



ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN DOS Y MÁS DÍAS CONSECUTIVOS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CAUCA.

Maria Teresa Solarte
Ronald Andrés González
Universidad del Valle



2015

ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN DOS Y MÁS DÍAS
CONSECUTIVOS EN LACUENCA ALTA DEL RÍO CAUCA.

ELABORADO POR:

MARIA TERESA SOLARTE PAZ Código: 1210098
RONALD ANDRÉS GONZÁLEZ FRANCO Código: 1210099

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniería Agrícola

DIRECTOR:

YESID CARVAJAL ESCOBAR, PhD.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
INGENIERÍA AGRÍCOLA
SANTIAGO DE CALI
2015

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del evaluador 1

Firma del evaluador 2

Dedicatoria

Quiero darle las gracias a Dios, a mi mamá, hermana y a Julián por su apoyo, confianza, amor, consejos y en especial por enseñarme hacer perseverante, constante y a luchar por lo que quiero. A Ronald mi compañero de tesis por su amistad y confianza.

María Teresa Solarte Paz

Dedicatoria

A Dios, por ser guía durante mi carrera y la culminación de mi trabajo de grado, por darme la fuerza y capacidad para superar las pruebas y dificultades que se me presentaron en este camino.

A mi madre Luz Marina y abuela Rosalba, por su apoyo incondicional en todo momento, por su amor, comprensión y consejos, por la motivación contaste para hacer las cosas como una persona de bien.

A mis amigos Olga Cecilia, Cirilo de Pauw, Ernesto Jaramillo, por ser mis maestros y guías de vida.

A mi compañera, amiga y hermana María Teresa Solarte, por su amistad incondicional durante toda la carrera, por su vital compromiso para la culminación de nuestro trabajo de grado.

Ronald Andrés González Franco

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias por su apoyo y amor incondicional.

A la Universidad del Valle y a todos los profesores, por sus aportes en nuestra formación como profesionales.

Al profesor Yesid Carvajal por sus aportes, acompañamiento y por la ayuda en la proyección de todos los aspectos desarrollados en esta investigación.

Al Ingeniero Alexander Gaviria por su tiempo, dedicación, asesoría y apoyo durante todo el trabajo.

A Sergio Aponte y Cristhian Córdoba por su fundamental aporte y asesoría en la elaboración de los mapas.

Al grupo de investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos - IREHISA, de la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR), por su apoyo técnico y personal.

A nuestros compañeros y amigos de carrera con los que compartimos tantas experiencias y a todos los que directa o indirectamente aportaron en este trabajo.

LISTA DE SIGLAS

ACD	Análisis confirmatorio de datos.
AED	Análisis Exploratorio de Datos.
AF	Análisis de Frecuencia.
CC	Cambio Climático.
CV	Coeficiente de Variación.
CVC	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca.
ENOS	El Niño Oscilación del Sur.
EEA	Error estándar de ajuste.
FDP	Funciones de Distribución de Probabilidad.
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia.
IPCC	Panel Intergubernamental del Cambio Climático
IREHISA	Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos.
MEI	Índice Multivariado del ENOS
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration.
NOA	Oscilación del Atlántico Norte.
ONI	Índice Oceánico del Niño.
OMM	Organización Meteorológica Mundial.
PBA	Pruebas de Bondad de Ajuste.
SOI	Índice de Oscilación del Sur.
Tr	Períodos de retorno.
Tc	Tiempo de concentración.
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación y Diversificación, la Ciencia y la Cultura.
VMT	Valor Máximo Teórico.
VC	Variabilidad climática.
VM	Variables Macroclimáticas.
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical.

RESUMEN

Conocer el comportamiento de las precipitaciones máximas es de suma importancia, ya que en las últimas décadas en Colombia se han presentado fenómenos meteorológicos extremos con consecuencias económicas, sociales y ambientales. En esta investigación se realizó el análisis y la comparación de la frecuencia de eventos máximos de precipitación en dos y más días consecutivos en las estaciones pluviométricas ubicadas en la cuenca alta del río Cauca, utilizando las funciones de distribución de probabilidad Gumbel, LogNormal y LogPearson tipo III con diferentes períodos de retorno.

