respectos a los datos para una duración de 1 hora.....	138
Grafica A.19 Ajuste de los modelos propuestos respectos a los datos para una duración de 2 hora.....	138
Grafica A.20 Ajuste de los modelos propuestos respectos a los datos para una duración de 3 hora.....	139
Grafica A.21 Ajuste de los modelos propuestos respectos a los datos para una duración de 6 hora.....	139

INTRODUCCIÓN.

La estimación de intensidad de precipitación resulta fundamental en el diseño de infraestructuras, obras hidráulicas y en la planificación de usos de suelo. Con frecuencia no se encuentran disponibles estaciones pluviométricas en la zona de estudio, pero de igual forma se requiere el dato de intensidad máxima anual para una duración y período de retorno dado, de aquí la importancia las curvas IDF.

Las curvas IDF actualmente utilizadas en el país fueron propuestas en los años setenta por el Ministerio de Obras Públicas a través del Atlas de Profundidad Duración y Frecuencia de Lluvias en Venezuela, lo que parece adecuado plantear una actualización de la metodología, incorporando nuevas técnicas al estudio de esta variable.

En este trabajo se presentan los resultados de esta actualización, en el que se ha utilizado el método de valores extremos para el análisis de frecuencias de intensidades máximas a través de la Distribución Generalizada de Extremos, para series de máximos anuales y Distribución Generalizada de Pareto para series de excedencias. Los datos fueron analizados de bandas pluviométricas digitalizadas y vectorizadas, de la estación meteorológica de la Universidad Central de Venezuela

Se cuenta para esta investigación con un registro de 42 años, con los que se trató de obtener para el área de influencia de la estación meteorológica, la relación entre la intensidad media de la precipitación correspondiente al intervalo en que la lluvia es más intensa, su duración y frecuencia.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.

1.1.- Planteamiento del problema.

Los estudios y proyectos destinados al manejo del agua pluvial requieren de la disponibilidad de información básica apropiada y consistente para su desarrollo, siendo el conocimiento de las precipitaciones máximas en el área de interés del proyecto uno de los puntos elementales para el entendimiento de los procesos hidrológicos.

Para lograr esto es imprescindible estudiar las precipitaciones y conocer su distribución temporal y espacial en el tiempo, ya que estas son motivo de interés para diversos fines, por ejemplo: meteorológico, agrícola, hidrológico y sobre todo, para un adecuado diseño y dimensionamiento de las obras hidráulicas como es el caso de los sistemas de drenajes urbanos. Por esto, conocer las intensidades de precipitación en un sitio de interés para distintos períodos de retorno se hace fundamental para estimar los caudales de diseño en obras de diversa índole (ej., drenajes viales y urbanos, puentes, control de inundaciones, pequeñas presas, etc.).

Los sistemas de drenaje urbano que se utilizan para desalojar las aguas pluviales colapsan frecuentemente, situación que ocasiona el incumplimiento con el objetivo secundario de un sistema de drenaje, el de garantizar el normal desenvolvimiento de la vida diaria en las poblaciones; es decir, el paso de personas y vehículos para el momento de estar lloviendo, y en algunos casos el no cumplir con el objetivo primario de proteger la vida y las propiedades de las personas que habitan en el medio urbano. Es conveniente resaltar que los sistemas de drenajes forman parte de la planificación urbana; por lo tanto son parte de los proyectos de aprovechamiento de los recursos hidráulicos. Por tal

Capítulo I: **Fundamentos de la investigación.**

motivo, debe haber una concordancia entre los sistemas de Drenaje Urbano y el Control de Inundaciones, no un incremento de los problemas.

El análisis del colapso de los sistemas de drenaje implica el estudio de varios factores que conviene tomar en cuenta, como son la falta de mantenimiento oportuno, situación que resta eficiencia a los sistemas de drenaje, información desactualizada y escasa para determinar los valores de intensidades de lluvia sobre todo para intervalos temporales menores de una hora, como suelen ser los tiempos de concentración en cuencas urbanas, metodologías inadecuadas en los cálculos de las intensidades duración y periodo de retorno de las precipitaciones, o variaciones en el comportamiento de las intensidades máximas, que podrían estar dadas por dos factores: la variabilidad natural e intrínseca de un clima y la variación de los promedios propios del clima ya que el régimen de intensidades de precipitaciones es una de las posibles variables sensibles al cambio climático.

De hecho, la intensidad de la lluvia, además de depender del contenido de agua precipitable de la atmósfera, también depende del gradiente térmico vertical en los distintos sistemas nubosos de precipitación y como variable de estado hidrológica, se puede caracterizar a través de su distribución en el espacio y en el tiempo, y su frecuencia o probabilidad de ocurrencia. Para poder caracterizarla es necesario un gran número de observaciones, extraídas de series pluviométricas, con el objeto de deducir el patrón de comportamiento en una zona determinada y permitir un análisis o uso posterior.

Por ende, esta investigación pretende analizar el comportamiento de las precipitaciones a través de la relación de la intensidad media en función de la duración y la frecuencia, tomando como modelo de estudio la Estación Meteorológica de la Universidad Central de Venezuela; y cuya finalidad será la de aportar patrones de comportamiento de las lluvias, tales que permitan diseños confiables y efectivos para la ingeniería hidráulica e hidrológica, además,

Capítulo I: **Fundamentos de la investigación.**

de poner a disposición de los investigadores una herramienta de análisis y planificación en el largo plazo.

Con la apertura del departamento, en el año de 1957, se instaló la Estación Meteorológica la cual funcionó hasta 1963 en la azotea del edificio de aulas de la Facultad de Ingeniería, en el cual se realizaba mediciones de temperatura, humedad, presión y precipitación; es en el año de 1964, cuando la Estación es mudada a los terrenos del antiguo Jardín de Infancia Teotiste de Gallegos, fue dotada de nuevos instrumentos; pluviógrafo de balancín y sifón, termohigrógrafo, pluviómetro de cántaro caja lamont, tina evaporimétrica a la sombra y al sol, psicrómetro Assman con termómetro de máximas y mínimas, actinógrafo fuess de registro diario.

El Departamento de Ingeniería Hidrometeorológica de la UCV desarrolló un proyecto de análisis digital de bandas pluviométricas, lo que permite conocer de datos de precipitación hasta un nivel de tiempo en minutos, aunado a esto se tiene un registro pluviométrico en la Estación Meteorológica mayor a cuarenta años, situación que hace que el análisis de las intensidades duraciones y frecuencias a realizar sea extensivo y probablemente único en su género en el país.

1.2.- Marco referencial.

En Venezuela se han hechos varios estudios sobre las intensidades de precipitación, uno de los organismos que llevo a cabo algunos de los estudios mencionados anteriormente fue el Ministerio de Obras Públicas, a través de la dirección de obras hidráulicas, esta publicación es: Atlas de Profundidad-Duración-Frecuencia de Lluvias en Venezuela (Caracas, Venezuela, Enero de 1963), en años anteriores se publicó "Intensidades y Frecuencias de algunas lluvias en Venezuela", estudio de Ministerio de Obras Publicas, 1951.

Capítulo I: **Fundamentos de la investigación.**

El profesor A.W. Goldbruner en su texto “Causas Meteorológicas de las Lluvias de Extraordinarias Magnitud”, hace un enfoque del problema.

Una de las primeras evaluaciones de intensidades de precipitación fueron hechas en Alemania por el Dr., Josef Haeuser del Bureau Hidrográfico de Múnich, en el año 1933. El Dr. Haeuser en su estudio sobre la hidrometeorología de Baviera, Alemania mencionó que para obtenerse la evaluación de los caudales de los ríos, no solamente es suficiente obtener las observaciones de la precipitación con una observación diaria, sino que se hace necesario obtener las intensidades de precipitación.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) ha propuesto algunos procedimientos de análisis de las intensidades de las precipitaciones, en su reglamento técnico y en su guía de prácticas Hidrometeorológicas, publicación OMM N° 168 Tp.82.

Avellan Haydee y Porras Pedro publicaron en la revista hidráulica “El agua” edición N° 32, Marzo de 1984 el artículo: Curvas de Profundidad-Frecuencia-Duración.

En el 2005 el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales elabora un Atlas de Curvas de Intensidad - Duración - Frecuencia de Venezuela de publicación interna en formato Digital no disponible para el público.

Capítulo I: **Fundamentos de la investigación.**

1.3.- Objetivos.

1.3.1.- Objetivo General.

Estimar el número de eventos, las intensidades y duraciones para diferentes periodos de retorno de la precipitación en el área de influencia de la Estación Meteorológica del Departamento de Ingeniería Hidrometeorológica de la UCV.

1.3.2.- Objetivos Específicos.

1.3.2.1.- Procesar la información de la Estación Meteorológica del Departamento de Ing. Hidrometeorológica de la UCV.

1.3.2.2.- Describir el comportamiento general del número de eventos, duraciones e intensidades de la precipitación del área de influencia de la Estación Meteorológica UCV.

1.3.2.3.- Investigar metodologías para el ajuste de datos de intensidades de precipitación a distribuciones estadísticas.

1.3.2.4.- Describir el comportamiento de la relación Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) de la Estación Meteorológica UCV.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO.

El vapor de agua y la precipitación son elementos esenciales para la vida. La cantidad y frecuencia de la precipitación tiene un enorme impacto socioeconómico en los países del mundo. Es más, el régimen de calentamiento y transporte de humedad en los trópicos da impulso a los ciclos energético e hidrológico globales.

2.1.- Característica de la Precipitación.

La precipitación es la fuente de todo escurrimiento de agua en esteros, ríos y también del agua almacenada en el suelo o escurriendo a través de acuíferos. Por precipitación se entiende la lluvia, la nieve y el granizo. La precipitación ocurre cuando el aire húmedo de la atmósfera se enfría lo suficiente para que el vapor de agua existente se condense alrededor de núcleos de condensación. Cuando las gotas así formadas crecen, ellas alcanzan un tamaño y un peso tal que la gravedad las hace caer, originando algunos de los tipos de precipitación. La cantidad y la intensidad de la precipitación dependen tanto de la cantidad de vapor de agua del aire como de la tasa de enfriamiento. La disminución de la temperatura de las masas de aire puede ser causada por efectos topográficos, convección térmica, acción de los frentes atmosféricos o corrientes de aire. La causa de la precipitación condiciona las propiedades de las lluvias y por consiguiente es una variable significativa para el diseño. Por ejemplo, las precipitaciones convectivas son por lo general de corta duración, bastante intensas y afectan un área normalmente reducida. Por otra parte, las precipitaciones frontales afectan un área mayor y son normalmente de mayor duración y menor intensidad.

La precipitación, expresada como altura de agua, se mide en forma continua en Pluviógrafos y en forma esporádica en pluviómetros. Los instrumentos son básicamente recipientes estandarizados que recogen la precipitación y la

miden por unidad de área en términos de altura. Aquellos que entregan un registro continuo están equipados con un sistema que va indicando en forma mecánica o electrónica la precipitación acumulada en función del tiempo.

2.2.- Mecanismos físicos responsables de la distribución anual de la precipitación en Venezuela.

La distribución de la precipitación en una región está modulada, tanto por la existencia de mecanismos de gran escala, como los efectos locales, y para explicar los regímenes anuales de la precipitación en el territorio venezolano, aun cuando se tiene la limitante que la distribución de estaciones meteorológicas no es lo suficientemente densa, varios autores han señalado alguno de los mecanismos físicos:

Goldbrunner (1963), “Las causas Meteorológicas de las precipitaciones de extraordinaria magnitud en Venezuela”; plantea que las causas meteorológicas de las precipitaciones en Venezuela, se pueden explicar por: vaguadas en altura, la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), ondas del este, la presencia de huracanes en el Caribe y avances de masas de aire frío polar hacia Venezuela, también Schultz et al. (1997, 1998) determinaron que estas masas de aire pueden tener un sustancial impacto en el océano.

Poveda y Mesa (1997), “Sistemas atmosféricos convectivos de mesoescala sobre Colombia, Revista Académica 29 p 113” encontraron que la distribución anual de la precipitación sobre los trópicos en América del Sur está primordialmente influenciada por la posición de la ZCIT, siendo los principales mecanismos de control, la presencia de la cadena montañosa de Los Andes, la región del este del Océano Pacífico Tropical, la parte oeste del Atlántico y las circulaciones atmosféricas sobre el Amazonas.

Un análisis de los meses del inicio del período lluvioso y su duración, señala exactamente el movimiento de la ZCIT desde el sur hacia el centro del país.

2.3.- Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT).

La ZCIT ó ITCZ (Inter Tropical Convergency Zone) es una franja de bajas presiones ubicada en la zona ecuatorial, en ella confluyen los vientos alisios del sureste y del noreste. Debido a las altas temperaturas las masas de aire son forzadas a ascender originando abundante nubosidad y fuertes precipitaciones algunas acompañadas de descargas eléctricas. La ITCZ no es uniforme ni continua, se puede interrumpir y su grosor variar de un sitio a otro, también su comportamiento en zonas marítimas y continentales.

2.3.1.- Desplazamiento.

La ITCZ tiene la particularidad de desplazarse detrás del ecuador real, es decir, sigue la zona donde los rayos solares caen perpendicularmente, esto nos indica; que se mueve hacia el hemisferio de verano tal como se muestra en la figura:

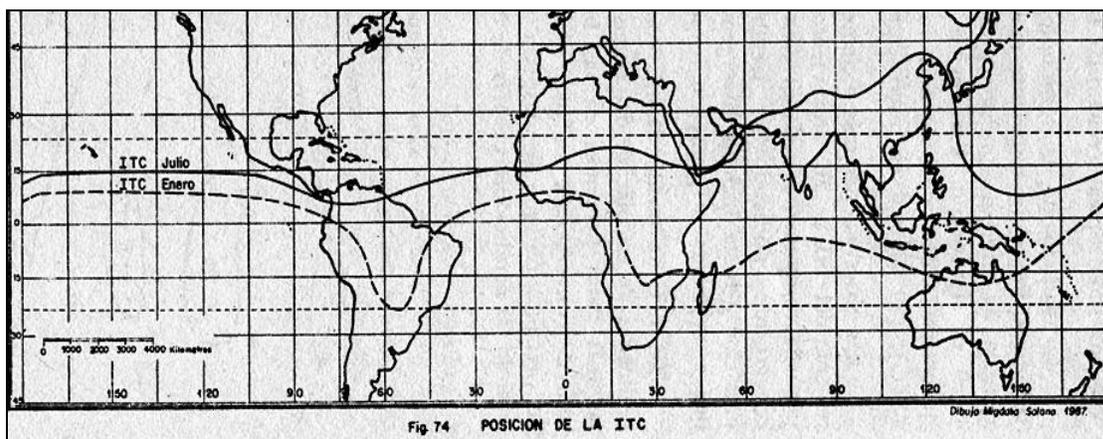


Figura 2.1. Desplazamiento de la ITCZ, Fuente: "Meteorología" por José Manuel Guevara Díaz. 2001

2.3.2.- Su Influencia sobre Venezuela.

La ITCZ es muy importante sobre el país ya que marca el periodo lluvioso sobre todo el territorio. A mediados de Mayo el desplazamiento al norte del anticiclón del Atlántico permite el avance de la ITCZ estableciéndose sobre todo el territorio venezolano. A continuación se indican las fechas aproximadas del periodo lluvioso por región:

1era. quincena de Abril: Sur de Venezuela (Amazonas y sur de Edo. Bolívar).

2da. Quincena de Abril: Edo. Apure, los Andes.

1era. Quincena de Mayo: Llanos Centrales, Edo. Bolívar, Occidente y parte de los llanos centrales.

2da. quincena de Mayo: Centro Norte Costera, Suroriente.

1ra. Quincena de Junio: Nororiente.

El periodo lluvioso en Venezuela finaliza en Noviembre con el retiro progresivo de la ITCZ al sur, fuera del territorio venezolano y el aumento de la influencia del anticiclón del Atlántico sobre el país, lo que origina el inicio del periodo seco y el cual se extiende hasta el mes de Abril.

En ocasiones las vaguadas, restos de frentes fríos, y el paso de perturbaciones tropicales (ondas, depresiones, tormentas ó huracanes) sobre el Caribe al norte de Venezuela pueden reforzar la ZCIT produciendo precipitaciones extraordinarias.

2.4.- Medida de la precipitación.

Las técnicas de registro y medida de la precipitación del agua se agrupan bajo el nombre de pluviometría. El objeto de éstas es obtener datos de gran valor en el balance de intercambio del agua entre la Tierra y la atmósfera.

Para efectuar la pluviometría es necesario recordar:

2.4.1.- Unidades en que se mide la precipitación.

La precipitación se mide por la altura en milímetros que alcanzaría sobre una superficie plana y horizontal donde no se perdiera por infiltración o evaporación, y tal altura se da en milímetros. Un milímetro de precipitación equivale a un litro de agua por metro cuadrado.

2.4.2.- Aparatos de medida y registro.

Para la medida y registro de las precipitaciones se emplea un material de observación básica muy sencilla, pero de cierta diversidad y dificultad en cuanto a instalación, normas de empleo e interpretación de sus medidas.

Para medir cantidad de precipitación se tiene:

- ✓ Pluviómetros.
- ✓ Nivómetros.
- ✓ Totalizadores.

Para registrar distribuciones de lluvia en el tiempo:

- ✓ Pluviógrafos.

Para medir la precipitación a distancia:

- ✓ Radar meteorológico.

2.4.3.- Descripción del Pluviógrafo.

Son los instrumentos destinados a medir la distribución de la lluvia en el tiempo en un determinado lugar. Con ellos se conoce la cantidad de lluvia a través del tiempo y también su intensidad.

Hay varias clases o tipos fundamentales:

- ✓ De flotador sin sifón automático.
- ✓ De flotador con sifón automático.
- ✓ De balanza.
- ✓ De oscilación.
- ✓ Combinación del pluviógrafo de balanza y el de oscilación.

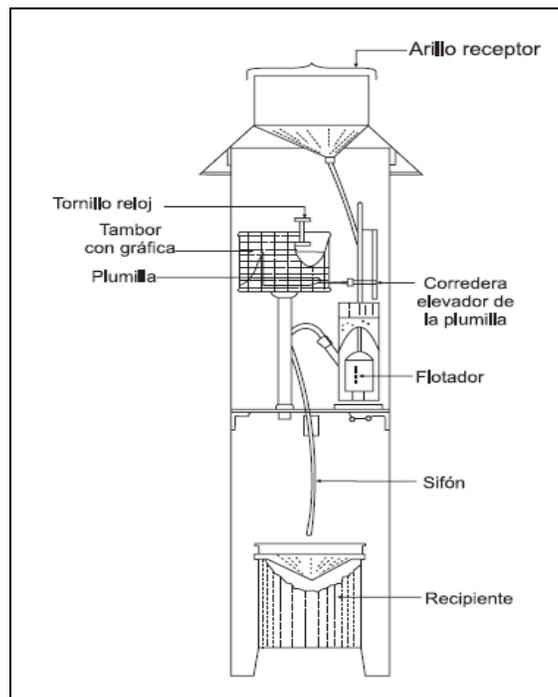


Figura 2.2. Pluviógrafos de flotador con sifón automático.

2.5.- Lluvias de diseño.

Una tormenta es un conjunto de intervalos de lluvia producido por una situación meteorológica favorable para generar precipitación. El número de horas sin lluvia que separa una tormenta de otra es un valor arbitrario, pero típicamente se supone que lapsos del orden de seis a ocho horas sin lluvia determinan eventos diferentes. Las características principales de este episodio, desde la perspectiva de usar la información para diseñar sistemas de drenaje urbano son: su duración, magnitud total, variación de la intensidad en el tiempo y variación de

la lluvia en el espacio. Se entiende por lluvia de diseño una tormenta de duración, magnitud e intensidad para cada intervalo predefinido, tal que las obras funcionan adecuadamente frente a una lluvia similar o menor, y pueden presentar fallas frente a eventos peores, peores puede referirse en este caso a eventos más largos, más intensos o de mayor magnitud.

2.6.- Duración.

Una de las primeras decisiones del proyectista es escoger la duración de la tormenta de diseño a utilizar, entendiendo por duración el total de intervalos de lluvia. La importancia de la duración de la lluvia es evidente ya que la intensidad media de la tormenta decrece con la duración y el área de aporte de la cuenca crece al aumentar la duración de la tormenta. La selección de la duración de la tormenta de diseño, está influenciada por factores del clima de la región en cuestión y por aspectos propios del área de aporte, tales como su tamaño, pendiente y rugosidad superficial frente al escurrimiento.

Es usual que la duración de diseño sea igual al tiempo de concentración del área de aporte, definido como el tiempo necesario para que la gota más alejada llegue a la salida. Otros criterios, tienden a seleccionar duraciones de tormentas más o menos largas, en el rango entre 24 horas y 48 horas, ya que es usual que las crecidas importantes ocurran en tiempos correspondientes de duraciones significativas.

2.7.- Magnitud e Intensidad.

Para la escogencia como valor de diseño de la magnitud de la lluvia, o total de agua caída durante el tormenta es necesario tomar en cuenta varios factores ya que existe una relación entre duración, magnitud y probabilidad de ocurrencia

la cual normalmente se estudia y se representa en familias de curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF).

El efecto de la magnitud de la tormenta, se ve influenciado por la variación temporal y espacial que presenta la intensidad de la lluvia. Es difícil definir lo que se entiende por intensidad representativa, ya que se puede hablar de intensidades máximas, medias, u otros valores que la representen.

2.8.- Hietograma de la tormenta.

La distribución en el tiempo de la lluvia total caída durante una tormenta es sin lugar a dudas, un factor primordial en la determinación del escurrimiento de respuesta de la cuenca y, en consecuencia, debe ser considerado en la definición de una tormenta de diseño.

2.9.- Variación Espacial.

La distribución espacial de la tormenta es también un factor de gran importancia en la definición de la tormenta de diseño. Los estudios al respecto, han tomado dos enfoques. En algunos casos, se han encontrado curvas de igual precipitación considerando como origen el centro de la tormenta y en otros se ha estudiado la variación dentro de un área definida. Sin embargo, la obtención de información en relación a la distribución espacial requiere de una red pluviográfica densa.

2.10.- Probabilidad de ocurrencia.

La probabilidad de ocurrencia de una tormenta de diseño es un problema muy difícil de resolver, pues es complejo asociar una probabilidad de ocurrencia a un fenómeno que presenta una variabilidad importante en el espacio y en el tiempo. Adicionalmente, desde el punto de vista del diseño interesa también

relacionar la frecuencia de la tormenta de diseño con la probabilidad de la crecida resultante.

Por lo dicho anteriormente, es difícil contar con la información necesaria para caracterizar y describir cuantitativamente la tormenta de diseño. Al analizar y estudiar el registro de lluvias es poco probable que se encuentren situaciones similares que permitan definir probabilidades de ocurrencia. Prácticamente todas las tormentas difieren en la distribución espacial, en la variación de la intensidad, magnitud, duración, etc.

El segundo problema es también muy complejo porque inciden en él las condiciones de humedad de la cuenca, y sobre este punto se disponen de valores índices que describen situaciones en forma cualitativa.

Sin embargo, en situaciones de diseño, para cada duración se acostumbra a asociar la probabilidad a la magnitud de la lluvia y suponer que en crecidas provocadas por lluvias la frecuencia de la crecida es igual a la frecuencia de la lluvia que la origina. Esta suposición, adquiere mayor realidad a medida que se alcanzan condiciones de saturación en el área de aporte y por lo tanto representa una situación conservadora desde la perspectiva del diseño.

2.11.- Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia de Lluvias.

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

El diseño hidráulico de las obras de drenaje urbano, requiere el uso de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia de Lluvias (IDF). Estas relaciones

presentan la variación de la intensidad de la lluvia de distintas duraciones, asociadas a diferentes probabilidades de ocurrencia y son útiles para estimar indirectamente el escurrimiento proveniente de cuencas pequeñas esencialmente impermeables, en función de la lluvia caída. Estas curvas tienen usualmente una forma exponencial, donde la intensidad, para una misma frecuencia disminuye a medida que aumenta la duración de la precipitación. Es corriente incorporar en el mismo gráfico las curvas asociadas a diferentes frecuencias, en forma paramétrica, para obtener la familia de curvas de un lugar en un mismo gráfico.

2.11.1.- Obtención de las curvas IDF.

Para determinar las curvas IDF se necesita contar con registros continuos de lluvia en el lugar de interés y seleccionar la lluvia más intensa de diferentes duraciones en cada año, para realizar un estudio de frecuencia con cada una de las series así formadas. Es decir, se deben examinar los histogramas de cada una de las tormentas ocurridas en el tiempo establecidos para el estudio y de estos histogramas elegir la lluvia correspondiente a la hora más lluviosa, a las dos horas más lluviosas, a las tres horas más lluviosas y así, sucesivamente. Con estos valores se forman series de la hora más lluviosa de cada año con registro, de las dos horas más lluviosas, etc. Cada una de estas series se somete a un estudio de frecuencia asociando a cada serie un modelo probabilístico, o bien, una frecuencia empírica. Ello da como resultado una asignación de probabilidad a la lluvia correspondiente a cada duración.

2.12.- Análisis de Eventos Extremos.

Una de los principales aspectos de datos Hidrometeorológicos es el de sus valores extremos; su correcta caracterización es vital, ya que usualmente son valores de diseño, así como umbrales para estimar niveles de riesgos

ambientales. Es relativamente común que se analicen sólo los valores máximos, ya que obviamente pueden originar desastres, pero el conocer los caudales mínimos o umbrales de lluvia que indiquen sequía es vital para diseñar el manejo del recurso hídrico.

Físicamente, hay valores extremos por varias causas. Eventos sinópticos que produzcan, por ejemplo, lluvias extremas, olas de calor, vientos huracanados, etc. La acumulación de los efectos debidos a una serie de eventos, cada uno de ellos relativamente comunes, pero que ocurren simultáneamente, o inmediatamente uno después de otros; cambios de origen antrópico que alteran el régimen de los elementos, por ejemplo, en la cobertura de la tierra que hace que valores relativamente normales de lluvia produzcan grandes escorrentías y/o crecientes repentinas; obras en las planicies de inundación y/o los cauces que alteren el régimen hidrológico, etc.

2.12.1- Análisis de frecuencias de variables aleatorias de valores máximos.

Las variables aleatorias de valores máximos habitualmente utilizadas en el ámbito de la hidrología (precipitación, intensidad y caudal) presentan un coeficiente de asimetría positivo. Este hecho obliga a considerar patrones de funciones de densidad, o de distribución que recojan ese comportamiento, prestando especial cuidado a la hora de estimar el coeficiente de asimetría, ya que es precisamente sobre la cola derecha de la función ajustada- correspondiente a períodos de retomo alto- donde se centra el interés de la estima de cuantiles. En este sentido, la evolución del análisis de frecuencias de valores máximos se puede sistematizar en el desarrollo de funciones de distribución específicas.

2.12.2.- Desarrollo de funciones de distribución específicas.

Teniendo en cuenta la trascendencia que el coeficiente de asimetría tiene en la estimación de cuantiles, los distintos patrones de funciones de distribución propuestos para el análisis de valores extremos, y máximos en particular, suelen clasificarse, atendiendo al tratamiento del factor de forma asumido en: asimetría fija, libre y variable.

Asimetría fija: Tradicionalmente se ha acudido a patrones de función de distribución con coeficiente de asimetría fijo (USWRC, 1981) y de ellas, la más utilizada es Gumbel (1941) (Chow et al, 1994), función biparamétrica que asume un coeficiente de asimetría fijo de 1,14. Los cuantiles estimados a partir de esta función son, lógicamente, independientes de la asimetría muestral.

Asimetría libre: Frente al planteamiento descrito en el párrafo anterior, se considera otros patrones de funciones de distribución con tres parámetros. Las más utilizadas son Log- Pearson Tipo 3 (LP3) y Valores Extremos Generalizados (GEV), En estos patrones, el parámetro de forma se estima considerando el coeficiente de asimetría muestral. Sin embargo, el error y la asimetría en la estimación del coeficiente de asimetría crecen a medida que se reduce el tamaño muestral, Bedient, P. B. and W. C. Huber, Hydrology and Floodplain Analysis, 2nd Ed. Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY, 1992, 692 paginas. Esto hace que la estimación del factor de forma únicamente a partir de la asimetría muestral dé lugar a estimas de cuantiles para períodos de retorno altos muy poco robustas, ya que la entrada o salida de un valor extremo -el máximo de los máximos- cambia significativamente la asimetría muestral; con ella cambia la estimación del factor de forma de la función de distribución y, por lo tanto, los cuantiles correspondientes a periodos de retomo altos. En los Estados Unidos, donde se utiliza la función LP3, se ha implementado un estadístico para la estimación del

coeficiente de asimetría en el que, además del valor muestral, se incluye un coeficiente de asimetría regional, recogido en mapas, y un factor de ponderación que minimiza la varianza de la estima (U.S. Interagency Advisory Committee on Water Data, Hydrology Subcommittee, 1983).

2.13.- El Rol de la Teoría de Valores Extremos.

Para ilustrar un poco lo que se realizó en este trabajo de grado en el ajuste de los datos, es necesario aclarar que al analizar valores extremos, se presenta un conjunto de datos independientes, como por ejemplo: X_1, X_2, \dots, X_n que tienen distribución de probabilidad desconocida F , y de la cual queremos saber su comportamiento en las colas. La Figura 3.1 muestra la dificultad de hacer esto, ya que la mayoría de los datos están concentrados en el centro de la distribución, mientras que muy pocos son los datos que están en los extremos de las mismas. Por definición los valores extremos son escasos y, por lo tanto, la estimación resulta difícil.

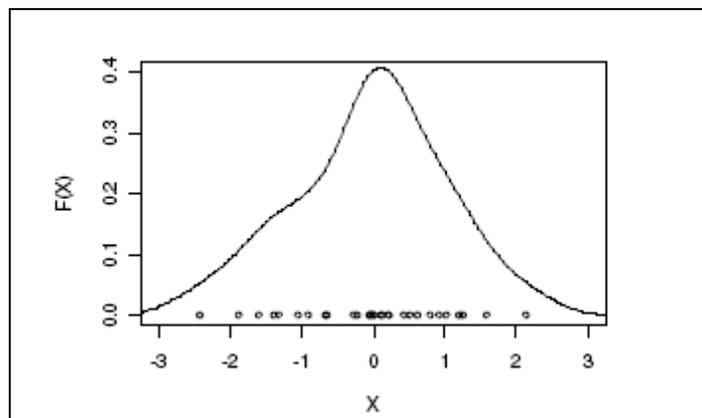


Figura 2.3. Datos de la muestra ejemplo y su función densidad F

Los principales temas de discusión que se consideraron son los siguientes:

Hay muy pocas observaciones en la cola de la distribución; los estimados que frecuentemente se requieren están más allá del nivel máximo $X_{m\acute{a}x}$, el valor más grande del conjunto de datos. Las técnicas de estimación clásicas se ajustan muy bien a los datos cuando estos tienen densidad bastante grande, pero pueden ser ineficientes al estimar las colas de la distribución de probabilidades.

La finalidad aquí es estimar el comportamiento a niveles extremos del fenómeno que se estudia.

3.13.1.- Formulación del Modelo de Extremos.

El objetivo ahora es el de plantear el modelo de valores extremos más simple. Dicho modelo se enfoca principalmente en el comportamiento de la siguiente expresión

$$Mn = \text{m\acute{a}x. } \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$$

Donde X_1, X_2, \dots, X_n es una serie de variables aleatorias independientes que tienen función de distribución común F . Cada X_i representa los valores del proceso aleatorio medidos a espacios de tiempo regulares. Desde luego Mn es el máximo del proceso medido en “ n ” unidades de tiempo, y n es el número de observaciones en un año, por lo que Mn representa aquí el máximo de intensidad de precipitación anual. En teoría la distribución de Mn es sencilla, ya que por propiedades de las variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas se tiene que:

$$\begin{aligned} \Pr \{Mn \leq z\} &= \Pr \{X_1 \leq z, X_2 \leq z, \dots, X_n \leq z\} \\ &= \Pr \{X_1 \leq z\} \times \Pr \{X_2 \leq z\} \times \dots \times \Pr \{X_n \leq z\} \\ &= \{F(z)\}^n . \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Debido a que en la práctica la distribución F es desconocida, este resultado no es muy útil. El obtener un estimado de F usando el registro de datos sustituyéndolos en la ecuación 2.1, pero en la práctica pequeñas diferencias en la estimación de F puede ocasionar grandes discrepancias en la función F^n .

Es por esto que se buscan familias de modelos que se aproximen a la distribución de $\{F(z)\}^n$, aunque se desconozca la función F^n . La forma de estimar $\{F(z)\}^n$ se basa en los datos extremos únicamente, y es muy similar a la aproximación que se hace de las medias de la población por la distribución normal, la cual viene justificada por el Teorema del Límite Central.

Se estudia el comportamiento de $F_n(z)$ cuando $n \rightarrow \infty$. Pero esto no es suficiente ya que para un valor $z \leq z_+$ –donde z_+ es el menor valor de z tal que $F(z) = 1$, la función $F_n(z) \rightarrow 0$ cuando $n \rightarrow \infty$, así la distribución de M_n se degenera en el punto z_+ . En otras palabras, la distribución de M_n converge a la cota superior de F , con probabilidad 1.

En el Teorema del Límite Central se presenta este mismo problema: con probabilidad 1, el promedio de X_n converge a la media poblacional μ . Esto se soluciona reescalando el promedio de manera que se aproxime a la distribución Normal con media 0 y varianza 1, es decir

$$\frac{\overline{X_n} - \mu_n}{\sigma_n} \rightarrow N(0,1) \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

Donde $\mu_n = \mu$ y $\sigma_n = \sigma/\sqrt{n}$ ayudan a prevenir que el límite se degenera (sea igual a cero). Esta misma aproximación se hace para obtener límites de la distribución de M_n , se reescala de la siguiente manera:

$$\frac{M_n^* = M_n - b_n}{a_n} \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

Donde $\{a_n > 0\}$ y $\{b_n\}$ son sucesiones de coeficientes normalizadores. Ahora, al escoger valores de a_n y b_n apropiadamente se puede estabilizar la escala y locación de la distribución M_n^* a medida que n crece, evitando así las dificultades que tiene la distribución de M_n al buscar la distribución límite.

El rango de posibles distribuciones límite de M_n^* esta dado por la siguientes clases de distribuciones extremas, que son el resultado de estudiar la expresión de M_n^* .

3.13.2.- Tipos de Distribuciones Extremas.

Si existen constantes $\{a_n > 0\}$ y $\{b_n\}$ tales que $\Pr \{(M_n - b_n)/ a_n \leq z\} \rightarrow G$, cuando $n \rightarrow \infty$, entonces tienen una distribución límite $G_{(\alpha)}$, la cual pertenece a una de las siguientes familias de distribuciones extremas Gumbel, Fréchet y weibull:

$$\text{I: } G_{(\alpha)} = \exp \left\{ -\exp \left[-\left(\frac{z-b}{a} \right) \right] \right\}, \quad -\infty < z < \infty; \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

$$\text{II: } G_{(\alpha)} = \begin{cases} 0, & z \leq b; \\ \exp \left\{ -\left(\frac{z-b}{a} \right)^{-\alpha} \right\}, & z > b; \end{cases} \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

$$\text{III: } G_{(\alpha)} = \begin{cases} \exp \left\{ -\left[-\left(\frac{z-b}{a} \right)^{-\alpha} \right] \right\}, & z < b, \\ 1, & z \geq b, \end{cases} \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

Para $\alpha > 0$, b y, en caso de las familias II y III, $\alpha > 0$

2.14.- R-Project.

R es un lenguaje y entorno de programación para análisis estadístico y gráfico.

Se trata de un proyecto de software libre, resultado de la implementación de software libre, del conocido lenguaje S. R y S-Plus -versión comercial de S- son, probablemente, los dos lenguajes más utilizados en investigación por la comunidad estadística, siendo además muy populares en el campo de la investigación biomédica, la bioinformática y las matemáticas financieras. A esto contribuye la posibilidad de cargar diferentes librerías o paquetes con finalidades específicas de cálculo o gráfico.

2.14.1.- Historia.

Fue desarrollado inicialmente por Robert Gentleman y Ross Ihaka del Departamento de Estadística de la Universidad de Auckland en 1993. Su desarrollo actual es responsabilidad del R Development Core Team.

A continuación se enumeran algunas reseñas que resaltar en el desarrollo de R:

1. Versión 0.16: Es la última versión alfa desarrollada esencialmente por Ihaka y Gentleman, que incluye gran parte de las características descritas en el "White Book" manual de usuarios especializados.
2. Versión 0.49 del 23 de abril de 1997: Es la versión más antigua de la que se conserva el código (que todavía compila en algunas plataformas UNIX. En esta fecha arrancó también CRAN (red de archivos comprimidos de R) con tres espejos que albergaban 12 paquetes. Poco después aparecieron las versiones alfa para Windows y Mac OS.
3. Versión 0.60 del 5 de diciembre de 1997: R se integra oficialmente en el Proyecto GNU (Sistema operativo de software libre).

4. Versión 1.0.0 del 29 de febrero de 2000: Los desarrolladores lo consideran suficientemente estable para su uso en producción.
5. Versión 2.0.0: Introduce el “lazy loading”, que permite una carga rápida de datos con un coste de memoria mínimo.
6. Versión 2.1.0: Aparece el soporte para UTF-8 (Formato de codificación de caracteres de 8 bits) y comienzan los esfuerzos de internacionalización para distintos idiomas.
7. Versión 2.9.0: El paquete “Matrix” donde se incluye en la distribución básica del software R.

2.14.2.- Características.

R proporciona un amplio abanico de herramientas estadísticas (modelos lineales y no lineales, test estadísticos, análisis de series temporales, algoritmos de clasificación y agrupamiento, etc.) y gráficas.

Al igual que S, se trata de un lenguaje de programación, lo que permite que los usuarios lo extiendan definiendo sus propias funciones. De hecho, gran parte de las funciones de R están escritas en el mismo S, aunque para algoritmos computacionalmente exigentes es posible desarrollar librerías en C, C++ o Fortran que se cargan dinámicamente. Los usuarios más avanzados pueden también manipular los objetos de R directamente desde código desarrollado en C. R también puede extenderse a través de paquetes desarrollados por su comunidad de usuarios.

Además, R puede integrarse con distintas bases de datos y existen librerías que facilitan su utilización desde lenguajes de programación diversos. Otra de las características de R es su capacidad gráfica, que permite generar gráficos con calidad. R posee su propio formato para la documentación basado en LaTeX (Software libre).

R también puede usarse como herramienta de cálculo numérico, campo en el que pueden ser tan eficaces como otras herramientas específicas tales como GNU Octave y su versión comercial, MATLAB.

2.14.3.- Extensiones y paquetes.

R forma parte de un proyecto colaborativo y abierto. Sus usuarios pueden publicar paquetes que extienden su configuración básica. Existe un repositorio oficial de paquetes cuyo número superó en otoño de 2009 la cifra de los 2000.

Dado el enorme número de nuevos paquetes, éstos se han organizado en vistas (o temas), que permiten agruparlos según su naturaleza y función. Por ejemplo, hay grupos de paquetes relacionados con estadística bayesiana, econometría, series temporales, etc.

Para facilitar el desarrollo de nuevos paquetes, se ha puesto a servicio de la comunidad una forja de desarrollo que facilita las tareas relativas a dicho proceso.

2.15. Desarrollo del sistema de Vectorización.

Para el desarrollo del sistema, se utilizó como plataforma el programa de diseño asistido por computadora "AUTOCAD" y su lenguaje de programación "AUTOLISP". El mismo permite desarrollar aplicaciones que se ejecuten en conjunto con él, y así poder utilizar todo el potencial del mismo. El sistema se encuentra actualmente en desarrollo.

2.15.1.- Digitalización.

En el proceso de digitalización (Escaneo) se realizan labores de rastreo mediante escáner para obtener imágenes en formato digital de las bandas y de esta manera tener un respaldo fiel de la información original contenida en las

bandas. Selección del escáner según el tipo de banda: Para el proceso de Digitalización se cuenta con dos tipos de escáner: Los escáner planos con capacidad para digitalizar solo bandas de hasta 29,7 cm. de largo y el escáner de rodillo, el cual puede digitalizar bandas de cualquier longitud. Por tal motivo la selección del escáner a utilizar está sujeta a dichas características.

2.15.2.- Control y carga de imagen de bandas digitalizadas.

Toda la información de bandas digitalizada, se encuentra almacenada, por código de la estación, instrumento que realizó la medición y fecha de la lectura, por lo que el módulo, es capaz de determinar si la información solicitada efectivamente existe, para luego cargar en pantalla la imagen de la banda solicitada. Una vez verificada la existencia, de la imagen digitalizada se carga esta en pantalla.

2.15.3.- Vectorización.

En el proceso de Vectorización resulta indispensable por la necesidad de reproducir la curva que se encuentran en las diferentes bandas, pluviométrica; higrométricas; de temperatura, entre otras y obtener de esta manera los valores representados en las graficas analizadas o analizar.

Debido a la gran diversidad en formatos de bandas existentes, así como los errores observados en las escalas, por deformación del papel, la generación de la cuadrícula (grilla) para cada banda a vectorizar, se debe ajustar las escalas y deformaciones para cada caso en particular.

Una vez generada la cuadrícula, el sistema se adapta al tipo de banda que se está vectorizando, presentando en la línea de estado del sistema la fecha, hora y valor del parámetro medido, según la posición del ratón dentro de la banda a vectorizar.

Antes de comenzar la Vectorización de la curva generada por el instrumento, es necesario realizar un análisis de la banda y determinar si la misma presenta errores, tales como adelanto o atraso del reloj, o falta de calibración en el instrumento que mide el parámetro, para corregirlos con los módulos correspondientes del programa.

CAPÍTULO III

MÉTODO.

Capítulo III: Metodología de la Investigación.

A continuación, se describirá detalladamente, cada una de las fases para la realización de este Trabajo Especial de Grado, en el cual se analizaron el proceso de diseño y construcción de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) de la Estación Meteorológica de la Universidad Central de Venezuela.

3.1.- Selección de la Estación.

El criterio de selección de la Estación Meteorológica se basó en el tipo, cantidad y la facilidad de tener gran parte de los datos en formato digital. El caso de estudio de este trabajo especial de grado es la Estación UCV, serial 0539, Latitud: 10°29'41'' N, Longitud: 66°53'12'' W a 884,69 m.s.n.m, tomándose como referencia de análisis el período comprendido entre 1965 – 2007 para los datos provenientes del pluviógrafo, porque en el tiempo comprendido en este periodo el registro estuvo aceptablemente completo, del 2008 en adelante el instrumento se mantuvo fuera de servicio, y de 1965 al 2010 para los datos provenientes del pluviómetro con los cuales se completaron valores de precipitación diaria y mensual en el caso de datos faltantes (bandas Pluviométricas).

3.2.- Recolección información.

En el año de 1957, se instaló la Estación Meteorológica de la Universidad Central la cual funcionó hasta 1963 en la azotea del edificio de aulas de la Facultad de ingeniería, aquí se realizaban mediciones de temperatura, humedad, presión y precipitación (*Pluviómetro*); es en el año de 1964 cuando la estación es mudada a los terrenos del antiguo Jardín de Infancia Teotiste de Gallegos, fue dotada de nuevos instrumentos; como pluviógrafo de balancín y sifón; con la instalación de estos instrumentos registradores construidos por la casa SIAP, se da comienzo a la fuente de datos utilizado en esta investigación, que está desde 1965, pero de la cuales se dispuso del año 1965 al 2007 (bandas Pluviométricas), este conjunto de

Capítulo III: Metodología de la Investigación.

bandas constituye una fuente de datos probablemente única en el país, es conveniente señalar que estas bandas en el transcurso de los años fueron diarias y semanales, aunque el mayor número está constituida por las de rotación semanal.

El proceso de digitalización ha sido creado en el departamento de Ingeniería Hidrometeorológica de la Universidad Central de Venezuela, este procedimiento fue realizado en un 75 % por personal de la Universidad para investigaciones anteriores, y en un 25 % para este trabajo, con esto se dispone en archivos de texto toda la información de la precipitación y el tiempo en el cual se han registrado. Se digitalizaron todos los eventos ocurridos reproduciendo la forma original de la gráfica precipitación tiempo de todas las bandas del pluviógrafo.

Dado el interés en el estudio de las intensidades de lluvias extraordinarias, de 2365 episodios de lluvia ocurridos se seleccionaron 465 en los que en algún momento la intensidad durante la tormenta fue superior o igual a 1 mm/min, y como segunda condicionante que el valor de la precipitación acumulada en el evento fuera superior a 2 mm de lluvia caída, todo esto con la finalidad de que estos episodios de lluvia fueran significativos. Para considerar un episodio de lluvia diferente, el tiempo entre una y otra tormenta debió ser superior a tres horas sin lluvia.

Se adoptó como valor real o referencia la precipitación obtenida del pluviógrafo de la Estación porque este presentó poco datos faltantes, entonces en conjunto con la información del pluviómetro se construyó la descripción de las características de la precipitación de la zona de estudio.

3.3.- Características de la precipitación en la Estación Meteorológica UCV.

Para describir las características de la precipitación en la Estación Meteorológica UCV fue necesario desarrollar varios ítems que nos den una idea de cómo se desarrolla la misma.

Capítulo III: Metodología de la Investigación.

3.3.1.- Precipitación y distribución anual de las lluvias de 1965 a 2009.

Se seleccionaron todas las precipitaciones que se registraron en el pluviómetro y el pluviógrafo, para determinar el número de días de lluvia por año en el periodo comprendido entre al año 1965 al 2009, de igual forma para determinar el total anual de la estación, así como el porcentaje de lluvias registrada vs totales, otro parámetro importante para describir la precipitación anual es la fluctuación respecto a la media.

3.3.2.- Precipitación y distribución mensual de las lluvias de 1965 a 2009.

La precipitación y la distribución mensual de las lluvias se realizó seleccionando el registro del pluviómetro de 1965 al presente año (2009), con estos valores se elaboraron dos gráficos muy explicativos, el primero donde se compara la distribución promedio mensual por décadas con el promedio histórico mensual, y el segundo de los gráficos se compara la precipitación promedio mensual con el porcentaje acumulado mensual.

3.3.3.- Distribución de las precipitaciones a lo largo del día.

Se seleccionaron todos los hietogramas de los eventos ocurridos en el área de influencia de la Estación y registrados con el pluviógrafo para de esta forma conocer la frecuencia de la hora con que inicia las lluvias en el día.

3.3.4.- Duración de las precipitaciones.

Se seleccionaron todos los hietogramas de los eventos ocurrido en el área de influencia de la Estación para Describir en porcentaje, las duraciones de las tormentas, con la intención de conocer el valor de duración (tiempo) frecuente de las precipitaciones de la estación.

Capítulo III: Metodología de la Investigación.

3.3.5.- Altura de agua de las precipitaciones.

Se seleccionaron todos los hietogramas de los eventos ocurridos en el área de influencia de la estación con el motivo de determinar, el porcentaje de la altura de precipitación de las tormentas, para saber cuál es el valor de la precipitación (mm) frecuente de los eventos en la estación.

3.4.-Selección de las intensidades máximas.

En esta etapa se analizaron las bandas del pluviógrafo y a partir de los episodios de lluvias seleccionados se calculó para cada uno de ellos, la duración promedio y la cantidad máxima de precipitación recogida en un intervalo de un minuto, cinco, diez, quince, veinte, treinta, cuarenta y cinco minutos, y en intervalos de 1 a 6 horas; de forma de obtener la intensidad máxima media registrada a lo largo de la tormenta para ese intervalo de tiempo, este proceso se repite para diversas ventanas de duraciones en intervalos de tiempo en minutos y horarios.