Se realizó una descripción de las series de precipitación máximas anuales en las temporalidades estudiadas, donde se observó que las magnitudes con mayores valores de precipitación máxima se dieron en general en el sur de la cuenca, específicamente en la estación Peña Mona y las Brisas y las de menor magnitud en la zona central y al noroccidente de la cuenca.

Por otra parte se hizo un estudio del comportamiento de las series de precipitaciones máximas donde se dividieron en tres fases, que corresponden a las dos fases extremas de El ENOS y a la fase normal o No ENOS. Se pudo observar que para los primeros días consecutivos, las precipitaciones máximas de mayor magnitud tendían a presentarse en la mayoría de las estaciones durante la época cálida del ENOS, El Niño, mientras que para los días consecutivos de 15 y 30 días, se presentaban en la mayoría de las estaciones en la época fría de El ENOS, La Niña.

El análisis de frecuencia se realizó con las funciones de distribución de probabilidad tradicional en las series de precipitación máximas anuales para 48 y 72 horas, 5, 7, 15 y 30 días. Para determinar la función de mejor ajuste se empleó la prueba del error estándar de ajuste. La función tradicional LogPearson tipo III representó mejor los datos de las precipitaciones máximas para las temporalidades estudiadas, aunque gráficamente no fue muy precisa, por lo que se recomienda explorar otras funciones de distribución.

Por último se hizo una espacialización de las precipitaciones estimadas para tiempos de retorno de 5, 20 y 50 años. Se observó que en los Farallones de Cali se presenta un foco de precipitaciones máximas de alta magnitud para la mayoría de los tiempos de retorno y las temporalidades de estudio.

Palabras claves: Cuenca alta del río Cauca, Análisis de frecuencia, Precipitaciones Máximas, Fenómeno El ENOS.

PRESENTACIÓN DEL TRABAJO

El trabajo está organizado en cinco partes principales:

1. En el capítulo 1 y 2 se presenta una introducción y una justificación donde se indica brevemente la importancia del estudio. Después en el capítulo 3 se definen los objetivos y los alcances de la investigación, y por último se presentan los principales antecedentes.
2. En el capítulo 5 se presenta un marco teórico que se relaciona con la información relevante para el desarrollo de esta investigación, donde se describen los métodos utilizados para realizar el análisis de frecuencia, funciones de distribución, las variables necesarias para su implementación y la definición de la metodología usada; además se presentan algunas definiciones de los temas que inciden en la variabilidad climática, cambio climático y fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS).
3. En el capítulo 6 se hace una breve descripción de la zona de estudio y se presenta la metodología usada para cumplir con los objetivos planteados. La metodología se dividió en la selección de la red hidrometeorológica, organización de las series de precipitaciones máximas, descripción de las mismas para dos y más días consecutivos, análisis de frecuencia, prueba de bondad de ajuste y espacialización de las precipitaciones máximas para la función de distribución de mejor ajuste en los períodos de retorno estudiados.
4. El capítulo 7 corresponde a la presentación, el análisis y la discusión de los resultados obtenidos, siguiendo el orden descrito en la metodología.
5. El capítulo 8 del documento se conforma por las conclusiones generales y algunas recomendaciones, en el 9 las futuras líneas de investigación, por último las referencias bibliográficas y los apéndices del trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	14
2. JUSTIFICACIÓN.....	16
3. OBJETIVOS.....	18
3.1 General	18
3.2 Específicos.....	18
4. ANTECEDENTES	19
5. MARCO TEÓRICO	23
5.1 Marco Contextual.....	23
5.1.1 Cambio climático (CC) y Variabilidad climática (VC)	23
5.1.2 El Niño Oscilación del Sur (ENOS)	23
5.1.3 Inundaciones y Avenidas	26
5.2 Marco Conceptual.....	27
5.2.1 Estadística Hidrológica.....	27
5.2.2 Probabilidad de un Evento	27
5.2.3 Probabilidad total	28
5.2.4 Complementariedad	28
5.2.5 Probabilidad Condicional.....	28
5.2.6 Series de Información Hidrológica.....	28
5.2.7 Funciones de Frecuencia y de Probabilidad	30
5.2.8 Parámetros Estadísticos	31
5.2.9 Funciones de Distribución de Probabilidad Para Variables Hidrológicas	32
5.2.10 Período de Retorno	33
5.2.11 Probabilidad Empírica por Posición o Probabilidad de Weibull	34
5.2.12 Análisis de Frecuencia	34
5.2.13 Análisis de Frecuencia Utilizando Factores de Frecuencia	35
5.2.14 Prueba de Bondad de Ajuste.....	38
5.2.15 Coeficiente de Correlación Graficada (C.C.G).....	38
5.2.16 Prueba del Error Estándar de Ajuste (E.E.A.).....	38
5.2.17 Método de Interpolación Spline.....	39
6. METODOLOGÍA.....	41
6.1 Árbol Metodológico.....	41
6.2 Zona de estudio	42
6.2.1 Selección de la zona de estudio.....	42
6.2.2 Descripción general de la zona de estudio	42
6.3 Selección de la Red Meteorológica.....	44
6.4 Organización de las series de precipitaciones máximas	46