3.5.-Tratamiento de la información requerida.

Para el ajuste de un modelo a los datos, es necesario tener una idea a priori de la tendencia o comportamiento de los mismos. En la teoría de estadística clásica se utilizan estadísticos conocidos como la media, la mediana, la varianza, entre otros, como medidas numéricas de localización y dispersión de datos. Además existen herramientas gráficas como los diagramas de cajas y los histogramas, que sirven como técnicas para visualizar los datos.

Como uno de los objetivos es ajustar la Distribución Generalizada de Extremos (DGE) y la Distribución Generalizada de Pareto (DGP) y Gumbel factor frecuencia, a continuación se presentan las técnicas básicas para visualizar los datos que se utilizaron en esta investigación. Estas técnicas son especialmente

Capítulo III: Metodología de la Investigación.

seleccionadas debido a la relevancia y utilidad que aportan en la Teoría de Valores Extremos. Por ejemplo, la función de distribución empírica resulta de gran ayuda al justificar o chequear el modelo ajustado a los datos, al hacer un gráfico de la misma versus el modelo ajustado. Las herramientas a usar para describir los datos por medio de gráficos fueron, la función de distribución empírica y el nivel de retorno empírico.

Se puede obtener un estimado de la función de distribución real de los datos empíricamente. Al tener los datos ordenados $X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(n)}$ se tiene que para cualquier observación $X_{(i)}$ exactamente i de las n observaciones tiene valor menor o igual que $X_{(i)}$. Así que un estimado empírico de la probabilidad de una observación que es menor o igual que $X_{(i)}$ es $F(X_{(i)}) = i/n$. En la práctica se hace un ajuste a esta expresión, haciendo $F(X_{(i)}) = i/(n+1)$, de manera que la función F en el punto máximo $X_{(n)}$ no sea igual a 1 ($F(x(n)) \neq 1$).

El nivel de retorno empírico se define como $T_{(i)} = 1/(1 - F(X_{(i)}))$ en años. El Gráfico de los $X_{(i)}$ versus $T_{(i)}$ es el gráfico de nivel de retorno con respecto a la función de distribución empírica F , definida anteriormente. Un método para extraer observaciones extremas de un conjunto de datos $X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(n)}$ es tomar los índices que sobrepasen un nivel predeterminado " u ". Las observaciones Y_i que sobrepasan el nivel u dado son aquellos $X_{(i)}$ que cumplen $X_{(i)} > u$. A los valores $Y_i - u$ se les denomina excesos sobre u . El análisis de los excesos y los valores excedentes Y_i son importantes en este análisis. Debido a que los valores más altos en precipitación están en estos valores excedentes, estudiar sus propiedades o atributos aportará información valiosa al estudio de observaciones extremas.

Capítulo III: Metodología de la Investigación.

Para un nivel u dado, la proporción de los valores excedentes de dicho nivel es la probabilidad de que un valor x_i sea mayor que u , $P(X_i > u)$. Por propiedades de las probabilidades, $P(X_i > u) = 1 - P(X_i < u) = 1 - F(X_i)$. Si F es la función de probabilidad empírica, que sirve como un estimado de la función de probabilidad real de los datos extremos, entonces podemos obtener el gráfico de la probabilidad de los valores que exceden un nivel u dado (gráfico de la media de los excesos ver capítulo 4).

La media de excesos, o exceso promedio, se define como la esperanza de los excesos $E[x-u / x>u]$. Para cada nivel u se promedian los valores de los excesos $(X_{(i)} - u)$ que son, obviamente, aquellos que cumplen $X_{(i)} > u$.

La Distribución Generalizada de Extremos abarca tres casos, tres tipos de distribución: Gumbel, Frechet y Weibull.

3.6.- Ajuste de los datos en función de la distribución generalizada de extremos y Pareto.

3.6.1.- Distribución Generalizada de Extremos (DGE).

La mayoría de las veces resulta inconveniente trabajar con las tres clases de distribuciones límite (Ecuaciones 2.4, 2.5, 2.6). Por una parte, porque necesitaríamos una técnica que nos permita decidir cuál de las 3 distribuciones es la más apropiada para los datos. Luego de escoger la distribución, las inferencias que se hacen pueden sugerir que dicha distribución es la mejor, sin obtener alguna medida de la incertidumbre que envuelve el hecho de haberla seleccionado, aunque esta incertidumbre puede ser importante. Por esta razón se utiliza una parametrización que contiene a los 3 tipos de distribución anteriores.

Capítulo III: Metodología de la Investigación.

Dicha parametrización es el resultado de: Von Mises, R., 1954. La distribution de la plus grande de n valeurs. In: Selected Papers, vol. II. American Mathematical Society, Providence, RI, USA, pp. 271–294. Y Jenkinson, A.F., 1955. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological events. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 81, 158–272. Quienes independientemente derivaron la Distribución Generalizada de Extremos cuya función de distribución es la siguiente:

$$G_{(z)} = \exp\left(-\left[1 + \xi\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-\frac{1}{\xi}}\right) \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Definida en el conjunto de puntos $\{z \text{ tales que } 1 + \xi\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right) > 0\}$ con parámetros de localización, escala y forma que satisfacen lo siguiente: $-\infty < \mu < \infty$, $\sigma > 0$ y $-\infty < \xi < \infty$. Cuando $\xi > 0$ y $\xi < 0$ esta distribución corresponde a las distribuciones Fréchet y Weibull respectivamente. El caso $\xi = 0$, se interpreta como el límite de $G(z)$ cuando $\xi \rightarrow 0$, el cual converge a la distribución Gumbel con función de distribución.

$$G_{(z)} = \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)\right]\right\}, \quad -\infty < z < \infty; \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Con esta manera de representar la distribución de extremos (ecuación 3.1) no hay necesidad de ver cuál es la distribución que mejor se ajusta de las tres, ya que a partir de inferencias hechas al parámetro ξ se determina el mejor modelo según los datos.

3.6.2.- Nivel y Período de Retorno para la Distribución Generalizada de Extremos.

Se procedió ajustar los datos de intensidades de precipitación a dicha distribución, de una serie de datos de máximos anuales, es decir, si tenemos m años de estudio y en cada año se hicieron n mediciones obtenemos bloques de máximos Mn_1, Mn_2, \dots, Mn_n . Los cuantiles extremos de la distribución de los máximos anuales se obtienen invirtiendo la expresión de $G(z)$ y obtenemos:

$$Z_p = \begin{cases} \mu - \frac{\sigma}{\xi} [1 - \{-\log(1-p)\}^{-\xi}], & \xi \neq 0 \\ \mu - \sigma \log\{-\log(1-p)\}, & \xi = 0 \end{cases} \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

Donde $1 - p = G(Z_p)$. Z_p Se conoce como el nivel de retorno asociado al periodo de retorno $1/p$ ya que con un grado razonable de certeza el nivel Z_p se espera que sea excedido, en promedio, una vez cada $1/p$ años. Dicho de otro modo, Z_p va a ser superado por el máximo anual en cualquier año en particular con probabilidad p .

3.6.3.- Inferencias en la Distribución Generalizada de Extremos.

Al obtener series de tiempo lo suficientemente largas para considerar la DGE válida en el ajuste, el problema se reduce a estimar, o hacer inferencias en los parámetros (μ, σ, ξ) . Dichas inferencias se basan, generalmente, en técnicas gráficas, estimadores de los momentos de la distribución y los estimadores de la función de verosimilitud, los métodos basados en la función de verosimilitud son los preferidos, ya que los estimadores son más entendibles y las inferencias son fácilmente modificadas al incorporar estructuras complejas en el modelo. El procedimiento al hacer inferencias en la verosimilitud será la siguiente:

Capítulo III: Metodología de la Investigación.

Especificación de la función de verosimilitud: la función log-verosimilitud es muy fácil de obtener y tiene la siguiente expresión:

$$L(\mu, \sigma, \xi) = \sum_{i=1}^K \left\{ \left(1 + \frac{1}{\xi}\right) \log \left[1 + \xi \left(\frac{Z_i - \mu}{\sigma}\right)\right] - \left[1 + \xi \left(\frac{Z_i - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-\frac{1}{\xi}} \right\} \quad (\text{Ecuación 3.10})$$

Maximización (numérica) de la expresión anterior, así obtenemos los Estimadores Máximo-Verosímiles (EMV) de (μ, σ, ξ) .

Cálculo de los errores estándar, lo cual se hace invirtiendo la matriz de información observada (que deriva de la teoría clásica de estimación por máxima verosimilitud)

Se realizó un chequeo Diagnóstico, que consiste en la comparación de la distribución empírica de Mn y de los estimados basados en el modelo ajustado, mediante los gráficos de la distribución empírica y la distribución basada en el modelo. Igualmente se comparó la gráfica de los cuantiles basados en la DGE y la distribución empírica en un gráfico cuantil-cuantil ofrece una medida en cuanto a lo bien que ajusta el modelo. Tanto el primer gráfico como el segundo deben estar cerca de la diagonal unitaria (la recta $y=x$), de otro modo indica fallas en el modelo de la DGE ajustado.

3.6.4.- Distribución Generalizada de Pareto (DGP).

El modo más común para generar las muestras de eventos extremos es tomar el valor máximo anual; ahora bien, este modo de crear la serie desperdicia una enorme cantidad de información. Supongamos que el máximo de precipitación diaria el año 1 fue de 120 mm, y en ese año hubo cinco eventos de precipitaciones entre 105 y 115 mm, y luego, el año 2, el máximo anual fue de 95 mm; se está dejando de incluir en la serie, 2 valores que son, en la vida real, mucho mayores que el “máximo” del año 2.

Capítulo III: Metodología de la Investigación.

Por estas razones se buscan modelos que eviten el desuso de información disponible. Considerando el conjunto máx. $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ como se explicó anteriormente, y suponiendo que la distribución de Mn sigue la DGE, es decir;

$$Pr \{Mn \leq z\} \approx G(z) \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

Entonces, para un “umbral” u lo suficientemente grande, la función de distribución de $(X - u)$ condicional en $X > u$ es aproximadamente

$$H(y) = 1 - \left[1 + \left(\frac{\xi y}{\sigma^*} \right)^{\frac{1}{\xi}} \right] \quad \text{para } \xi \neq 0$$

$$H(y) = 1 - \exp\left(-\frac{y}{\sigma^*}\right) \quad \text{para } \xi = 0$$

(Ecuación 3.6 y 3.7)

Definida en $\{y : y > 0, 1 + (\xi y / \sigma^*) > 0\}$ donde:

$$\sigma_u = (\sigma_{u_0} + \xi(u - u_0))$$

(Ecuación 3.8)

$H(y)$ se conoce como la **Familia Generalizada de Pareto**. Lo anterior dice que si los máximos se comportan según el modelo de la DGE, los valores que están por encima del umbral tienen distribución dentro de la Familia Generalizada de Pareto. Lo importante de esto es que la familia de distribuciones de valores extremos (DGE) se relaciona con esta por medio del parámetro de forma, ya que este es el mismo para ambas. También se nota la falta de parámetro de localización, pero aun así la relación de los parámetros de localización y escala de la DGE con el parámetro de escala de la DGP está dada por (3.8).

Suponiendo que la DGP es válida para cierto umbral u_0 , haciendo algunos cálculos se puede mostrar que

$$E(X - u_0 | X > u_0) = \sigma_{u_0} / 1 - \xi$$

(Ecuación 3.9)

Capítulo III: Metodología de la Investigación.

Donde su σ_u es el parámetro de escala correspondiente de tomar el umbral u_0 . Pero si la DGP es válida para u_0 , es válida también para $u > u_0$ por lo que

$$\begin{aligned} E(X - u | X > u) &= \sigma_u / 1 - \xi \\ &= (\sigma_{u_0} + \xi u) / 1 - \xi \end{aligned} \quad \text{(Ecuación 3.10)}$$

Luego se observa que para $u > u_0$ la esperanza se comporta como función lineal de u . Pero al tener los datos, se puede calcular de forma empírica el valor de $E(X - u | X > u)$ como la media muestral de los valores que exceden el umbral u . Luego, si se gráfica el conjunto de puntos

$$\left\{ \left(u, \frac{1}{n_u} \sum_{i=1}^{n_u} x_i - u \right) : u < x_{\max} \right\} \quad \text{(Ecuación 3.11)}$$

Donde X_1, X_2, \dots, X_n son las observaciones que exceden u , la DGP provee una aproximación de los excesos que es válida para valores que se muestran aproximadamente lineales en u . Este gráfico se llama Gráfico de Medias de Excesos (gráfico ME). En el presente trabajo este gráfico se muestra con intervalos de confianza para facilitar la escogencia del umbral a partir del cual se ajustara el modelo DGP.

Aparte del gráfico de la media de los excesos, se usan otros gráficos que apoyan lo dicho anteriormente para la selección de un umbral. Si la DGP es un modelo razonable para los excesos del umbral u_0 , entonces la distribución de los excesos de $u > u_0$ también siguen un modelo DGP. Si σ_u es el parámetro de escala del modelo de Pareto para los excesos de u , se sigue de (3.8) que

$$\sigma_u = (\sigma_{u_0} + \xi(u - u_0)) \quad \text{(Ecuación 3.12)}$$

Capítulo III: Metodología de la Investigación.

De modo que el parámetro de escala cambia a menos que $\xi = 0$. Este problema se soluciona reescalando el parámetro como $\sigma = \sigma_u - \xi_u$, expresión que es constante respecto de u por virtud de la ecuación (3.14). Como consecuencia, los estimados de ambos parámetros de escala y forma deben ser constantes sobre u_0 si la DGP es válida para los excesos de u_0 . Luego al graficar los parámetros σ y ξ respecto de u , se debe escoger el menor u_0 para el cual los estimados de escala y forma se mantienen constantes o casi constantes. Más adelante se verá como se escogen los umbrales viendo ambos gráficos, el de Media de los excesos y el gráfico de los estimados de σ y ξ respecto de u .

3.6.5.- Inferencias de la Distribución Generalizada de Pareto (DGP).

Similar a lo que se hace en el ajuste de la DGE, en el ajuste de la DGP se estiman los parámetros de la función log-verosimilitud, que tiene la siguiente forma:

$$L(\sigma, \xi) = -k \log \sigma - \left(1 - \frac{1}{\xi}\right) \sum_{i=1}^k \log \left(1 + \frac{\xi y_i}{\sigma}\right) \quad (\text{Ecuación 3.13})$$

Para el caso en que $\xi \neq 0$, y

$$L(\sigma) = -k \log \sigma - \frac{1}{\sigma} \sum_{i=1}^k \log(y_i) \quad (\text{Ecuación 3.14})$$

Para $\xi = 0$. La expresión está definida para $\left(1 + \frac{\xi y_i}{\sigma}\right) > 0$ y donde los y_i son las k observaciones que exceden el valor de u . Aquí debe entenderse que el parámetro σ no es el mismo que el de la DGE, sino que se sobreentiende que $\sigma = \sigma_u$.

Capítulo III: Metodología de la Investigación.

Si la DGP es válida para los excesos del umbral u , entonces para $X > u$ tenemos

$$\Pr\{X > x \mid X > u\} = \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{\frac{1}{\xi}}\right]$$

Luego de aplicar ciertas propiedades de las probabilidades condicionales y reacomodando la expresión anterior obtenemos

$$\begin{aligned}x_m &= u + \left(\frac{\sigma}{\xi}\right) [(m.P_u)^\xi - 1] && \text{para } \xi \neq 0 \\x_m &= u + \sigma \log(m.P_u) && \text{para } \xi = 0\end{aligned} \quad (\text{Ecuación 3.15})$$

Donde $P_u = Pr\{X > u\}$ y con m lo suficientemente grande para asegurar que $X_m > u$. La ecuación anterior se conoce como el periodo de retorno para la observación m . En la práctica el valor de P_u se calcula empíricamente: N° de excedentes / N° de datos totales. El valor de m se calcula como el producto de las observaciones tomadas en un año con el periodo de retorno que se desea estimar.

El gráfico de periodo de retorno de X_m , junto con el gráfico de probabilidades y cuantil-cuantil, sirven de soporte tanto para la presentación del modelo, como para su validación, y las consideraciones que se toman en la interpretación de cada gráfico son las mismas tomadas para este caso. Por lo tanto, se hará el ajuste de la DGP para las series de precipitación diaria de cada estación con el diagnostico gráfico similar al presentado para la DGE.

3.7.- Método de Gumbel.

El “valor máximo” que se determinó para un determinado período de retorno se halló por medio de la expresión:

$$x = \bar{x} + D_x = \bar{x} + k * s_{n-1} \quad (\text{Ecuación 3.16})$$

Capítulo III: Metodología de la Investigación.

x: valor máximo para un período de retorno Tr.

\bar{x} : media de la serie dada de valores máximos

Dx: desviación respecto a la media, que se estima mediante el producto: $k * s_{n-1}$

Donde:

k: factor de frecuencia, que indica el número de veces de desviación típica en que el valor extremo considerado excede a la media de la serie.

s_{n-1} : desviación estándar, desviación típica de los valores extremos.

El valor de la variable “k” se estima a partir del período de retorno en años y del número de años disponibles en la serie. Así:

$$k = (y_T - y_n) / S_n \quad (\text{Ecuación 3.17})$$

y_T : variable de Gumbel para el período de retorno T. Se determinó a partir del valor del período de retorno. El valor se puede obtener de tablas o de su ecuación:

$$y_T = -\ln \ln (T/T-1) \quad (\text{Ecuación 3.18})$$

y_n : valor que se obtiene a partir del número de años de la serie, mediante Tabla.

S_n : valor que se obtiene a partir del número de años de la serie, mediante Tabla

Sustituyendo en la expresión anterior:

$$x = \bar{x} + (k * s_{n-1}) = \bar{x} + ((y_T - y_n) * s_{n-1} / S_n) \quad (\text{Ecuación 3.19})$$

3.8.- Pruebas de Ajuste.

Para determinar que tan adecuado es el ajuste de los datos a una distribución de probabilidades se trabajó con el test de Kolmogorov-smirnov:

3.8.1.- Kolmogorov–Smirnov.

El estadístico Kolmogorov–Smirnov “D” considera la desviación de la función de distribución de probabilidad de la muestra $P(x)$ de la función de probabilidades teórica escogida $P_o(x)$ tal que: **$D_n = \text{máx. } (P(x) - P_o(x))$** . La prueba requiere que el valor D_n calculado con la expresión anterior sea menor que el valor tabulado D_n para un nivel de probabilidad requerido. Esta prueba es fácil de realizar y comprende las siguientes etapas:

- El estadístico D_n es la máxima diferencia entre la función de distribución acumulada de la muestra y la función de distribución acumulada teórica escogida.
- Se fija el nivel de probabilidad α , valores de 0,05 y 0,01 son los más usuales.
- El valor crítico D_α de la prueba debe ser obtenido de tablas en función de α y n .
- Si el valor calculado D_n es mayor que el D_α , la distribución escogida se debe rechazar.

3.9.- Diseño de las curvas IDF.

En esta etapa se elaboraron las gráficas que representaran la relación de la intensidad, duración y frecuencia de la precipitación de la Estación seleccionada, de acuerdo a los parámetros calculados en las secciones anteriores y al distribución de probabilidad seleccionada, que se presentan en el capítulo IV de manera intercalada pero seguido de cada uno de los ajustes de los datos a las respectivas distribuciones de probabilidades estudiadas.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS.

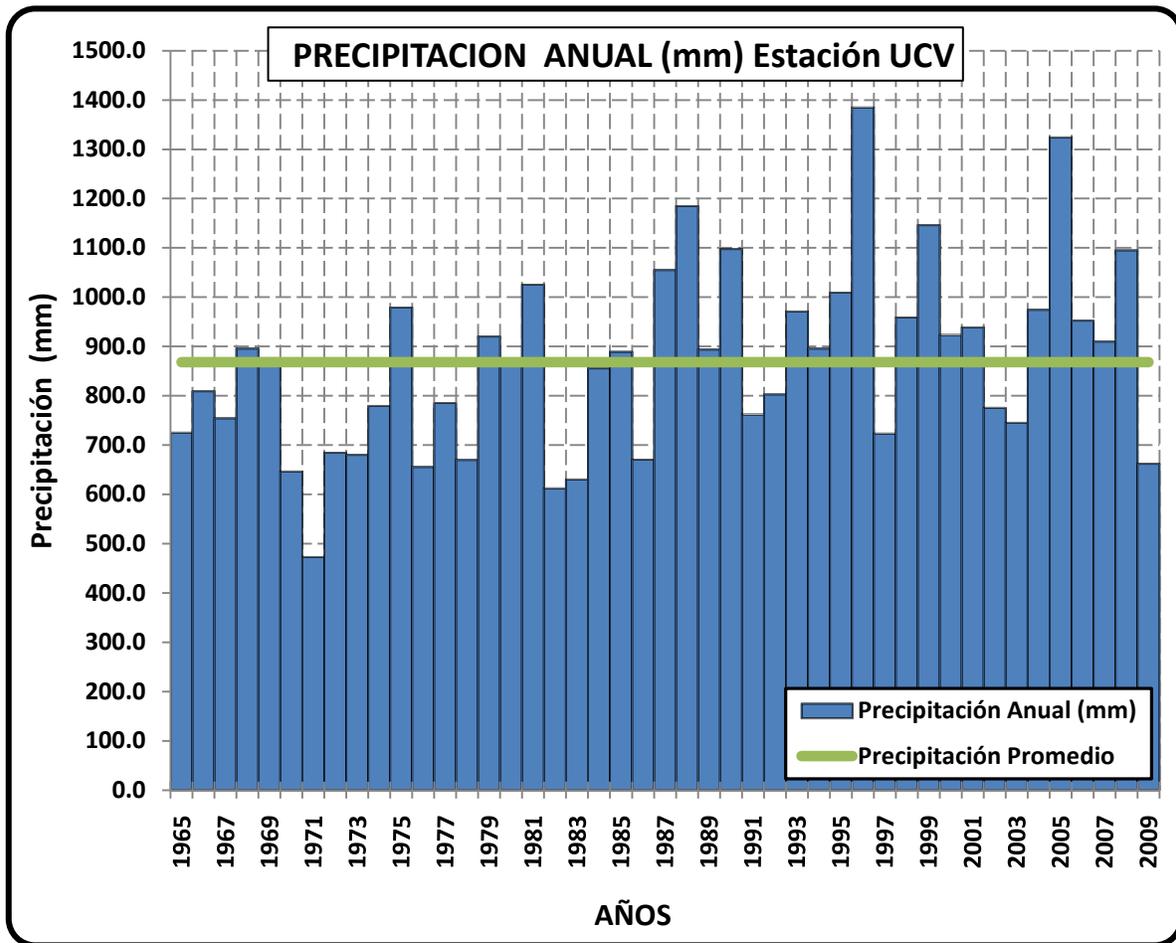
Capítulo IV: **Resultados y Análisis.**

4.1.- Precipitación y distribución anual de las lluvias de 1965 a 2009, Estación Meteorológica UCV.

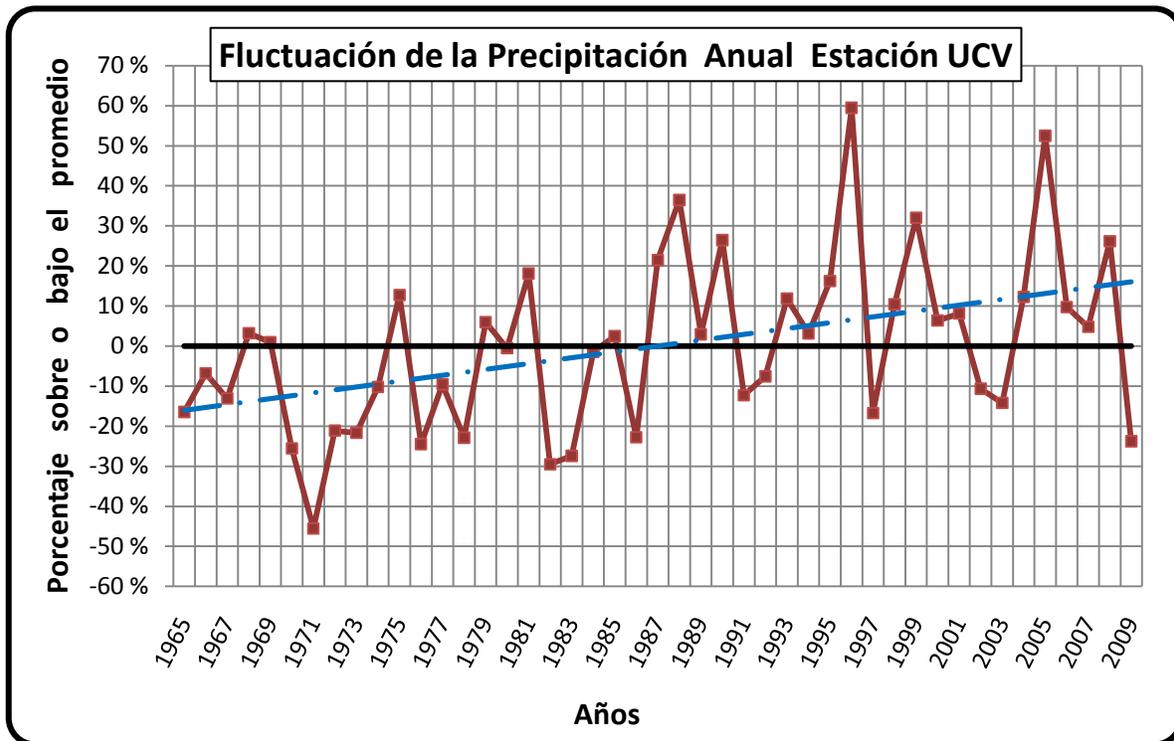
El comportamiento de las lluvias puede ser muy variable de un año a otro, en términos tanto de cantidades de precipitaciones como de su distribución a lo largo de cada temporada de lluvias; para estudiar esto se utilizó un periodo de datos de la estación meteorológica de la Universidad Central de Venezuela que va desde 1965 hasta el presente, aunque es conveniente resaltar que para el análisis de las intensidades de la precipitación los datos provenientes del pluviógrafo van desde 1965 hasta el 2007.

Respecto a la precipitación media anual para el área de influencia de la estación, se presenta un valor de 868,1 mm (Gráfico 4.1) para un registro de cuarenta y dos años, desde 1965 a 2009, los valores anuales oscilan entre 1384.6 mm el año más lluvioso (1996), y 472.7 mm el menos lluvioso (1971). Ver (Tabla 4.1 y 4.2)

En lo relativo a los cambios observados a lo largo del periodo de la precipitación anual de la estación meteorológica UCV se puede decir que; en el lapso 1965 a 1969, en general la lluvia fue deficiente respecto a la media; de 1970 a 1979 la lluvia fue en general deficiente; de 1980 a 1989 las lluvias estuvieron cerca de la media con varias fluctuaciones, estando la mitad de la década por debajo de la media y la otra mitad por encima; de 1990 a 1999 la lluvia fue superior a la media; de 2000 a 2009 la lluvia fue superior a la media, dentro de estas tendencias descritas anteriormente, lógicamente hay contrarias, pero cuya importancia secundaria no alcanza a modificar la tendencia general. (Gráfica 4.2)



Gráfica 4.1 – Precipitación Anual.



Gráfica 4.2 – Fluctuación de la precipitación Anual.

4.2.- Precipitación y distribución mensual de las lluvias de 1965 a 2007.

El análisis de la distribución de las precipitaciones mensuales (Gráfica 4.3 y 4.4), indica la existencia de una temporada lluviosa, en los meses de Mayo a Noviembre, en la cual ocurre más del 80% de la precipitación anual y una temporada peculiarmente seca en los meses de Enero, Febrero y Marzo en que la cae menos del 10% de la precipitación anual. Con cierta frecuencia ocurren lluvias importantes en los meses de Diciembre; Enero y Febrero que tienen varias condiciones sinópticas asociadas, como por ejemplo, llegadas de masa de aires fríos al litoral proveniente de latitudes medias. El mes de abril es uno de los meses que presenta mayor variación, esto motivado que muchas veces el inicio de la

Capítulo IV: **Resultados y Análisis.**

temporada de lluvia se adelanta y se presentan precipitaciones considerables sobre todo a final de mes.

En la Tabla 4.1, se aprecian los datos mensuales de precipitación de la estación Meteorológica UCV desde 1965 a 2010 incluyendo el valor anual, valores que se utilizaron para elaborar los gráficos que ilustran lo analizado en esta sección.

Es conveniente resaltar que dentro de esta temporada lluviosa el mes en promedio que tiene el valor más alto de precipitación es el mes de octubre y este representa el 13,6% del total anual mientras que; Mayo cae el 9,4% del total anual, en Junio el 12.1%, en Julio 11,5%, en Agosto el 12,4%, en Septiembre el 12.2% y en Noviembre el 11.4% para sumar aproximadamente el 84% de la lluvia anual, esto da una idea que en promedio la temporada de lluvia resulta ser constante mes a mes de su ocurrencia (Tabla 4.3).

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

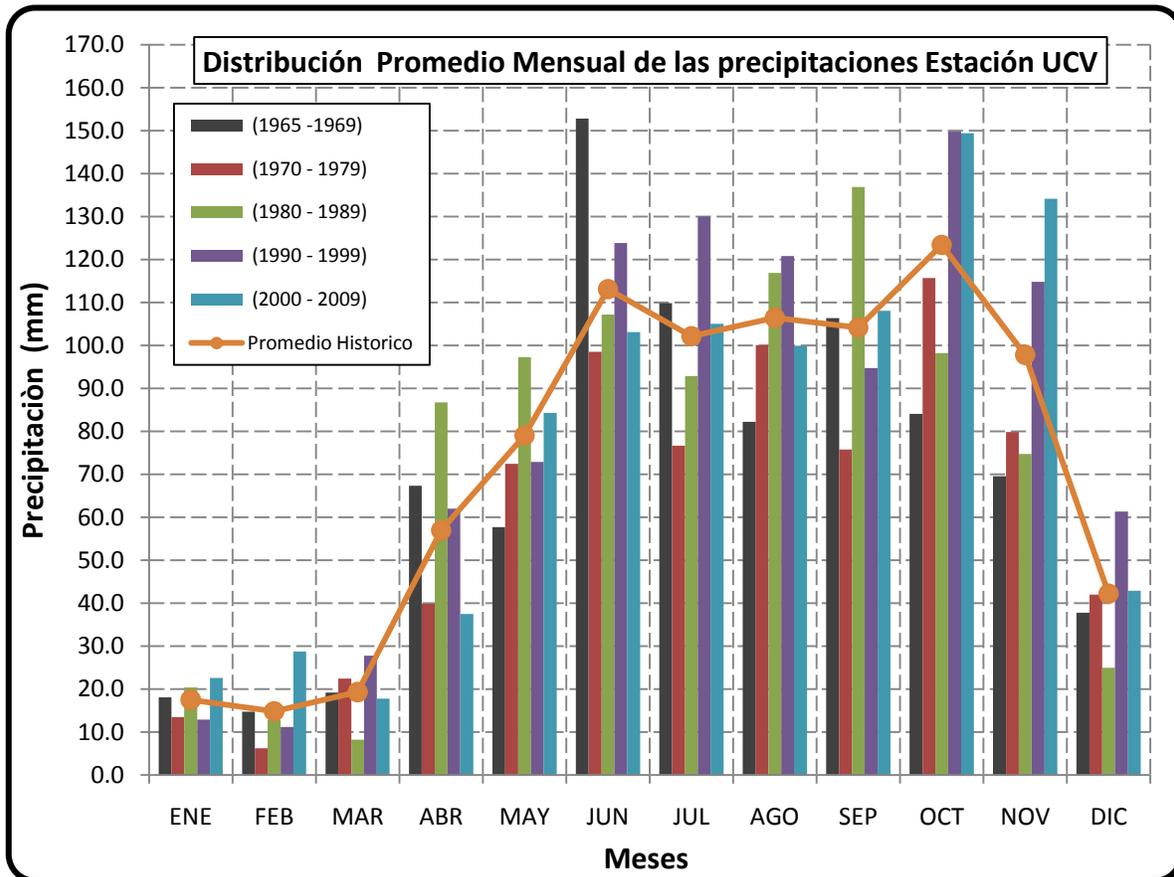
Tabla 4.1 - Precipitaciones Mensuales de 1965 a 2010.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1965	12,5	25,5		16,8	63,5	120,3	201,9	184,8	8,4	17,3	68,3	6,0	725,3
1966	22,5	14,9		83,8	58,7	173,7	78,8	47,2	81,3	94,2	118,6	35,4	809,1
1967	12,5	1,4	8,59	67,62	9,3	68,62	101,1	73,51	198,3	119,28	60,38	33,87	754,5
1968	0,2	10,82	9,31	110,6	135,1	184,2	113,1	43,4	155,5	80,1	19,7	33,9	895,9
1969	42,78	21,0	39,6	58,1	22,19	217,53	54,59	62,1	88,49	109,5	80,9	79,62	876,4
1970	24,68	26,23	55,3	14,12	97,14	159,09	114,97	87,75	41,93	25,01			646,2
1971	9,9	2,8	11,5	90,0	78,4	63,1	29,9	25,0	31,9	45,9	34,1	50,2	472,7
1972	43,4	4,48	8,63	55,8	128,45	96,2	53,99	35,65	22,31	134,97	39,85	61,14	684,9
1973	9,8	0,0	0,0	67,0	18,5	51,0	32,4	153,5	108,9	68,1	120,5	50,4	680,1
1974	9,48	0,91	5,12	2,14	116,99	40,15	166,91	113,16	184,9	61,18	74,62	3,99	779,6
1975	2,36	2,2		40,19	42,32	91,29	31,52	228,17	114,51	247,71	112,58	66,09	978,9
1976	20,26	23,77	18,56	23	16,94	116,82	100,89	81,34	49,42	147,37	23,78	33,65	655,8
1977		0,7	15,1	0,0	84,2	108,7	84,2	158,3	49,2	108,7	173,7	2,6	785,4
1978	0	1,15	48,37	35,78	67,47	101,04	77,71	61,75	32,28	146,4	56,28	41,37	669,6
1979	1,38	0,01	39,2	70,47	74,44	157,88	74,5	56,41	122,3	171,9	83,1	68,4	920,0
1980	5,49	1,35	0	55,3	65,04	112,47	162,7	114,43	177,5	54,81	73,59	40,91	863,6
1981	22,39	65,95	6,96	319,3	103,8	106,4	40,88	159,63	129,2	33,75	20,41	16,56	1025,2
1982	36,63	14,55	9,63	39,38	76,74	146,59	77,56	39,83	122,65	28,39	6,41	13,7	612,1
1983	42,6	2,85	0,06	57,76	86,04	111,8	54,91	91,1	92,3	69,43	21,11	0,3	630,3
1984	39,6	23,9		79,2	12,3	31,9	183,1	67,0	204,2	129,2	79,9	5,2	855,5
1985	2,0	8,4	45,3	88,2	57,3	75,2	105,6	100,5	91,59	98,0	118,06	99,36	889,5
1986	1,15	1,68	2,08	64,8	80,85	98,48	20,13	114	96,22	105,3	81,15	4,65	670,5
1987	36,8	0,3	0,5		285,4	55,96	100,45	173,68	120,8	141,33	109,41	30,24	1054,9
1988	11,5	7,34	4,58	61,55	28,97	251,46	61,15	158,47	151,73	313,76	97	37,18	1184,7
1989	5,82	2,2	4,73	15,57	176,0	82,0	122,69	150,4	183,1	8,71	140,8	1,64	893,7
1990	8,38	28,66	0,57	47,88	121,21	151,0	131,1	121,83	190,9	186,5	82,0	27,65	1097,7
1991	10,1	0,92	59,0	47,8	4,06	44,89	45,18	155,45	103,35	31,14	234,2	25,67	761,8
1992	5,75	2,8	0	72,54	106,69	144,6	108,01	81,49	82,14	21,55	120,6	56,5	802,7
1993	26,39	4,55	5,07	82,1	136,1	121,97	95,08	240,2	77,5	29,22	140,5	12,42	971,1
1994	0	0	0,15	19,81	51,99	84,31	127,86	69,7	67,07	332,66	99,29	42,62	895,5
1995	2,79	0	137,3	83,18	24,35	126,99	127,42	116,2	102,08	197,81	87,75	3,43	1009,3
1996	37,3		0,2		55,81	159,06	311,66	156,64	68,63	229,01	189,19	177,14	1384,6
1997	33,6	35,05	0,13	18,49	42,57	128,78	146,08	61,87	27,35	179,94	39,99	9,24	723,1
1998	0,33	0,2	57,31	49,19	162,19	206,48	87,36	53,62	108,0	87,37	94,49	52,33	958,9
1999	4,57	28,31	17,97	137,38	24,37	70,6	120,79	151,6	120,38	203,2	60,37	206,8	1146,3
2000	54,59	40,82	43,76	0,83	81,13	89,16	107,88	104,02	195,79	70,56	113,56	21,52	923,6
2001	0,33	4,5		3,43	57,57	51,7	165,6	126,79	101,1	202,88	127,47	97,21	938,6
2002	7,1	0,82	0,95	90,9	100,2	145,6	112,9	54,53	106,37	108,4	20,44	27,5	775,7
2003	0	0	15,06	51,5	13,82	112,61	118,35	28,08	90,17	222,29	64,87	28,27	745,0
2004	16,82	1,74	0	57,17	136,09	100,97	93,69	66,06	97,1	138,09	248,09	18,88	974,7
2005	79,3	116,0		64,1	168,2	196,3	92,6	128,3	96,4	26,5	270,3	86,0	1324,0
2006	24,54	35,81	12,99	11,23	120,72	85,7	73,2	103,98	74,02	248,48	120,81	40,99	952,5
2007	6,85	2,26	39,42	59,2	0,25	116,97	64,63	244,3	87,35	165,98	61,93	60,5	909,6
2008	20,8	2,3	5,5	27,2	128,7	93,0	145,3	11,2	67,0	264,4	283,0	47,0	1095,4
2009	15,6	83,5	24,8	9,3	36,3	39,0	76,5	132,3	165,5	47,0	31,1	1,1	662,0
2010	2,3	13,3	19,0	108,5									143,1

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

Tabla 4.2 – Descriptivos de las Precipitaciones Mensuales de 1965 a 2010.

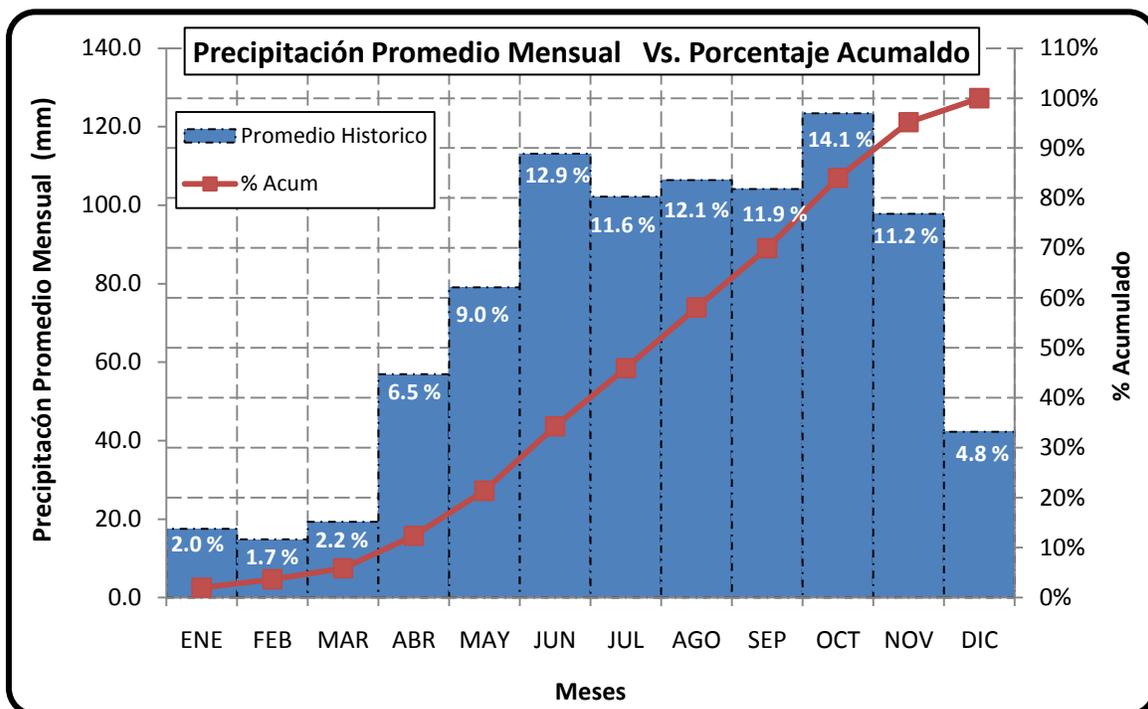
DESCRIPTIVOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Media	17.2	14.8	19.3	57.0	79.1	113.1	102.2	106.4	104.2	123.4	97.8	42.3	868.1
Error típico	2.7	3.6	4.7	8.1	8.4	7.5	7.9	8.5	7.6	12.4	10.1	6.4	28.2
Mediana	10.1	2.9	8.6	55.8	74.4	108.7	100.5	104.0	97.1	108.7	82.6	33.9	876.4
Desviación estándar	17.7	23.6	27.0	51.8	56.6	50.3	52.9	57.2	50.8	83.5	66.5	42.3	189.2
Mínimo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	31.9	20.1	11.2	8.4	8.7	6.4	0.3	472.7
Máximo	79.3	116.0	137.3	319.3	285.4	251.5	311.7	244.3	204.2	332.7	283.0	206.8	1384.6
Percentil 10	0.3	0.1	0.0	9.7	15.1	51.3	42.6	41.3	36.1	27.3	21.9	3.6	658.3
Percentil 90	41.4	35.5	49.8	89.6	136.1	180.0	164.4	168.1	184.2	240.2	184.5	84.1	1096.8
Número de datos	44.0	44.0	33.0	41.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	43.0	43.0	45.0



Gráfica 4.3 – Distribución promedio Mensual de las precipitaciones.

Tabla 4.3 – Promedios Mensuales de precipitación.

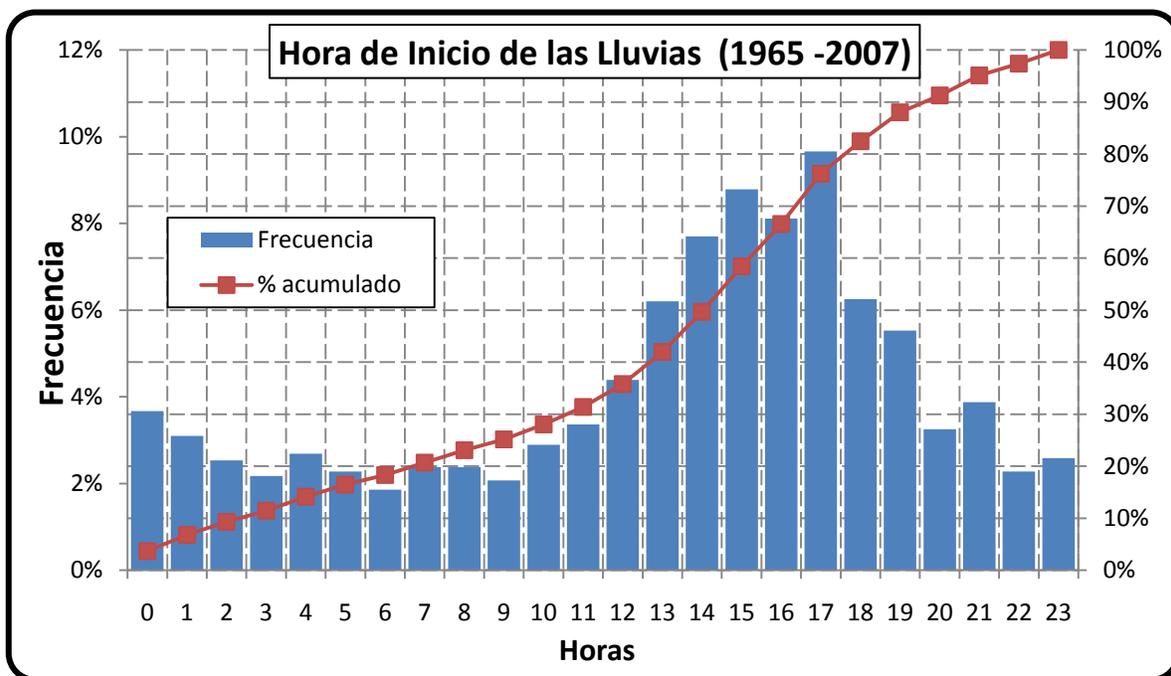
Promedios Decadales Precipitación (mm)												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
(1965 -1969)	18,1	14,7	19,2	67,4	57,7	152,9	109,9	82,2	106,4	84,1	69,6	37,8
(1970 -1979)	13,5	6,2	22,4	39,9	72,5	98,5	76,7	100,1	75,8	115,7	79,8	42,0
(1980 -1989)	20,4	12,9	8,2	86,8	97,2	107,2	92,9	116,9	136,9	98,3	74,8	25,0
(1990 -1999)	12,9	11,2	27,8	62,0	72,9	123,9	130,1	120,9	94,7	149,8	114,8	61,4
(2000 -2009)	22,6	28,8	17,8	37,5	84,3	103,1	105,1	100,0	108,1	149,5	134,2	42,9
Promedio Historico	17,5	14,8	19,3	57,0	79,1	113,1	102,2	106,4	104,2	123,4	97,8	42,3
% Respecto al Total	2,2%	1,7%	2,3%	6,4%	9,4%	12,1%	11,5%	12,4%	12,2%	13,6%	11,4%	4,8%
% Acum	2,2%	3,9%	6,2%	12,6%	22,0%	34,1%	45,6%	58,0%	70,2%	83,7%	95,2%	100,0%



Gráfica 4.4 – Precipitación promedio Mensual Vs. Porcentaje Acumulado.

4.3.- Distribución de las precipitaciones a lo largo del día.

Las lluvias se distribuyen a lo largo del día según un esquema típico de lluvias de medio tropical: es muy poco usual que llueva entre media noche y las 10 de la mañana, mientras que la mayoría de las precipitaciones inician entre las 12 del medio día y las siete de la noche, con una proporción del 47% respecto al total, (Gráfica 4.5). Siendo las 5 de la tarde la hora con el mayor porcentaje de inicio de precipitación con casi 10% del total de las lluvias; mientras que las 3, 6 y 9 de la mañana presentan el menor porcentaje de hora de inicio de precipitaciones, menores al 2%.

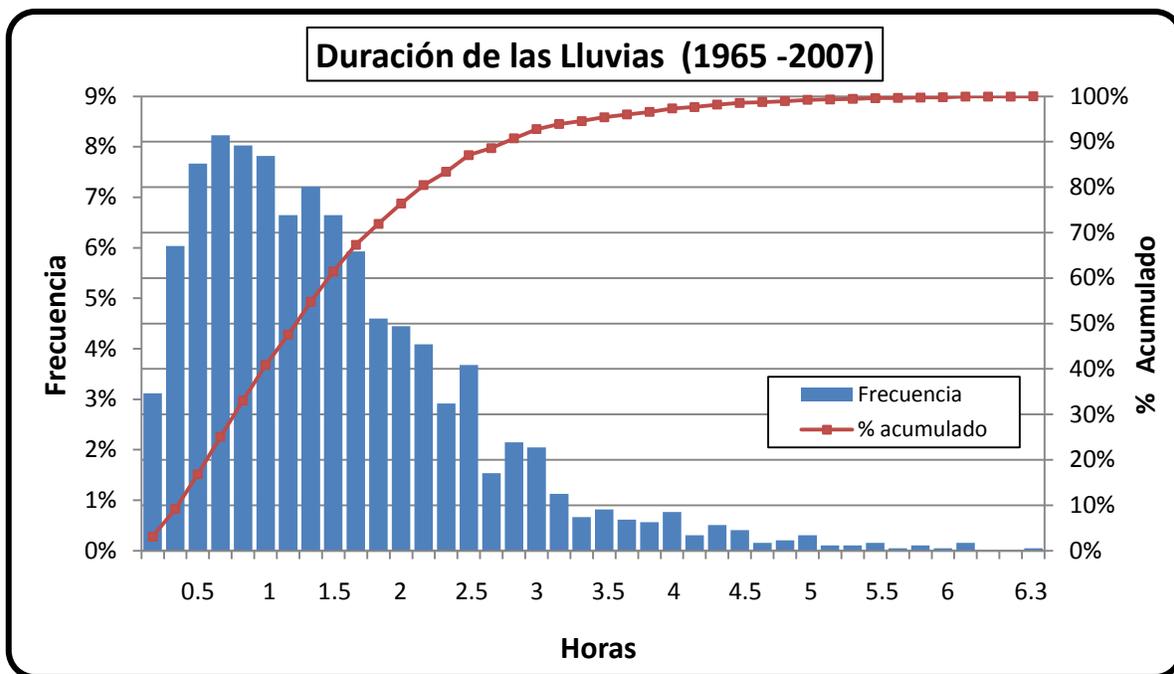


Gráfica 4.5 – Hora de inicio de las Lluvias.

4.4.- Duración de las precipitaciones.

La mitad de las lluvias tienen una duración inferior a 75 minutos, y de ellas el 50% no superan los 40 minutos. Por otro lado, solamente un 6 % de los aguaceros tienen una duración mayor a 3 horas. Estas características de las precipitaciones son típicas de lluvias de los trópicos que caen bajo la forma de aguaceros breves. Para determinar esta duración se estudiaron eventos que no superaran las dos horas sin precipitar, de ocurrir esto se consideró como otro evento.

La duración más común para eventos medidos en la estación meteorológica es de 30 minutos a 1 hora, resultando las precipitaciones de 40 minutos las más comunes con un poco más del 8% de frecuencia. (Gráfica 4.6).

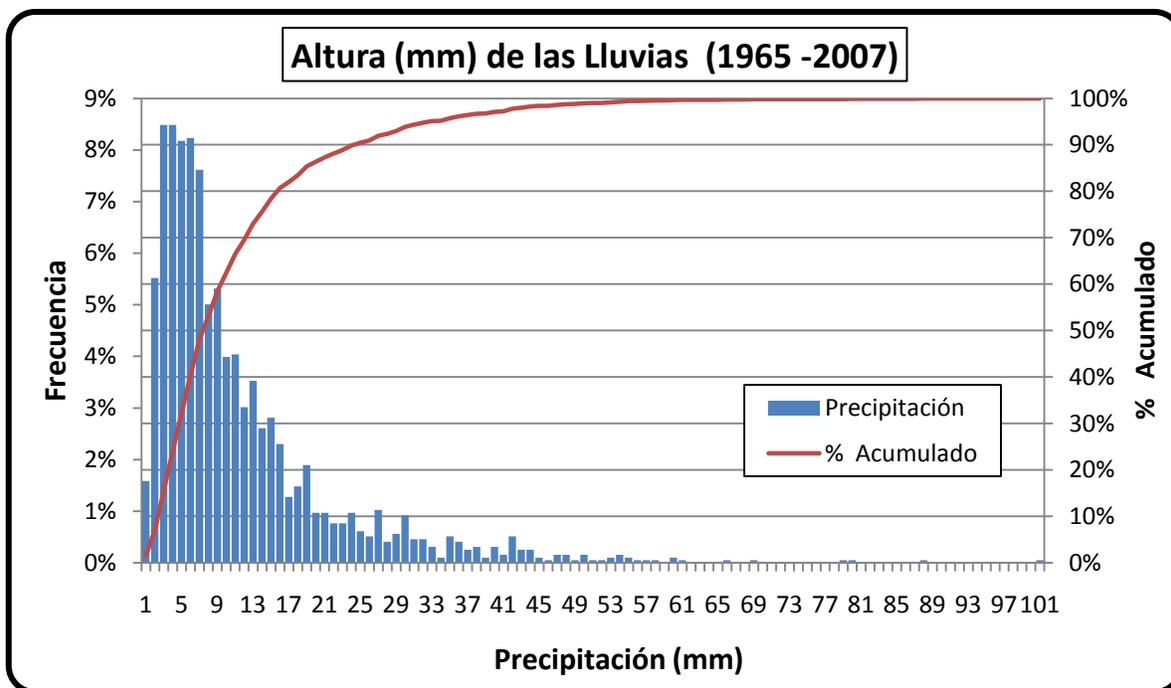


Gráfica 4.6 – Duración de las Lluvias.

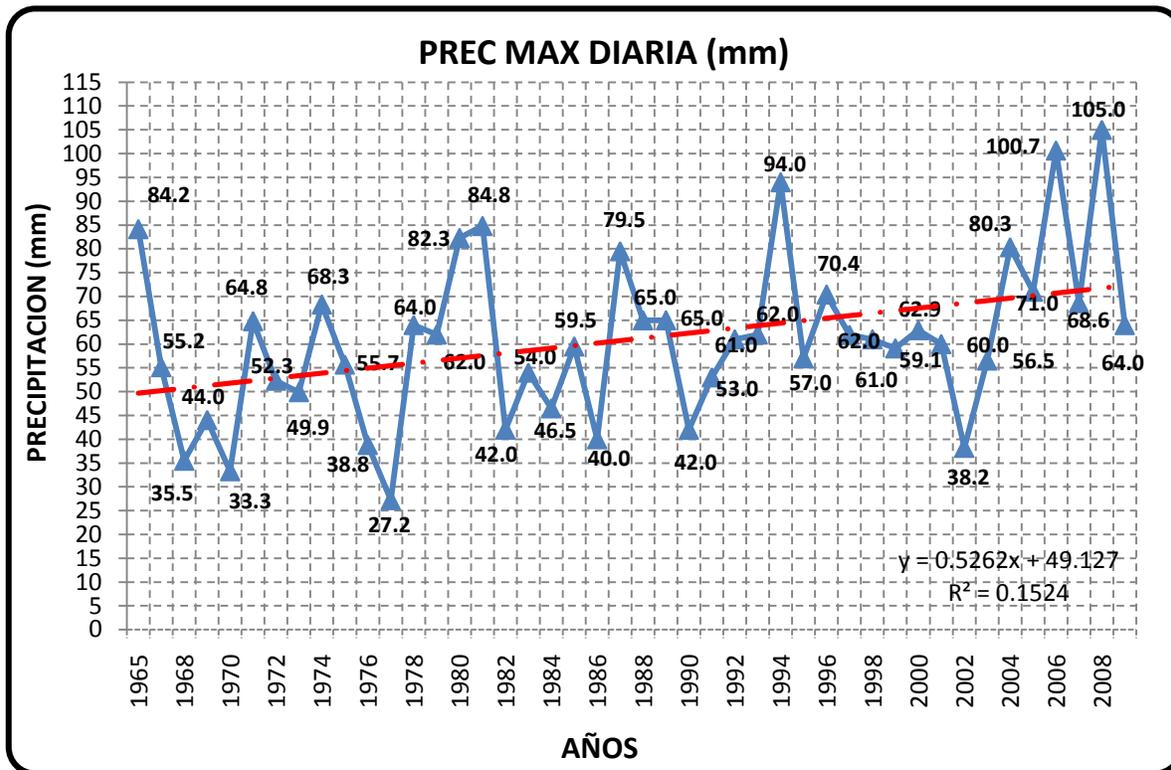
4.5.- Cantidad de agua de las precipitaciones.

De acuerdo al análisis efectuado de la cantidad de precipitación de todo el registro de datos de la estación, el 60 % de las lluvias tienen un valor inferior a los 10 mm, y de estas el 50 % no superan los 5 mm, solo el 8 % de la lluvias son iguales o superiores a 30 mm, así como también encontramos una lluvia de 100 mm la cual tiene una frecuencia de 0.05 % siendo este el valor más extremo registrado. (Gráfica 4.7).

De igual forma se presenta (Gráfica 4.8), donde se puede visualizar el comportamiento de la precipitación máxima diaria alcanzada por año durante todo el registro de la estación meteorológica UCV, en la cual se observa que los años 2006 y 2008 presentaron una lluvia máxima diaria de 100 mm, del mismo modo en los años 1968, 1970, 1977 la precipitación máxima diaria no supero los 35 mm.

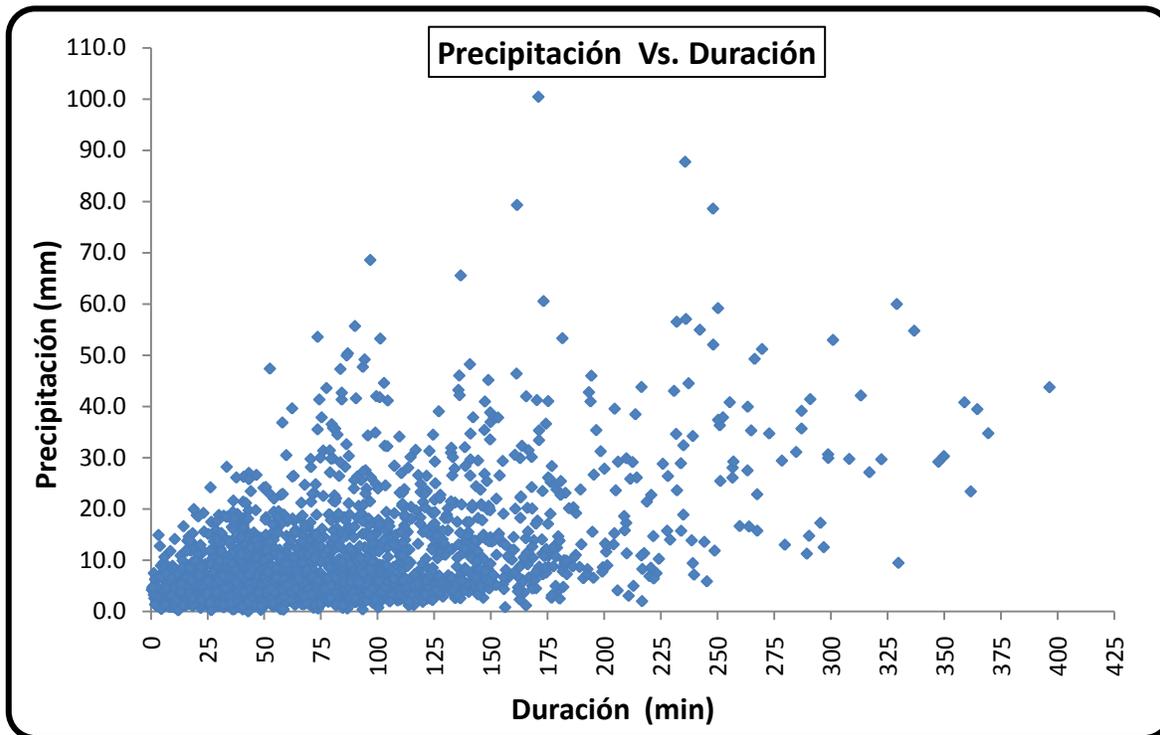


Gráfica 4.7 – Altura (mm) de las Lluvias.



Gráfica 4.8 – Precipitación máxima diaria observada.

En la gráfica 4.9 se presenta la relación existente entre la precipitación y la duración de todos los eventos desde 1965 al 2007, en ella se puede ver como se distribuye la cantidad de precipitación respecto a la duración del evento que la originó. La mayoría de los eventos, nube de puntos, están en precipitaciones menores a 10 mm para duraciones variables, pero menores de hora y media. Se pueden ver valores de precipitaciones superiores a 50 mm y estas están repartidas de 50 minutos en adelante pero no resultan frecuentes.



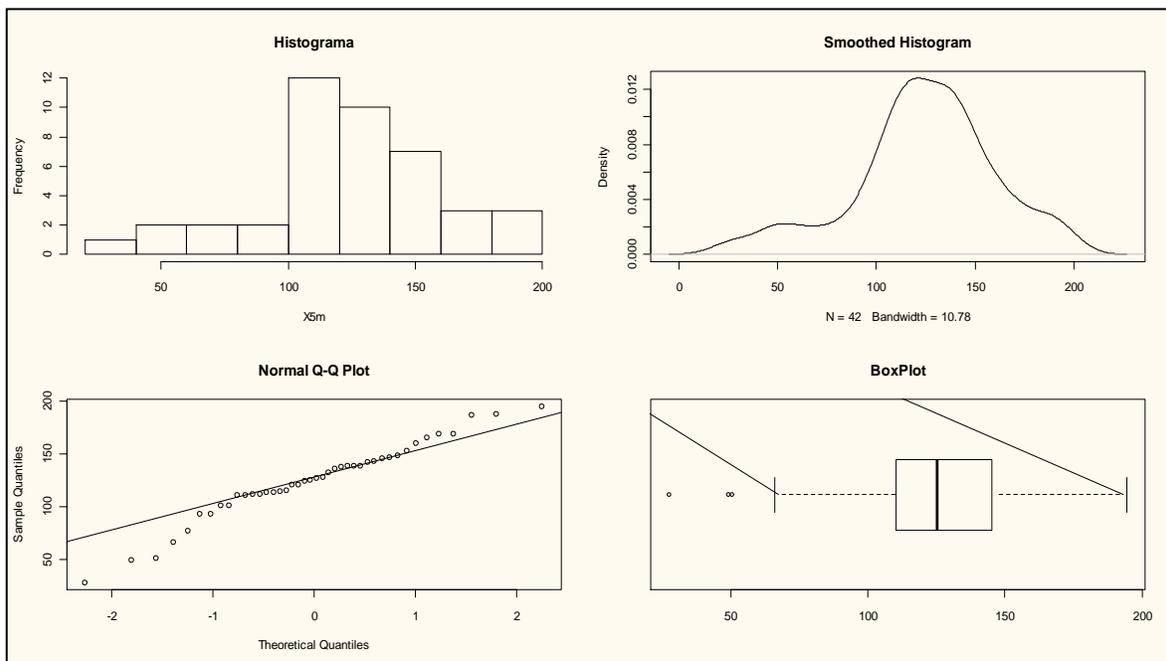
Gráfica 4.9 – Precipitación Vs. Duración.

4.6.- Análisis exploratorio de los datos.

Una técnica muy útil para trabajar con datos meteorológicos es el “*Análisis Exploratorio de Datos*” (AED – EDA, por sus siglas en inglés), que se basa en un *enfoque gráfico*, que permite, entre otros: maximizar la visión del conjunto de datos; detectar outliers, anomalías y/o datos erróneos; descubrir estructuras subyacentes en una serie, En estadística se presuponen cosas sobre los datos que no son necesariamente verdad, de modo que usando el enfoque tradicional, se corre el peligro de aceptar conclusiones que pueden ser falsas, o calcular indebidamente, y como una imagen vale más que mil palabras en la gráfica 4.10 se presenta el AED para la intensidad de 5 minutos de duración de la series de máximos anuales, en el cual observamos cuatro gráficos, que permiten sacar

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

Conclusiones interesantes acerca de las características de los datos, en primer lugar los mismos no provienen de una muestra que siga una distribución normal, por la forma del histograma, el histograma alienado, y la comparación de los cuantiles empíricos versus los cuantiles teóricos siguiendo una distribución normal, los puntos de la muestra no se ajustan a la línea recta en el (Normal Q-Q plot).

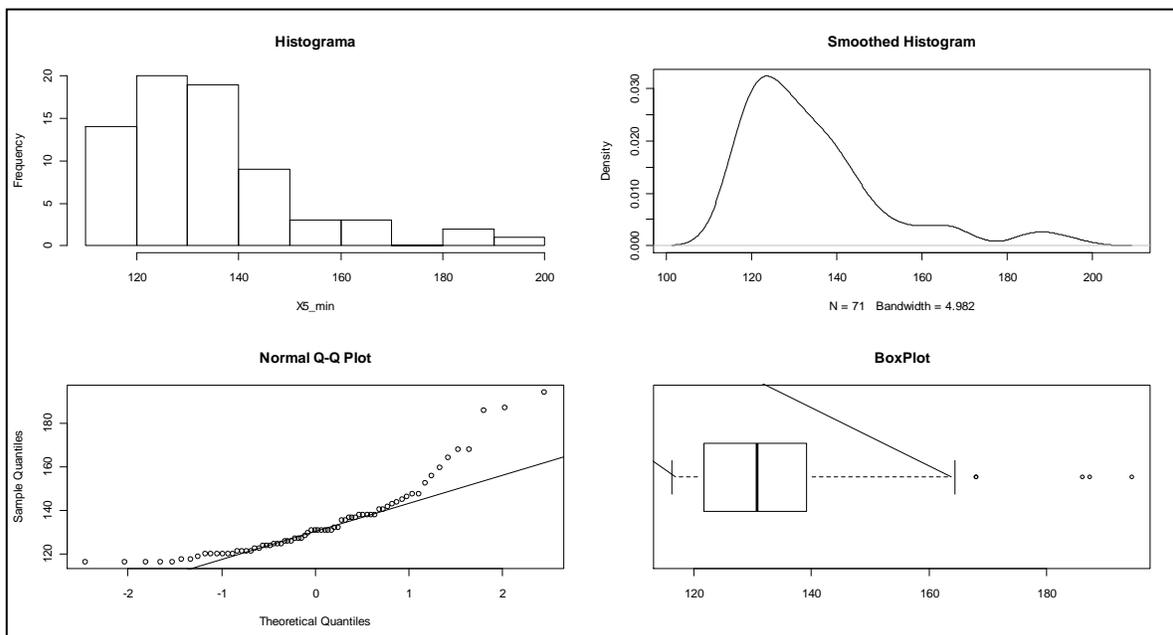


Gráfica 4.10 – AED series de máximos anuales para intensidad de 5 minutos.

Otra observación relevante es el gráfico de caja, el cual nos suministra información sobre los valores mínimo y máximo, los cuantiles Q1, Q2 o mediana y Q3, y sobre la existencia de valores atípicos, aquellos que exceden 1,5 veces el rango intercuartilico, por debajo o por encima, en este caso se presentaron tres valores por debajo de esta medida y la simetría de la distribución. Para ver el resto de los gráficos para las intensidades máximas anuales correspondientes a las duraciones comprendidas de 10 minutos a 6 horas revisar gráficos en el anexo del informe. En la gráfica 4.11 encontramos el mismo análisis para la intensidad de una duración de 5 minutos de las series de excedencias, es decir datos que

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

superan cierto valor considerado como umbral que dicta el punto de referencia para escoger de la muestra aquellos valores que vamos a considerar como máximos, aquí los gráficos de histograma el (smoothed Histogram) visualizan como presenta la concentración principal hacia la izquierda, observación que se hace notoria en el diagrama de caja, en donde se presentan cuatro valores atípicos que superan el límite superior del diagrama, es adecuado comentar que ninguno de los gráficos al igual que este y el anterior ajustan estos datos a un distribución de probabilidades normal la diferencia entre la recta de mejor ajuste entre los quintiles teóricos (distribución normal) y los empíricos de la muestra es grande poniendo en evidencia que estos datos no provienen de un población normal.

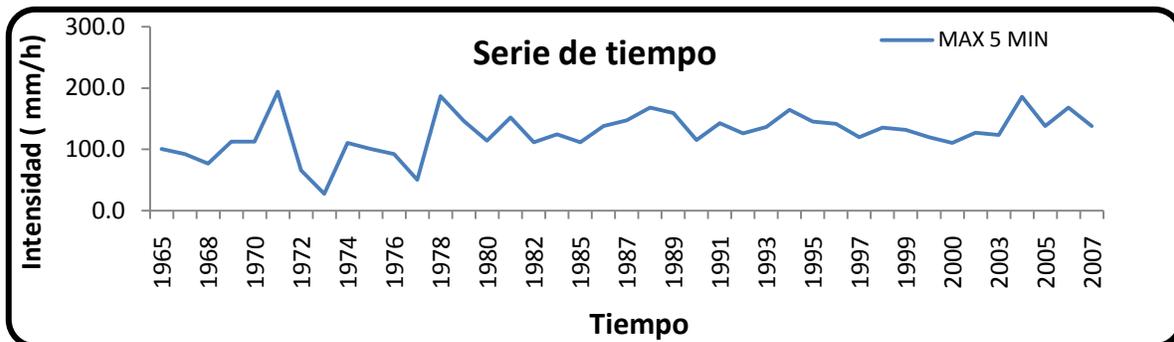


Gráfica 4.11 – AED series de Excedencias para intensidad de 5 minutos.

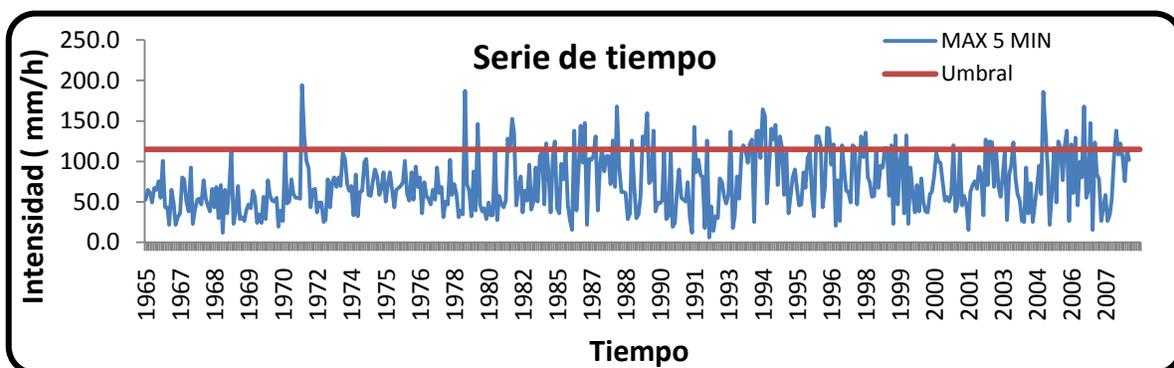
Otra parte que se utilizó en este trabajo para el análisis de los datos es el gráfico de la serie de tiempo; ejemplos que se presentan en las figuras 4.12 y 4.13 para intensidades máximas y para todas las intensidades con el umbral seleccionado para el análisis de la serie de excedencias, que tienen una duración

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

de 5 minutos, el resto de las gráficas para las duraciones comprendidas entre 10 minutos y seis horas se pueden ver en el anexo del presente trabajo.



Gráfica 4.12 – Series de tiempo para intensidades máximas de 5 minutos.



Gráfica 4.13 – Series de tiempo para intensidades de 5 minutos.

4.7.- Prueba de datos dudosos.

Un dato dudoso es definido como un punto de una muestra que se aleja significativamente de la tendencia de la información restante, la retención o eliminación de estos datos pueden afectar significativamente la magnitud de los parámetros estadísticos a la hora de ajustar la muestra a una distribución de probabilidades. El Water Resources Council de los Estados Unidos recomienda la prueba de Grubbs y Beck (1981), claro que asumiendo que los logaritmos de la muestra siguen una distribución normal, este método se utilizó en el trabajo y los resultados se muestran en las tablas 4.4 y 4.5.

Tabla 4.4- Prueba de detección de valores dudosos serie de máximos.

Serie De Maximos		
	Duración	Número de Outlier
MINUTOS	5	0
	10	1
	20	1
	30	1
	45	2
HORAS	1	1
	2	1
	3	1
	6	1

Tabla 4.5- Prueba de detección de valores dudosos serie de excedencias.

Serie De Excedencias		
	Duración	Número de Outlier
MINUTOS	5	3
	10	2
	20	2
	30	2
	45	3
HORAS	1	3
	2	3
	3	3
	6	2

Estos valores fueron revisados a uno a uno con las bandas para determinar su procedencia y determinar si se excluían del análisis posterior, dos valores determinados como datos dudosos de la serie de excedencias fueron retenidos para el análisis por no poder determinar su veracidad. La mayoría de estos se utilizaron para la estimación de los parámetros porque se determinó que si eran valores reales. Esta prueba junto con los valores no atípicos de los diagramas de caja del análisis exploratorio fueron revisados exhaustivamente.

4.8.- Ajuste de la Distribución Generalizada de Extremos (DGE).

4.8.1.- Intensidad para 5 minutos:

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

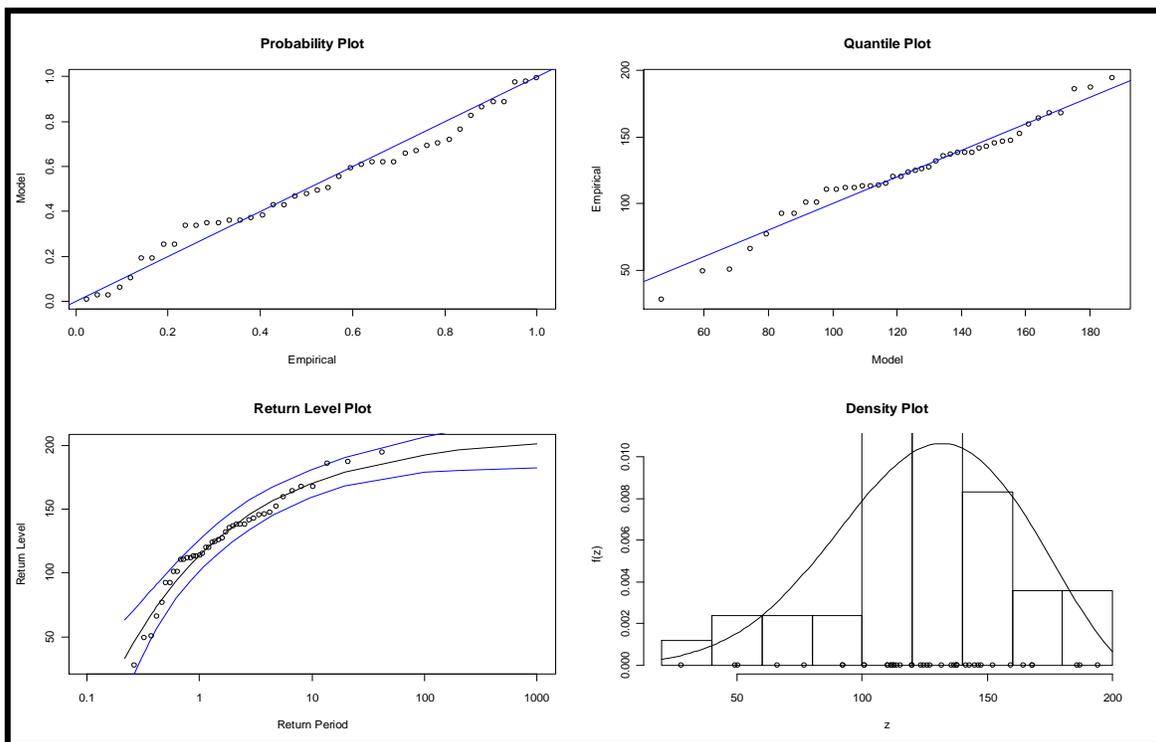
Estimadores de la máxima verosimilitud:

Valor de la función Log-Verosimilitud: 209.136111596274

μ : 113.85045 ± 6.39094 .

σ : 38.10291 ± 4.52955 .

ξ : -0.40821 ± 0.09021 .



Gráfica 4.14 – Diagnóstico DGE para Intensidad de 5 min.

Los gráficos de probabilidad y el de *Quantil Plot* sugieren que el ajuste de los datos a la distribución es razonable, sin embargo el segundo gráfico muestra que los datos son un poco más sensibles tanto a los valores altos como a los bajos, pero manteniéndose siempre alrededor de la recta lo que sugiere que los datos se ajustan de manera considerable al DGE. El gráfico de *Return Level Plot* muestra los valores de la intensidad para 5 minutos de los diferentes periodos de retorno, con una curva asintótica que muestra un límite finito, y esto se debe a que

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

el parámetro de forma es negativo como se evidencio al estimarlo. Sin embargo se presentan valores que están muy cerca de los límites de confianza, el último gráfico se compara el histograma de frecuencia de los datos contra la función de densidad de la distribución generalizada de extremos.

De acuerdo a esto y utilizando las ecuaciones descrita en la metodología del presente trabajo se calculo los valores de intensidad para 5 minutos correspondiente a los periodos de retorno seleccionado, es este caso 2, 5, 10, 25, 100 y 500 años, todos calculados con intervalo de confianza de 95% .

Tabla 4.6.- Intensidades para 5 minutos de Duración DGE:

Periodo de Retorno	Intensidad (mm/h)	Intervalo de 95 % de confianza (mm/h)
2	126,8	(114,5 y 138,9)
5	156,6	(145,4 y 168,1)
10	169,9	(159,5 y 183,2)
25	181,9	(172,2 y 198,7)
50	188,2	(178,8 y 206,8)
100	192,9	(183,7 y 213,9)
500	199,8	(190,3 y 226,6)

4.8.2.- Intensidad para 10 minutos.

Estimadores de la máxima verosimilitud:

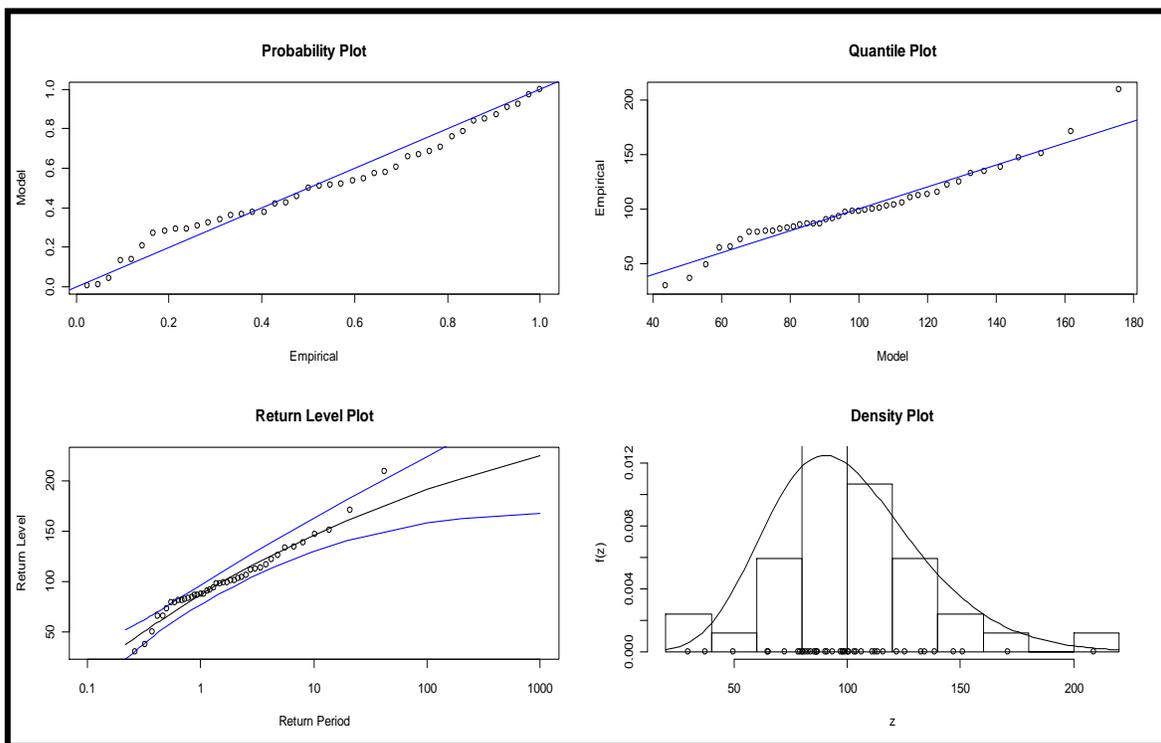
Capítulo IV: Resultados y Análisis.

Valor de la función Log-Verosimilitud: 205.139312828967

μ : 86.47550 \pm 4.97231.

σ : 29.65235 \pm 3.33249.

ξ : -0.12182 \pm 0.07535.



Gráfica 4.15 – Diagnóstico DGE para Intensidad de 10 min.

El Diagnóstico del ajuste de los datos de la intensidad correspondiente a la duración de los 10 minutos para DGE encontramos en los gráfico de *Probability Plot* y *Quantile plot* muestran que los datos se ajustan muy bien, exceptuando un último valor, el más extremo, que se separa considerablemente de la diagonal, este mismo valor en el gráfico *Return Level Plot* se sale del intervalo de confianza lo que genera una pequeña incertidumbre pero el resto de los datos se comportan muy bien, este ultimo gráfico presenta una ligera concavidad pero no tan pronunciada como el del anterior, esto se debe a que el parámetro de forma es

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

negativo pero cerca de cero de ahí esa casi linealidad. El *Density Plot* compara la muestra con la DGE y se observa bastante aceptable.

Utilizando la siguiente ecuación, con los valores estimados por la máxima verosimilitud de los parámetros de escala, posición y forma

$$Z_p = \begin{cases} \mu - \frac{\sigma}{\xi} [1 - \{-\log(1-p)\}^{-\xi}], & \xi \neq 0 \\ \mu - \sigma \log\{-\log(1-p)\}, & \xi = 0 \end{cases}$$

Y definiendo la probabilidad p para los periodos de retornos escogidos calculan los valores de intensidades que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.7-Intensidades para 10 minutos de Duración DGE:

Periodo de Retorno	Intensidad (mm/h)	Intervalo de 95 % de confianza (mm/h)
2	97,1	(87,0 y 107.9)
5	127,1	(115,0 y 142.4)
10	144,8	(130.8 y 166.4)
25	165,0	(148.0 y 197.4)
50	173,5	(159.0 y 218.8)
100	180,1	(168.5 y 240.4)
500	190,0	(186,0 y 290.2)

4.8.3.- Intensidad para 20 minutos.

Estimadores de la máxima verosimilitud:

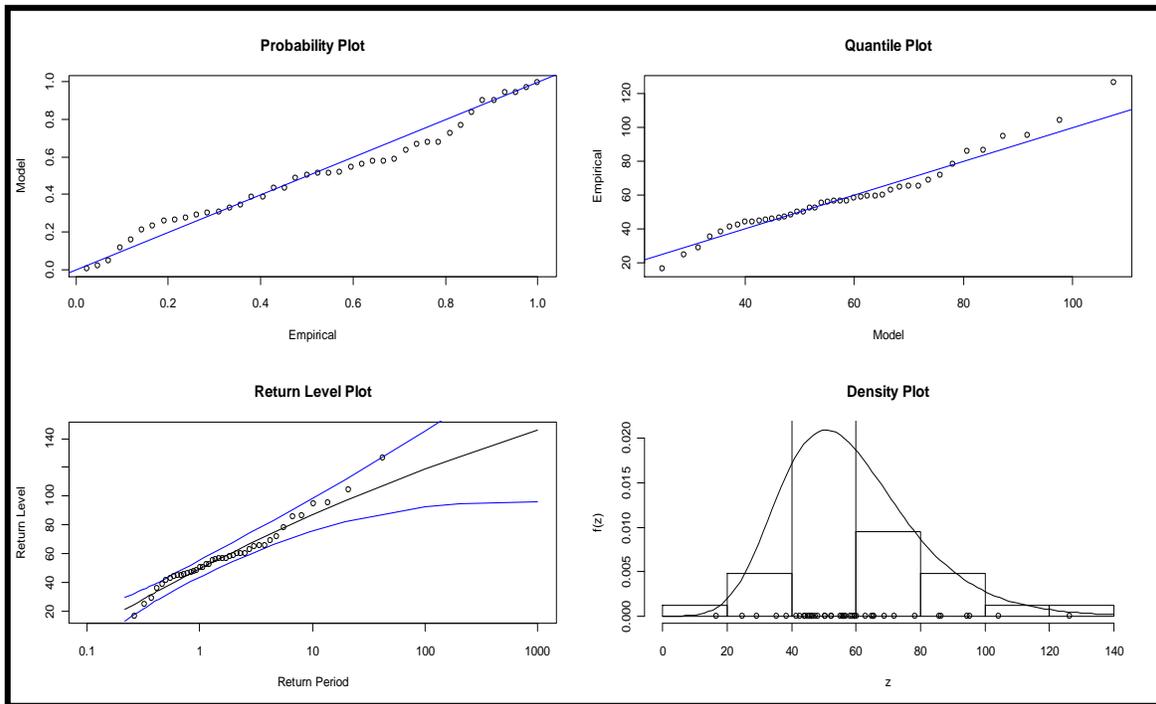
Valor de la función Log-Verosimilitud: 184.812453594794

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

μ : 49.41370 \pm 2.97428.

σ : 17.60536 \pm 2.03923.

ξ : -0.06934 \pm 0.08624.

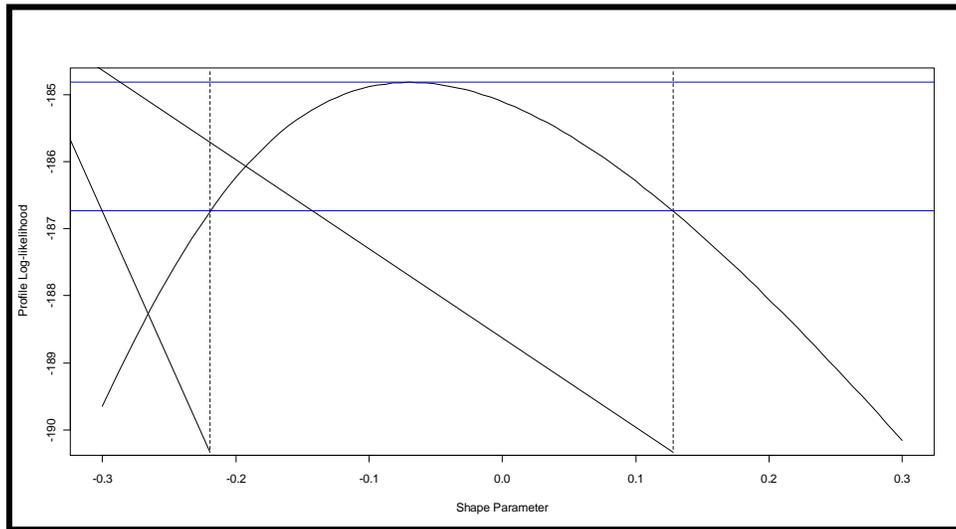


Gráfica 4.16 – Diagnóstico DGE para Intensidad de 20 min.

Para la intensidad correspondiente a la duración de 20 minutos encontramos en el gráfico diagnóstico anterior que tanto el probability plot y el Quantile plot muestran un ajuste de los datos razonables exceptuando por unos puntos extremos que en el segundo de los gráficos se alejan considerablemente de la diagonal, en el return level plot observamos una tendencia lineal del gráfico esto es debido al valor del parámetro de forma que es muy cercano a cero por lo que no sería erróneo rechazar la idea de que estos datos se ajusten a la familia de distribución de Gumbel. De igual forma se aprecia en la siguiente gráfica el comportamiento del parámetro de forma, aquí encontramos que el valor que

Capítulo IV: **Resultados y Análisis.**

maximiza la función de log-verosimilitud es el $-0,06934$, aunque este parámetro toma valores positivos y negativos dentro del intervalo de confianza.



Gráfica 4.17 – Perfil de log-verosimilitud del parámetro de forma para Intensidad de 20 min.

Tabla 4.8- Intensidades para 20 minutos de Duración DGE:

Periodo de Retorno	Intensidad (mm/h)	Intervalo de 95 % de confianza (mm/h)
2	55,8	(49,7 y 62,4)
5	74,5	(66,8 y 84,7)
10	86,1	(76,8 y 101,4)
25	99,9	(88,0 y 123,6)
50	109,6	(95,2 y 140,5)
100	118,8	(101,6 y 158,1)
500	138,3	(113,4 y 201,7)

4.8.4.- Intensidad para 30 minutos.

Estimadores de la máxima verosimilitud:

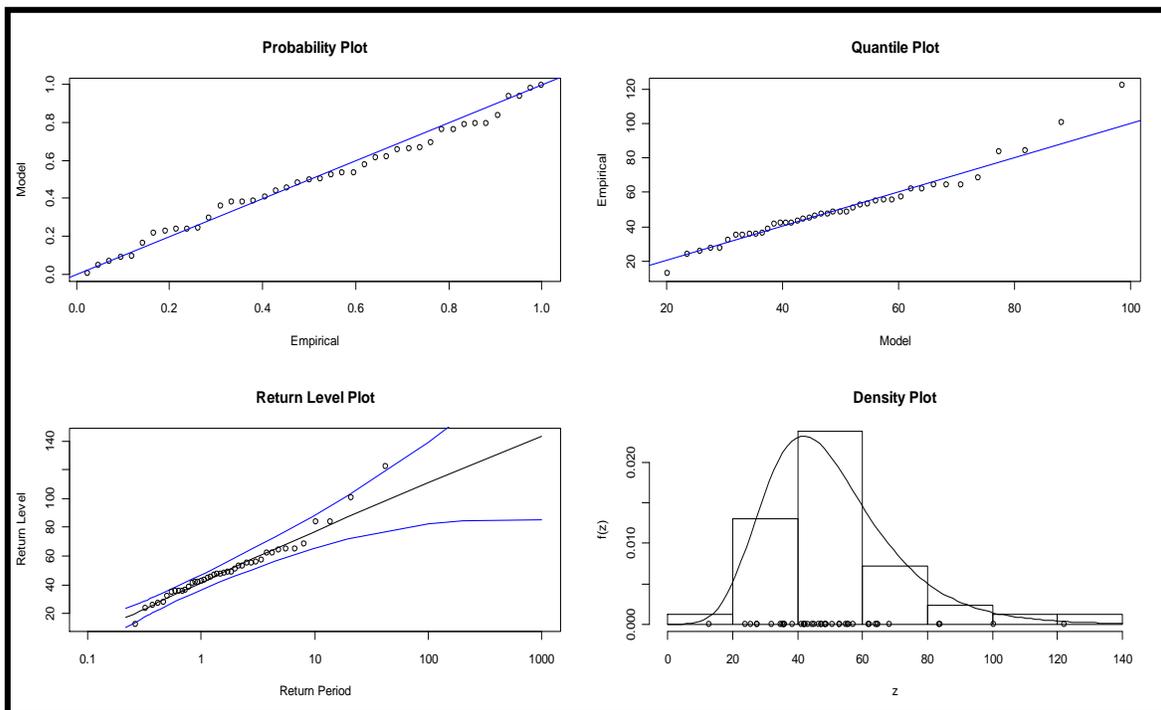
Valor de la función Log-Verosimilitud: 181.40699791264

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

$$\mu: 41.48611 \pm 2.67089$$

$$\sigma: 15.79906 \pm 1.85989$$

$$\xi: -0.01973 \pm 0.08647$$

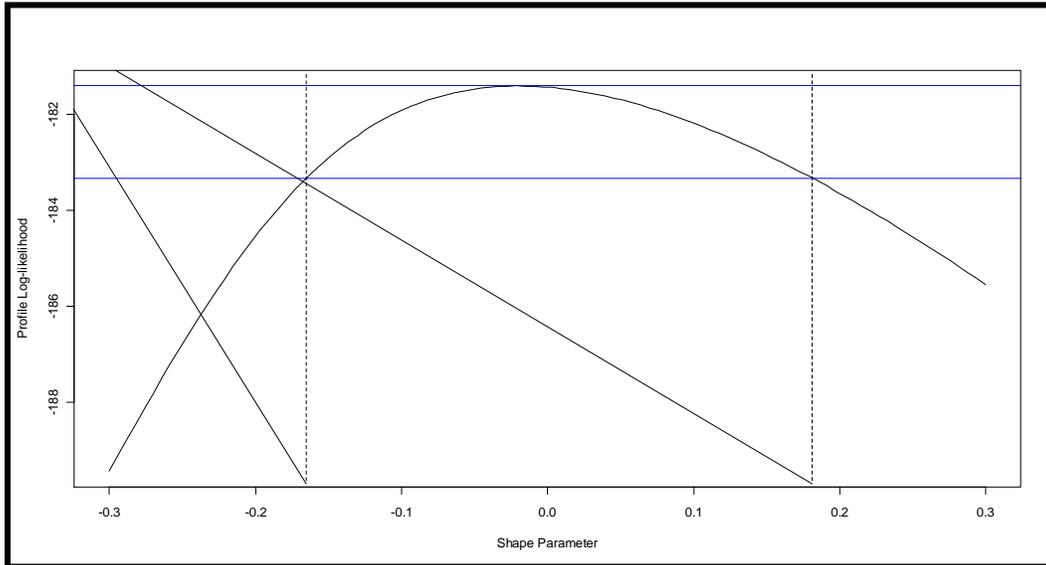


Gráfica 4.18 – Diagnóstico DGE para Intensidad de 30 min.

El ajuste de los datos se parecía a través del gráfico anterior, el probability plot muestra un ajuste muy bueno para los datos mientras que el quantile plot permite ver que para valores extremos que son la razón de esta investigación estos valores se alejan de la diagonal pero manteniendo de igual manera un comportamiento lineal, ahora en el return level plot se evidencia que el valor más extremo de la muestra no ajusta muy bien al modelo seleccionado, se sale del intervalo de confianza, mientras que el density plot muestra un buen ajuste. Al igual que el análisis del parámetro de forma del ítem anterior no da una idea de que estos datos ajustan a la función de distribución de Gumbel, y al ver el gráfico del perfil de log-verosimilitud vemos como el valor del parámetro de forma que

Capítulo IV: **Resultados y Análisis.**

máxima la función es -0.01973 , pero esta vez el intervalo se reparte por igual entre números negativos y positivos.



Gráfica 4.19 – Perfil de log-verosimilitud del parámetro de forma para Intensidad de 30 min.

Tabla 4.9- Intensidades para 30 minutos de Duración DGE:

Periodo de Retorno	Intensidad (mm/h)	Intervalo de 95 % de confianza (mm/h)
2	47,3	(41,7 y 53,4)
5	64,8	(57,5 y 74,9)
10	76,3	(67,0 y 91,8)
25	90,5	(78,1 y 115,2)
50	100,8	(85,6 y 133,7)
100	110,9	(92,3 y 153,8)
500	133,8	(105,6 y 206,0)

4.8.5.- Intensidad para 45 minutos.