6.5	Descripción de las series de precipitaciones máximas	48
6.5.1	Estudio de las series de precipitaciones máximas por número de días consecutivos.....	48
6.5.2	Estudio de las precipitaciones máximas anuales en el ENOS	49
6.6	Análisis de Frecuencia.....	50
6.7	Prueba de bondad de Ajuste.....	50
6.8	Espacialización	50
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
7.1	Análisis de las Precipitaciones Máximas	52
7.2	Estudio de las precipitaciones máximas anuales en El ENOS.....	63
7.3	Análisis de frecuencia	66
7.3.1	Análisis de frecuencia para precipitaciones máximas en 48 horas	66
7.3.2	Análisis de frecuencia para precipitaciones máximas en 72 horas	68
7.3.3	Análisis de frecuencia para precipitaciones máximas en 5 días	69
7.3.4	Análisis de frecuencia para precipitaciones máximas en 7 días	71
7.3.5	Análisis de frecuencia para precipitaciones máximas en 15 días	73
7.3.6	Análisis de frecuencia para precipitaciones máximas en 30 días	75
7.4	Prueba de ajuste	77
7.5	Distribución espacial de las precipitaciones máximas asociadas a períodos de retorno para cada número de días consecutivos en la cuenca alta del río Cauca.	78
7.5.1	Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 48 horas.	79
	Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 72 horas.	81
7.5.2	Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 5 días.....	83
7.5.3	Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 7 días.....	86
7.5.4	Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 15 días.....	88
7.5.5	Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 30 días.....	90
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	93
9.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	95
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96
	APÉNDICES.....	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación de las condiciones en el océano Pacífico tropical a nivel superficial y en profundidad sobre la región de desarrollo de El ENOS en su fase normal y cuando está activo El Niño.	24
Figura 2. Representación de las condiciones en el océano Pacífico tropical a nivel superficial y en profundidad sobre la región de El ENOS en su fase fría.	25
Figura 3. Información Original N=20 años.....	29
Figura 4. Excedencias Anuales.	29
Figura 5. Máximos Anuales.	30
Figura 6. Funciones de frecuencia de la muestra y funciones de probabilidad de la población.....	31
Figura 7. Árbol metodológico.	41
Figura 8. Ubicación de la cuenca hidrográfica del río Cauca en su valle alto.....	43
Figura 9. Distribución espacial de la red meteorológica.	47
Figura 10. Precipitaciones diarias del evento en 48 y 72 horas.....	52
Figura 11. Precipitaciones diarias del evento en 5 y 7 días.....	53
Figura 12. Precipitaciones diarias del evento en 15 días.....	53
Figura 13. Precipitaciones diarias del evento en 30 días.....	54
Figura 14. Valores de precipitación máxima en 48 h para las estaciones estudiadas.	55
Figura 15. Valores de precipitación máxima en 72 h para las estaciones estudiadas.	55
Figura 16. Distribución espacial de las precipitaciones máximas históricas para 48 y 72 horas.....	56
Figura 17. Valores de precipitación máxima en 5 d para las estaciones estudiadas.	58
Figura 18. Valores de precipitación máxima en 7 d para las estaciones estudiadas.	58
Figura 19. Distribución espacial de las precipitaciones máximas históricas para 5 y 7 días.	59
Figura 20. Valores de precipitación máxima en 15 d para las estaciones estudiadas.	61
Figura 21. Valores de precipitación máxima en 30 d para las estaciones estudiadas.....	61
Figura 22. Distribución espacial de las precipitaciones máximas históricas para 15 y 30 días.	62
Figura 23. Precipitaciones máximas históricas en las fases extremas del ENOS y el No ENOS para dos o más días consecutivos.	64
Figura 24. Período de retorno de Gumbel, LogNormal y LogPearson tipo III de precipitaciones máximas en 48 h.	66
Figura 25. Período de retorno de Gumbel, LogNormal y LogPearson tipo III de precipitaciones máximas en 72 h.	68
Figura 26. Período de retorno de Gumbel, LogNormal y LogPearson tipo III de precipitaciones máximas en 5 d.	70

Figura 27. Período de retorno de Gumbel, LogNormal y LogPearson tipo III de precipitaciones máximas en 7 d.	72
Figura 28. Período de retorno de Gumbel, LogNormal y LogPearson tipo III de precipitaciones máximas en 15 d.	73
Figura 29. Período de retorno de Gumbel, LogNormal y LogPearson tipo III de precipitaciones máximas en 30 d.	75
Figura 30. Funciones de mejor ajuste para 55 estaciones con series de precipitaciones máximas para 48 y 72 horas, 5, 7, 15 y 30 días.	77
Figura 31. Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 48 horas para períodos de retorno de 5, 20 y 50 años, mediante el uso de la función de distribución de mejor ajuste.	80
Figura 32. Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 72 horas para períodos de retorno de 5, 20 y 50 años, mediante el uso de la función de distribución de mejor ajuste.	82
Figura 33. Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 5 días para períodos de retorno de 5, 20 y 50 años, mediante el uso de la función de distribución de mejor ajuste.	85
Figura 34. Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 7 días para períodos de retorno de 5, 20 y 50 años, mediante el uso de la función de distribución de mejor ajuste.	87
Figura 35. Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 15 días para períodos de retorno de 5, 20 y 50 años, mediante el uso de la función de distribución de mejor ajuste.	89
Figura 36. Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 30 días para períodos de retorno de 5, 20 y 50 años, mediante el uso de la función de distribución de mejor ajuste.	92

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros estadísticos.	32
Tabla 2. Funciones de distribución de probabilidad.	33
Tabla 3. Formas del Método Spline.	40
Tabla 4. Información básica de las 55 estaciones seleccionadas.	45
Tabla 5. Consenso para la clasificación de los años ENOS y No ENOS.	49
Tabla 6. Resumen de la precipitación máxima histórica para dos o más días consecutivos.	52
Tabla 7. Estadísticos básicos de la serie de máximas anuales para dos y más días consecutivos.	63
Tabla 8. Valores de precipitación máxima en 48 horas para Tr 5, 20 y 50 años.	67
Tabla 9. Valores de precipitación máxima en 72 horas para Tr 5, 20 y 50 años.	69

Tabla 10. Valores de precipitación máxima en 5 días para Tr 5, 20 y 50 años.	71
Tabla 11. Valores de precipitación máxima en 7 días para Tr 5, 20 y 50 años.	73
Tabla 12. Valores de precipitación máxima en 15 días para Tr 5, 20 y 50 años.	74
Tabla 13. Valores de precipitación máxima en 30 días para Tr 5, 20 y 50 años.	76

1. INTRODUCCIÓN

Colombia es un país que goza de un gran potencial hídrico, pues cerca del 70% del territorio presenta lluvias superiores a 2.000 mm/año en promedio, y el rendimiento anual del escurrimiento es de 59 L/s/Km², es decir, seis veces mayor que el promedio de la tierra y tres veces mayor que el de América Latina (Carvajal y Marco, 2005). Sin embargo dicho recurso no está distribuido equitativamente en tiempo, ni en espacio, pues así como hay zonas muy húmedas y con grandes precipitaciones como es el caso del Pacífico colombiano, hay otras zonas con escasez hídrica. La precipitación es uno de los elementos climáticos que de manera directa influye en las condiciones del medio natural, siendo la principal entrada del balance hídrico en la cuenca, su distribución tanto temporal como espacial, condiciona los ciclos productivos desarrollados en las cuencas (Fernández, 1995).

Conocer el comportamiento hidrológico de un lugar, más específicamente el de la precipitación y tener en cuenta el fenómeno de “El Niño-Oscilación del Sur” (ENOS) el cual domina la variabilidad climática del planeta a escala de tiempo interanual (Álvarez y Poveda, 2006), es de suma importancia para la planificación de obras hidráulicas, carreteras, redes de alcantarillado, así como el diseño de los sistemas de drenaje de las aguas pluviales, la optimización de recursos hidráulicos en cuencas hidrográficas y la prevención de inundaciones.