Estimadores de la máxima verosimilitud:

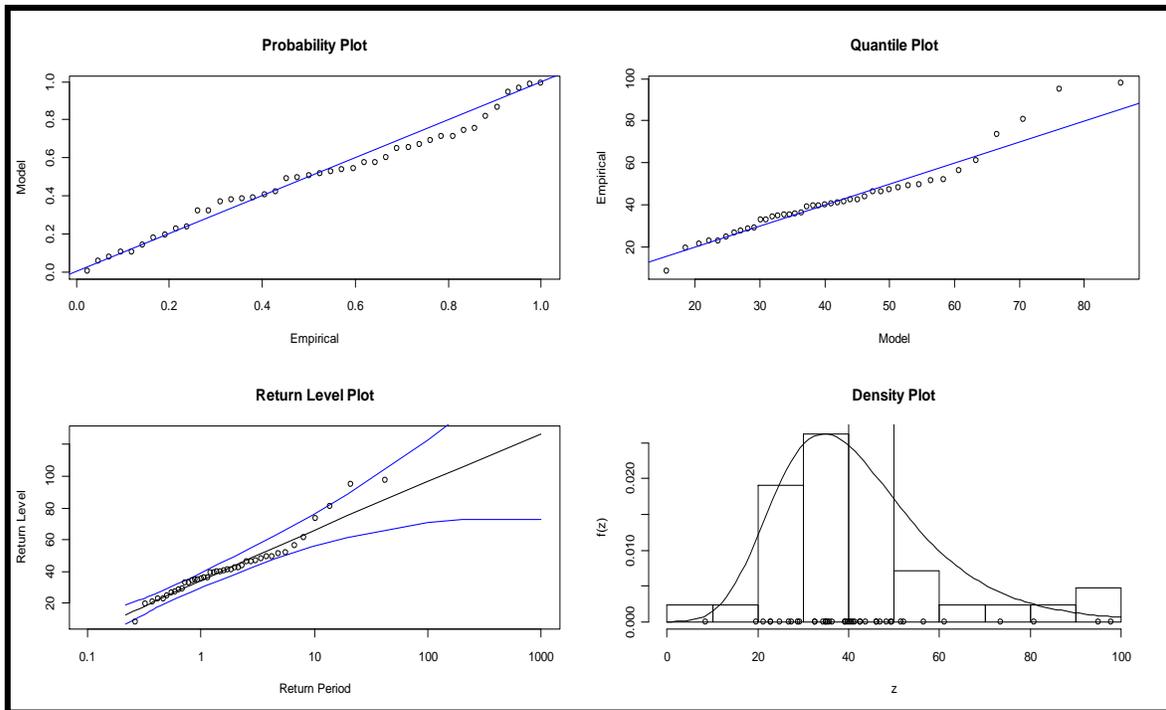
Capítulo IV: Resultados y Análisis.

Valor de la función Log-Verosimilitud: 176.577155371825

μ : 34.45135 \pm 2.36792

σ : 14.01343 \pm 1.64786

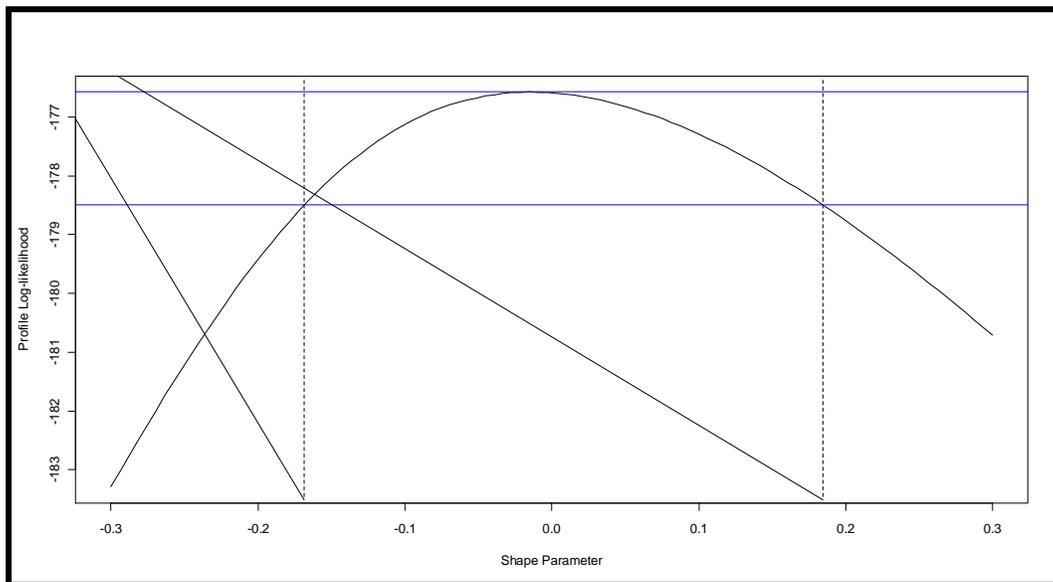
ξ : -0.01389 \pm 0.08744



Gráfica 4.20 – Diagnóstico DGE para Intensidad de 45 min.

El diagnóstico de la calidad de los datos para la intensidad correspondiente a la duración de 45 minutos muestra a través del probability plot como los mismos se ajustan muy bien al modelo pero al ver el quantile plot vemos como los valores extremo de la muestra se separa de la diagonal, en el return level plot se verifica como algunos de los valores están cerca de los límites de confianza y uno de ellos se sale del intervalo de confianza, este gráfico presenta una tendencia lineal esto debido a que el parámetro de forma está muy cerca de cero, en la gráfica 4.17 se observa que el valor de ξ es igual -0,01389 y es el que maximiza la función, el density plot difiere un poco el modelo con los datos.

Capítulo IV: Resultados y Análisis.



Gráfica 4.21 – Perfil de log-verosimilitud del parámetro de forma para Intensidad de 45 min.

Tabla 4.10- Intensidades para 45 minutos de Duración DGE:

Periodo de Retorno	Intensidad (mm/h)	Intervalo de 95 % de confianza (mm/h)
2	39,6	(34,7 y 45,0)
5	55,3	(48,7 y 64,3)
10	65,5	(57,2 y 79,6)
25	78,3	(67,1 y 100,8)
50	87,7	(73,7 y 117,8)
100	96,9	(79,7 y 136,2)
500	117,9	(91,4 y 184,6)

4.8.6.- Intensidad para 60 minutos.

Estimadores de la máxima verosimilitud:

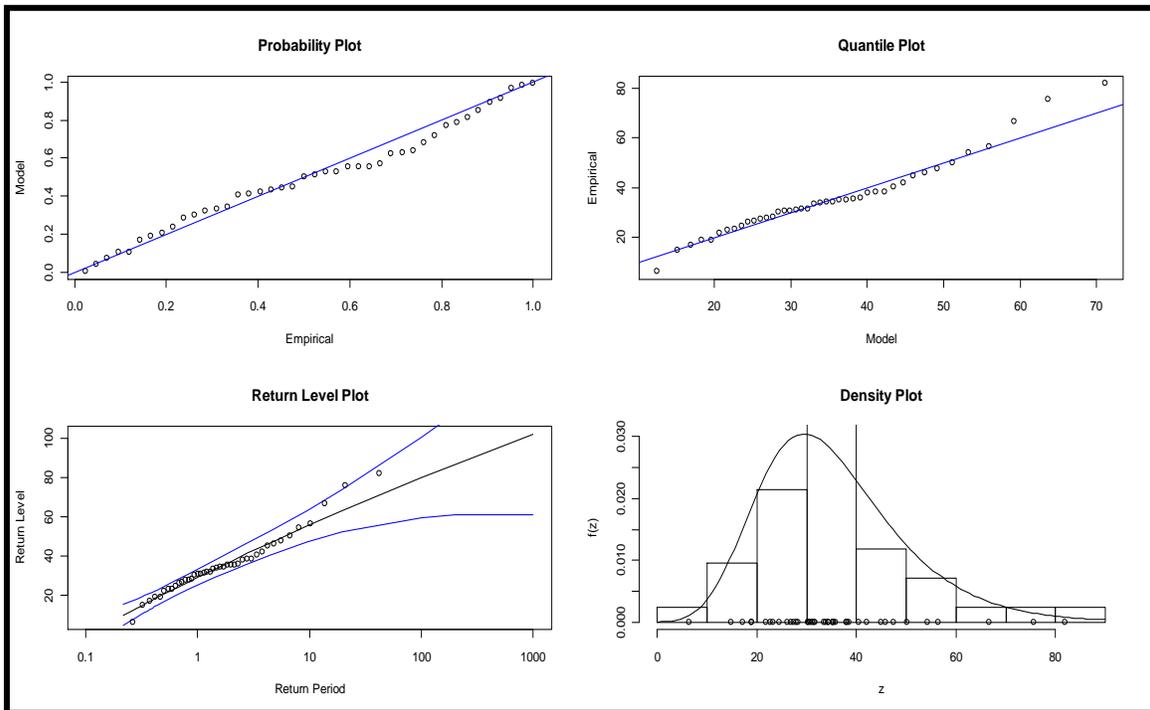
Valor de la función Log-Verosimilitud: 169.793094273498

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

$$\mu: 29.02763 \pm 2.04719$$

$$\sigma: 12.10377 \pm 1.41689$$

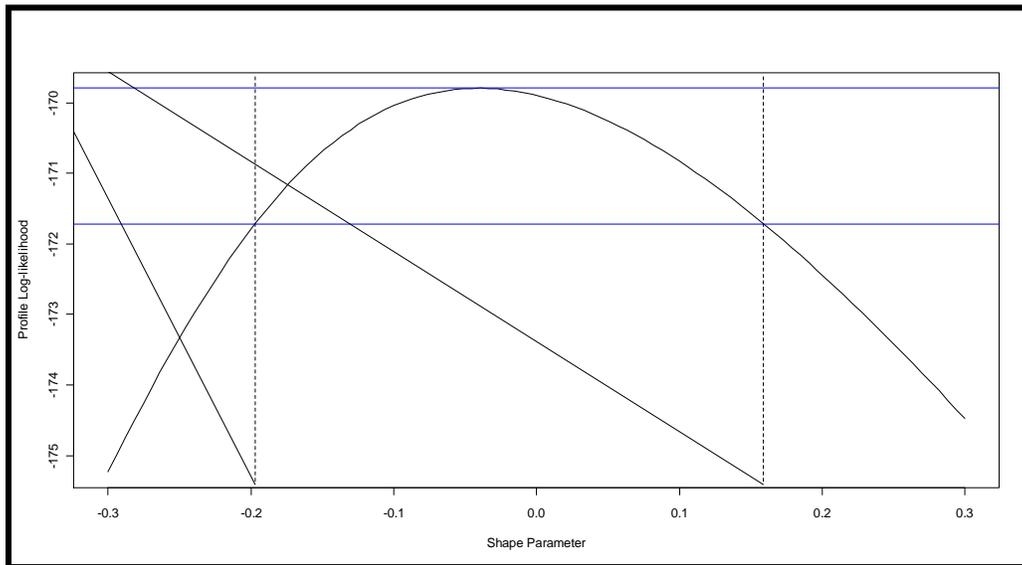
$$\xi: -0.04070 \pm 0.08827$$



Gráfica 4.22 – Diagnóstico DGE para Intensidad de 60 min.

La situación para las intensidades de 60 minutos es similar a las anteriores. El probability plot muestra que los datos se ajustan muy bien, mientras que el quantile plot muestra una diferencia notable para los valores extremos de los datos. El return level presenta una tendencia de apariencia lineal, esto debido al parámetro de forma que es igual a $-0,04070$; valor que confirmaremos a través de la gráfica 4.23.

Capítulo IV: Resultados y Análisis.



Gráfica 4.23 – Perfil de log-verosimilitud del parámetro de forma para Intensidad de 60 min.

Tabla 4.11- Intensidades para 60 minutos de Duración DGE:

Periodo de Retorno	Intensidad (mm/h)	Intervalo de 95 % de confianza (mm/h)
2	33,4	(29,2 y 38,0)
5	46,6	(41,1 y 54,0)
10	55,0	(48,3 y 66,4)
25	65,3	(56,4 y 83,3)
50	72,7	(61,7 y 96,5)
100	79,8	(66,4 y 110,5)
500	95,5	(75,4 y 146,4)

4.8.7.- Intensidad para 2 horas.

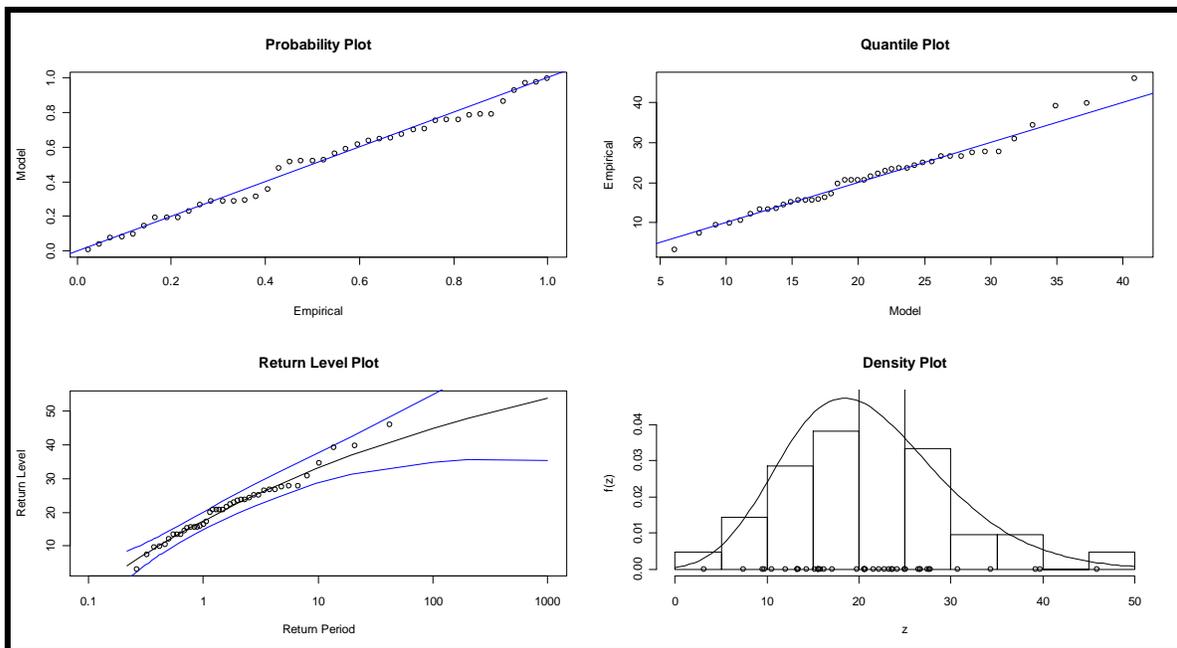
Estimadores de la máxima verosimilitud:

Valor de la función Log-Verosimilitud: 149.609744550898

μ : 17.41170 \pm 1.33640

σ : 7.82271 \pm 0.92788

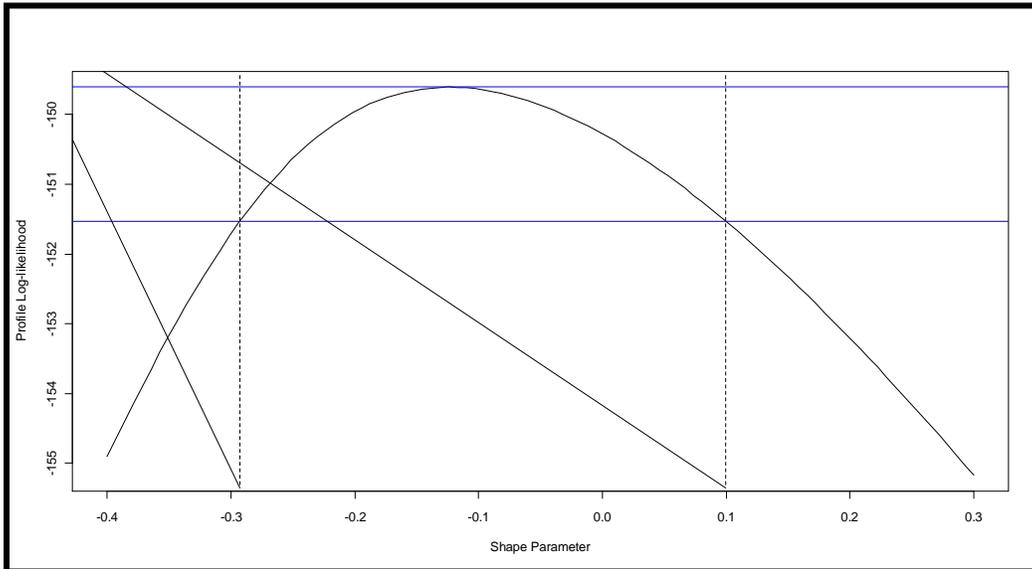
ξ : -0.12358 \pm 0.09733



Gráfica 4.24 – Diagnóstico DGE para Intensidad de 2 Horas.

El diagnóstico para estos datos muestran un ajuste considerable aun con existen punto extremos que difieren un poco de la diagonal (quantile plot, el return level plot muestra una ligera concavidad esto es porque el parámetro de forma es negativo y presenta un límite finito, y con la gráfica 4.25 se visualiza que el mismo es en su mayoría negativo por lo que su valor se comprueba.

Capítulo IV: Resultados y Análisis.



Gráfica 4.25 – Perfil de log-verosimilitud del parámetro de forma para Intensidad de 2 Horas.

Definiendo la probabilidad p para los periodos de retornos escogidos se calculan los valores de intensidades que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.12- Intensidades para 2 horas de Duración DGE:

Periodo de Retorno	Intensidad (mm/h)	Intervalo de 95 % de confianza (mm/h)
2	20,2	(17,5 y 23,1)
5	28,1	(24,9 y 32,2)
10	32,8	(29,0 y 38,9)
25	38,0	(33,5 y 47,2)
50	41,6	(36,2 y 53,4)
100	44,9	(38,6 y 59,8)
500	51,3	(42,6 y 74,9)

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

4.8.8.- Intensidad para 3 horas.

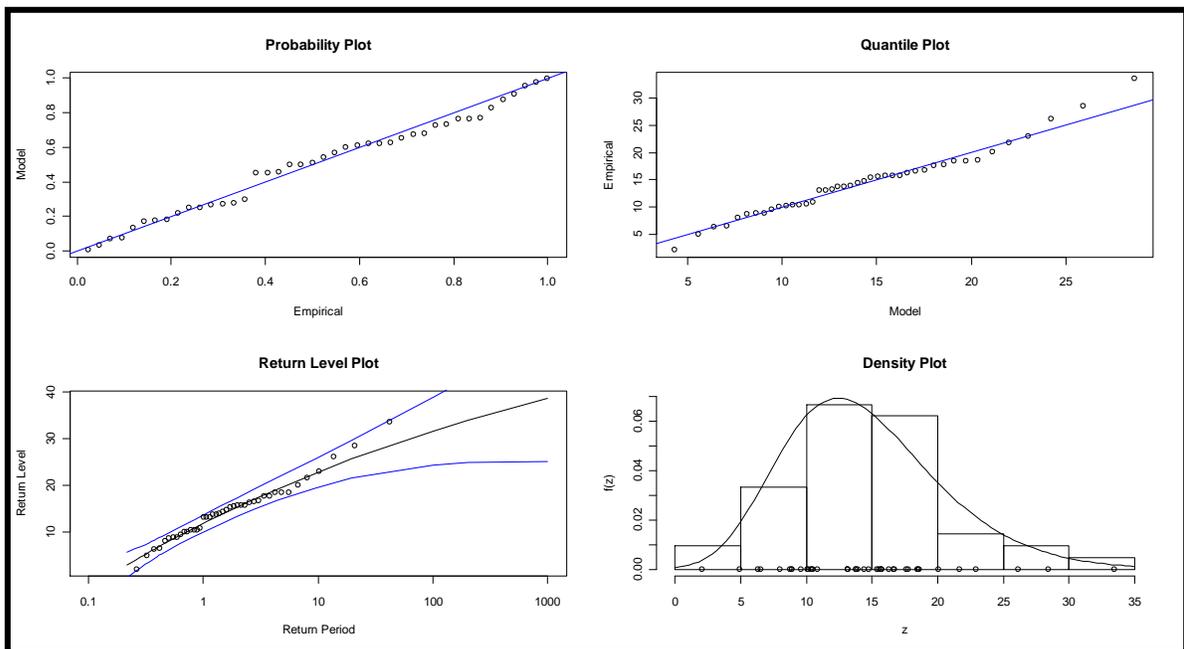
Estimadores de la máxima verosimilitud:

Valor de la función Log-Verosimilitud: 134.078177948808

μ : 11.89399 \pm 0.90786

σ : 5.34425 \pm 0.62632

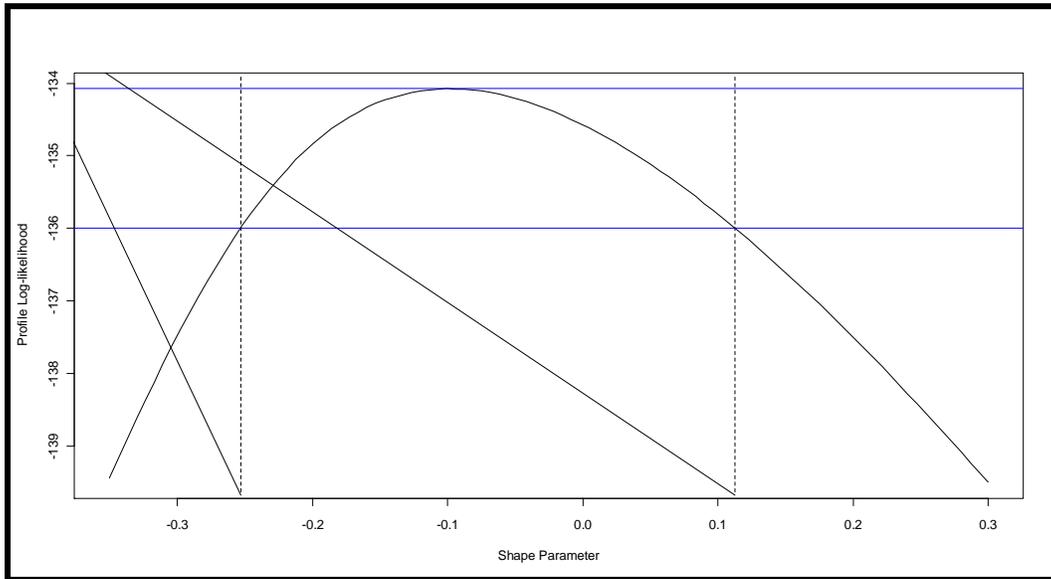
ξ : -0.09839 \pm 0.09070



Gráfica 4.26 – Diagnóstico DGE para Intensidad de 3 Horas.

Tanto el probability plot como el quantile plot muestran un ajuste razonable para los datos versus el modelo (Distribución Generalizada de Extremos) con una pequeña desviación para los valores más extremos, sin embargo en el density plot se observa un muy buen ajuste de la función de densidad y los datos de las intensidades, el return level plot se aprecia que los valores extremos entran en el intervalo de confianza del modelo elegido. El parámetro de forma se mantiene dentro del intervalo de confianza mostrado en la gráfica 4.27 en su mayor parte con valores negativos.

Capítulo IV: **Resultados y Análisis.**



Gráfica 4.27 – Perfil de log-verosimilitud del parámetro de forma para Intensidad de 3 Horas.

Definiendo la probabilidad p para los periodos de retornos escogidos se calculan los valores de intensidades que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.13- Intensidades para 3 horas de Duración DGE:

Periodo de Retorno	Intensidad (mm/h)	Intervalo de 95 % de confianza (mm/h)
2	13,8	(12,0 y 15,8)
5	19,3	(17,1 y 22,3)
10	22,7	(20,0 y 27,1)
25	26,6	(23,2 y 33,2)
50	29,2	(25,3 y 37,8)
100	31,2	(27,0 y 42,5)
500	36,7	(30,2 y 53,9)

4.8.9.- Intensidad para 6 horas.

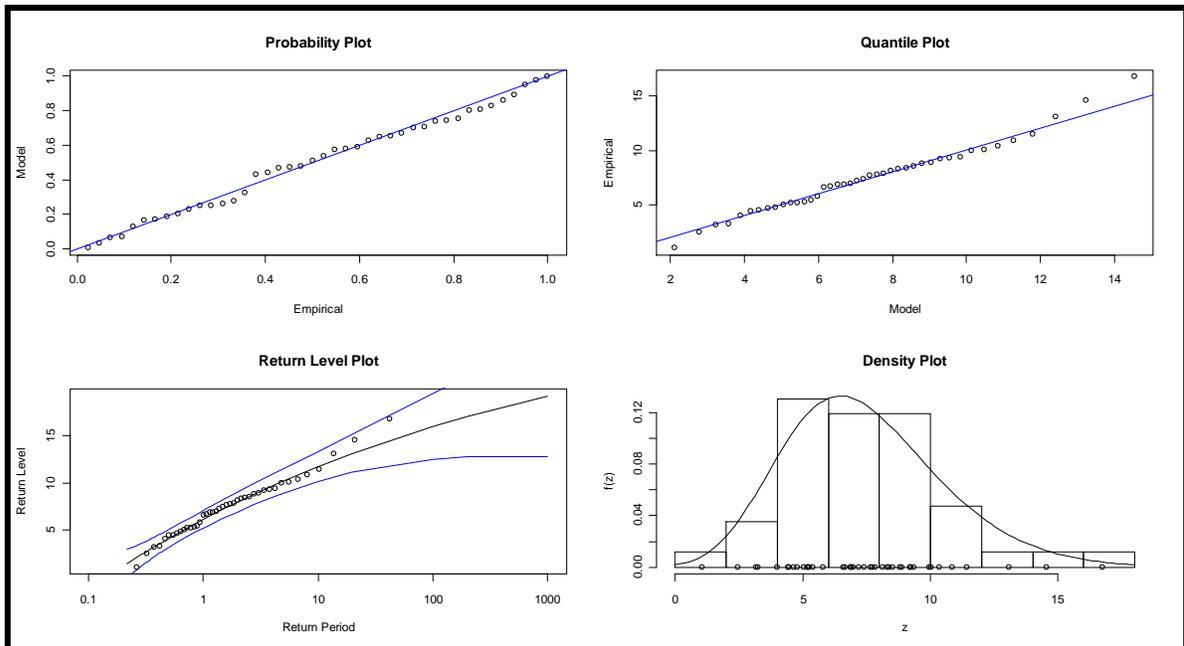
Estimadores de la máxima verosimilitud:

Valor de la función Log-Verosimilitud: 106.299193061509

μ : 6.12760 \pm 0.47479

σ : 2.78898 \pm 0.32831

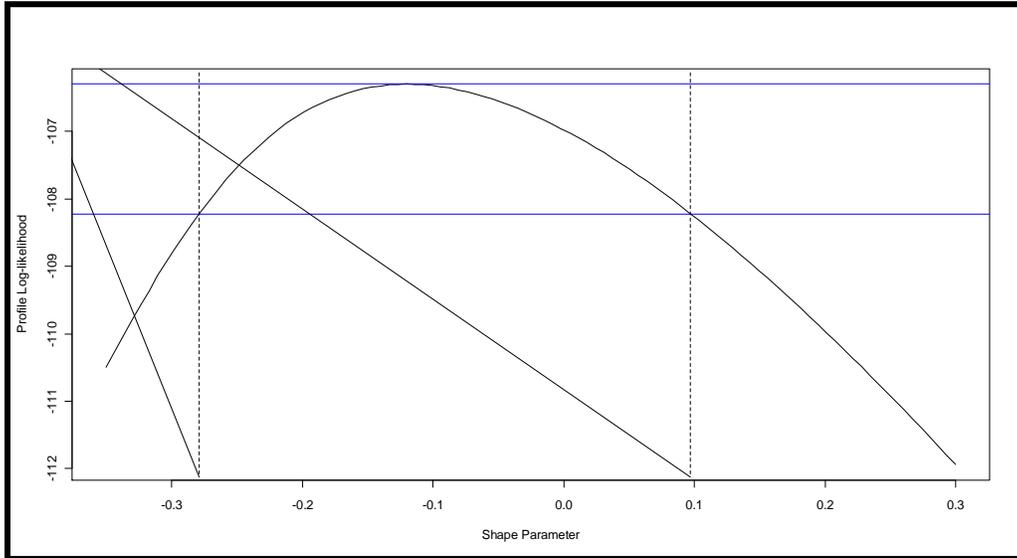
ξ : -0.12005 \pm 0.09293



Gráfica 4.28 – Diagnóstico DGE para Intensidad de 3 Horas.

El ajuste de los datos al modelo propuesto es aceptable de acuerdo a lo que se muestra en el probability plot y en el quantile plot, al igual que el density plot en el que se observa como los datos siguen la función de densidad. El parámetro de forma para esta muestra es negativo, en la mayoría del intervalo de confianza (gráfica 4.29) lo que sugiere una distribución de Weibull.

Capítulo IV: **Resultados y Análisis.**



Gráfica 4.29 – Perfil de log-verosimilitud del parámetro de forma para Intensidad de 6 Horas.

Definiendo la probabilidad p para los periodos de retornos escogidos se calculan los valores de intensidades que se muestran en la siguiente tabla.

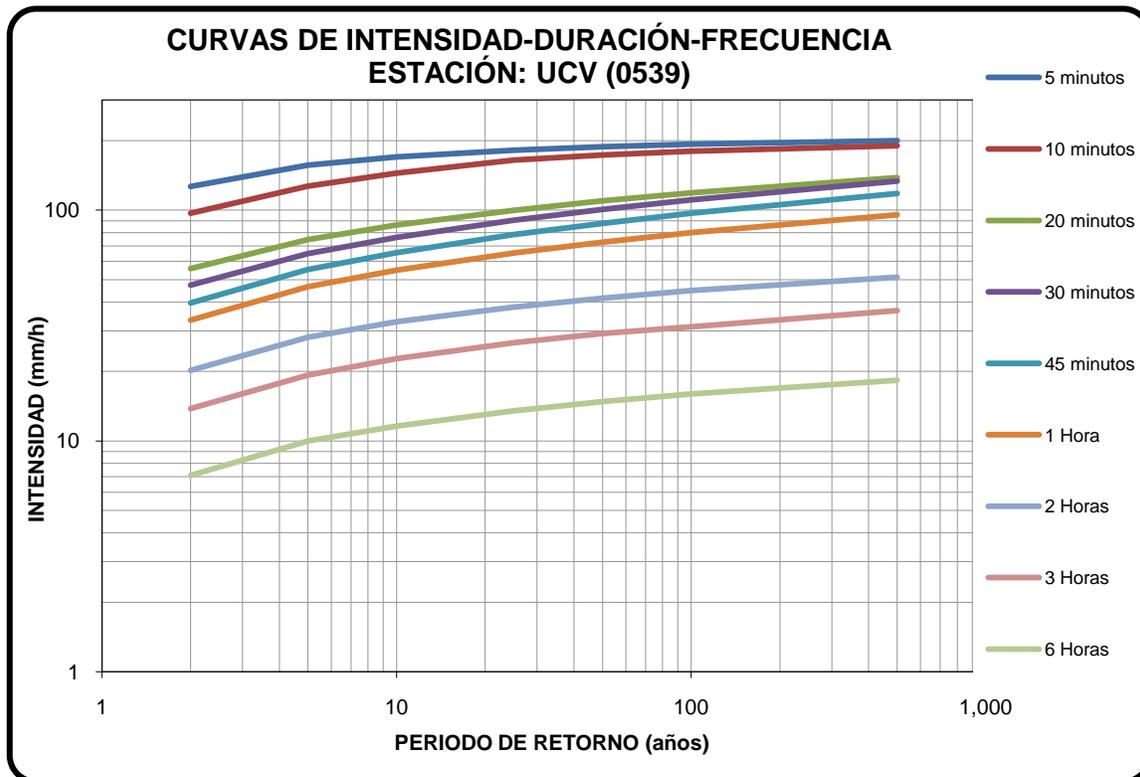
Tabla 4.14- Intensidades para 6 horas de Duración DGE:

Periodo de Retorno	Intensidad (mm/h)	Intervalo de 95 % de confianza (mm/h)
2	7,1	(6,2 y 8,2)
5	10,0	(8,8 y 11,4)
10	11,6	(10,3 y 13,8)
25	13,5	(11,9 y 16,8)
50	14,8	(12,9 y 19,0)
100	16,0	(13,8 y 21,2)
500	18,3	(15,3 y 26,6)

4.9.- Resumen general de las intensidades con la DGE.

Tabla 4.15- Resumen de las intensidades para la DGE.

		Intensidades (mm/h)							
		Duración (horas)	Periodo de retorno en años (Tr)						
			2	5	10	25	50	100	500
MINUTOS	5		126.8	156.6	169.9	181.9	188.2	192.9	199.8
	10		97.1	127.1	144.8	165	173.5	180.1	190
	20		55.8	74.5	86.1	99.9	109.6	118.8	138.3
	30		47.3	64.8	76.3	90.5	100.8	110.9	133.8
	45		39.6	55.3	65.5	78.3	87.7	96.9	117.9
HORAS	1		33.4	46.6	55.0	65.3	72.7	79.8	95.5
	2		20.2	28.1	32.8	38.0	41.6	44.9	51.3
	3		13.8	19.3	22.7	26.6	29.2	31.2	36.7
	6		7.1	10.0	11.6	13.5	14.8	16.0	18.3

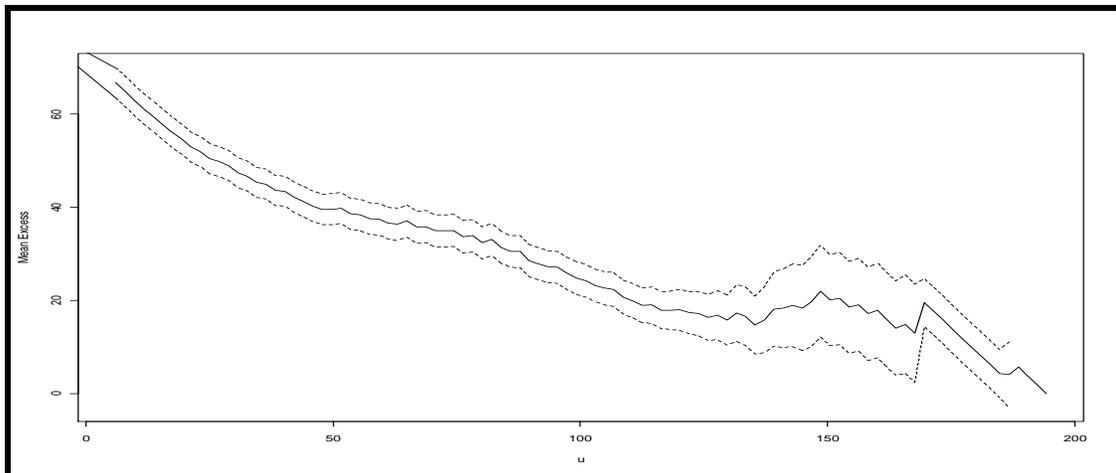


Gráfica 4.30 – Curvas de Intensidad duración y frecuencia estación UCV modelo DGE.

4.10.- Distribución Generalizada de Pareto (DGP).

4.10.1.- Intensidad para 5 minutos.

El ajuste de los datos a la distribución de probabilidades Generalizada de Pareto, requiere de precisar un valor umbral, pero si se desea escoger un umbral óptimo u nos encontramos con problemas usuales de sesgo y varianza. Un valor demasiado alto de u resulta en pocas excedencias con las cuales el modelo puede estimar, y en consecuencia estimadores de varianza alta. Para u demasiado pequeño los estimadores son sesgados y se viola el principio asintótico del modelo. Un método de selección disponible en la práctica está basado en la linealidad de la función media de los excesos para la DGP, gráfico que se ve a continuación con un intervalo de confianza de 95 %.

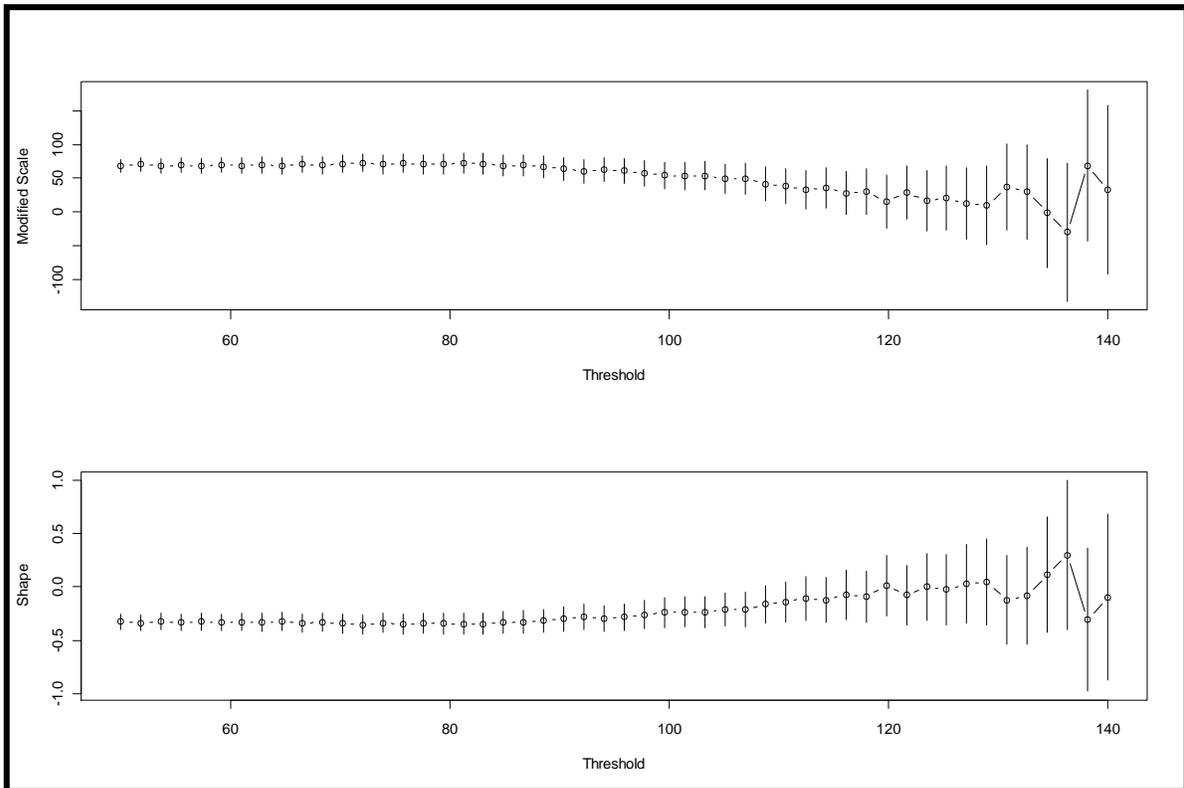


Gráfica 4.31 –Media de los Excesos para la intensidad de 5 minutos.

En la gráfica se aprecia un comportamiento lineal de por lo menos hasta el valor de 130 mm/h pero al ver el gráfico siguiente donde se aprecia la variación del parámetro de forma y de escala respecto al cambio del umbral, se observa

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

como el valor de 115 mm/h es el máximo valor que mantiene estable estos dos parámetros, por lo que la escogencia de este valor como umbral para esta distribución arrojo lo siguientes resultados:



Gráfica 4.32 –Variación de los parámetros para la intensidad de 5 minutos.

Para un umbral de 115 mm/h, el número de valores que exceden el umbral es 74

Estimadores de la máxima verosimilitud:

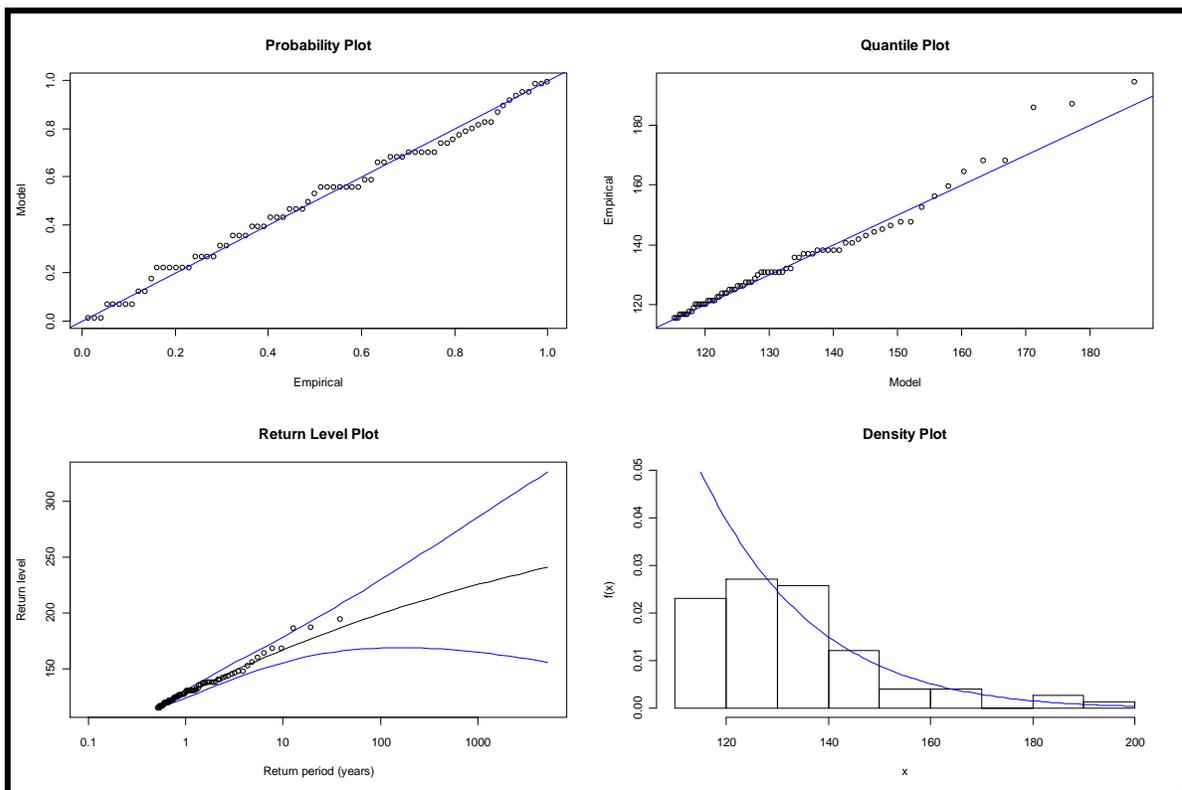
Valor de la función Log-Verosimilitud: 289.548504584674

σ : 20.13923923 \pm 3.2662851

ξ : -0.08981245 \pm 0.1135879

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

Al igual que para DGP, al ser negativo el parámetro de forma se espera que esta sea cóncava con límite finito, de las inferencias hechas a la intensidad correspondiente a 5 minutos observamos como los gráficos (probability y quantile) muestran el ajuste de los datos respecto a la distribución empírica el segundo de estos muestran una pequeña diferencia para los valores extremos, el de nivel de retorno confirmó la concavidad de acuerdo a el estimado de ξ , el gráfico de la función de densidad, representa el modelo ajustado con el histograma de la serie de excedencia.



Gráfica 4.33 – Diagnóstico DGP para Intensidad de 5 minutos.

Definiendo la probabilidad de ocurrencia asociada a los diferentes periodos de retorno, para esta intensidad los resultados se expresan en la siguiente tabla.

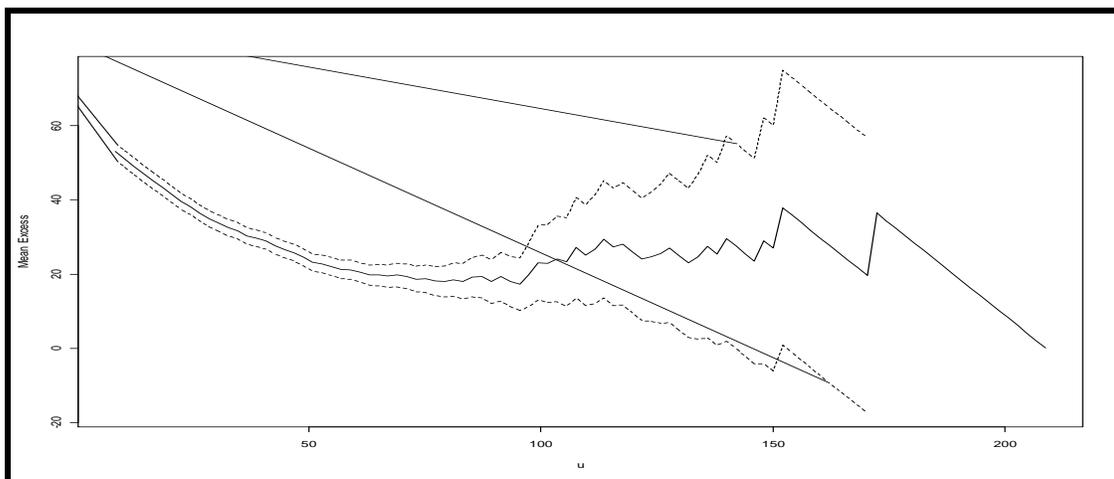
Capítulo IV: Resultados y Análisis.

Tabla 4.16- Intensidades para 5 minutos de Duración DGP.

Periodo de Retorno	Intensidad (mm/h)	Intervalo de 95 % de confianza (mm/h)
2	140.43	(135.18 y 146.85)
5	156.1331	(148.62507,166.95729)
10	167.1844	(157.88266,184.78321)
25	180.7763	(168.52503,212.13952)
50	190.3402	(175.30068,226.26361)
100	199.3269	(181.02095,239.53524)
500	218.1568	(190.79412,267.34357)

4.10.2.- Intensidad para 10 minutos.

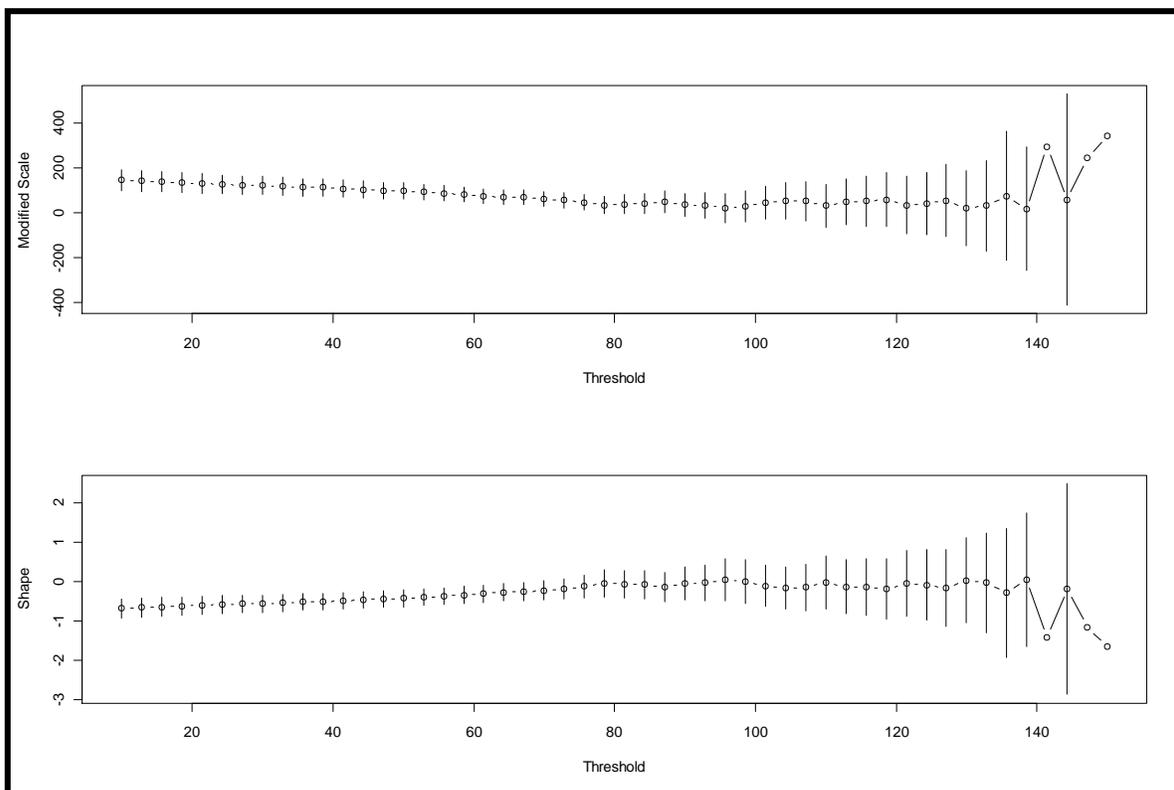
Para la intensidad correspondiente a la duración de 10 minutos se escogió como primera aproximación un valor que estuviese entre 80 y 95 de acuerdo a como se muestra en el gráfico de la media de los excesos



Gráfica 4.34 –Media de los Excesos para la intensidad de 10 minutos.