Para representar el comportamiento futuro de una variable es necesario realizar un análisis de frecuencia (AF) meteorológica que consiste en relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia, mediante el uso de Funciones de Distribución de Probabilidad (FDP) (Álvarez y Poveda, 2006).

En las últimas décadas, en Colombia se han presentado fenómenos meteorológicos extremos con consecuencias en todos los ámbitos: económicos, sociales, ambientales, entre otros. El país ha enfrentado grandes dificultades debido a sequías prolongadas, temporadas de lluvias extendidas con grandes intensidades y la falta de organización e infraestructura acrecienta los efectos que se pueden generar por las inundaciones o sequías.

La zona andina colombiana es altamente vulnerable a los deslizamientos de tierra por la conjunción de factores geológicos, geomorfológicos, climáticos y antrópicos (construcción de carreteras, centros poblados, etc.). A lo largo de los años, este fenómeno ha traído consigo numerosas pérdidas en el ámbito social y económico (Polanco, 2001), situación

que se hace particularmente grave durante los períodos lluviosos, cuando las precipitaciones prolongadas y las lluvias intensas de corta duración desencadenan deslizamientos (Moreno et al., 2013). En este trabajo se busca conocer el comportamiento de las precipitaciones máximas para dos y más días consecutivos y de esta manera poder prevenir o estar preparados para los efectos que puedan causar.

En esta investigación se realizó el análisis y la comparación de la frecuencia de eventos máximos de precipitación en 48 y 72 horas, 5, 7, 15 y 30 días consecutivos en las estaciones pluviométricas ubicadas en la cuenca alta del río Cauca, utilizando las funciones de distribución de probabilidad Gumbel, LogNormal, LogPearson tipo III con diferentes períodos de retorno, determinando su mejor ajuste.

2. JUSTIFICACIÓN.

Los procesos hidrológicos evolucionan en el espacio y en el tiempo en una forma que es parcialmente predecible o determinística, y parcialmente aleatoria (Chow, Maidment y Mays, 1994). Los análisis tradicionales han estado arrojando resultados con alta incertidumbre, debido a que la interpretación de registros de eventos pasados para inferir la ley de probabilidades de la variable de interés y los sistemas hidrológicos a los que pertenecen son afectadas por eventos extremos como sequías, crecientes y tormentas que se han incrementado con la VC y CC. Se realizó un estudio probabilístico que permitió incorporar fenómenos extremos, se supuso que estos tenían ocurrencias temporalmente independientes.

Durante los últimos años, múltiples estudios han reportado el incremento de la frecuencia e intensidad de los fenómenos extremos de VC y CC en el mundo (García et al., 2012); esto se debe a la tendencia del calentamiento de la tierra que está relacionado directamente con los gases de efecto invernadero provocados por el hombre, lo que ha traído grandes problemas y pérdidas en los sectores ambientales, sociales y económicos.

El estudio de las frecuencias de eventos hidrológicos y en especial de eventos extremos, tales como tormentas severas, crecientes y sequías, pueden proporcionar la información pertinente para el diseño de obras civiles, para el desarrollo de un adecuado plan de ordenamiento territorial y para planificación y programación obras y actividades que estén encaminadas a evitar desastres socio-naturales. (Chow et al., 1994).

La tendencia de los registros hidrometeorológicos en Colombia permite evidenciar el aumento de precipitación en algunas zonas del país, lo que se traduce en un cambio importante de uno de los factores disparadores de amenazas por inundaciones y deslizamientos. La mayor parte de precipitaciones de gran duración ocurren en el período de mayores lluvias. Es relativamente frecuente que las lluvias torrenciales den lugar a inundaciones con pérdidas de vidas humanas, económicas tanto en la producción primaria como en industrias, vías de comunicación y viviendas, además del impacto que producen sobre el terreno al arrastrar por escorrentía grandes cantidades de suelo (Banco Mundial, 2012).

En Colombia, las condiciones fisiográficas forman un escenario propicio para la ocurrencia de movimientos en masa, situación que se acentúa con los procesos antrópicos que se desarrollan en las zonas montañosas. Un suelo sin vegetación está expuesto a ser

arrastrado por el agua, y si a ello se le suman las pérdidas de capacidad de infiltración debido a las actividades antrópicas, se pueden provocar incrementos en los cursos temporales del agua, los cuales es posible que generen inundaciones o avalanchas (Banco Mundial. 2012).

No es un secreto que el Valle del Cauca es una región con un alto potencial de desarrollo agrícola e industrial. Este goza de buenos recursos naturales los cuales no están distribuidos de manera equitativa, lo que hace que se dificulte su aprovechamiento y la extensión de cultivos, situación que se agrava con las sequías e inundaciones que se han presentado en las últimas décadas (Carvajal, 2011).

El estudio de AF de eventos extremos asociados a la precipitación, se realiza para planificar y desarrollar proyectos de ingeniería con pautas para generar planes de desarrollo enfocados a un adecuado manejo de los recursos naturales, entre ellos el agua. Por lo anterior se propuso este trabajo, el cual consistió en realizar el AF de precipitaciones máximas en 48 y 72 horas, 5, 7, 15 y 30 días consecutivos, utilizando distribuciones de probabilidad en la cuenca alta del río Cauca.

3. OBJETIVOS

3.1 General

Realizar el análisis de frecuencia de las precipitaciones máximas en 48 y 72 horas, 5, 7, 15 y 30 días consecutivos en la cuenca alta del río Cauca, empleando las funciones de distribución de probabilidad LogNormal, Log Pearson III y Gumbel.

3.2 Específicos

- Describir estadísticamente las series de precipitación máximas en 48 y 72 horas, 5, 7, 15 y 30 días consecutivos en la cuenca alta del río Cauca.
- Determinar las precipitaciones máximas anuales de dos y más días consecutivos durante la ocurrencia de las fases extremas del fenómeno ENOS y períodos No ENOS.
- Realizar el análisis de frecuencia con las funciones de distribución de probabilidad LogNormal, Log Pearson III y Gumbel en las series de precipitación máximas anuales en 48 y 72 horas, 5, 7, 15 y 30 días consecutivos en la cuenca alta del río Cauca.
- Espacializar las estimaciones de precipitaciones máximas para la función de distribución de mejor ajuste en los períodos de retorno de 5, 20 y 50 años.

4. ANTECEDENTES

El ciclo hidrológico es cada vez más acelerado; esto se debe en gran parte al cambio climático, que trae consigo el aumento de las precipitaciones extremas que a su vez aumenta la probabilidad de inundaciones, deslizamientos de tierras, avalanchas y erosión, por lo que se ha visto la necesidad de predecir futuras tendencias estacionales, anuales y decadales teniendo en cuenta los efectos de cambio climático. Hasta el momento se han realizado varios estudios de VC, CC, ENOS, funciones de probabilidad, AF, precipitaciones y caudales máximos en el Valle del Cauca y Colombia con los que se han explicado los fenómenos macroclimáticos; algunos de estos estudios han sido:

Gaviria y Rodríguez (2015), enfocaron su investigación en la aplicabilidad meteorológica de tres modelos probabilísticos, correspondiente a las funciones de distribución Gumbel, LogNormal y LogPearson Tipo III, para series máximas de precipitaciones diarias para la región de la cuenca alta del río Cauca. Realizaron la prueba de estacionariedad para identificar las variaciones de la precipitación que posiblemente pueden ser indicadores de variabilidad y cambio climático. Se obtuvo como resultado que el 80% de las estaciones presentan no estacionariedad en las precipitaciones máximas diarias y el 20% restante son estacionarias. El análisis de frecuencia fue realizado con las funciones de distribución de probabilidad tradicional y mixta (parte de considerar que las poblaciones de precipitaciones máximas provienen de muestras diferentes por lo que son adecuadas para enfrentar la presencia de la variabilidad y cambio climático). Determinaron la función de mejor ajuste por medio de la prueba del error estándar de ajuste donde obtuvieron que la función tradicional LogPearson tipo III representó mejor los datos de las precipitaciones máximas diarias y que Gumbel se ajusta mejor a las series analizadas con las funciones mixtas; pero la función tradicional presentó menor error estándar de ajuste, por lo que se recomienda emplearla para la zona de estudio. Por último investigaron el impacto del fenómeno de La Niña en las lluvias máximas en 24 horas a través de los reportes de inundaciones, deslizamientos de tierra entre otros, registrados en noticias, y DesInventar donde encontraron que no necesariamente las lluvias máximas de todo el registro se presentaron en La Niña.