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

Al contrastar estos posibles valores con el gráfico de los parámetros versus los umbrales se visualiza como una escogencia adecuada el valor de 85 mm/h como buen indicador ya que mantiene la linealidad de los parámetros frente a la variación del umbral.



Gráfica 4.35 –Variación de los parámetros para la intensidad de 10 minutos.

Para un umbral de 85 mm/h el número de valores que exceden el umbral es 68

Estimadores de la máxima verosimilitud:

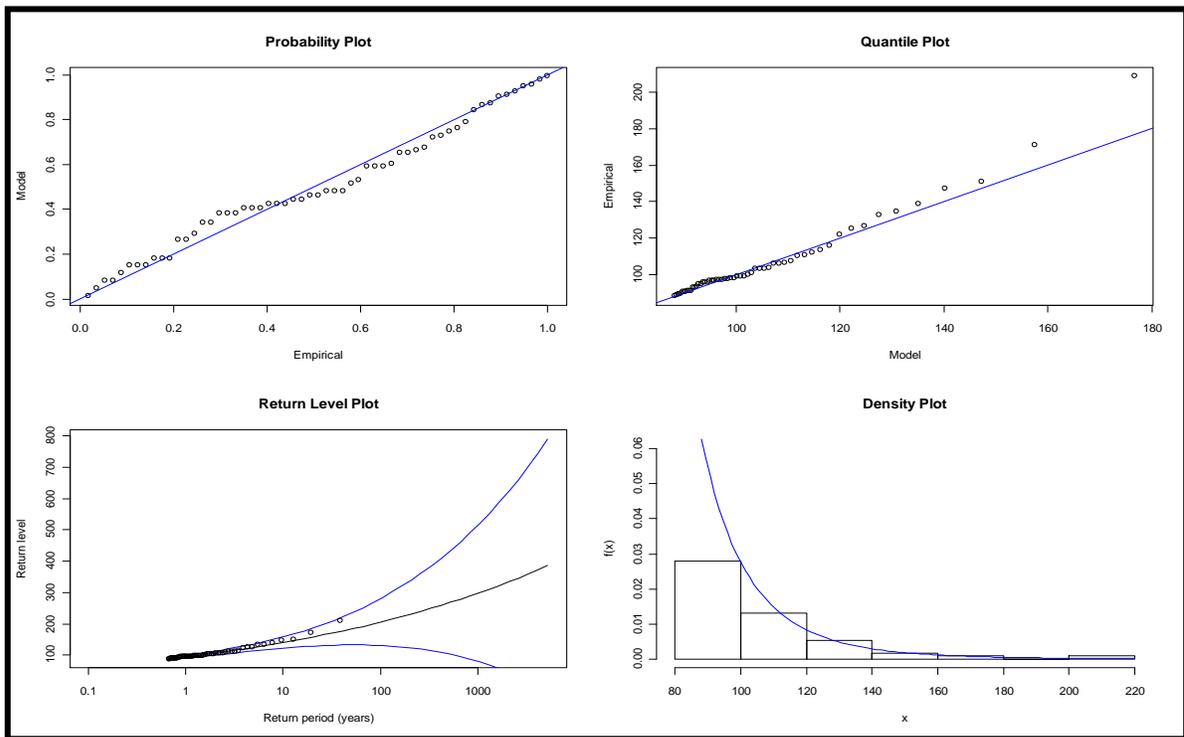
Valor de la función Log-Verosimilitud: 265.025672835386

σ : 15.6696048 \pm 2.8493606

ξ : 0.1459096 \pm 0.1367066

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

El ajuste de los datos al modelo propuesto se aprecia en el gráfico siguiente, en el que el probability plot muestra un buen ajuste pero el quantile plot muestra diferencias sobre todo en los valores más grandes, el return level indica una ligera convexidad, esto por el valor positivo del parámetro de forma.



Gráfica 4.36 – Diagnóstico DGP para Intensidad de 10 minutos.

Al evaluar esta función de probabilidades para los diferentes periodos de retorno se obtuvo las intensidades correspondientes para cada uno. Y esto se reseña en la siguiente tabla:

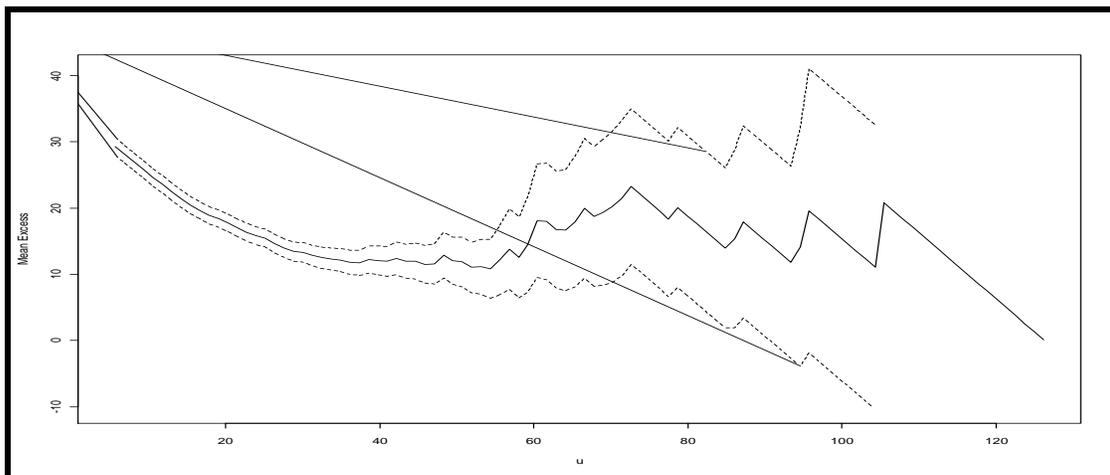
Capítulo IV: Resultados y Análisis.

Tabla 4.17- Intensidades para 10 minutos de Duración DGP.

Periodo de Retorno	Intensidad (mm/h)	Intervalo de 95 % de confianza (mm/h)
2	106.5909	(101.34304,113.51391)
5	125.0413	(115.75621,140.68991)
10	140.7324	(127.19272,170.52688)
25	164.0666	(142.30637,206.33551)
50	178.321	(153.44769,236.78883)
100	189.319	(164.20045,270.48325)
500	209.792	(187.40972,363.20333)

4.10.3.- Intensidad para 20 minutos.

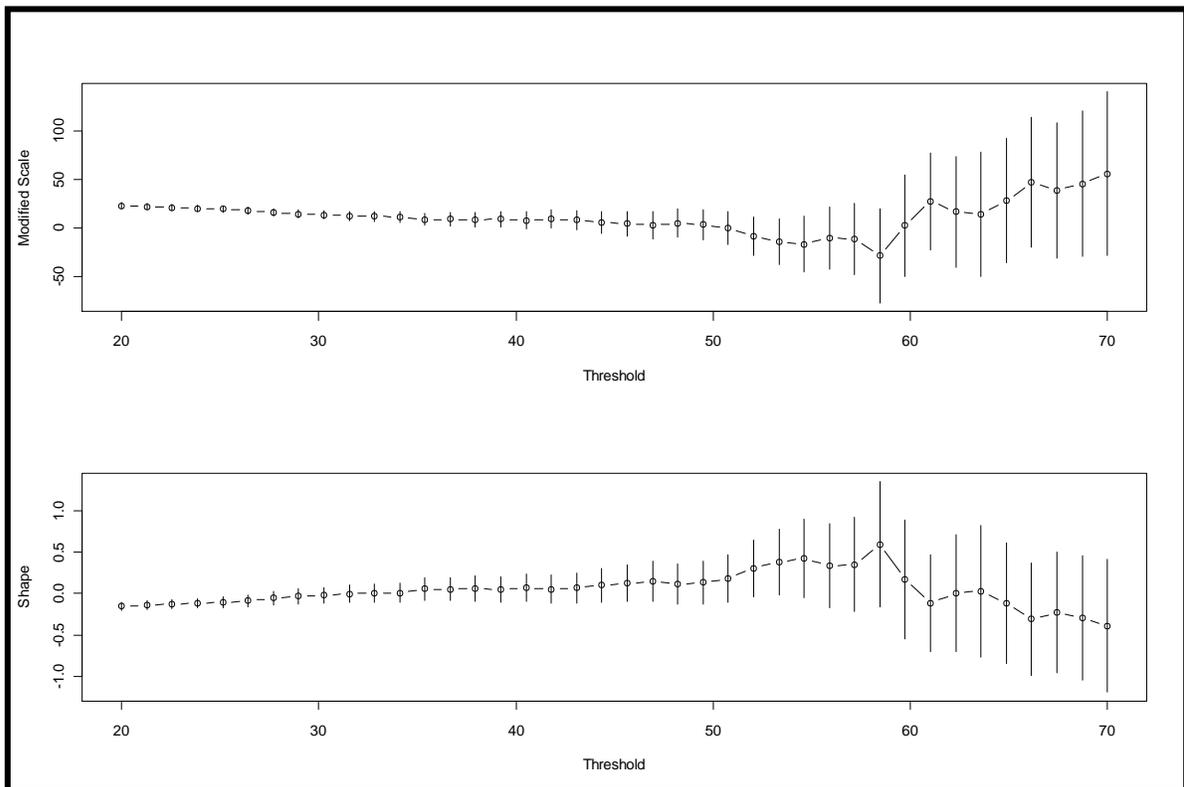
El gráfico de la media de los excesos muestra un indicativo de linealidad alrededor de los 40 mm/h como valor de umbral, pero es necesario corroborar el comportamiento de los parámetros de la distribución respecto a este umbral a determinar



Gráfica 4.37 -Media de los Excesos para la intensidad de 20 minutos.

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

Ahora al estudiar el gráfico 4.38, observamos que los parámetros de la función de distribución comienzan hacerse grandes a partir de 45 mm/h, especialmente para el del parámetro de forma, por lo que escoger este valor como umbral es razonable.



Gráfica 4.38 –Variación de los parámetros para la intensidad de 20 minutos.

Para un umbral de 45, el número de valores que exceden el umbral es 91

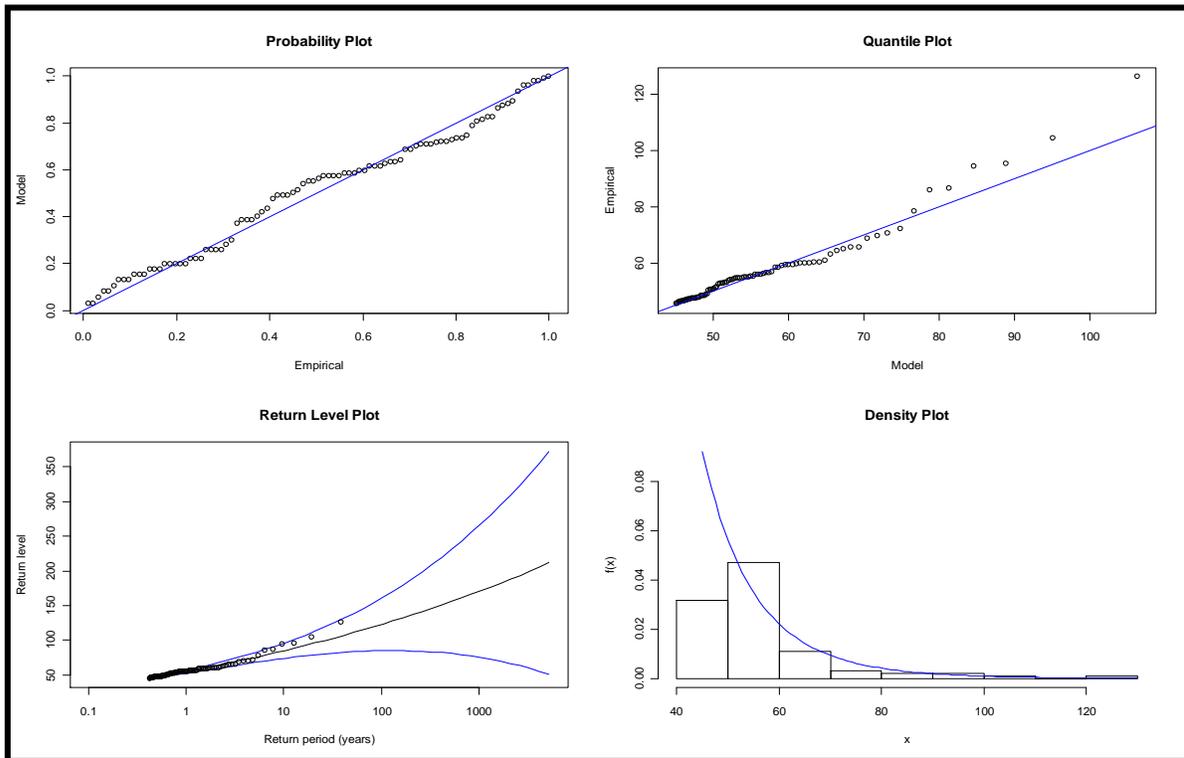
Estimadores de la máxima verosimilitud:

Valor de la función Log-Verosimilitud: 316.535239061407

σ : 10.81990408 \pm 1.6087628

ξ : 0.09678315 \pm 0.1059246

Capítulo IV: Resultados y Análisis.



Gráfica 4.39 – Diagnóstico DGP para Intensidad de 20 minutos.

El probability plot y el quantile plot, se visualiza como los valores de la muestra ajustan muy bien para el primero de los gráficos, mientras que para el segundo la diferencia de la recta que indica la mejor calidad de ajuste al modelo teórico (DGP) es un poco notoria, pero por debajo de la muestra, situación que queda en evidencia en el return level, sin embargo los valores son aceptado en el intervalos de confianza, con algunos muy cerca pero no fuera del intervalo.

Los valores de intensidades para los diferentes periodos de retorno se presentan en la tabla 4.18.

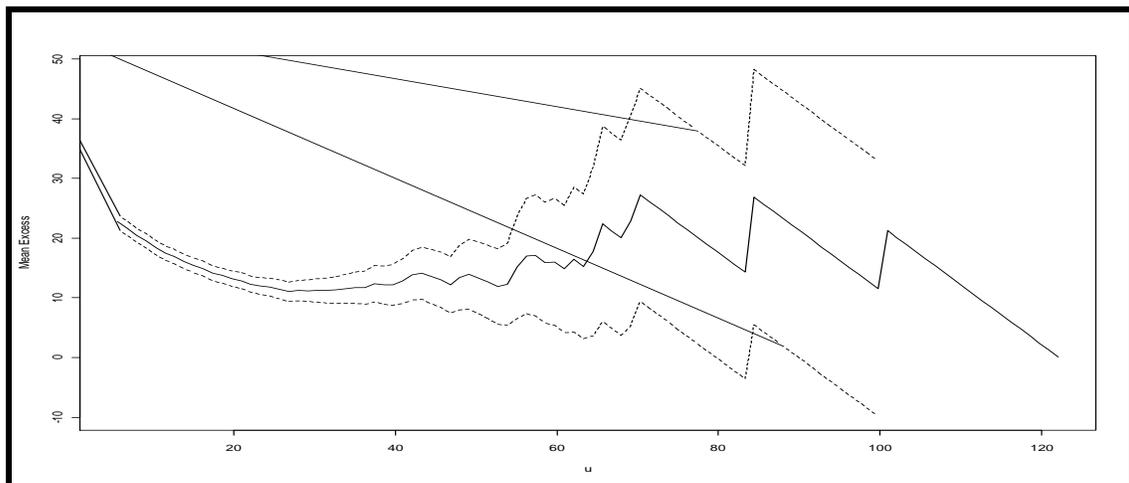
Capítulo IV: Resultados y Análisis.

Tabla 4.18- Intensidades para 20 minutos de Duración DGP.

Periodo de Retorno	Intensidad (mm/h)	Intervalo de 95 % de confianza (mm/h)
2	63.0548	(59.44016,67.75211)
5	75.0962	(69.13312,84.86614)
10	84.9415	(76.54986,102.10831)
25	99.0125	(86.14626,122.6228)
50	110.5173	(93.12374,139.15665)
100	122.8203	(99.80193,156.83773)
500	154.7807	(114.07887,202.76881)

4.10.4.- Intensidad para 30 minutos.

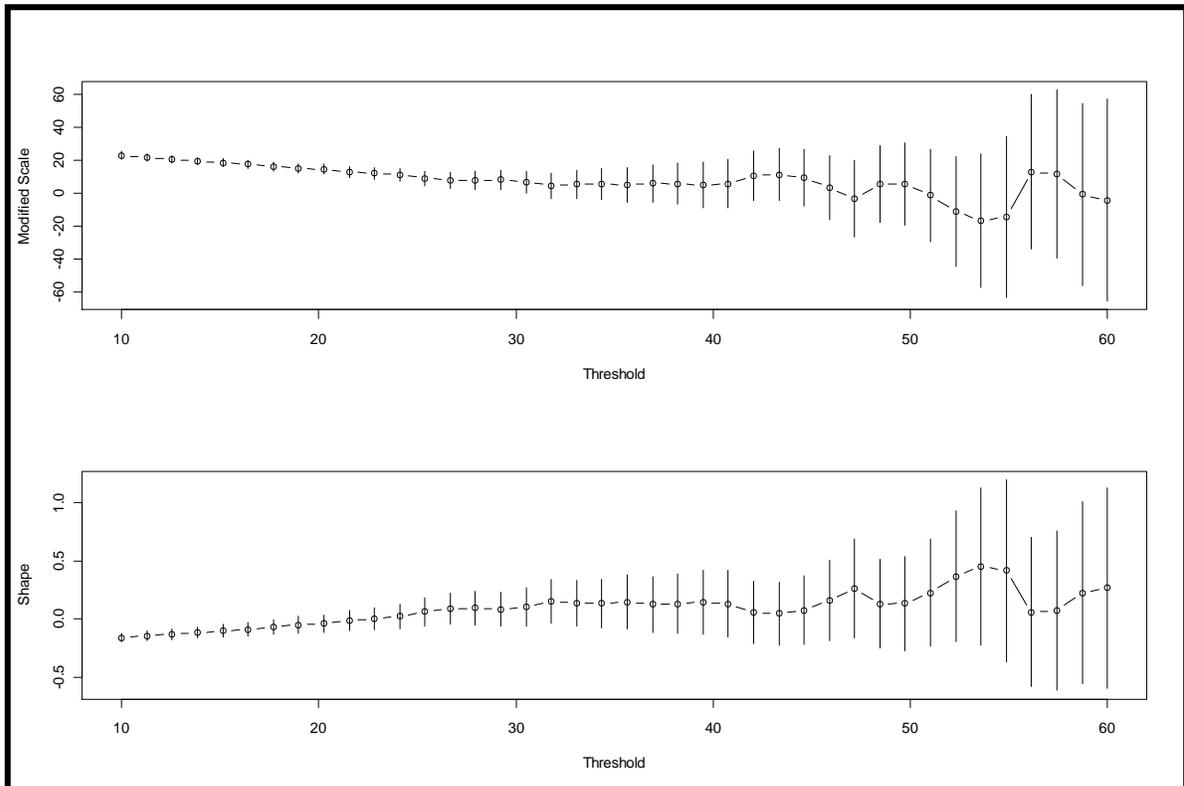
La elección del umbral de acuerdo al gráfico 4.30; nos indica una posible selección del mismo entre los valores de 20 mm/h y 40 mm/h por la linealidad que se evidencia a través de la media de los excesos.



Gráfica 4.40 -Media de los Excesos para la intensidad de 30 minutos.

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

Al ver el comportamiento de los parámetros de escala y forma ante la variación del umbral podemos percatar que un umbral de 35 mm/h es el punto donde los parámetros comienzan hacerse inestables. De aquí la selección de este valor.



Para un umbral de 37, el número de valores que exceden el umbral es 81

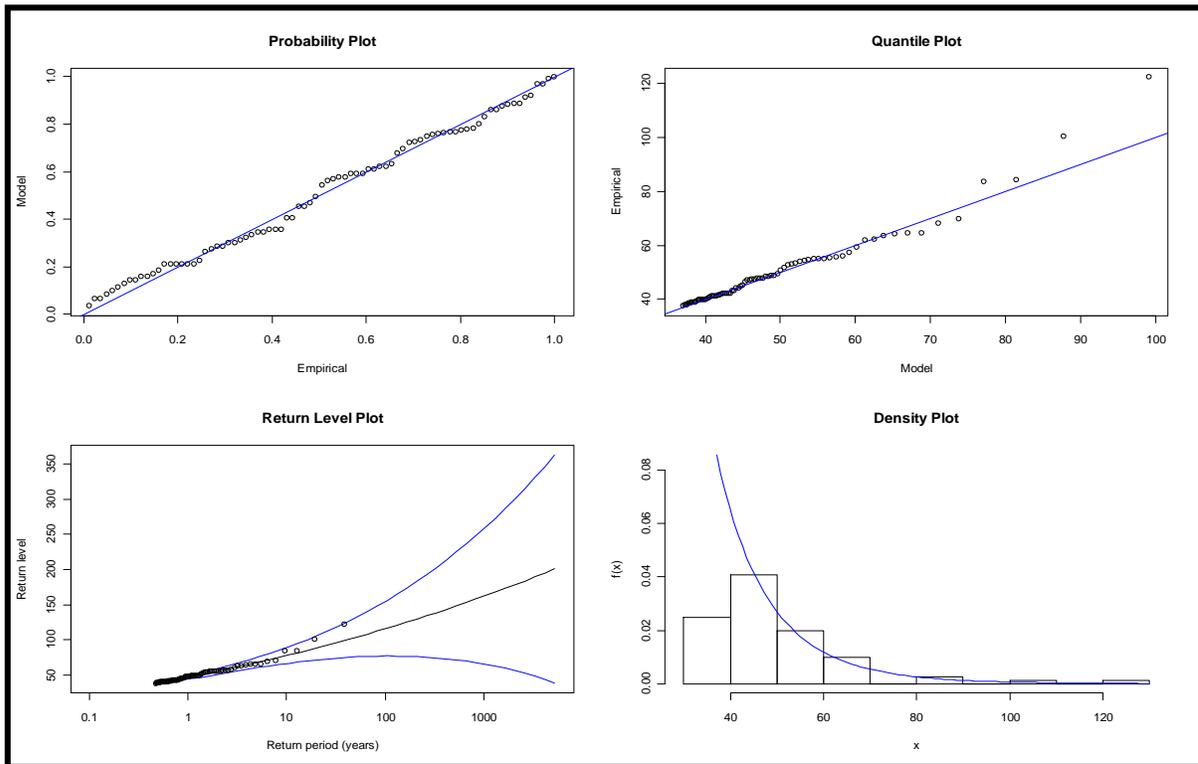
Estimadores de la máxima verosimilitud:

Valor de la función Log-Verosimilitud: 286.802728573435

σ : 11.67710009 \pm 1.8501870

ξ : 0.08311521 \pm 0.1133796

Capítulo IV: Resultados y Análisis.



Gráfica 4.42 – Diagnóstico DGP para Intensidad de 30 minutos.

El diagnóstico de la muestra reflejado en la gráfica anterior indica como para los valores más extremos se nota una discrepancia, tanto para el modelo en return level como en el quantile plot contra la distribución teórica de los datos, pero ajustando muy bien en el probability plot, el histograma de los datos y la función de densidad muestran parecido.

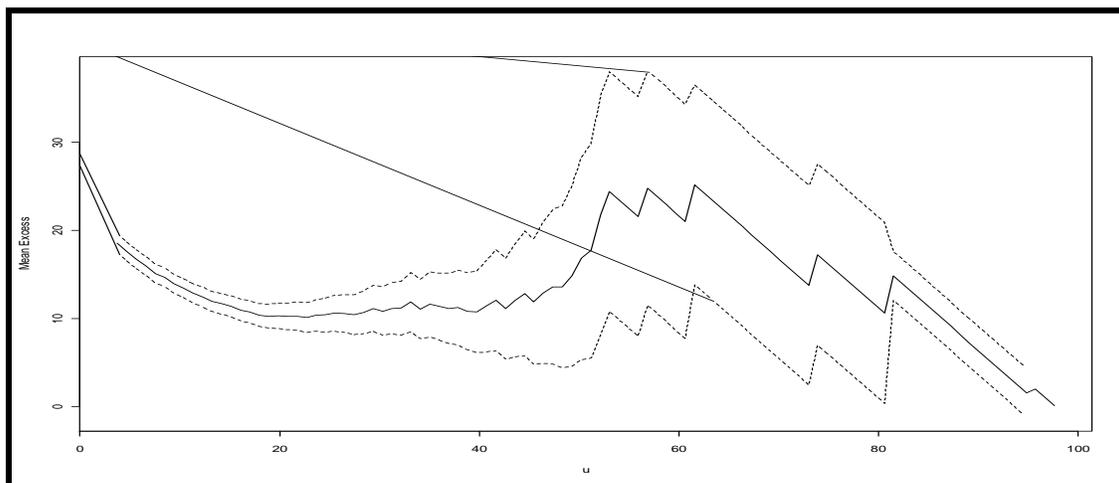
De acuerdo a los parámetros estimados y que el modelo es el adecuado para la muestra obtenemos para la probabilidad de ocurrencia los diferentes valores de intensidades para esta duración, 30 minutos. (Ver tabla siguiente)

Tabla 4.19- Intensidades para 30 minutos de Duración DGP.

Periodo de Retorno	Intensidad (mm/h)	Intervalo de 95 % de confianza (mm/h)
2	54.7372	(50.97414,59.59923)
5	67.2584	(61.06074,77.31143)
10	77.3845	(68.73891,95.33229)
25	91.6978	(78.59671,117.17721)
50	103.2732	(85.70024,134.14466)
100	115.535	(92.44132,152.11833)
500	146.8841	(106.61618,198.07057)

4.10.5.- Intensidad para 45 minutos.

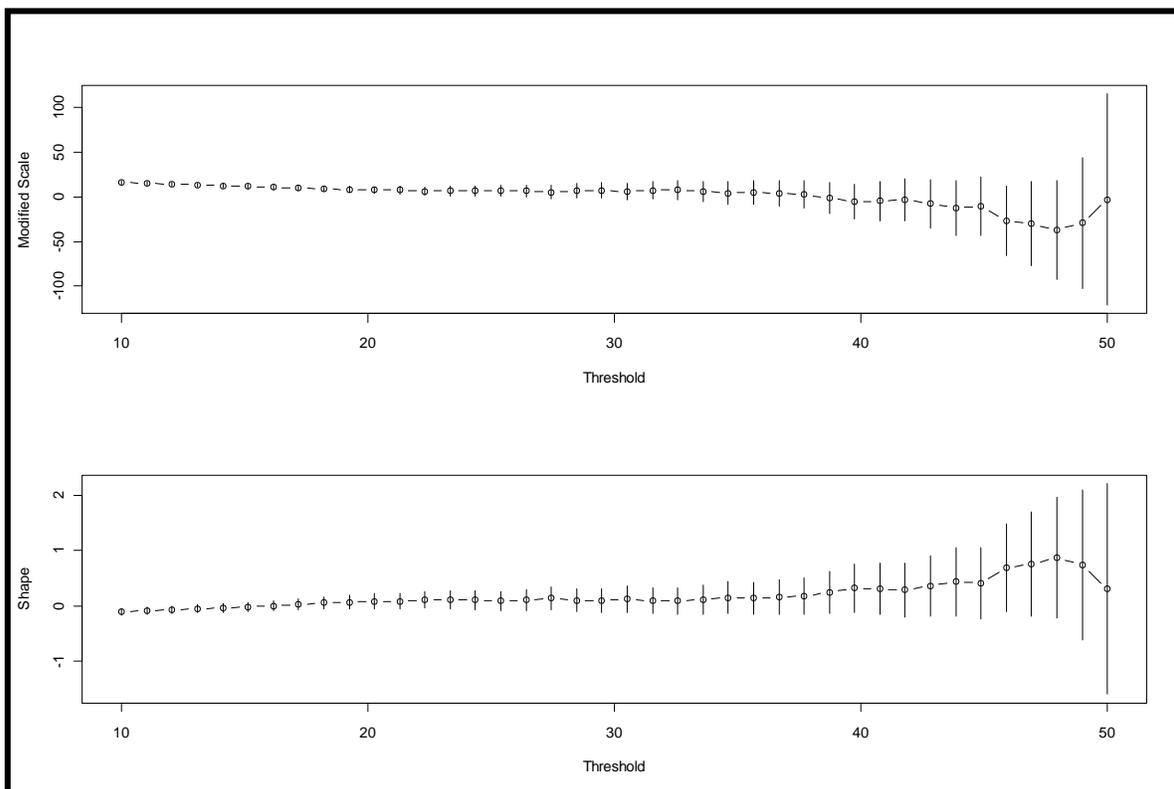
El gráfico de la media de los excesos para la serie de datos correspondiente a la intensidad de 45 minutos de duración indica en la línea central y en las líneas punteadas correspondientes al intervalo de confianza de 95% una linealidad en los valores de alrededor de 20 y 30.



Gráfica 4.43 –Media de los Excesos para la intensidad de 45 minutos.

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

Después de 40 la gráfica se hace inestable y el intervalo de confianza se hace mayor, sin embargo al observar la variación de los parámetros de la distribución respecto al cambio del umbral se puede observar que un valor de 32 es una buena escogencia.



Gráfica 4.44 –Variación de los parámetros para la intensidad de 45 minutos.

Para un umbral de 32, el número de valores que exceden el umbral es 68

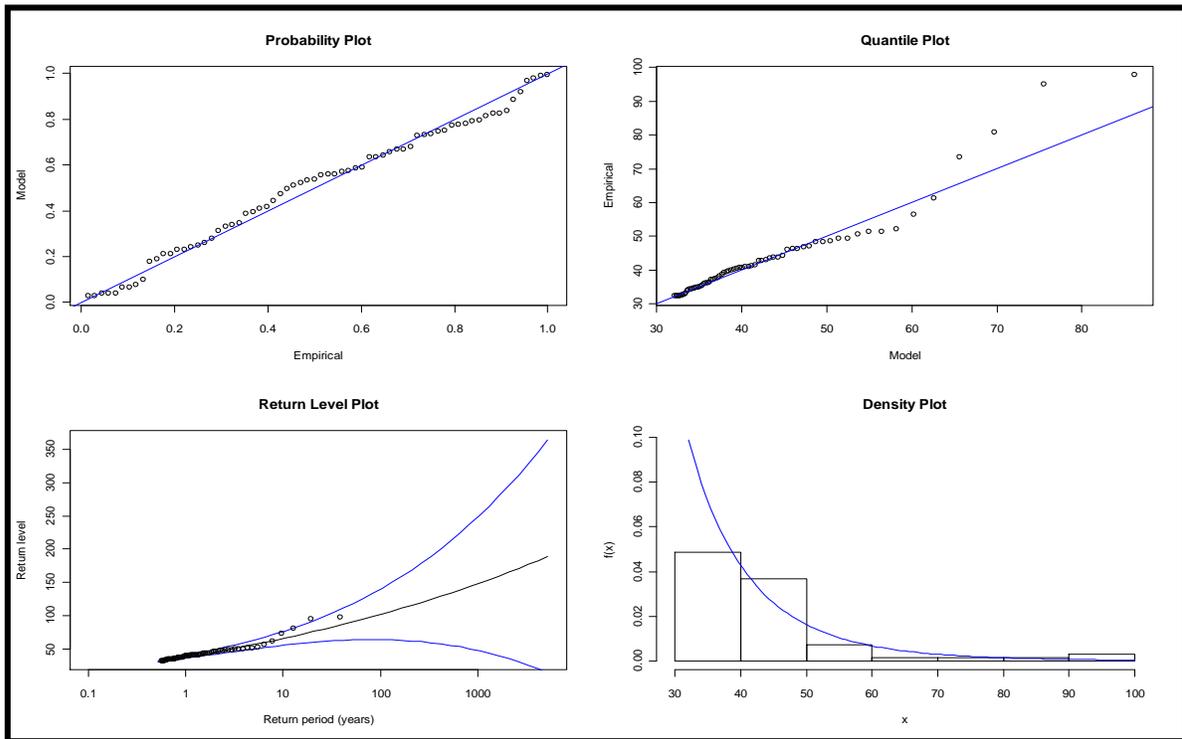
Estimadores de la máxima verosimilitud:

Valor de la función Log-Verosimilitud: 232.572714700611

σ : 10.0942849 \pm 1.7558580

ξ : 0.1081290 \pm 0.1253633

Capítulo IV: Resultados y Análisis.



Gráfica 4.45 – Diagnóstico DGP para Intensidad de 45 minutos.

El diagnóstico del modelo respecto a los datos se muestra en el gráfico anterior, se puede observar como el probability plot ajusta excelentemente, pero al verificar el ajuste en el quantile plot es ajuste no es muy bueno, el valor cercano de cero del parámetro de forma se manifiesta en el gráfico de return level mediante una línea recta y por último la comparación del histograma contra la función de densidad de la distribución de probabilidad propuesta no difiere en mucho respecto a los datos.

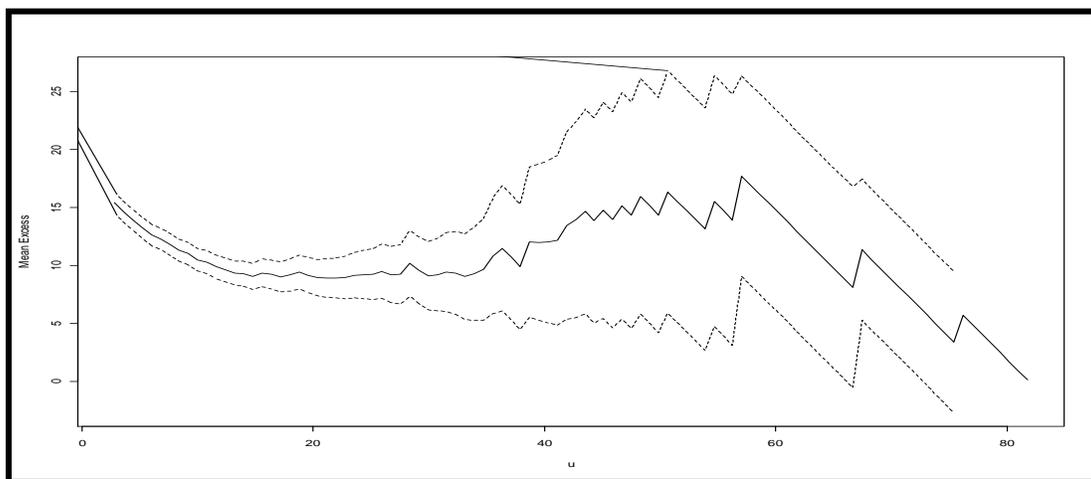
Aceptando como válido este modelo se calcula los diferentes valores de intensidad de precipitación para los periodos de retorno seleccionados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4.20- Intensidades para 45 minutos de Duración DGP.

Periodo de Retorno	Intensidad (mm/h)	Intervalo de 95 % de confianza (mm/h)
2	45.5742	(42.36489,49.80118)
5	56.711	(51.15752,65.7367)
10	65.8999	(58.0164,82.60052)
25	79.1537	(66.96924,103.26765)
50	90.0893	(73.4898,119.7957)
100	101.8761	(79.70931,137.61012)
500	132.9041	(92.82664,184.50563)

4.10.6.- Intensidad para 60 minutos.

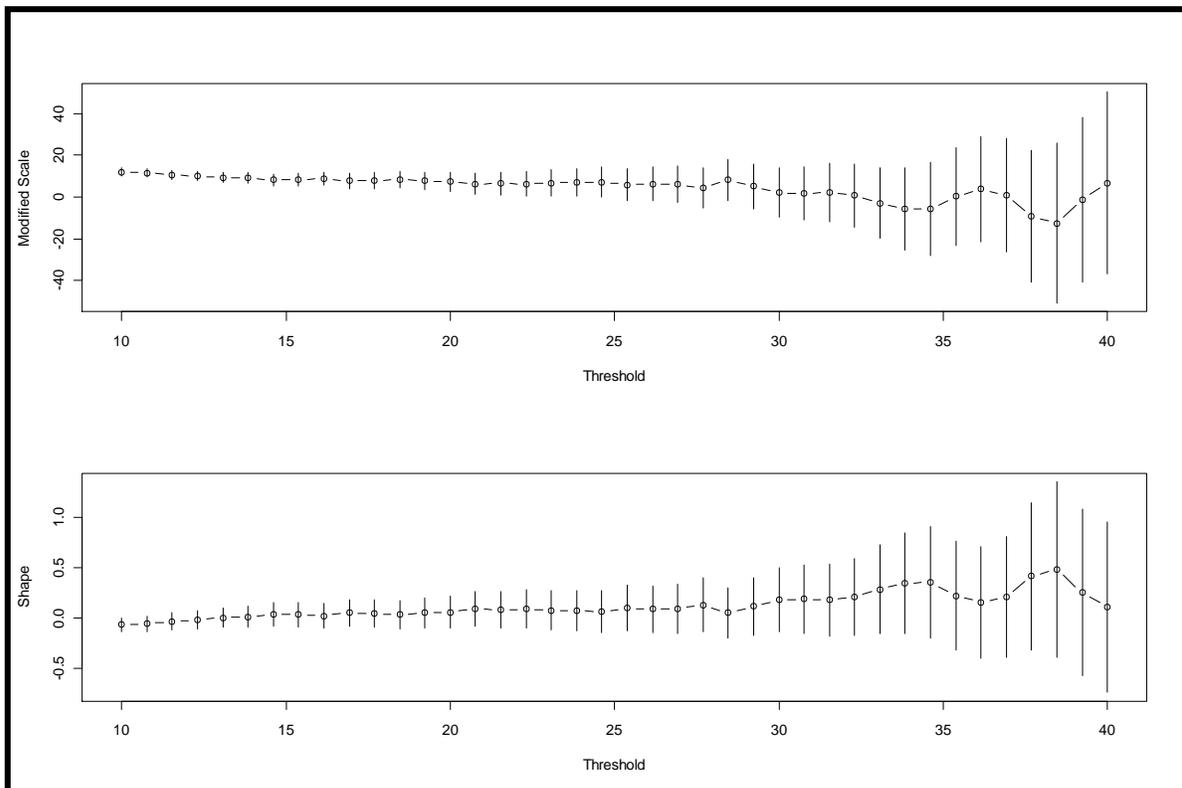
Para el ajuste de estos datos a la DGP se hace importante determinar el valor de umbral para definir los parámetros de la distribución, hacemos uso del gráfico siguiente donde se observa una linealidad de la función entre los valores umbrales de 20 y 30 antes de que la misma se haga inestable.



Gráfica 4.46 –Media de los Excesos para la intensidad de 60 minutos

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

Del siguiente gráfico se desprende el valor exacto del umbral utilizado, que no es más que el umbral máximo que mantenga los parámetros de la distribución estable, para este caso se seleccionó el valor de 25 mm/h.



Gráfica 4.47 –Variación de los parámetros para la intensidad de 60 minutos.

Para el umbral de 25 mm/h el número de valores que exceden el umbral es 85

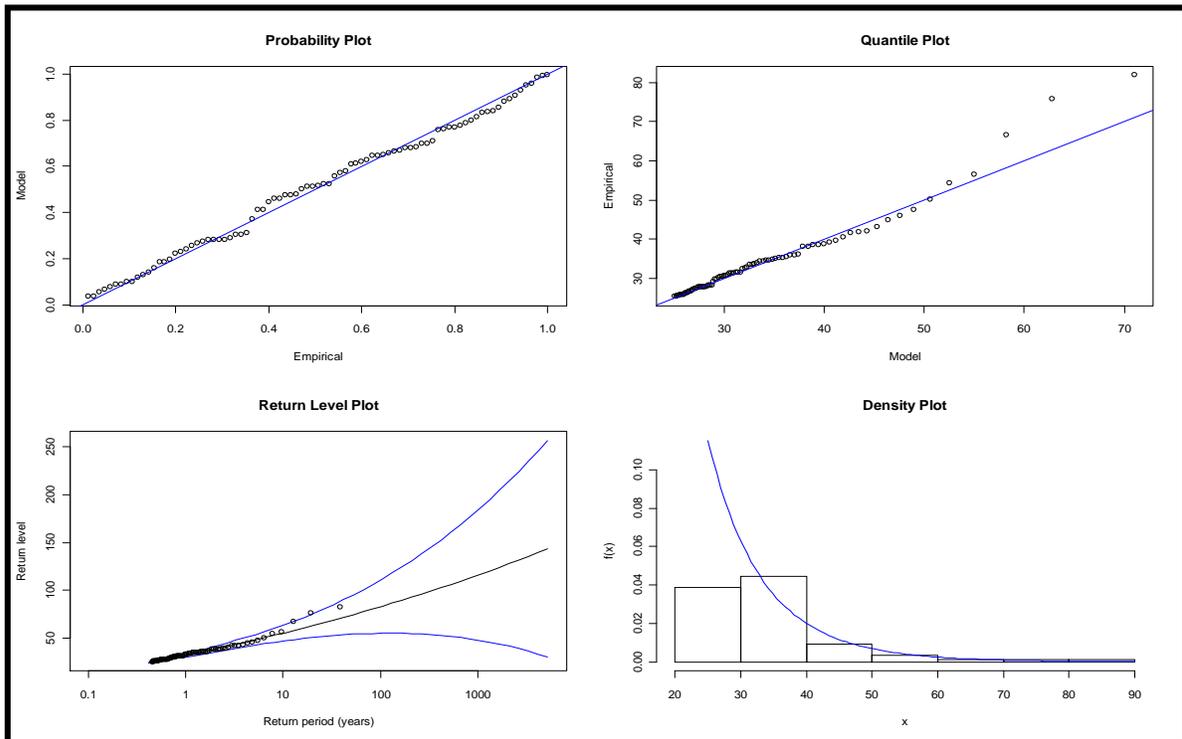
Estimadores de la máxima verosimilitud:

Valor de la función Log-Verosimilitud: 275.189355064397

σ : 8.68149515 \pm 1.3393253

ξ : 0.07612502 \pm 0.1100443

Capítulo IV: Resultados y Análisis.



Gráfica 4.48 – Diagnóstico DGP para Intensidad de 60 minutos.

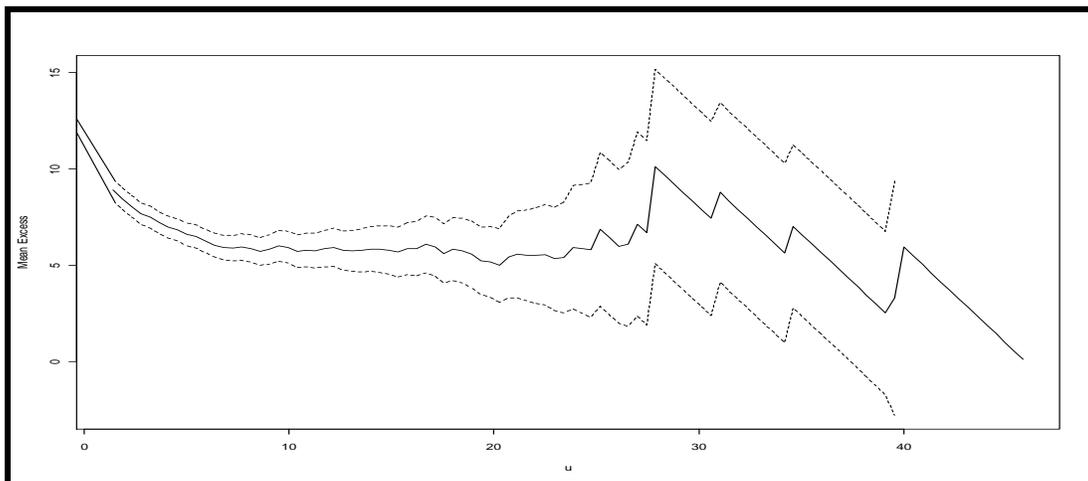
El gráfico anterior muestra a través del probability plot el ajuste de los valores mediante la distribución empírica contra la teórica, en este caso la DGP, en el se ve que los datos ajustan muy bien para todos los valores, la muestra se mantiene cerca de la línea recta, sin embargo en el probability plot se nota como valores más grandes no parecen acercarse muy bien a la recta, el return level no muestra como modelo una línea recta, esto debido al parámetro de forma que es casi cero. De este gráfico se pueden observar para los periodos de retorno seleccionados el valor de la intensidad (ver siguiente tabla), el density plot muestra que el histograma sigue razonablemente la función de densidad del modelo propuesto.

Tabla 4.21- Intensidades para 60 minutos de Duración DGP.

Periodo de Retorno	Intensidad (mm/h)	Intervalo de 95 % de confianza (mm/h)
2	38,5874	(35,7935 42,1897)
5	47,8078	(43,2580 55,1767)
10	55,2227	(48,9050 68,1983)
25	65,6449	(56,1089 84,0796)
50	74,0263	(61,2616 96,2623)
100	82,8618	(66,116 109,105)
500	105,2678	(76,203 141,674)

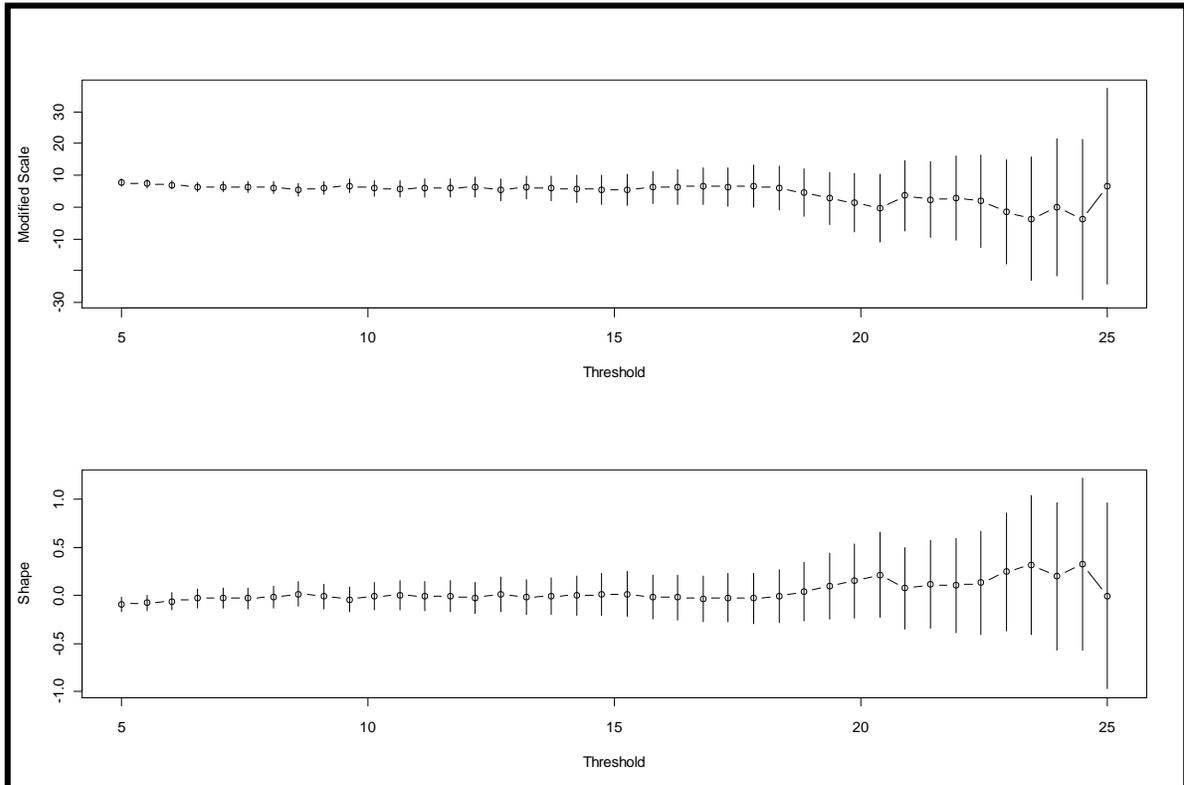
4.10.7.- Intensidad para 2 horas.

La gráfica de la media de los excesos nos muestra una forma gráfica de seleccionar el umbral para la distribución de probabilidades, para este caso observamos como aparece un tendencia de línea recta para los valores de los umbrales que se localizan entre 10 y 20, debemos visualizar la siguiente gráfica para estar seguro de cuál será la elección del umbral definitivo.



Gráfica 4.49 –Media de los Excesos para la intensidad de 2 horas.

Capítulo IV: Resultados y Análisis.



Gráfica 4.50– Variación de los parámetros para la intensidad de 2 horas.

Al observar detalladamente la gráfica de sensibilidad de los parámetros de escala y de forma de la distribución respecto a los cambios en los umbrales, se puede percibir que la elección de un umbral igual a 16 es una buena elección, y nos dice que para este valor hay 66 valores que lo exceden, estos conformarán los datos a estudiar para la intensidad correspondiente a dos horas de duración.

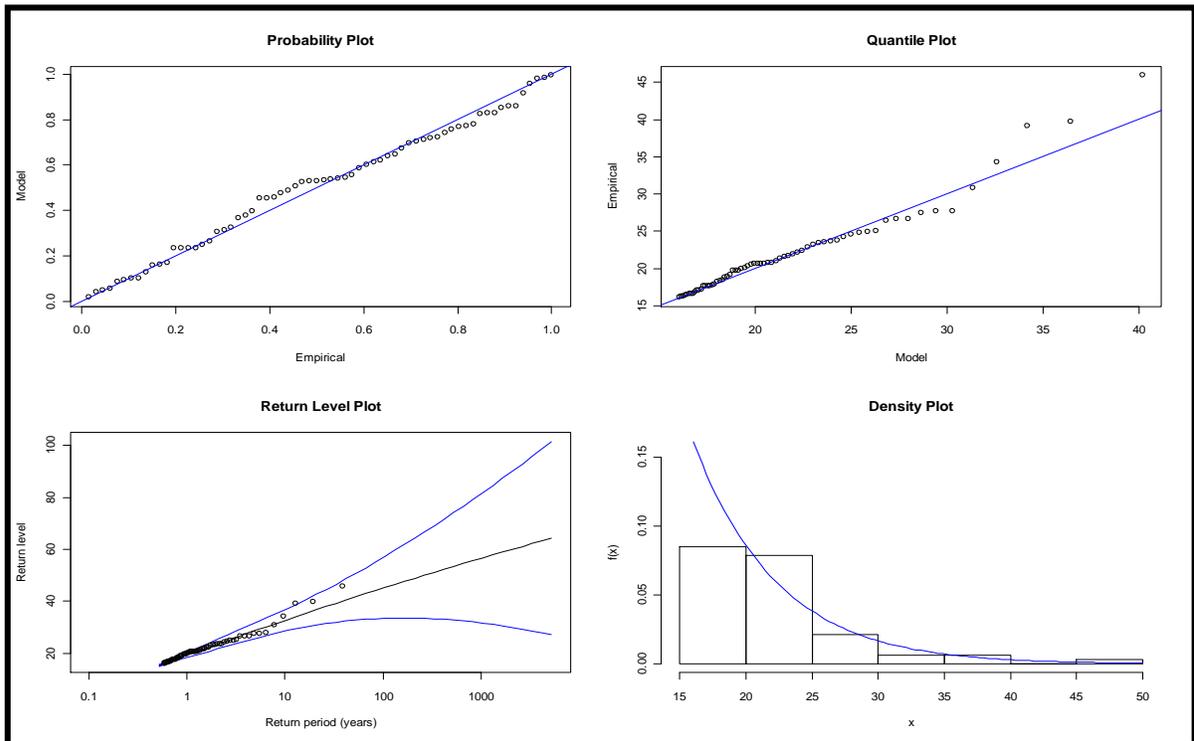
Estimadores de la máxima verosimilitud:

Valor de la función Log-Verosimilitud: 183.980241186546

σ : 6.18444295 \pm 1.0390930

ξ : -0.03438575 \pm 0.1144413

Capítulo IV: Resultados y Análisis.



Gráfica 4.51 – Diagnóstico DGP para Intensidad de 2 horas.

Los valores de esta muestra se ajustan relativamente bien al modelo propuesto, se mantienen cerca de la diagonal tanto para el probability plot como para el quantile plot, el return level deja ver como todos los valores se encuentran dentro de los límites de confianza, a la vez que estos se hacen más flexibles a medida que aumenta el periodo de retorno, esto indica el grado de incertidumbre a medida que se extrapola a niveles de retorno elevados, el gráfico de densidad se asemeja al histograma de los datos.

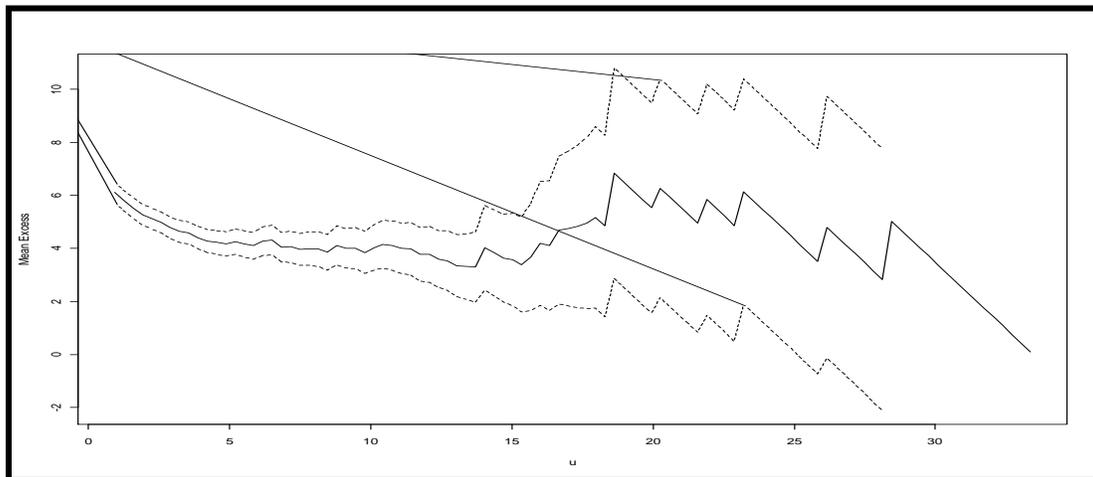
Las intensidades para los diferentes periodos de retornos correspondientes a la duración de una hora se colocan en la siguiente tabla.

Tabla 4.22- Intensidades para 2 horas de Duración DGP.

Periodo de Retorno	Intensidad (mm/h)	Intervalo de 95 % de confianza (mm/h)
2	23.4226	(21.7548,25.54245)
5	28.7708	(26.17977,32.56222)
10	32.706	(29.36586,39.03076)
25	37.7663	(33.21003,48.51798)
50	41.4897	(35.79267,54.08059)
100	45.1254	(38.08502,59.51219)
500	53.2404	(42.35237,71.6357)

4.10.8.- Intensidad para 3 horas.

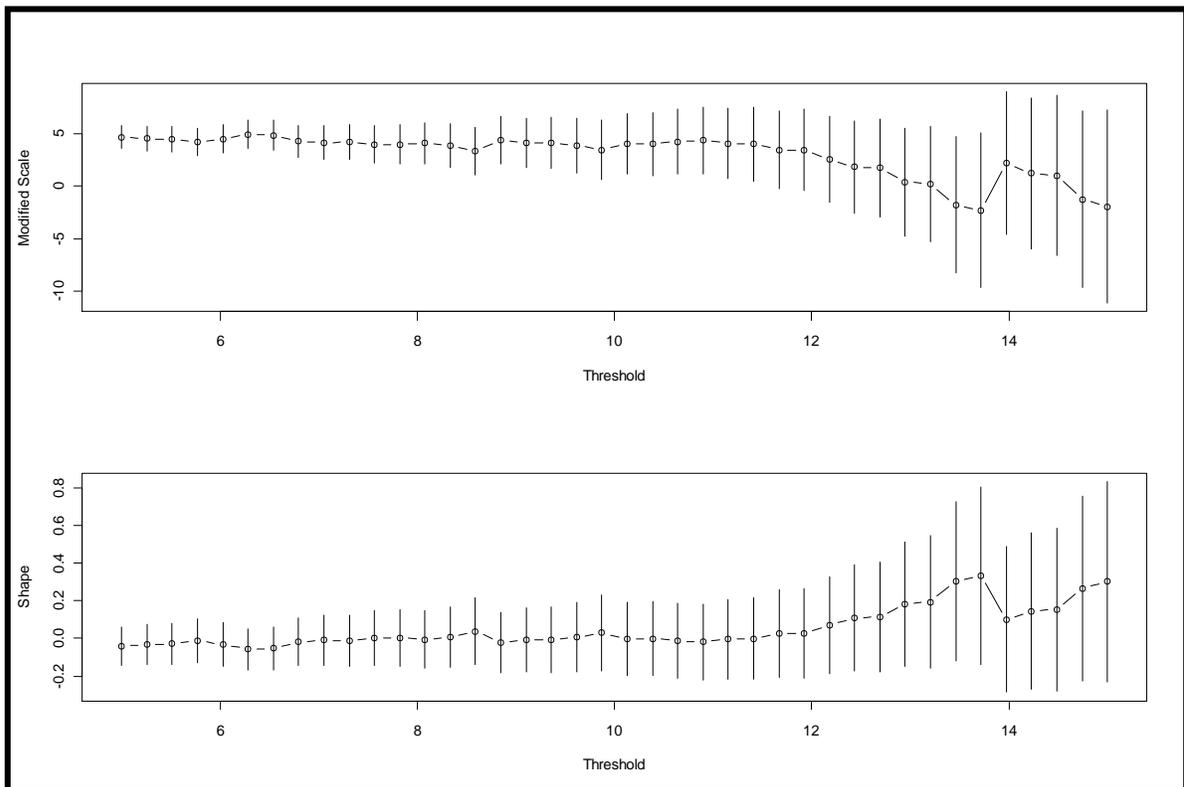
La elección del umbral de acuerdo al gráfica inferior debe estar entre 5 y 15, esto debido a lo que se visualiza.



Gráfica 4.52 –Media de los Excesos para la intensidad de 3 horas.

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

Al contrastar esta idea con el gráfico siguiente (sensibilidad de los parámetros de forma y escala versus los diferentes umbrales) se puede escoger como un buen valor de umbral para esta intensidad correspondiente a 3 horas de duración el valor de 10 mm/h.



Para el umbral de 10, el número de valores que exceden el umbral es 88

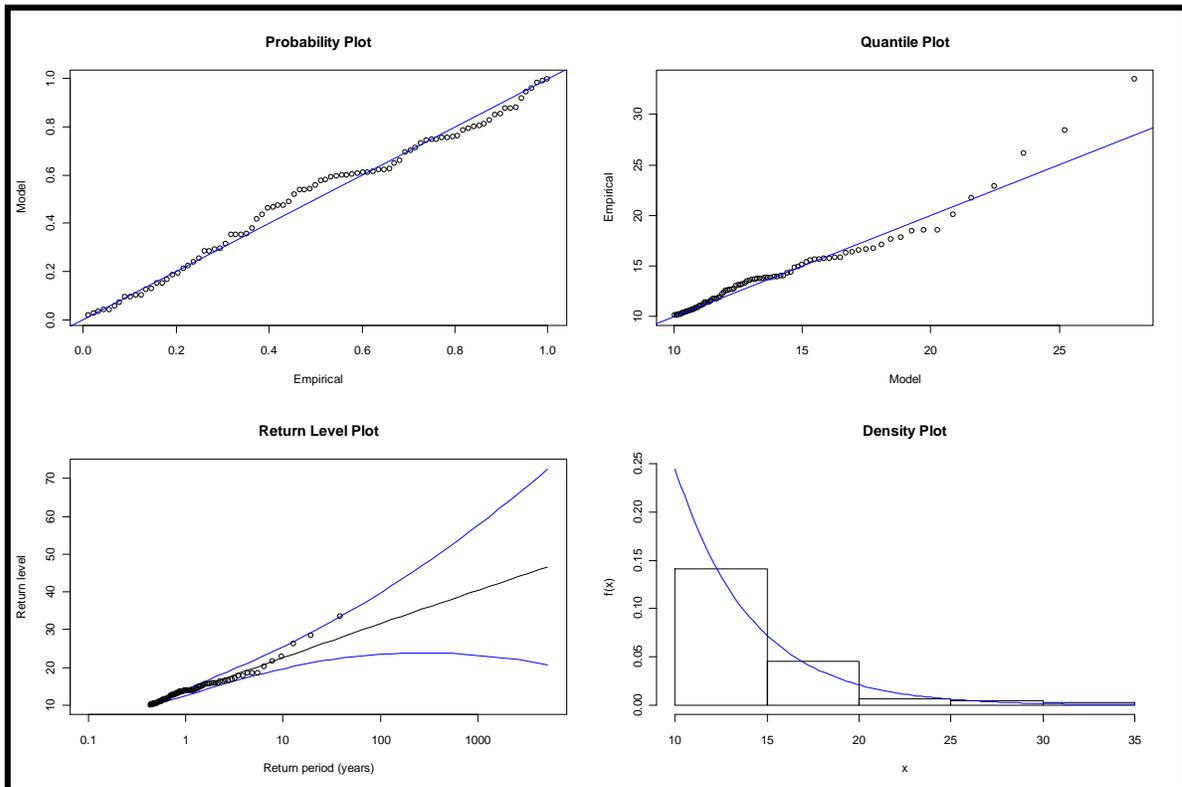
Estimadores de la máxima verosimilitud:

Valor de la función Log-Verosimilitud: 210.991465685696

σ : 4.085244282 \pm 0.5852592

ξ : -0.009765295 \pm 0.0957044

Capítulo IV: Resultados y Análisis.



Gráfica 4.54 – Diagnóstico DGP para Intensidad de 2 horas.

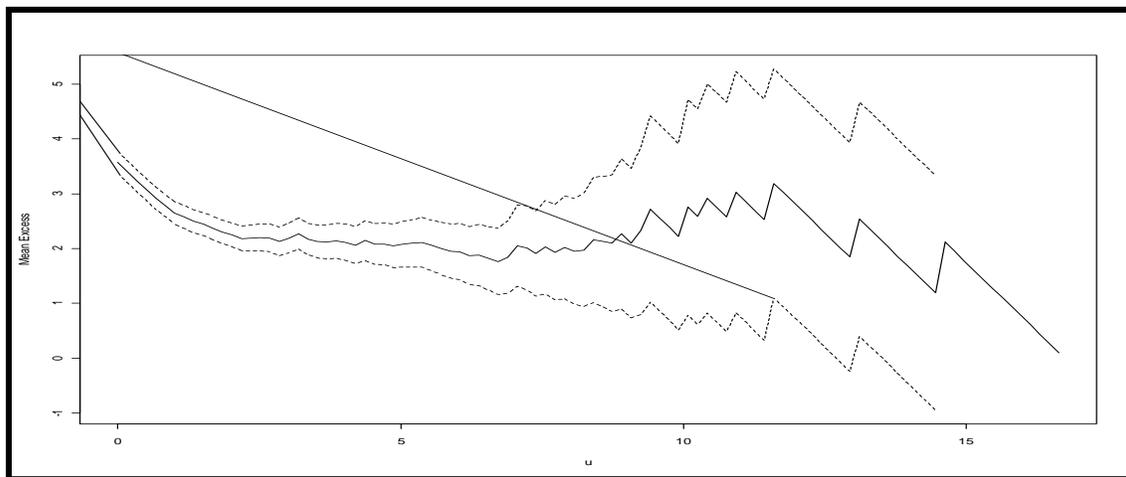
Los valores de estos datos ajustan bastante bien, exceptuando algunos que para los valores elevados se separan un poco de la diagonal principal que señala la mejora calidad en el ajuste, caso del quantile plot, el density plot asemeja muy bien a la función de densidad de la distribución con el histograma de los datos, de igual manera el gráfico de return level plot muestra como el modelo sigue una línea recta, esto debido a que el parámetro de forma es prácticamente cero, acotar que todos los valores se encuentran dentro de los límites de confianza es correcto mencionarlo.

Los valores de intensidades de precipitación para los periodos de retornos se visualizan en la tabla siguiente.

Tabla 4.23- Intensidades para 3 horas de Duración DGP.

Periodo de Retorno	Intensidad (mm/h)	Intervalo de 95 % de confianza (mm/h)
2	16.137	(14.96349,17.60982)
5	19.8089	(18.03293,22.49167)
10	22.5648	(20.24763,26.94726)
25	26.1795	(22.95834,32.99395)
50	28.8924	(24.82231,36.84957)
100	31.5871	(26.52062,40.67918)
500	37.774	(29.85337,49.47193)

4.9.9.- Intensidad para 6 horas.



Gráfica 4.55 – Media de los Excesos para la intensidad de 6 horas.

El valor del umbral a seleccionar aquí evidentemente debe estar cercano al valor de 5 mm/h, porque es en esta región en donde se presenta la mayor linealidad de la gráfica. Sin embargo decir esto a priora puede causar algunos

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

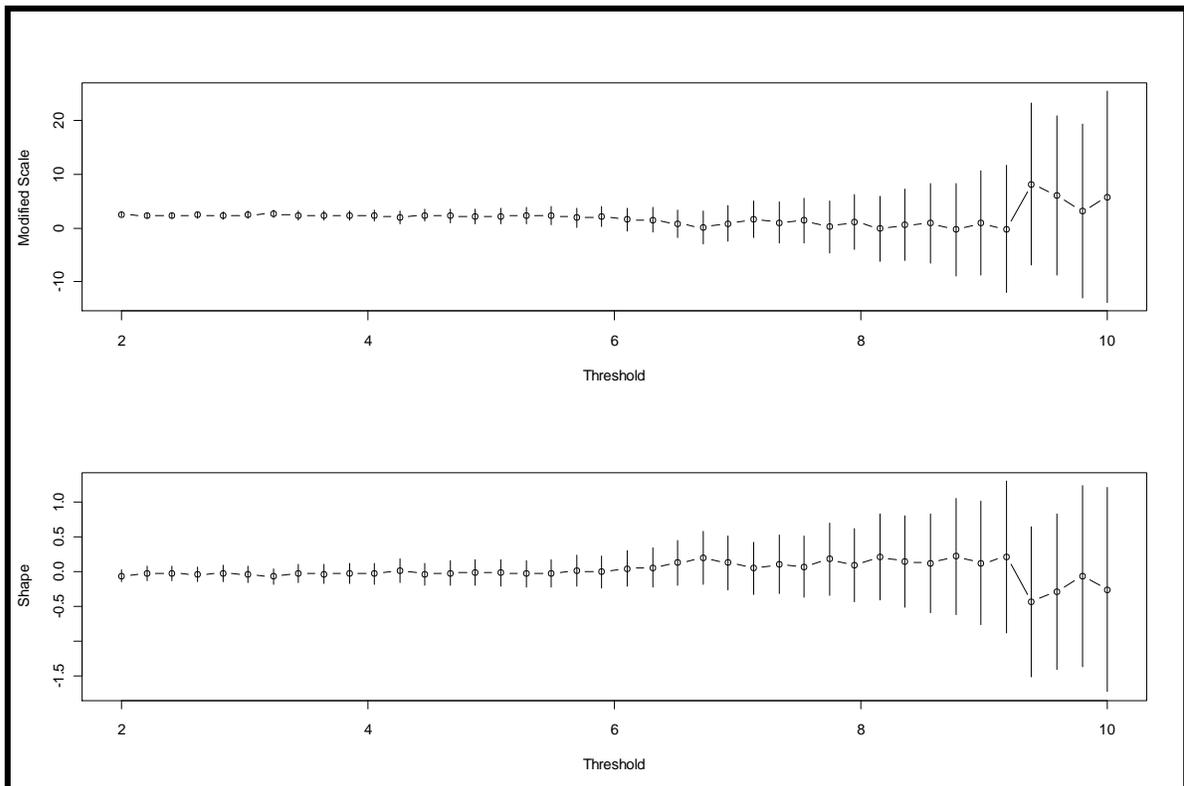
problemas, por lo que revisar el gráfico de la variación de los parámetros de forma y de escala respecto al umbral es siempre necesario. De aquí se extrae que el mejor valor para definir el umbral a trabajar es de 5,8 mm/h por la evidencia que se presenta en la siguiente figura. Para este valor el número de valores que exceden el umbral es de 65.

Estimadores de la máxima verosimilitud:

Valor de la función Log-Verosimilitud: 111.069962674765

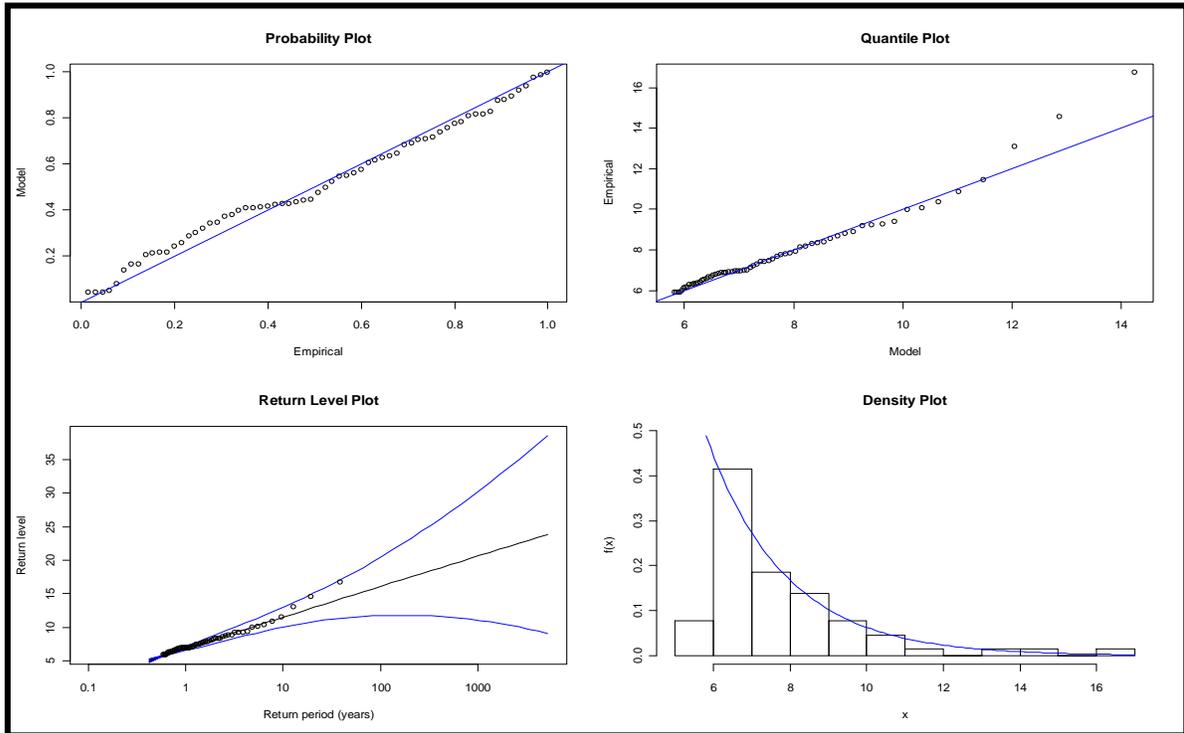
σ : 2.044425856 \pm 0.3445732

ξ : -0.006413643 \pm 0.1141435



Gráfica 4.57 – Variación de los parámetros para la intensidad de 6 horas.

Capítulo IV: Resultados y Análisis.



Gráfica 4.57 – Diagnóstico DGP para Intensidad de 6 horas.

El diagnóstico del ajuste se reseña en la gráfica anterior y los valores de las intensidades de precipitación en la tabla siguiente.

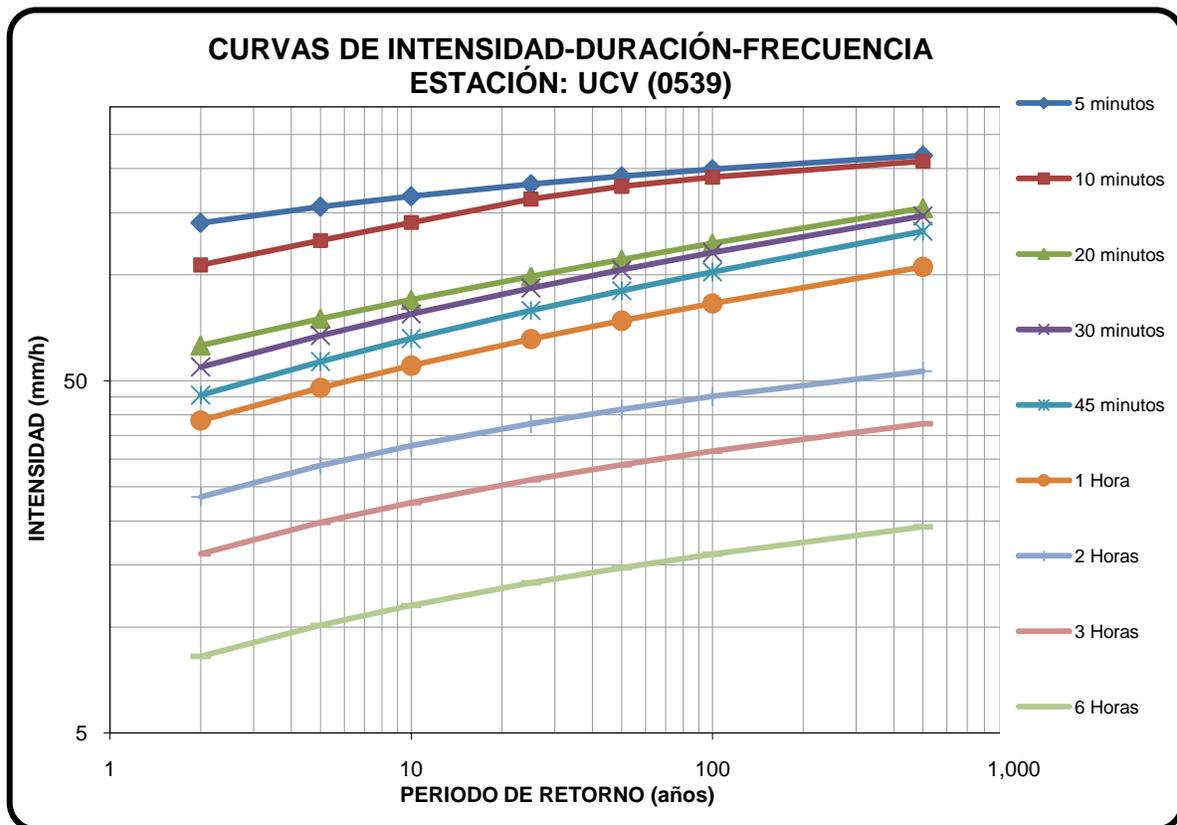
Tabla 4.24- Intensidades para 6 horas de Duración DGP.

Periodo de Retorno	Intensidad (mm/h)	Intervalo de 95 % de confianza (mm/h)
2	8.265	(7.70181,8.99098)
5	10.1184	(9.21605,11.45905)
10	11.5131	(10.32684,13.77519)
25	13.3475	(11.6941,17.08727)
50	14.7279	(12.63287,19.15177)
100	16.1023	(13.48307,21.2071)
500	19.2699	(15.12229,25.94435)

4.11.- Resumen de las Intensidades para DGP.

Tabla 4.25- Resumen de las intensidades par la DGP.

		Intensidades (mm/h)						
		Duración (horas)	Periodo de retorno en años (Tr)					
			2	5	10	25	50	100
MINUTOS	5	140.4	156.1	167.2	180.8	190.3	199.3	218.2
	10	106.6	125.0	140.7	164.1	178.3	189.3	209.8
	20	63.1	75.1	84.9	99.0	110.5	122.8	154.8
	30	54.7	67.3	77.4	91.7	103.3	115.5	146.9
	45	45.6	56.7	65.9	79.2	90.1	101.9	132.9
HORAS	1	38.6	47.8	55.2	65.6	74.0	82.9	105.3
	2	23.4	28.8	32.7	37.8	41.5	45.1	53.2
	3	16.1	19.8	22.6	26.2	28.9	31.6	37.8
	6	8.3	10.1	11.5	13.3	14.7	16.1	19.3



Gráfica 4.58 – Curvas de Intensidad duración y frecuencia estación UCV modelo DGP.

4.12.- Prueba de bondad de ajuste.

Para determinar que tan adecuado es el ajuste de los datos a la distribución de probabilidades propuesta en esta investigación se utilizó el test de Kolmogorov–Smirnov, resultado que se detalla a continuación:

El estadístico Kolmogorov–Smirnov “D” considera la desviación de la función de distribución de probabilidad de la muestra $P(x)$ de la función de probabilidades teórica escogida $P_o(x)$ tal que: $D_n = \text{máx} (P(x) - P_o(x))$. La prueba requiere que el valor D_n calculado con la expresión anterior sea menor que el valor tabulado D_n para un nivel de probabilidad requerido.

Tabla 4.26- Prueba de Kolmogorov para la DGE.

		Distribución Generalizada de Extremos							
		Test Kolmogorv				Parametros			Log Verosm
		$D\alpha 0,10$	$D\alpha 0,05$	$D\alpha 0,01$	$D_{critico}$	μ	σ	ξ	
MINUTOS	5	0,1883	0,2099	0,2515	0,1027	113,9	38,10	-0,4082	209,1361
	10	0,1883	0,2099	0,2515	0,1101	86,5	29,65	-0,1218	205,1393
	20	0,1883	0,2099	0,2515	0,0914	49,4	17,61	-0,0693	184,8125
	30	0,1883	0,2099	0,2515	0,0632	41,5	15,80	-0,0197	181,4070
	45	0,1883	0,2099	0,2515	0,0814	34,5	14,01	-0,0139	176,5772
HORAS	1	0,1883	0,2099	0,2515	0,0842	29,0	12,10	-0,0407	169,7931
	2	0,1883	0,2099	0,2515	0,0736	17,4	7,82	-0,1236	149,6097
	3	0,1883	0,2099	0,2515	0,0813	11,9	5,34	-0,0984	134,0782
	6	0,1883	0,2099	0,2515	0,0562	6,1	2,79	-0,1201	106,2992

En la tabla 4.26 se reseña el resultado de la prueba en el que se muestra que la diferencia entre las probabilidades teóricas para la distribución generalizadas de valores extremos y la empírica, no supera para ningún nivel de significancia el valor critico, por lo que no se puede rechazar la hipótesis nula de que la muestra no proviene de la DGE.

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

En la tabla 4.27 se visualiza el resumen de la prueba de bondad de ajuste de los datos para la serie de excedencias con la distribución de probabilidades generalizada de Pareto. En la tabla se puede apreciar como el valor critico de la prueba en algunos de sus casos solo pasó para un nivel de significancia de 0,01 pero en su mayoría el valor pasó el test para un nivel de significancia de 0,05 y 0,10.

Tabla 4.27- Resumen de Kolmogorov para la DGP.

		Distribución Generalizada de Pareto							
		Test Kolmogorov				Parametros		Umbral	Log Verosm
		D α 0,10	D α 0,05	D α 0,01	Dcritico	σ^*	ξ		
MINUTOS	5	0.1418	0.1581	0.1895	0.1542	20.139	-0.090	115	289.5485
	10	0.1479	0.1649	0.1977	0.1212	15.670	0.146	85	265.0257
	20	0.1279	0.1426	0.1709	0.1226	10.820	0.097	45	316.5352
	30	0.1356	0.1511	0.1811	0.1154	11.677	0.083	37	286.8027
	45	0.1479	0.1649	0.1977	0.0817	10.094	0.108	32	232.5727
HORAS	1	0.1448	0.1614	0.1934	0.1745	8.681	0.076	25	275.1894
	2	0.1502	0.1674	0.2006	0.0762	6.184	-0.034	16	183.9802
	3	0.1301	0.1450	0.1738	0.1063	4.085	-0.010	10	210.9915
	6	0.1513	0.1687	0.2022	0.0847	2.044	-0.006	5.8	111.0700

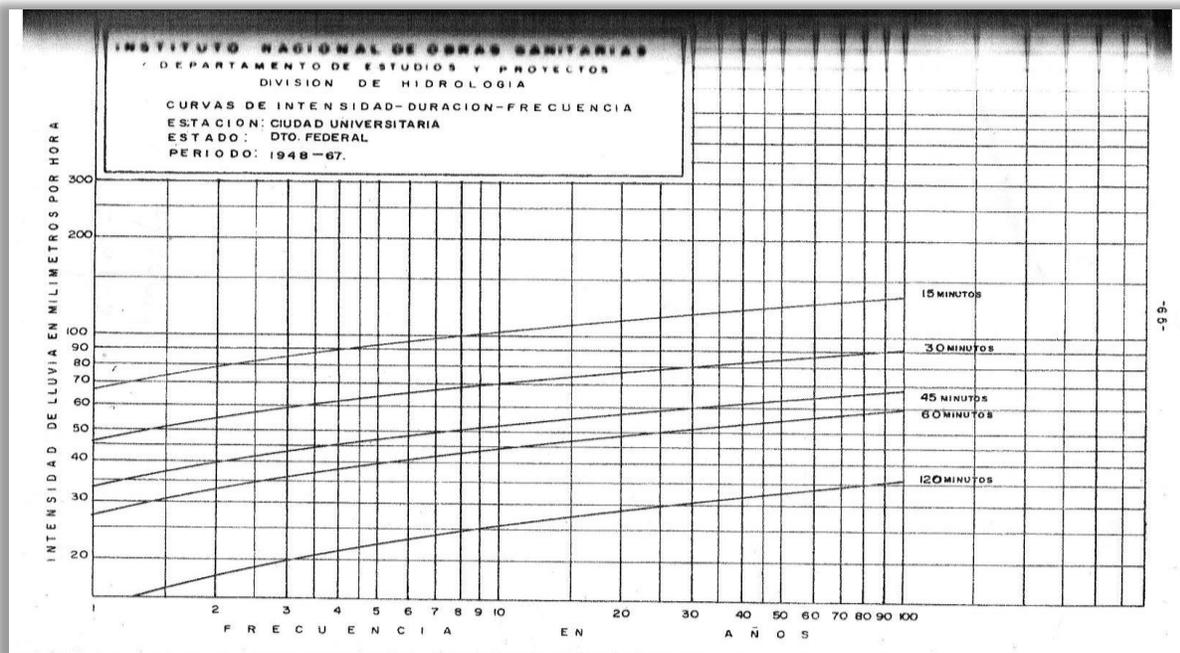
Los modelos mostrados aquí tratan de alguna manera describir el comportamiento de los niveles extremos en las intensidades de precipitación. Con herramientas estadísticas se describen los parámetros que identifican cada modelo para cada duración y se logra un pronóstico efectivo de los niveles extremos de la intensidad.

4.13.- Análisis de resultados.

Los Gráficos 4.30 (Curvas IDF para la distribución Generalizada de extremos **DGE**) y 4.58 (Curvas IDF para la distribución Generalizada de Pareto **DGP**) muestran el ajuste de los datos para las distribuciones propuestas, mientras

Capítulo IV: Resultados y Análisis.

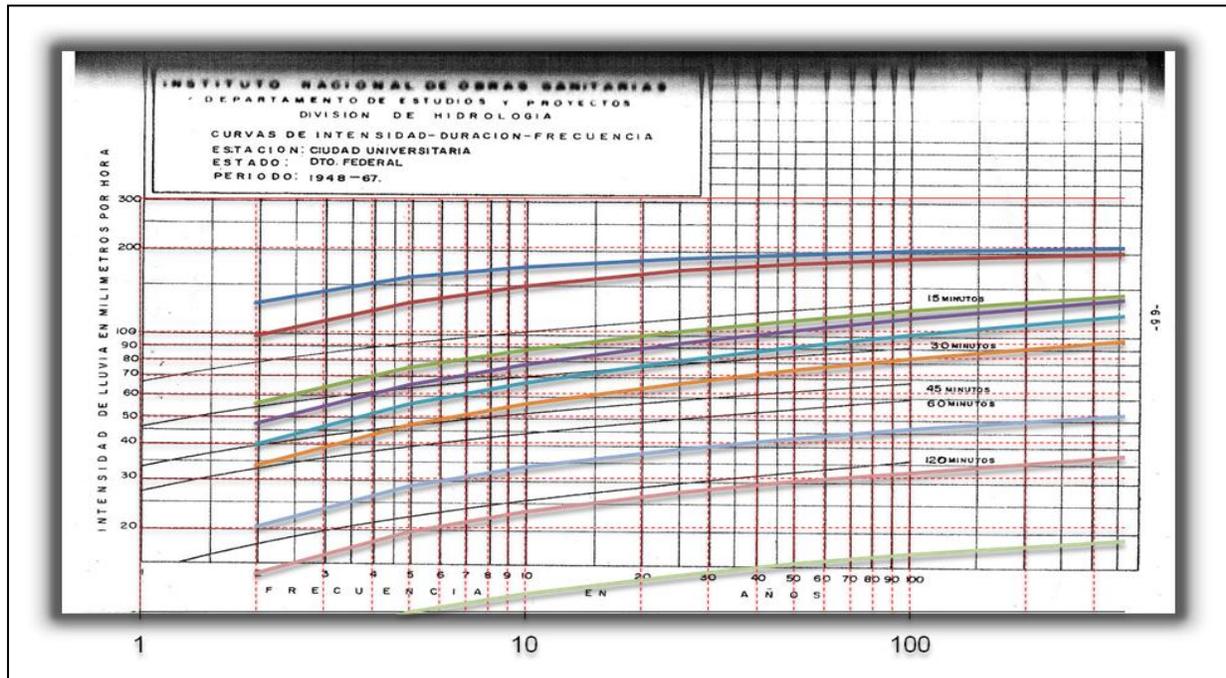
que en el gráfico 4.59 se visualizan las curvas IDF elaboradas por el INOS (Instituto Nacional de Obras Públicas) con un periodo de datos que va desde 1948 hasta 1967, en los gráficos siguientes 4.60 y 4.61 se represento mediante una yuxtaposición de imágenes las diferencias entre los valores de las curvas obtenidas en esta investigación con la realizada por el INOS.



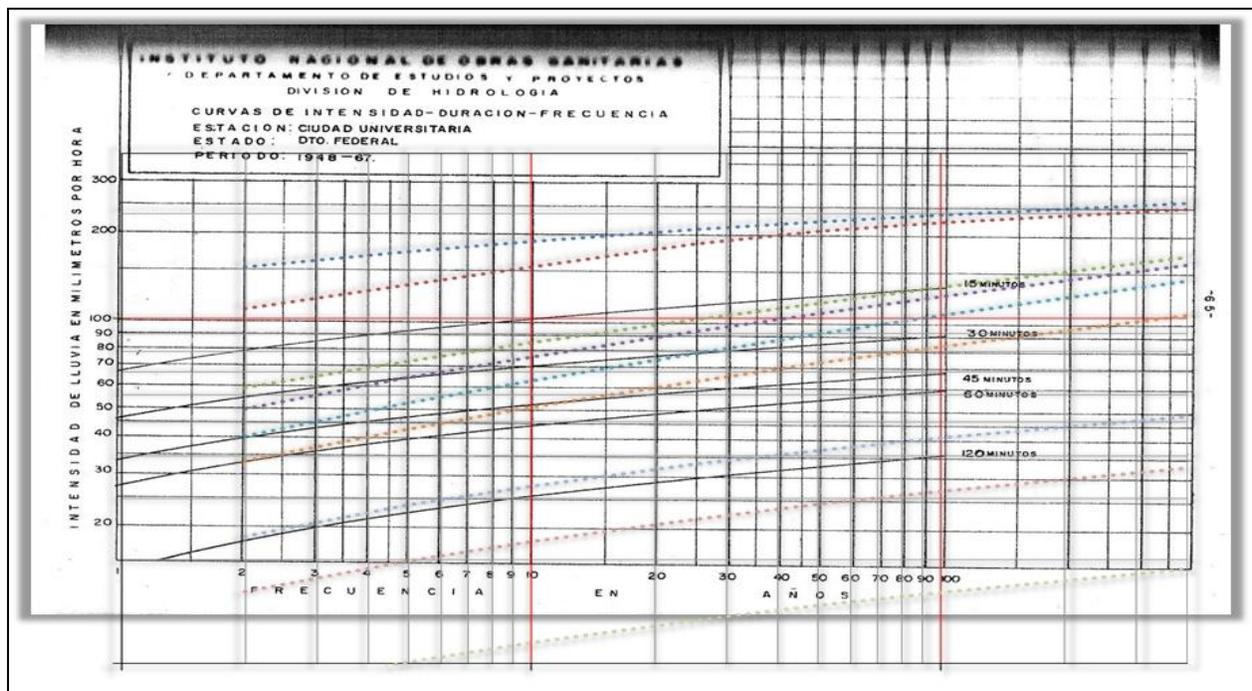
Gráfica 4.59 – Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia INOS.

La comparación de los dos gráficos de esta investigación versus el trabajo del INOS, arrojo resultados que indican que los valores obtenidos aquí están por encima de los cálculos generados por el Instituto Nacional de Obras Públicas en el orden del 10 al 30 % dependiendo de la duración de la intensidad y del periodo de retorno seleccionado. Verificar mediante los siguientes graficos.

Capítulo IV: Resultados y Análisis.



Gráfica 4.60 – Curvas IDF INOS Vs. Curvas IDF Distribución Generalizada de Extremos.



Gráfica 4.61 – Curvas IDF INOS Vs. Curvas IDF Distribución Generalizada de Pareto.

Capítulo IV: **Resultados y Análisis.**

De acuerdo a los resultados obtenidos del análisis hecho a lo largo de este trabajo se puede decir que las series de intensidad de precipitación, a pesar de que ninguna de ellas mostró problemas al ser ajustada a los modelos tanto de la Distribución Generalizada de Extremos como de la Distribución de Pareto. Dichos modelos sugieren que los datos de intensidad a niveles altos se comportan de manera estable y que razonablemente se pueden predecir observaciones futuras de niveles altos tomando en cuenta que la probabilidad con la que puede la observación es muy pequeña y el intervalo de confianza se hace mas grande, claro es difícil predecir a un periodo de retorno de más de cien años con una muestra de 42 años de datos.

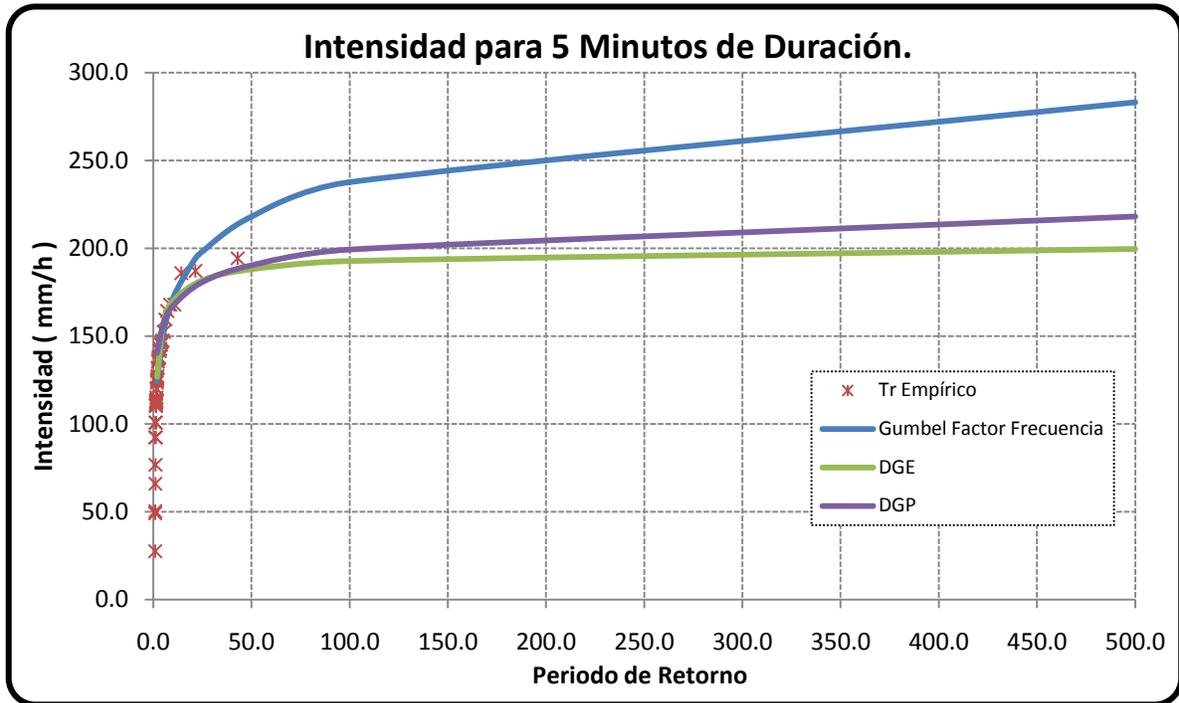
El valor del logaritmo de la máxima verosimilitud resulto en todos los casos mayores para la DGP que la DGE obviamente, los valores del parámetro de forma resultaron diferentes también, ahora si se disponen de más datos en el ajuste de la Distribución de Extremos, es decir, mas años de registro y por lo tanto una cantidad mayor de máximos anuales, probablemente los estimados de cada distribución coincidieran o su diferencia no fuera significativa.

En otro orden de idea se utilizó el factor frecuencia propuesto por Ven te chow en 1951, esto debido a que muchas funciones de distribuciones no son fácilmente invertibles, es difícil determinar para un X_t el periodo de retorno para esa magnitud y viceversa. Los valores de las intensidades para los diferentes periodos de retorno y duraciones se muestran en la siguiente tabla.

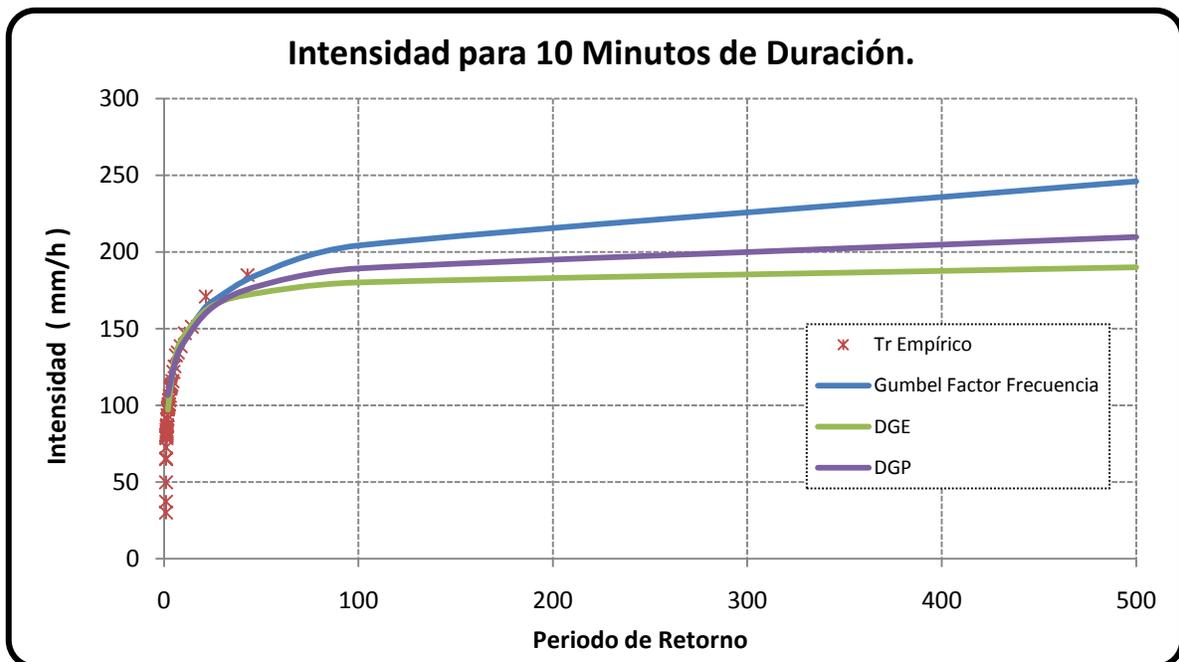
Tabla 4.28- Resumen de las intensidades para Gumbel Factor Frecuencia.