Carvajal, Enciso, Rojas y Loaiza (2014), en su estudio buscan conocer la distribución espacial de las lluvias máximas durante las crecientes históricas del río Cauca en su valle alto, período que transcurre desde 1988 hasta 2011. Definieron que la variabilidad de las precipitaciones presentadas se ven reflejadas en las curvas de las isoyetas para el día más lluvioso durante este período, y para los tres y los seis días consecutivos más lluviosos;

siendo estos, los días más representativos para el análisis de las precipitaciones de la cuenca, teniendo en cuenta el tiempo de viaje del río Cauca, que desde el embalse la salvajina hasta la victoria es aproximadamente de 4 a 5 días. Por otro lado observaron una concentración de las lluvias hacia las vertientes de las Cordilleras Central y Occidental , principalmente en inmediaciones de reserva forestal del departamento del Valle del Cauca, como son el Parque Nacional Natural Farallones de Cali (Cordillera Occidental) y el Parque Nacional Natural Las Hermosas (Cordillera Central) entre otros; Comprueban la importancia del ciclo hidrológico de los bosques andinos tropicales y de la orografía de la cuenca, en la hidroclimatología de la región.

Cardona, Ávila, Carvajal y Jiménez (2014), calcularon nueve índices de extremos climáticos utilizando el programa RClimdex para identificar cambios o tendencias en la precipitación diaria registrada en las cuencas hidrográficas de los ríos Dagua y Cali, ubicadas al Sur-Occidente colombiano en el Valle del Cauca. Analizaron las tendencias de precipitación anual en 18 estaciones pluviométricas localizadas en la zona de estudio, con series históricas diarias que oscilaron entre los 21 y 56 años. Los resultados indicaron cambios en la precipitación, dominadas por tendencias crecientes en casi todos los índices; en las estaciones ubicadas por debajo de los 1500 msnm se presentaron incrementos significativos de precipitación total anual promedio y en estaciones ubicadas en mayor altura se presentaron disminuciones. Encuentran que hay una distribución espacial homogénea para la mayoría de los índices y observaron patrones similares localizados en áreas delimitadas de la zona de estudio, que posiblemente afectarán la producción de escorrentía en las cuencas en los próximos años.

Gutiérrez, Carvajal y Ávila (2013), analizaron la oferta hídrica en la cuenca hidrográfica del río Dagua durante la ocurrencia de las fases extremas del fenómeno ENOS, mediante la implementación del cálculo de anomalías para la estimación de correlaciones significativas de variables macroclimáticas (VM) asociadas a ENOS en la hidrometeorología de la cuenca. Los resultados que obtuvieron muestran reducciones del 39% en la media anual de la variable precipitación mensual y aumentos del 84%, mientras que el caudal mensual del río Dagua, su río principal, presenta disminuciones del 40% e incrementos del 50%, respectivamente. Los resultados también sirven como herramienta para la gestión y planificación del recurso hídrico.

Sedano, Carvajal y Ávila (2013), analizaron algunos aspectos que potenciaron las inundaciones en Colombia en el período 2010/2011 y lo hicieron mediante la revisión y síntesis de información sobre distintos enfoques para el manejo de inundaciones, en armonía con la visión ecosistémica y de gestión integral de los recursos hídricos. Los resultados indican que las temporadas de lluvias y el fenómeno La Niña de abril de 2010 a diciembre de 2011 fue el evento más crítico en la historia, ya que duplica las pérdidas acumuladas por inundaciones en 30 años, este desastre se debió a la suma de varios

factores tanto sociales, políticos entre otros. Concluyeron que es necesario incluir nuevos conocimientos del clima en la gestión del riesgo eficiente y la planificación, pero que sean acorde con los conceptos modernos y en armonía con los procesos de desarrollo sostenible.