Gumbel Factor Frecuencia									
Tr (años)	INTEN 5 Min (mm/h)	INTEN 10 Min (mm/h)	INTEN 20 Min (mm/h)	INTEN 30 Min (mm/h)	INTEN 45 Min (mm/h)	INTEN 1 hora (mm/h)	INTEN 2 hora (mm/h)	INTEN 3 hora (mm/h)	INTEN 6 hora (mm/h)
2	124,30	99,99	58,33	50,21	42,29	35,49	21,06	14,48	7,43
5	150,27	123,89	73,59	64,85	55,43	46,39	27,44	18,93	9,71
10	171,43	143,36	86,01	76,78	66,13	55,27	32,63	22,56	11,56
20	191,73	162,03	97,93	88,21	76,39	63,78	37,62	26,04	13,34
25	198,17	167,95	101,72	91,84	79,65	66,48	39,20	27,15	13,90
50	218,00	186,20	113,36	103,02	89,68	74,80	44,07	30,55	15,64
100	237,69	204,31	124,93	114,12	99,64	83,06	48,90	33,92	17,36
500	283,18	246,16	151,64	139,76	122,65	102,15	60,07	41,73	21,34

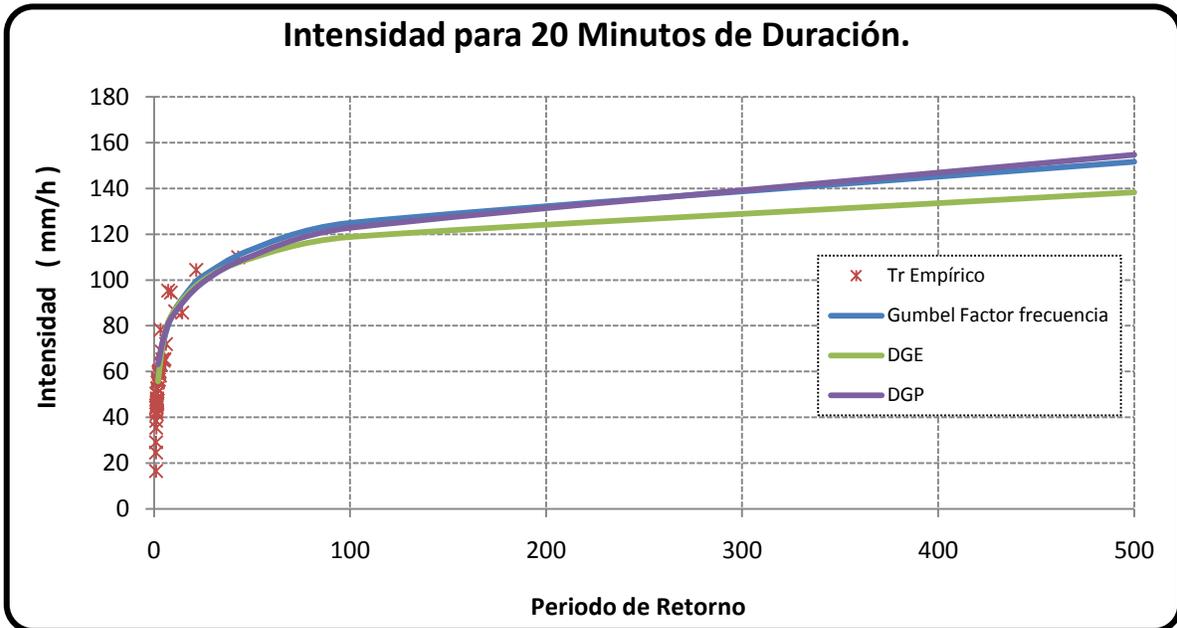
Con los resultados mostrados en las tablas 4.28, 4.25, 4.15 se elaboró el siguiente gráfico, donde se muestra los diferentes modelos, DGE, DGP y Gumbel factor frecuencia para las intensidades contra los datos de acuerdo al periodo empírico de los mismos. En el gráfico se aprecia como los datos (intensidades para una duración de 5 minutos) presentan una curvatura cerca del periodo de retorno de 50 años, decir cuál de los modelos es mejor que el otro es una conclusión que puede ser errónea por el tamaño de la muestra, pero si se puede observar como el valor del factor frecuencia de Gumbel está para la mayoría de las duraciones por encima de de la DGE y DGP, pero no en todo los casos, lo que sí es una constante es el valor de la DGP sobre la DGE en todos los casos, para ver el resto de las gráficas ir a la sección de anexos.



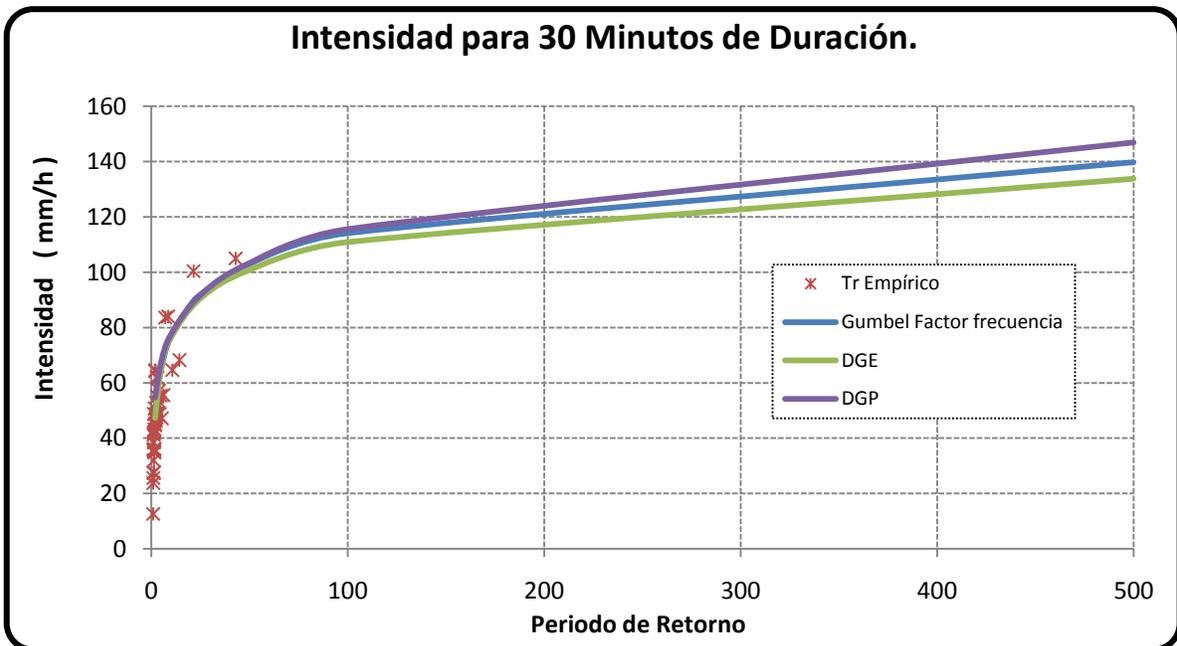
Gráfica 4.62 – Ajuste los modelos propuestos respecto a los datos para una duración de 5 minutos.



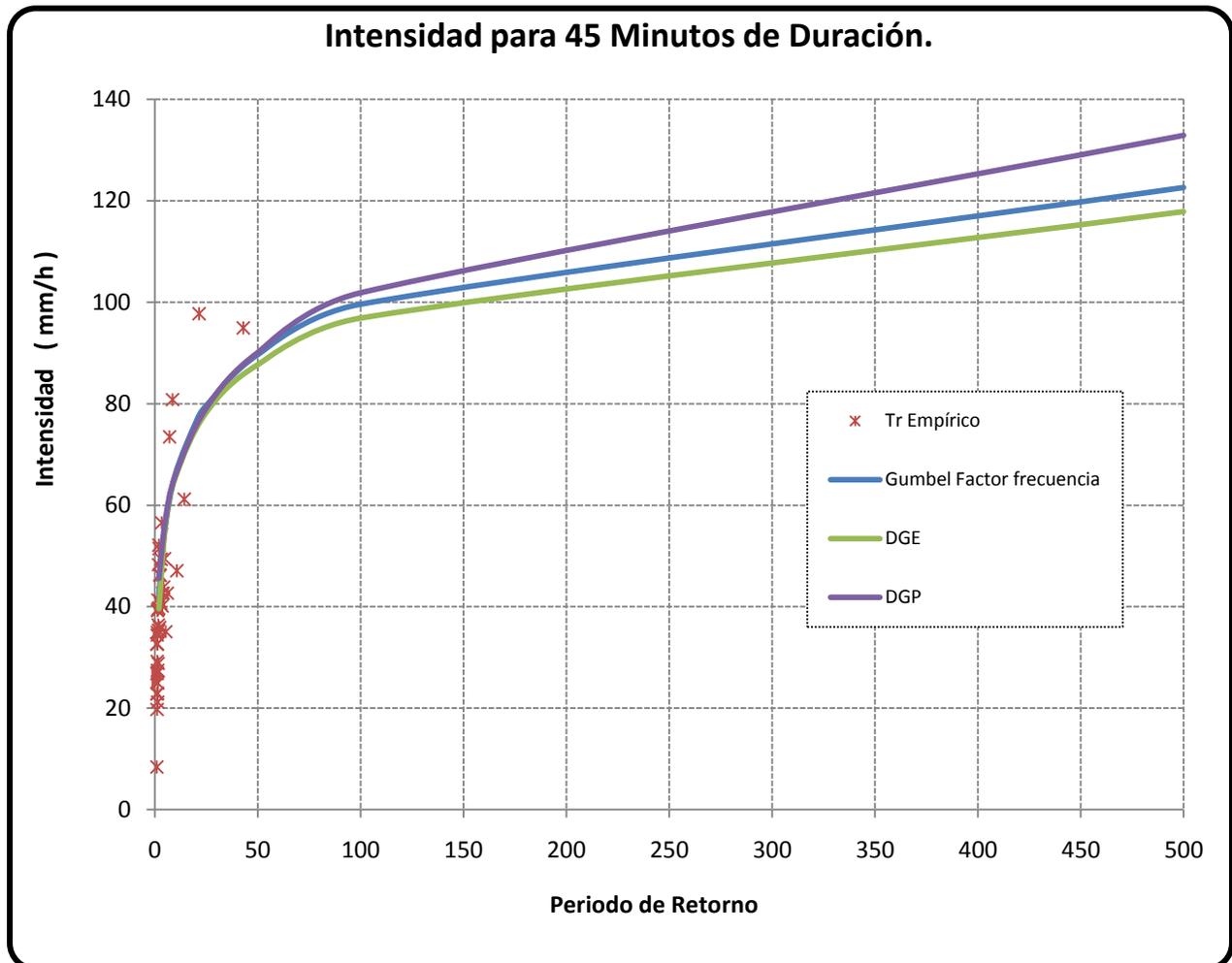
Gráfica 4.63 – Ajuste los modelos propuestos respecto a los datos para una duración de 10 minutos.



Gráfica 4.64 – Ajuste los modelos propuestos respecto a los datos para una duración de 20 minutos.



Gráfica 4.65 – Ajuste los modelos propuestos respecto a los datos para una duración de 30 minutos.



Gráfica 4.66 – Ajuste los modelos propuestos respecto a los datos para una duración de 45 minutos.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1.- Conclusiones.

La precipitación en el área de influencia de la estación meteorológica de la UCV de acuerdo a los resultados mostrados en el capítulo cuatro indican un aumento en el total anual, marcando una clara tendencia de incremento en especial en los últimos veinte años donde esto se refleja en un rango del 20% al 60% sobre la media, esto ha venido acompañado de igual forma en un aumento de la precipitación máxima diaria y de la magnitud de las intensidades para todas las duraciones.

Del análisis de la precipitación se indica la existencia de una temporada lluviosa, en los meses de Mayo a Noviembre, en la cual ocurre más del 80% de la precipitación anual y una temporada peculiarmente seca en los meses de Enero, Febrero y Marzo en que cae menos del 10% de la precipitación anual.

La mayoría de las precipitaciones inician entre las 12 del medio día y las siete de la noche, con una proporción del 47% respecto al total, Siendo las 5 de la tarde la hora con el mayor porcentaje de inicio de precipitación con casi 10% del total de las lluvias.

La mitad de las lluvias tienen una duración inferior a 75 minutos, y de ellas el 50% no superan los 40 minutos. Por otro lado, solamente un 6 % de los aguaceros tienen una duración mayor a 3 horas. Respecto a la cantidad de agua el 60 % de las lluvias tienen un valor inferior a los 10 mm, y de estas el 50 % no superan los 5 mm, solo el 8 % de las lluvias son iguales o superiores a 30 mm.

La distribución Generalizada de Pareto (GPD) arrojó resultados favorables en cuanto al ajuste de los datos, sin embargo al ajustar los mismos a la Distribución Generalizada de Extremos (GEV) estos resultados mejoraron, esto se debe que la distribución de probabilidades de excesos requiere de mucha inferencia por parte del usuario, quien decide cual es el valor del umbral, si se

Capítulo v: **Conclusiones y Recomendaciones.**

escoge un umbral muy bajo se pueden estar considerando observaciones no interesantes en el análisis y si se toman observaciones muy altas se deja por fuera observaciones relevantes. Los valores estimados a través de la GPD en todos los casos dieron valores superiores a los obtenidos por la GEV pero si se tuviesen más años de valores máximos anuales probablemente los estimadores de las distribuciones coincidieran y las diferencias serían mínimas, respecto al método de factor frecuencia de Gumbel utilizado ampliamente en el país, al aplicarlo se evidenció que este resulta superior que la GPD para las primeras duraciones, 5, 10, 20, 30 mientras que para mayores duraciones este resulta menor que la GPD, pero siempre superior a la GEV.

Las relación de las intensidades duración y frecuencia han mostrado un incremento del 20 al 30 % respecto a trabajos anteriores como el que realizó el Instituto de Nacional de obras sanitarias para la estación de estudio, con datos de 1948-67, este “aumento” es difícil asegurar porque no se dispone de un periodo largo de datos con los cuales se podrían hacer análisis climatológicos para verificar esto; los datos de este trabajo siguen siendo pocos, pero el incremento de las intensidades junto a la precipitación, que se observan claramente en esta investigación genera un aumento en los valores de diseños de las obras hidráulicas en los actuales momentos, para los que no se están preparados, sumado a esto la falta de mantenimiento, juntos son los dos grandes factores que pueden explicar el porqué estos sistemas se ven sobrepasados a menudo y constantemente.

5.2.- Recomendaciones.

Es importante probar la bondad de ajuste del modelo utilizado y asegurar que la incertidumbre que resulta de estimar los parámetros de la distribución sea mínima y evaluar esta a través del error estándar y los intervalos de confianza.

Por ser un único punto de medición es recomendable extender el análisis con otras estaciones de la zona, esto incluye la digitalización y Vectorización de las bandas y determinar cómo ha se distribuido la precipitación, al menos en los últimos veinte años y de esta forma verificar si las intensidades y la precipitación han aumentado para el resto de las estaciones de caracas como primer orden y evaluar la eficiencia de los drenajes, de ser esta afirmación positiva es necesario realizar un análisis regional de las intensidades duraciones y frecuencias para el resto del país.

La mayoría de las estaciones en el país no sobrepasan los 50 años de registro de bandas pluviométricas, es difícil trabajar con las distribuciones de probabilidades propuestas, ya que estas son tri paramétricas y pocos datos generan valores sesgados de los estimadores e introducen errores, sobre todo en el tercer parámetro, el coeficiente de asimetría, por lo que la recomendación de seguir utilizando el método de Gumbel para estimar las relaciones intensidad duración y frecuencias de las precipitaciones sigue vigente, por las comparaciones mostradas en el presente trabajo, pero con la observación que estén en las series se incluyan los años más recientes al menos los últimos 15 o 20 años si disponen; o calcular un factor entre estaciones con registros largo que pueda explicar en aquellas con registros cortos el aumento de los valores de las intensidades, de ser este aumento consistente para el resto de las estaciones de la zon

BIBLIOGRAFÍA

[1] COLES, Stuart. (2001) An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values (Springer series en statistic), U.K. 208 p.

[2] QUINTANA, Ramón: Análisis de intensidades de precipitación, Trabajo especial de grado presentado en la Universidad Central de Venezuela, Caracas, 1975.

[3] EURICIDE, Vicuña: Regionalización de intensidades máximas en la zona de desarrollo integral Guanare-Masparro, Trabajo especial de grado presentado en la Universidad Central de Venezuela, Caracas, 1986.

[4] REYES, Félix: Probabilidad de secuencia de días secos y lluviosos para cinco localidades de Venezuela, Trabajo especial de grado presentado en la Universidad Central de Venezuela, Caracas, 1975.

[5] LÓPEZ, Javier: Ecuaciones de Intensidad-Duraciones para las estaciones Pluviométricas del estado Anzoátegui, Nueva Esparta, Monagas y Sucre, Trabajo de grado para ascender a profesor asistente, Caracas, 1995.

[6] **MeteSwiss (2007): Records world wide. Grösste Regenmengen.**

Disponible:http://www.meteosuisse.admin.ch/web/en/research/good_to_know/records/worldwide.html [Consulta, 2010 Marzo 8].

[7] Goldbrunner, Antonio: Las Causas Meteorológicas de las precipitaciones de extraordinaria magnitud en Venezuela. Fuerza Aérea Venezolana. Publicación especial Nro. 02. Caracas, 1963 – Venezuela.

Capítulo v: **Conclusiones y Recomendaciones.**

[8] Velásquez, Ramón: Algunos mecanismos físicos responsables de la distribución anual de la precipitación en Venezuela. Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea Venezolana, Venezuela 2002.

[9] Beguería, Santiago: Revisión de métodos paramétricos para la estimación de la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos en Climatología e Hidrología: El uso de series de excedencias y su comparación con las series de máximos anuales. VII Reunión Nacional de Climatología Albarracín, Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC). Zaragoza, España 2002.

[10] William H. Asquith. Depth-Duration Frequency of Precipitation for Texas U.S. GEOLOGICAL SURVEY, Water-Resources Investigations Report 98-4044, Austin, Texas 1998.

[11] Christian. PRAT. Análisis de las características de la precipitación en san Miguel (Texecoco, Mexico). Memorias del III Simposio Internacional sobre Suelos volcánicos endurecidos (Quito, diciembre de 1996) 559-370 p.

[12] Vásquez, Ramón. Curvas IDF. Barcelona Fabra. Revistas de obras publicas, España, febrero de 1987 pág. 102 al 91.

[13] M.G. Albert y W. Francis, Guidelines on Analysis in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. World Meteorological Organization, Junio de 2009.

Anexos.

ANEXOS

Graficas y Tablas.

Anexos.

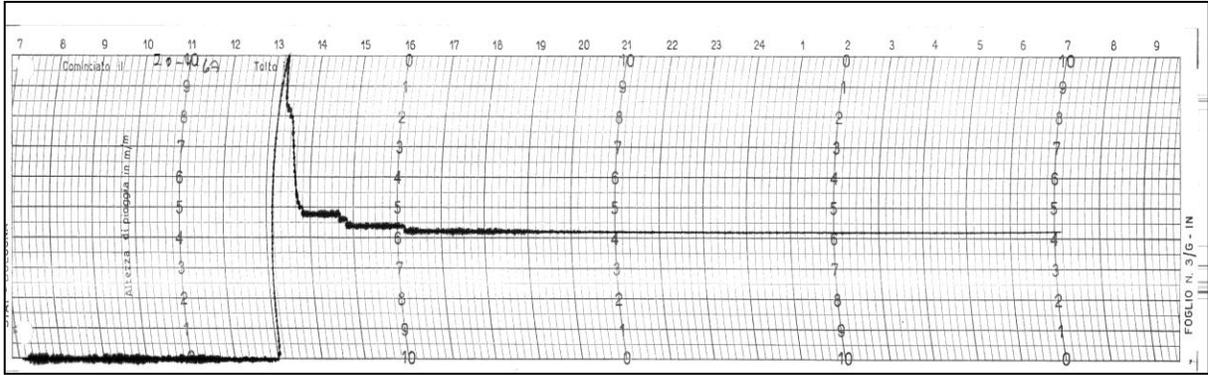


Figura A.1.- Bandas diarias.

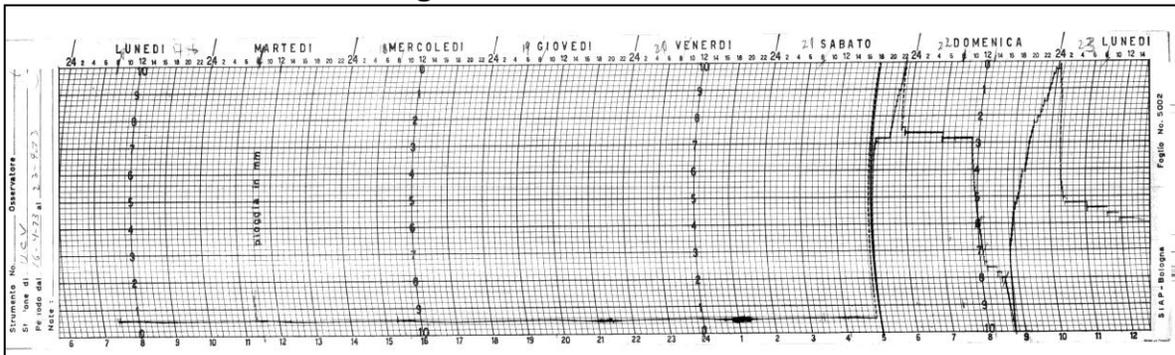


Figura A.2.- Bandas semanales.

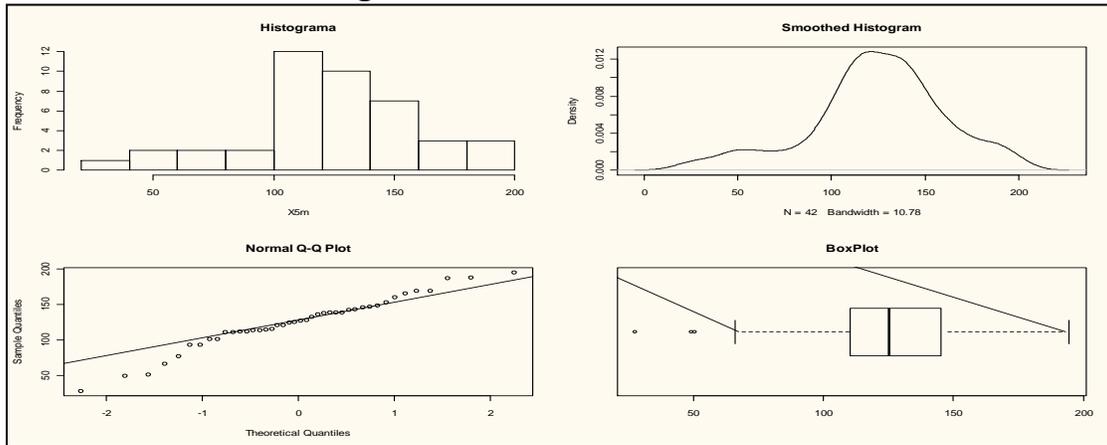


Figura A.3.- Análisis exploratorio de los datos series de máximos (Intensidad para 5 minutos).

Anexos.

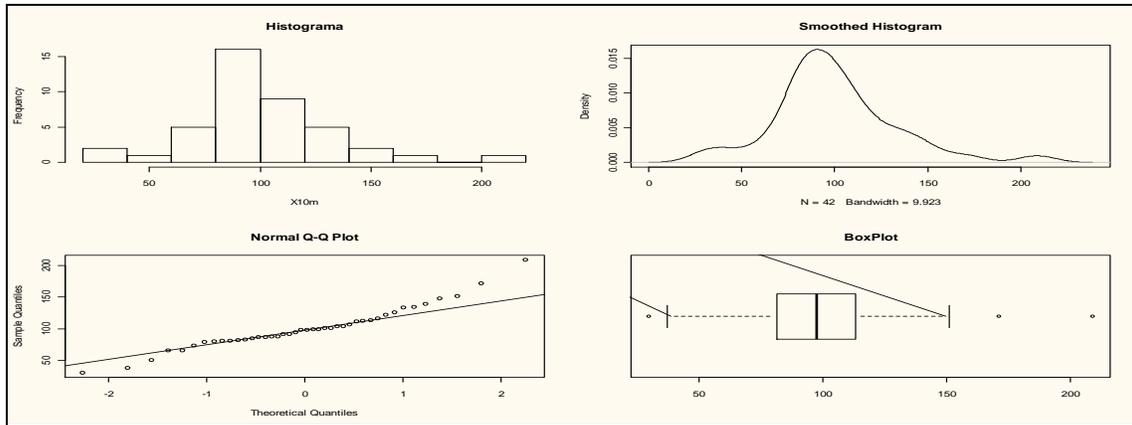


Figura A.4.- Análisis exploratorio de los datos series de máximos (Intensidad para 10 minutos).

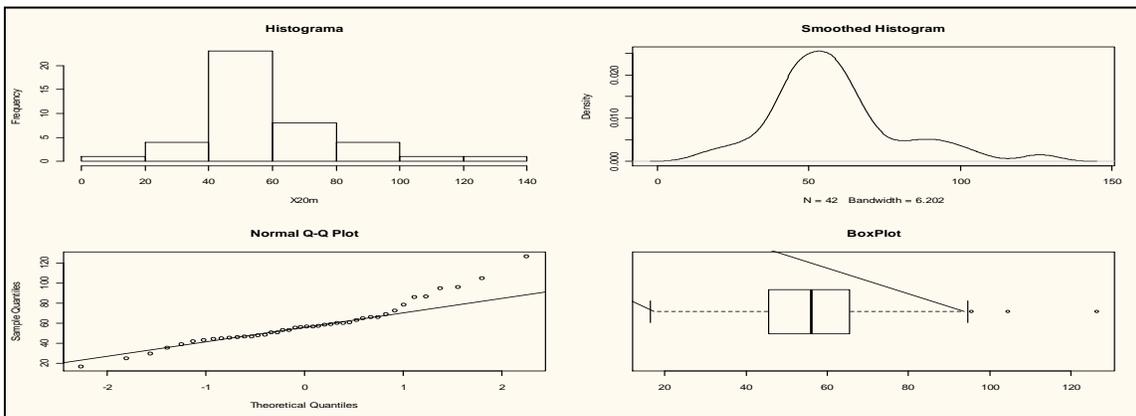


Figura A.5.- Análisis exploratorio de los datos series de máximos (Intensidad para 20 minutos).

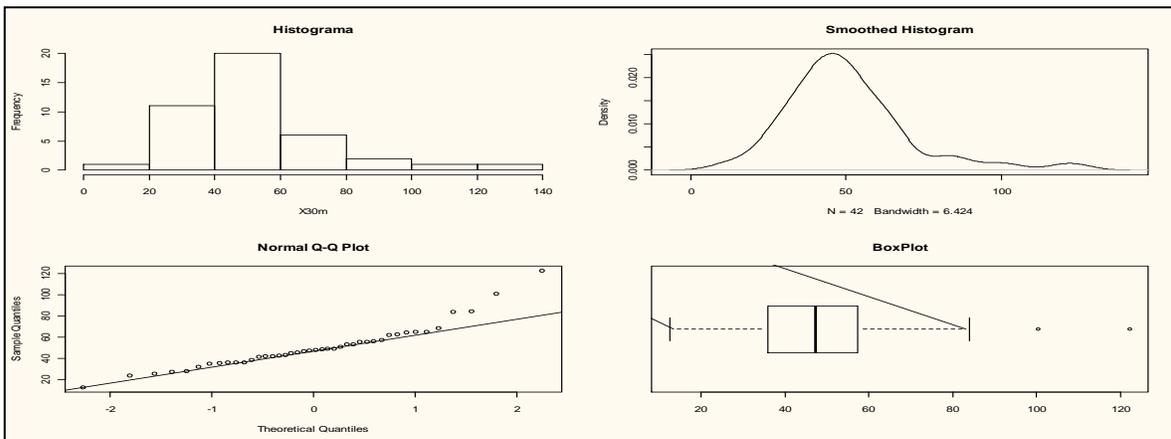


Figura A.6.- Análisis exploratorio de los datos series de máximos (Intensidad para 30 minutos).

Anexos.

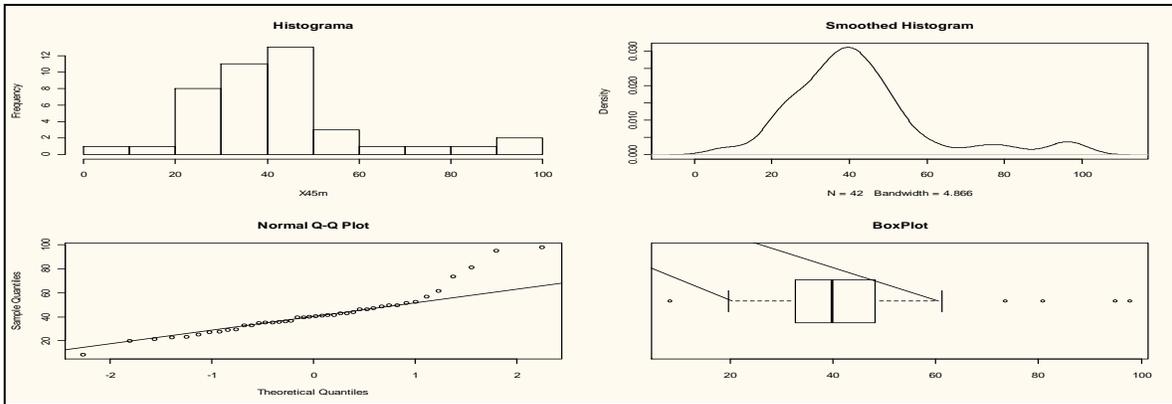


Figura A.7.- Análisis exploratorio de los datos series de máximos (Intensidad para 45 minutos).

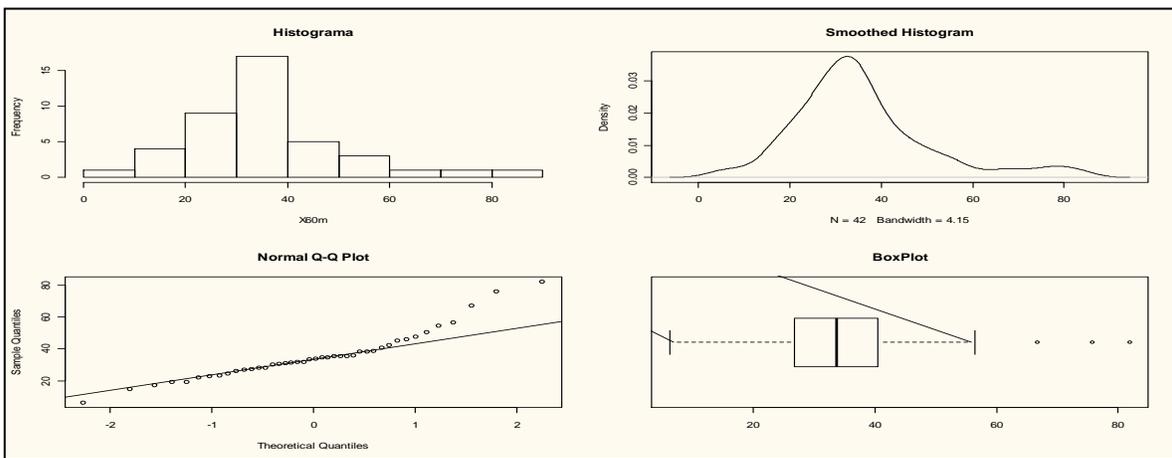


Figura A.8.- Análisis exploratorio de los datos series de máximos (Intensidad para 60 minutos).

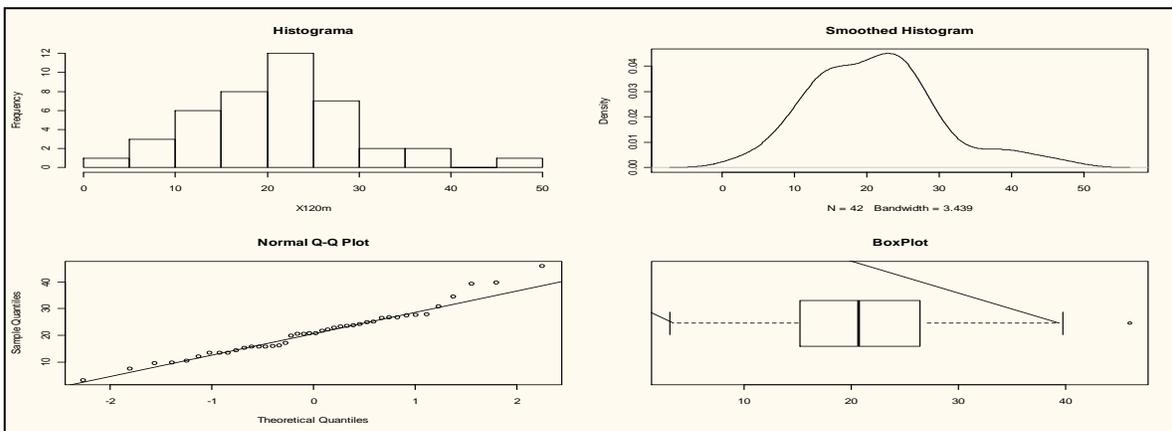


Figura A.9.- Análisis exploratorio de los datos series de máximos (Intensidad para 2 horas).

Anexos.

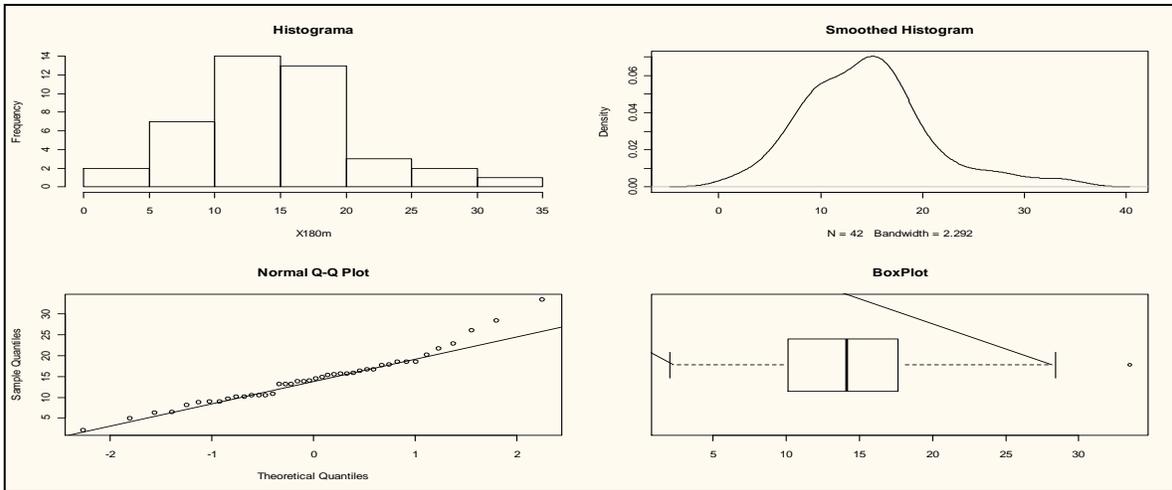


Figura A.10.- Análisis exploratorio de los datos series de máximos (Intensidad para 3 horas).

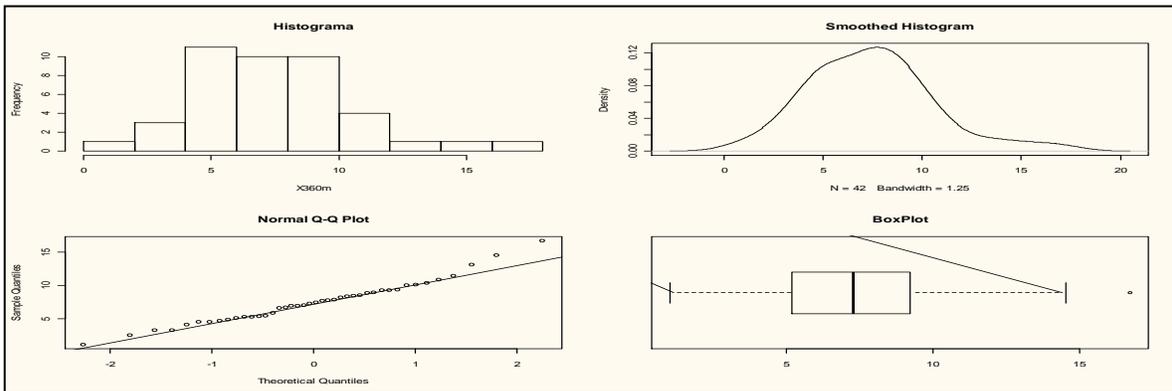


Figura A.11.- Análisis exploratorio de los datos series de máximos (Intensidad para 6 horas).

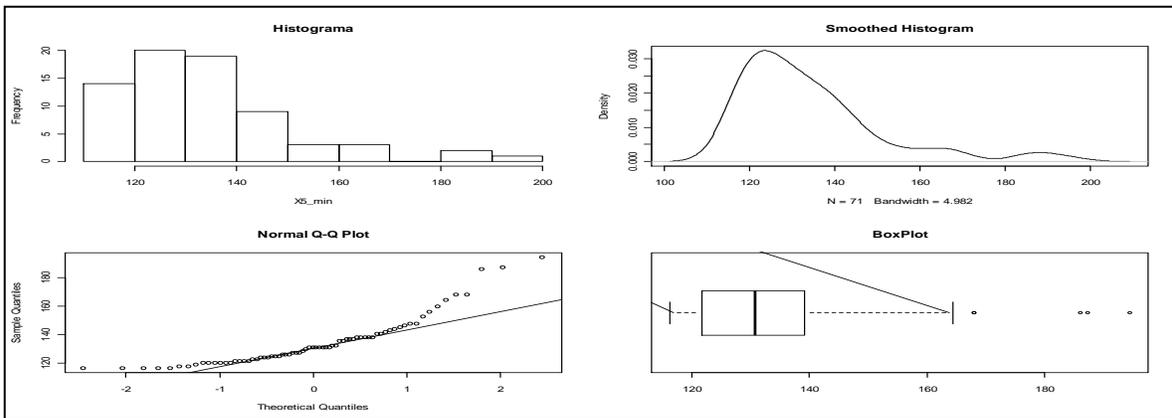


Figura A.12.- Análisis exploratorio de los datos serie de excedencias (Intensidad para 5 minutos).

Anexos.

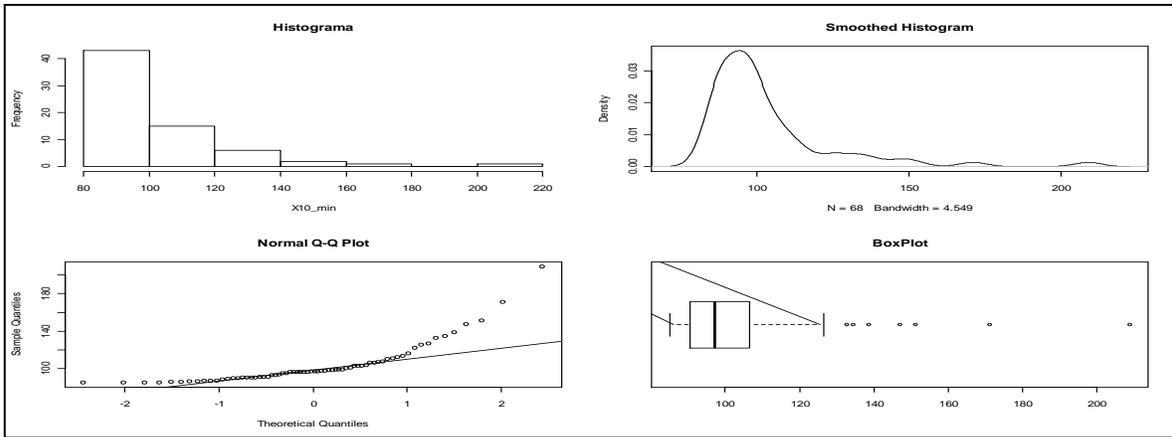


Figura A.13.- Análisis exploratorio de los datos serie de excedencias (Intensidad para 10 minutos).

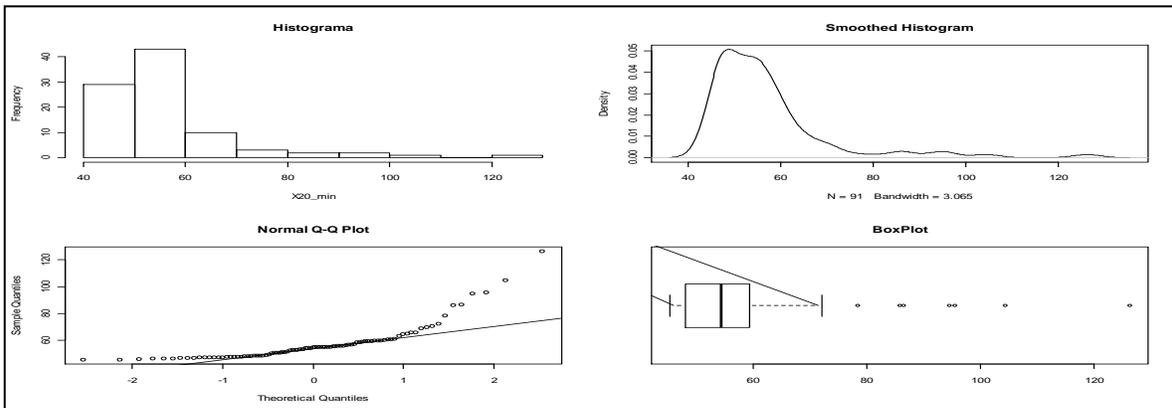


Figura A.14.- Análisis exploratorio de los datos serie de excedencias (Intensidad para 20 minutos).

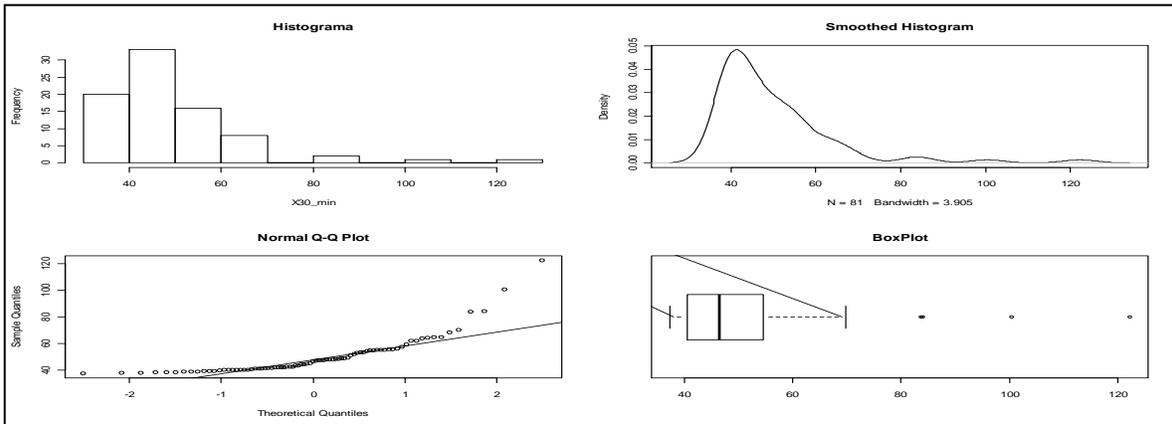


Figura A.15.- Análisis exploratorio de los datos serie de excedencias (Intensidad para 30 minutos).

Anexos.

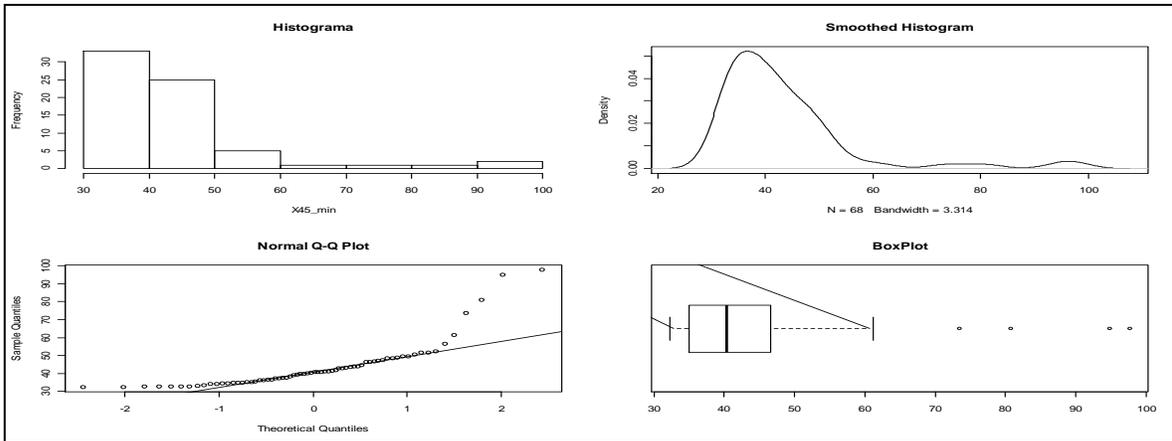


Figura A.16.- Análisis exploratorio de los datos serie de excedencias (Intensidad para 45 minutos).

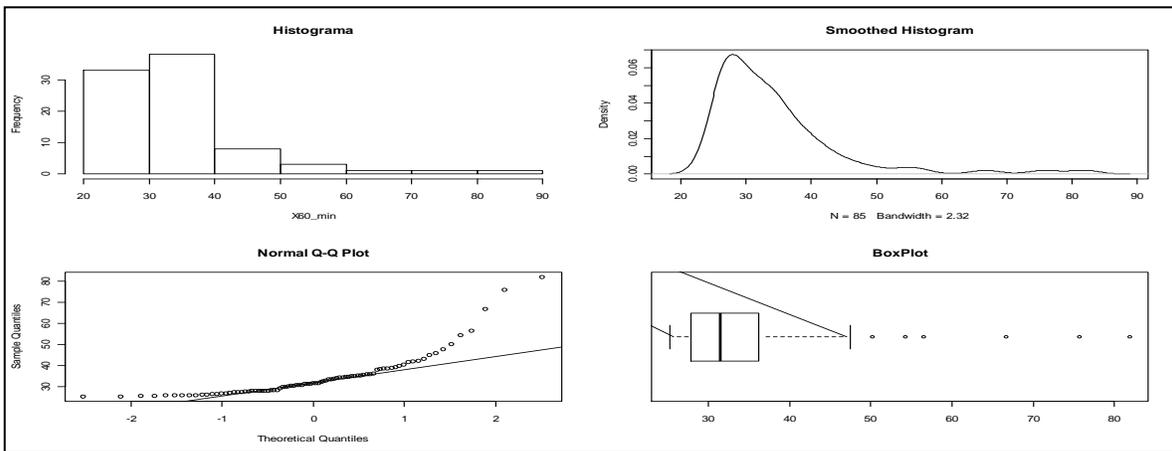


Figura A.17.- Análisis exploratorio de los datos serie de excedencias (Intensidad para 1 hora).

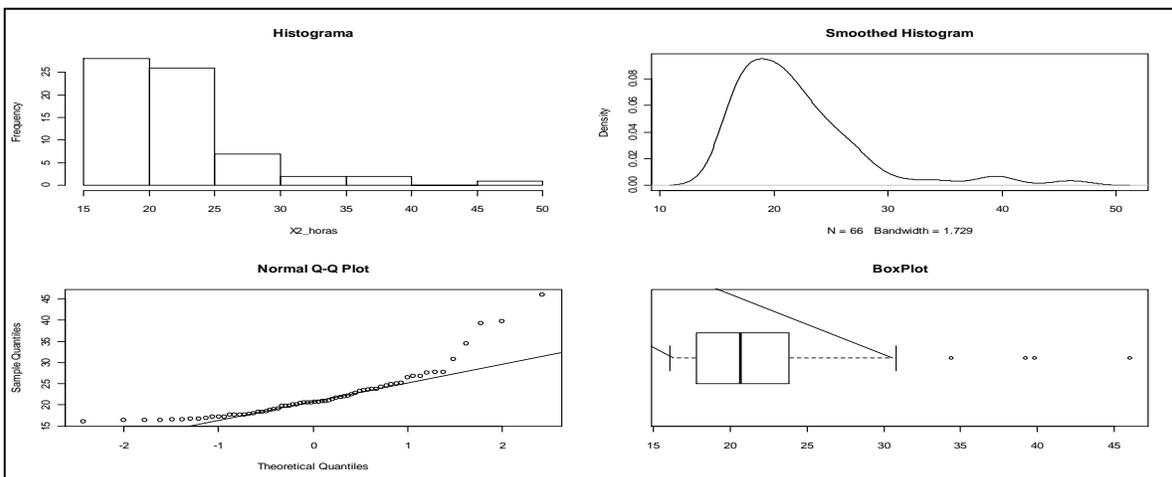


Figura A.18.- Análisis exploratorio de los datos serie de excedencias (Intensidad para 2 horas).

Anexos.

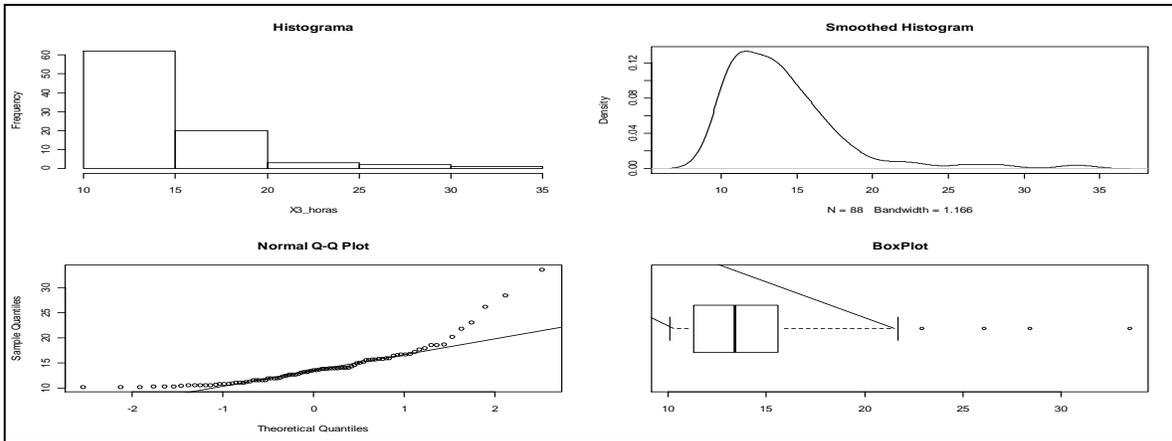


Figura A.19.- Análisis exploratorio de los datos serie de excedencias (Intensidad para 3 horas).

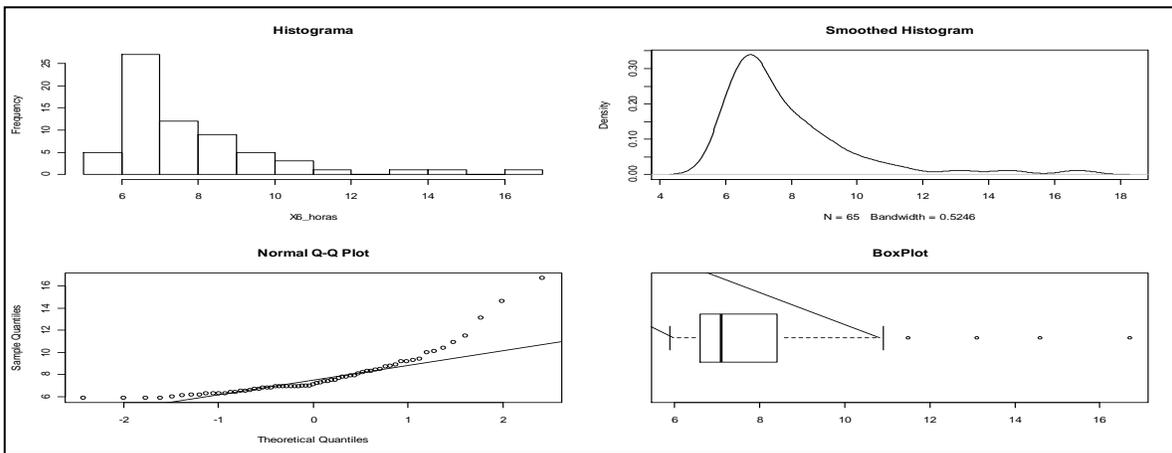
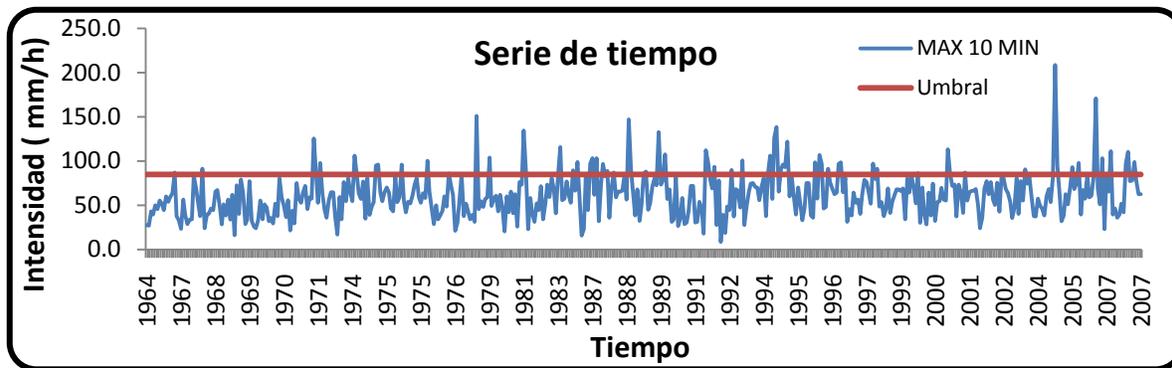
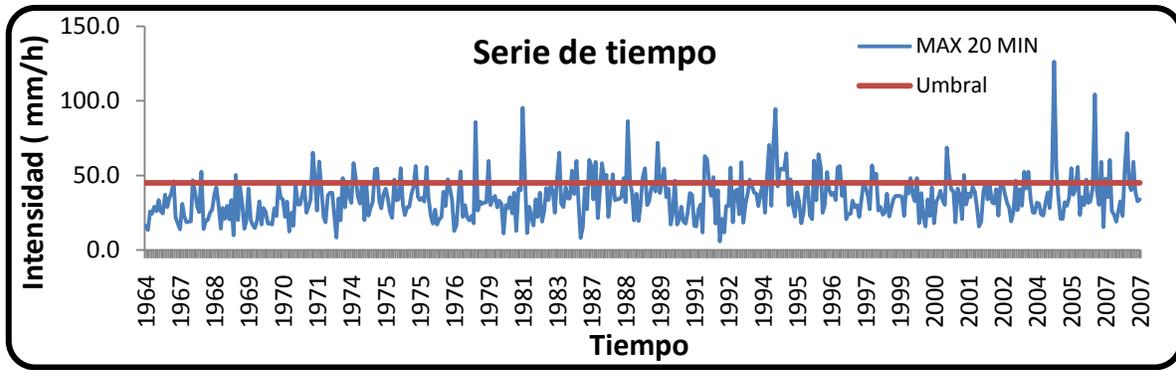


Figura A.20.- Análisis exploratorio de los datos serie de excedencias (Intensidad para 6 horas).

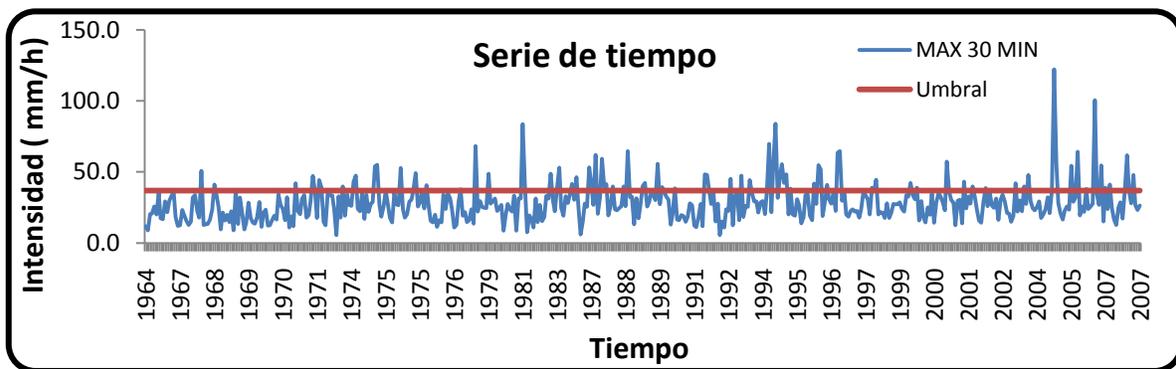


Grafica A.1.- Intensidades para 10 minutos (series de excedencias).

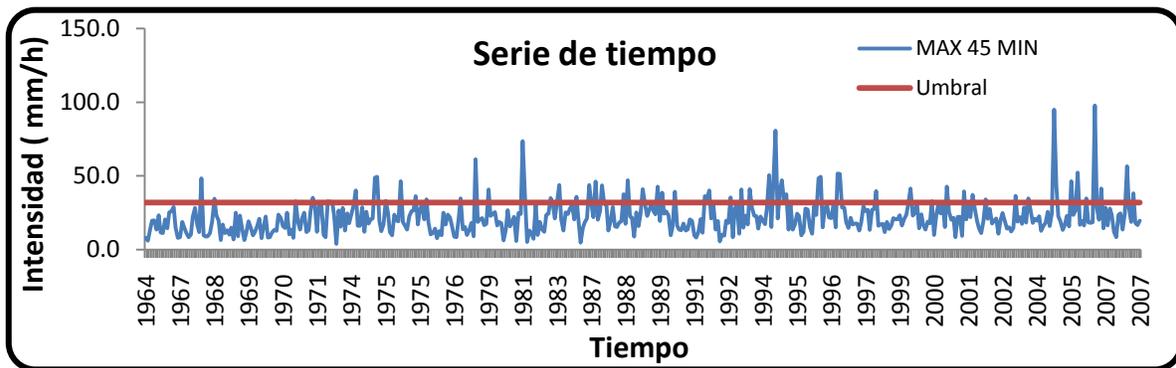
Anexos.



Grafica A.2.- Intensidades para 20 minutos (series de excedencias).

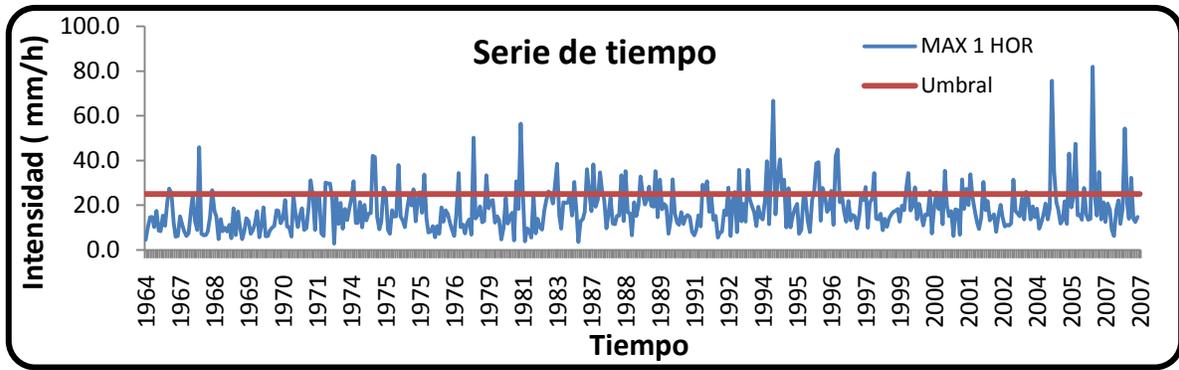


Grafica A.3.- Intensidades para 30 minutos (series de excedencias).

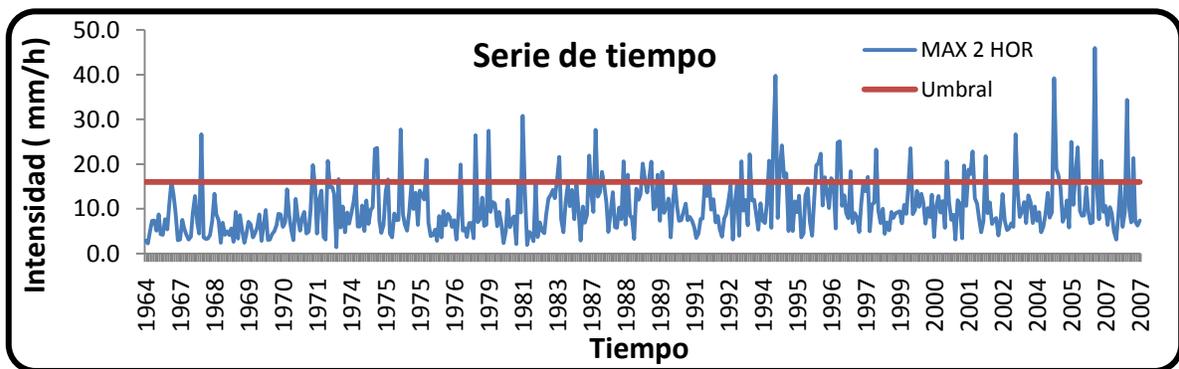


Grafica A.4.- Intensidades para 45 minutos (series de excedencias).

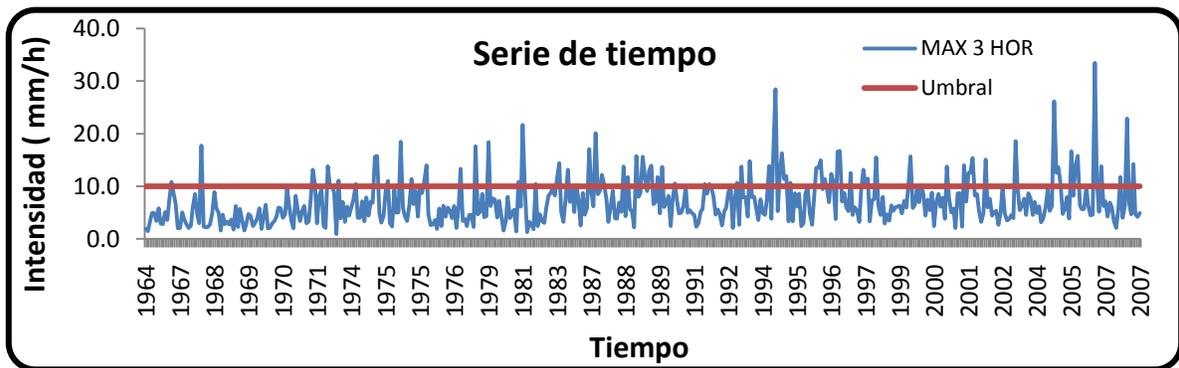
Anexos.



Grafica A.5.- Intensidades para 1 hora (series de excedencias).

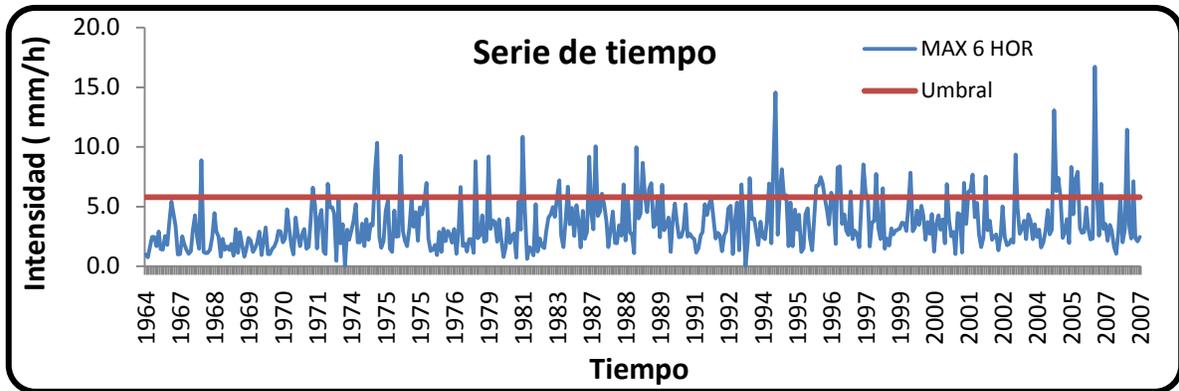


Grafica A.6.- Intensidades para 2 horas (series de excedencias).

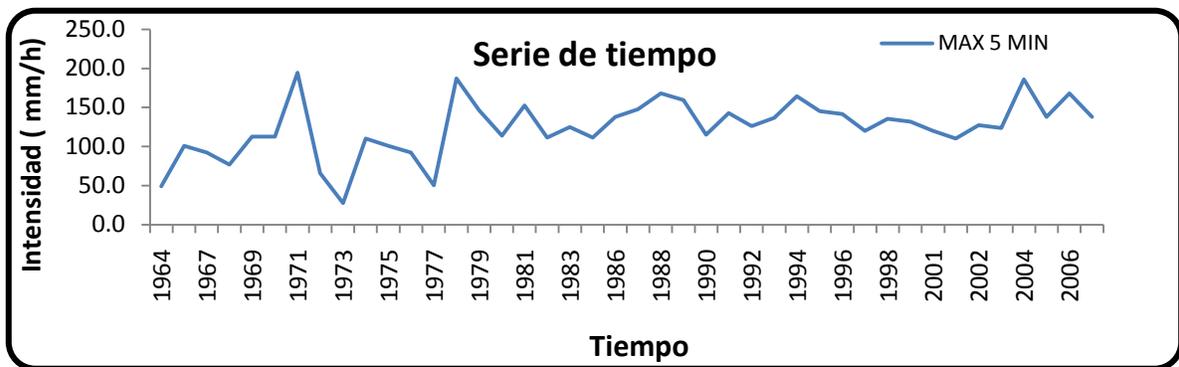


Grafica A.7.- Intensidades para 3 horas (series de excedencias).

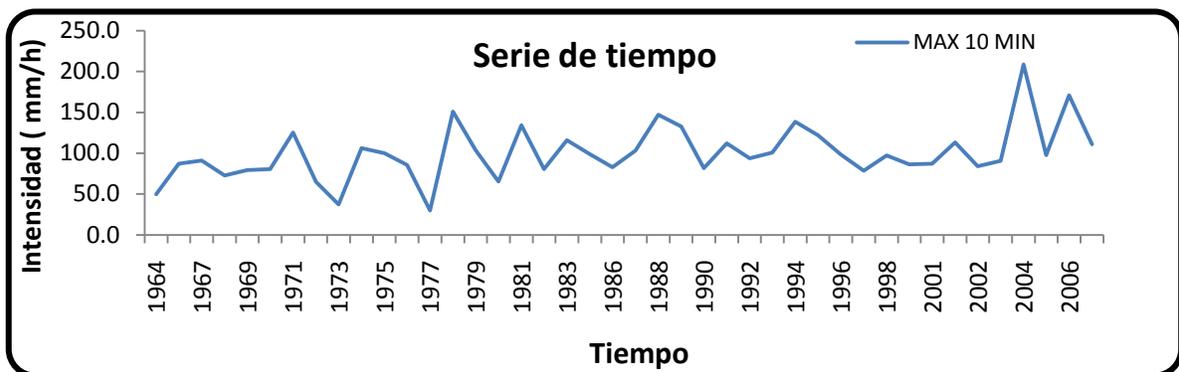
Anexos.



Grafica A.8.- Intensidades para 6 horas (series de excedencias).

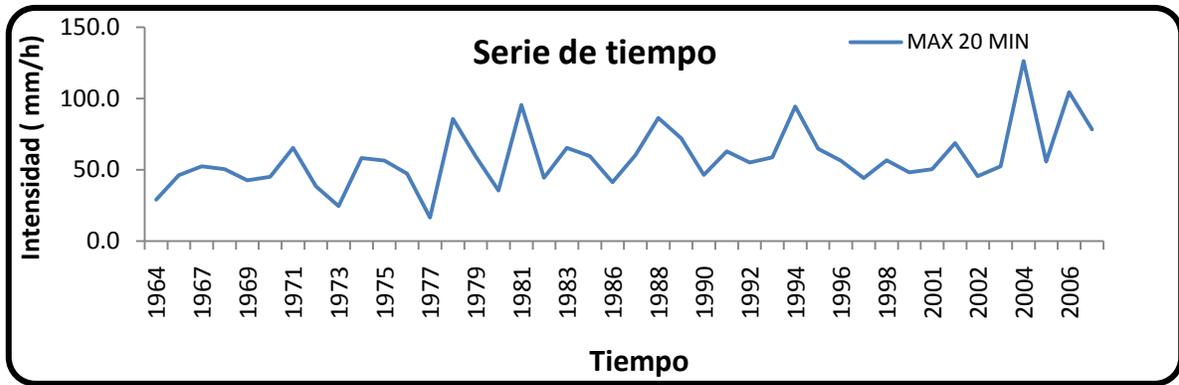


Grafica A.9.- Intensidades máximas para 5 minutos.

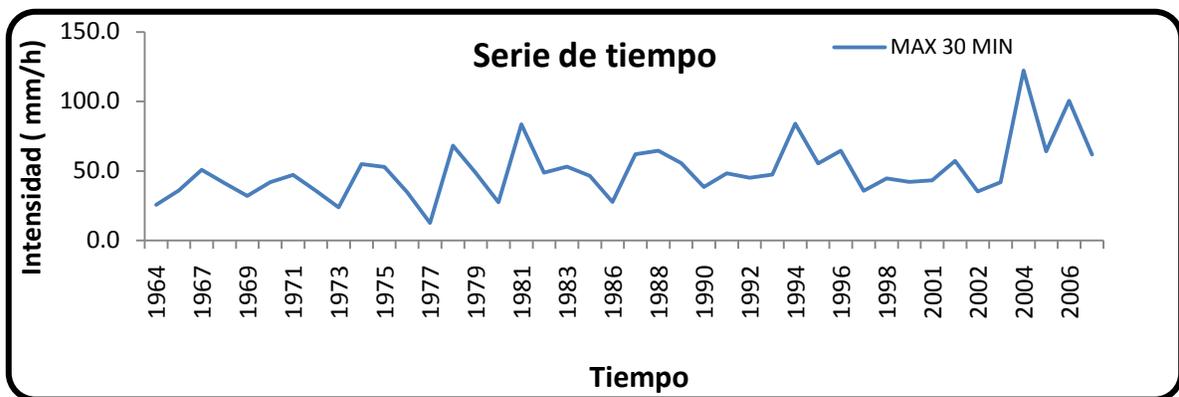


Grafica A.10.- Intensidades máximas para 10 minutos.

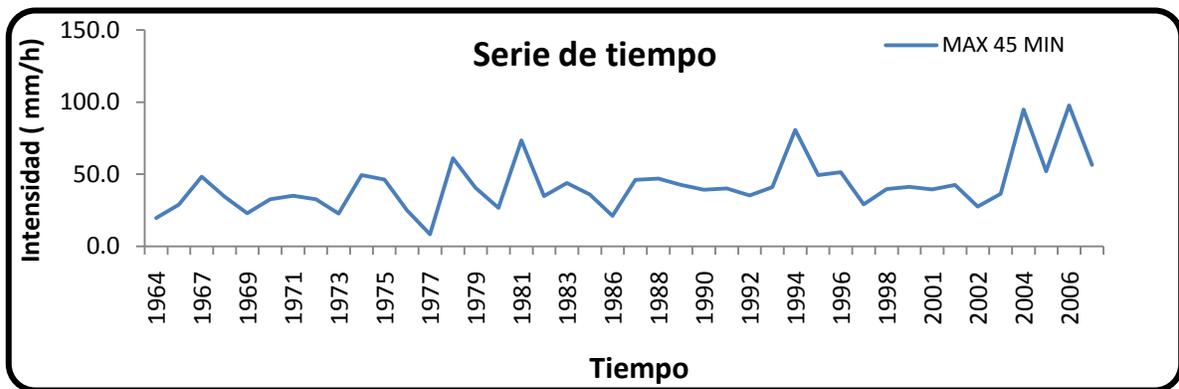
Anexos.



Grafica A.11.- Intensidades máximas para 20 minutos.

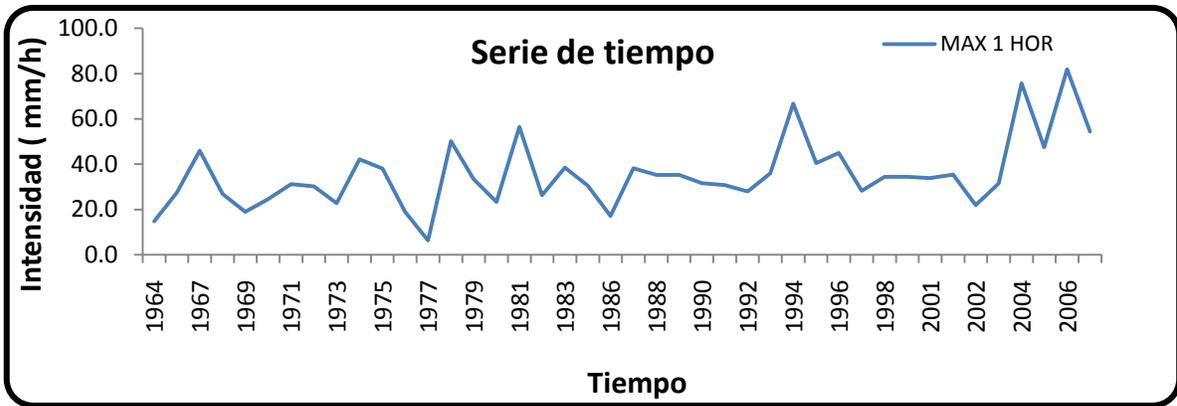


Grafica A.12.- Intensidades máximas para 30 minutos.

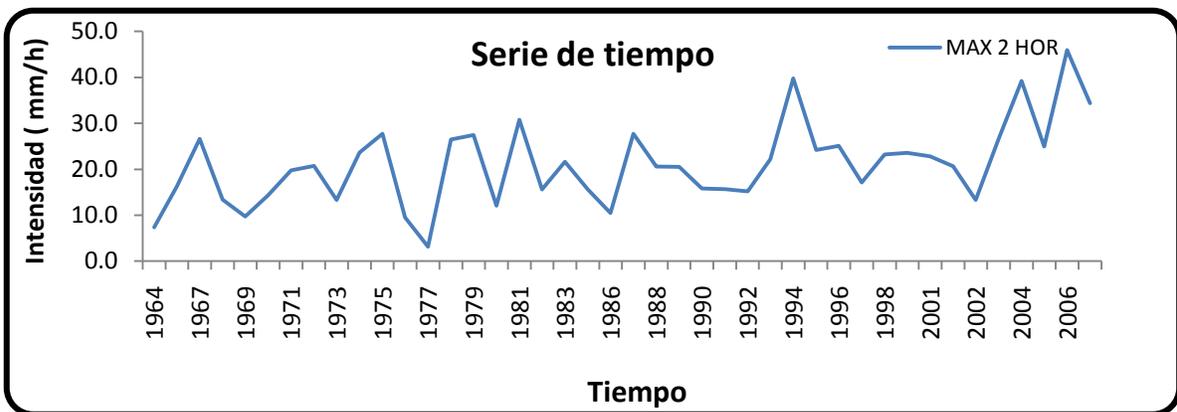


Grafica A.13.- Intensidades máximas para 45 minutos.

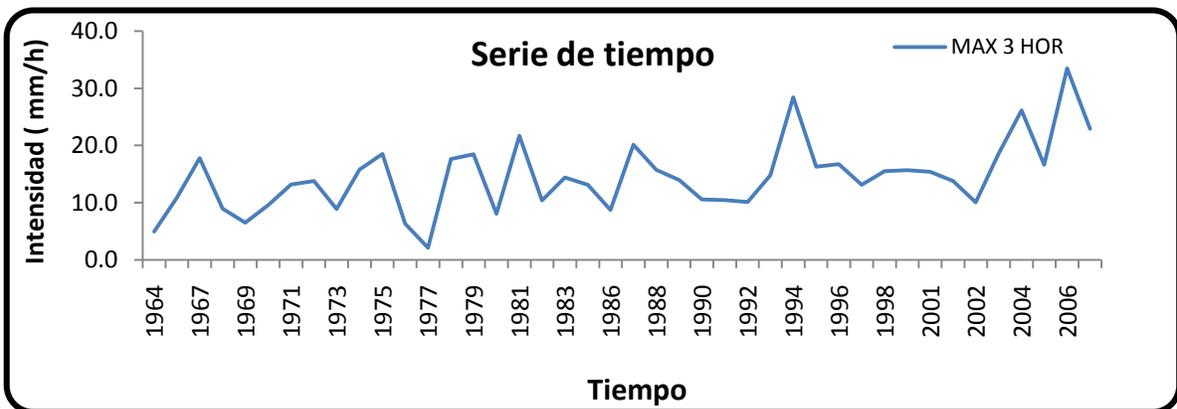
Anexos.



Grafica A.14.- Intensidades máximas para 1 Hora.

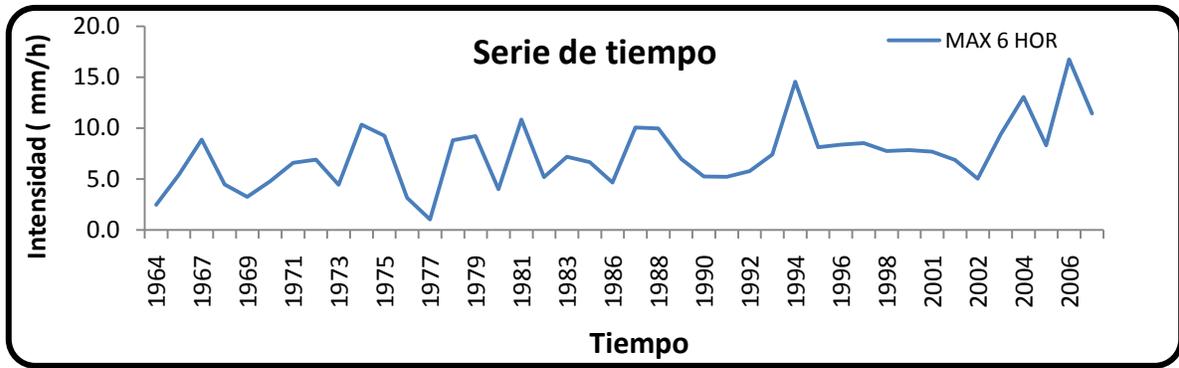


Grafica A.15.- Intensidades máximas para 2 Horas.

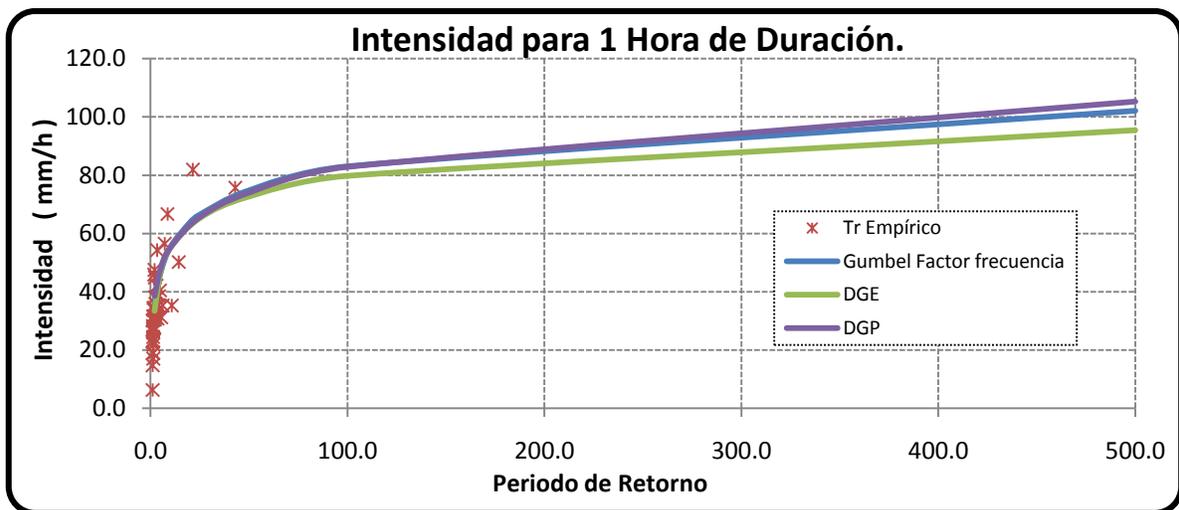


Grafica A.16.- Intensidades máximas para 3 Horas.

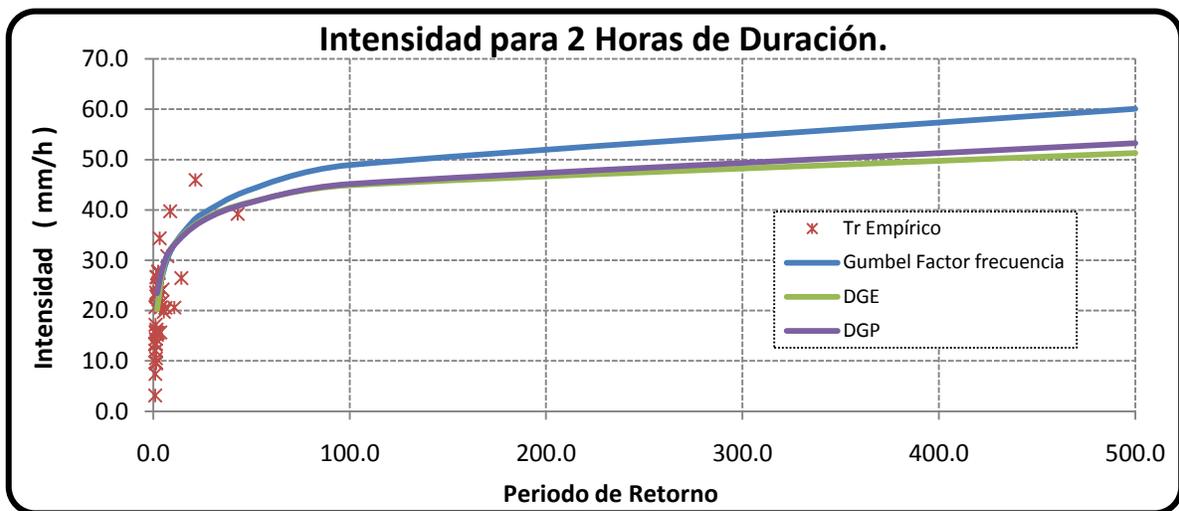
Anexos.



Grafica A.17.- Intensidades máximas para 6 Horas.

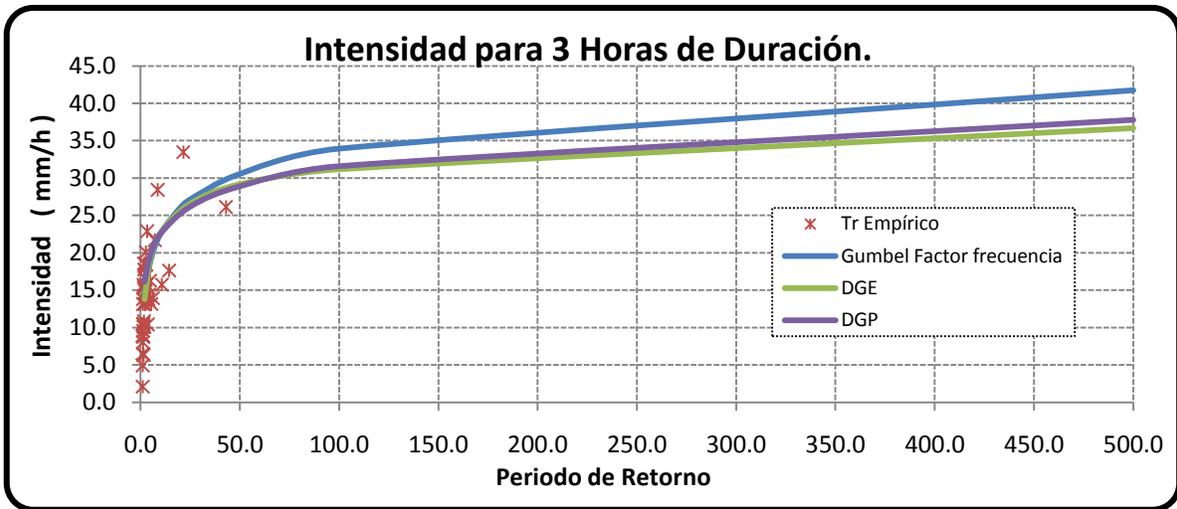


Grafica A.18.- Ajuste los modelos propuestos respectos a los datos para una duración de 1 hora.

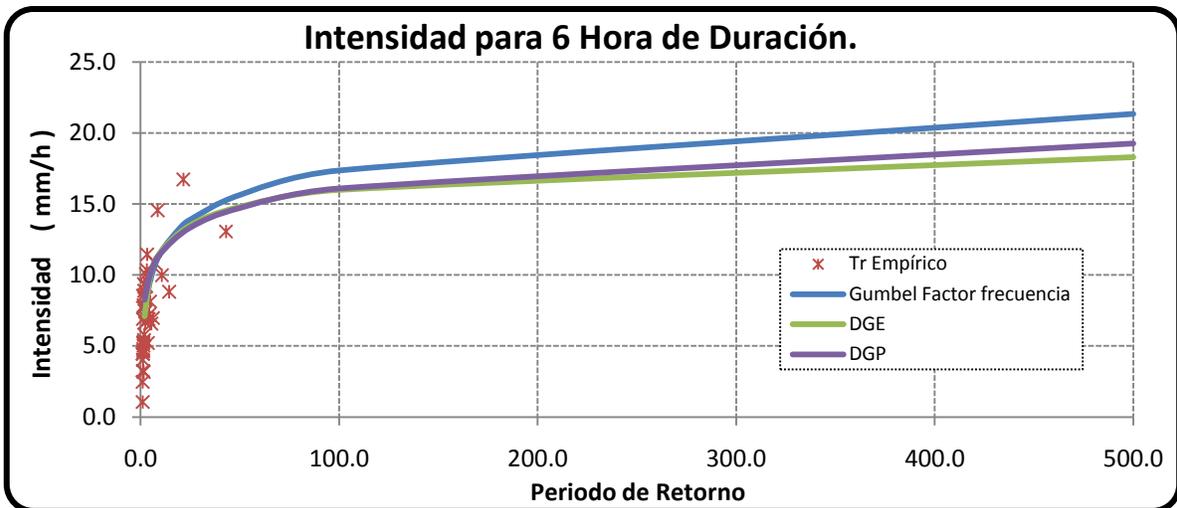


Grafica A.19.- Ajuste los modelos propuestos respectos a los datos para una duración de 2 hora.

Anexos.



Grafica A.20.- Ajuste los modelos propuestos respecto a los datos para una duración de 3 hora.



Grafica A.21.- Ajuste los modelos propuestos respecto a los datos para una duración de 6 hora.

Anexos.

Tabla A.1.- Estadística descriptiva Intensidades serie total.

<i>Estadísticos descriptivos</i>	<i>15min</i>	<i>110 min</i>	<i>120 min</i>	<i>130 min</i>	<i>145 min</i>	<i>11 hora</i>	<i>12 horas</i>	<i>13horas</i>	<i>16 horas</i>
Media	72,68	61,30	34,95	28,26	22,20	18,19	10,28	7,04	3,56
Mediana	64,80	58,80	33,30	26,60	20,13	15,90	8,90	6,00	3,00
Moda	64,80	65,40	33,90	22,60	13,47	15,10	9,00	6,00	3,00
Desviación estándar	35,95	24,71	14,62	13,30	11,69	10,04	6,15	4,30	2,23
Varianza de la muestra	1292,52	610,70	213,71	176,92	136,60	100,72	37,86	18,49	4,96
Curtosis	-0,19	3,44	4,96	7,81	8,28	6,86	4,60	4,98	4,46
Coefficiente de asimetría	0,63	1,12	1,45	1,91	2,07	1,91	1,69	1,71	1,66
Rango	188,40	200,40	120,60	116,60	94,00	79,10	44,55	32,53	16,73
Mínimo	6,00	8,40	5,70	5,60	3,73	2,80	1,40	0,93	0,00
Máximo	194,40	208,80	126,30	122,20	97,73	81,90	45,95	33,47	16,73
Percentil 90	124,80	91,20	54,00	42,80	36,21	30,76	18,28	13,13	6,66
Percentil 75	98,40	75,00	41,70	34,00	26,80	22,50	13,00	8,80	4,55

Tabla A.2.- Estadística descriptiva Intensidades máximas.

<i>Estadísticos descriptivos</i>	<i>15min</i>	<i>110 min</i>	<i>120 min</i>	<i>130 min</i>	<i>145 min</i>	<i>11 hora</i>	<i>12 horas</i>	<i>13horas</i>	<i>16 horas</i>
Media	126,09	101,18	59,02	50,79	42,82	35,98	21,39	14,71	7,55
Mediana	126,00	97,80	56,40	47,40	40,13	33,90	20,70	14,40	7,40
Moda	138,00	87,00	52,50	42,00	32,67	19,00	26,65	13,13	
Desviación estándar	34,58	32,71	20,99	20,26	18,16	15,00	8,72	6,09	3,11
Varianza de la muestra	1196,09	1069,97	440,51	410,33	329,94	225,01	76,02	37,09	9,65
Curtosis	1,00	2,38	1,99	3,38	2,60	2,16	0,85	1,58	1,16
Coefficiente de asimetría	-0,50	0,86	1,06	1,40	1,37	1,20	0,65	0,85	0,70
Rango	166,80	178,80	109,80	109,60	89,33	75,60	42,80	31,37	15,68
Mínimo	27,60	30,00	16,50	12,60	8,40	6,30	3,15	2,10	1,05
Máximo	194,40	208,80	126,30	122,20	97,73	81,90	45,95	33,47	16,73
Percentil 90	167,64	138,18	86,34	67,84	60,73	53,89	30,50	21,54	10,80
Percentil 75	144,60	113,10	65,25	56,80	47,97	40,00	26,11	17,41	9,13

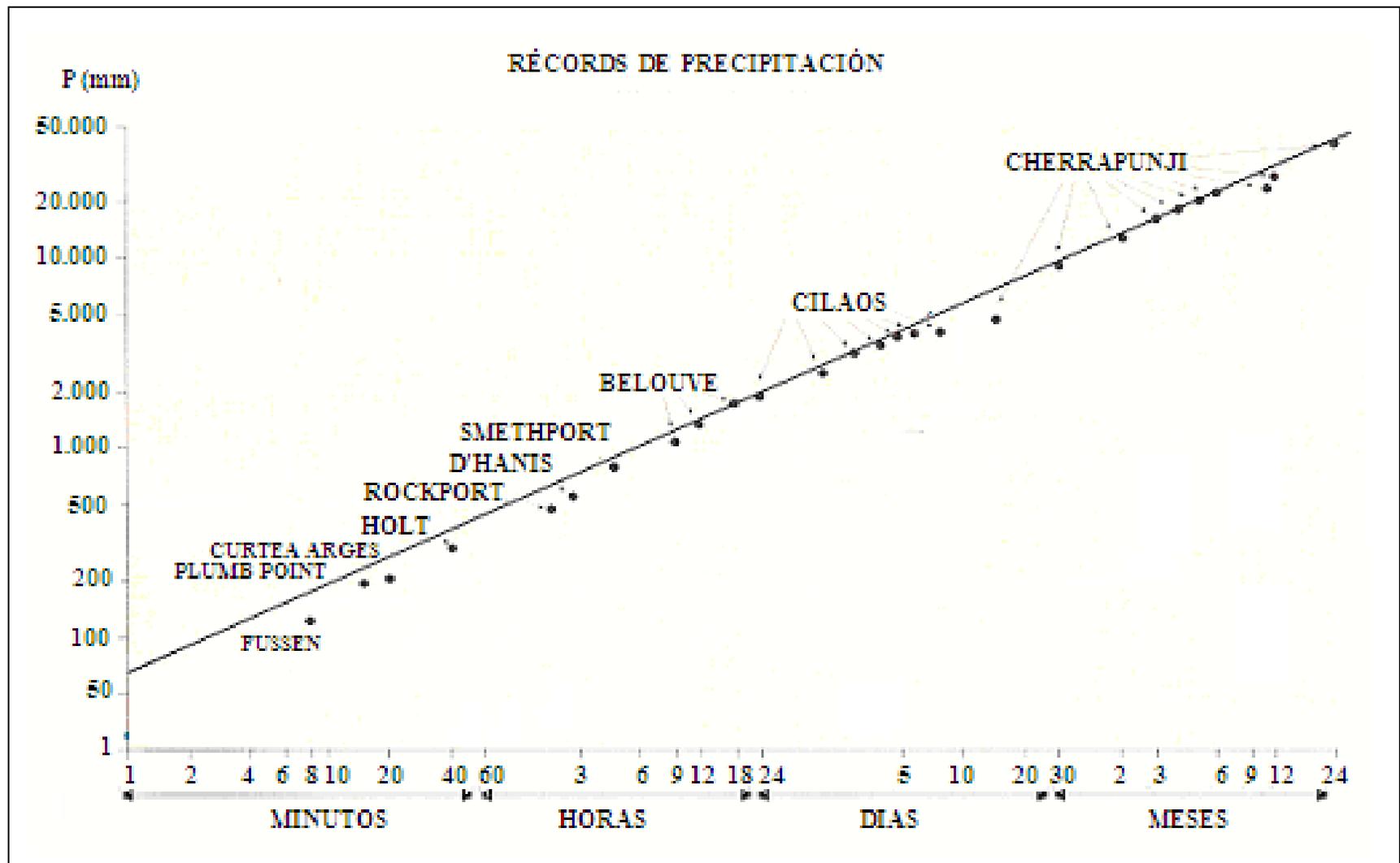


Figura A.21.- Records Globales de precipitación.