Poveda y Álvarez (2012), realizan un estudio donde muestran que la hipótesis de estacionariedad colapsa ante los efectos del CC; este estudio se realiza utilizando registros hidrológicos de Colombia y a través de Funciones de Distribución de Probabilidad Mixtas para determinar los caudales extremos teniendo en cuenta los efectos de VC, encontrando que la función de distribución Mixta Weibull Tipo I, presenta buenos estimativos en los caudales mínimos extremos, y la función Mixta Fréchet Tipo I es adecuada para estimar caudales máximos extremos.

García et al. (2012), presentan una síntesis de los principales avances que Colombia ha tenido respecto al estudio de los fenómenos de VC y los efectos del CC con relación al recurso hídrico y también se hace un recuento de modelos de análisis, resultados y pasos a seguir para mejorar el manejo de los recursos hídricos en Colombia.

Puertas, Carvajal y Quintero (2011), estudiaron las alteraciones en la oferta hídrica asociadas a la variabilidad o al cambio climático, mediante el análisis de las tendencias de la precipitación mensual (1975 – 2006) en escalas de lluvia total – anual, mensual – multianual y semianual – trimestral y la aplicación de la prueba no – paramétrica de Mann – Kendall en 108 estaciones pluviométricas, ubicadas en la cuenca alta – media del río Cauca. Concluyeron que existe cambios en el régimen interanual de la precipitación, dichos cambios afectaran negativamente la generación y disponibilidad de la escorrentía, que representa la oferta hídrica en la cuenca y proponen que se debe estudiar en futuras investigaciones los cambios en la precipitación a escala diaria y vincular actores locales, para el ajuste de adaptaciones frente a los cambios.

Carvajal (2011), realizó una revisión bibliográfica de diferentes enfoques y analizó factores que contribuyen a las inundaciones en Colombia; ya que las variaciones climáticas generan frecuentes anomalías de precipitación que se suman a la construcción social de riesgo, impactando la sociedad y los sectores productivos del país, ocasionando grandes pérdidas económicas. Plantea mecanismos de prevención, respuestas adaptativas y analiza la necesidad de incluir nuevos conocimientos de clima en la gestión de riesgo y la planificación. Ofrece lineamientos y recomendaciones para abordar las inundaciones integralmente y adaptar la sociedad colombiana en los próximos años, mediante una

gestión más eficiente, acorde con conceptos modernos de gestión del agua, y en armonía con procesos de desarrollo sostenible.

Álvarez y Poveda (2006), señalan que las dos fases extremas del fenómeno ENOS modulan la hidrología Colombia a escala de tiempo interanual por lo que para la estimación de eventos extremos de caudales máximos diarios en ríos de Colombia se utilizaron funciones de distribución de probabilidades mixtas y se hace necesario replantear los análisis tradicionales de caudales extremos de distintos períodos de retorno en tareas de diseño hidrológico.

Castro y Hoyos (2004), desarrollaron un programa computacional que permitiera el AF de crecientes de datos hidrológicos mediante la aplicación de varias distribuciones de probabilidad, con énfasis en la distribución Wakeby. El software utiliza los métodos de ajuste momentos (MM), Máxima verosimilitud (MV) y momentos de probabilidad ponderada (MPP) con el fin de encontrar los parámetros de cada distribución de probabilidad; diferentes expresiones empíricas de probabilidad de no excedencia y pruebas de bondad de ajuste como Kolmogorov - Smirnov, Chi cuadrado, coeficiente de correlación graficada (CCG) y error estándar de ajuste (EEA). Los resultados que obtuvieron demostraron que la distribución Wakeby puede ser utilizada para el AF de crecientes con series de cualquier tamaño y que la mejor valoración de los ajustes se obtuvo con las pruebas del coeficiente de correlación graficada y el error estándar de ajuste, lo cual se corroboró cuando se observó la gráfica de probabilidad respectiva.

Poveda et al. (2002), realizaron un estudio al ciclo anual de las máximas intensidades de lluvia para 51 estaciones ubicadas en los Andes tropicales de Colombia, donde se observa la similitud entre el ciclo anual de las intensidades máximas de la lluvia y el ciclo anual promedio de la lluvia en los Andes tropicales de Colombia y encontraron que durante La Niña se presentan en promedio, eventos de mayor intensidad que durante El Niño para la región estudiada. En general a medida que se exploran duraciones mayores a tres horas, la intensidad se reduce en un orden de magnitud en comparación con las duraciones más cortas, es decir entre 1 y 3 horas. Los eventos máximos registrados no tienen un definido comportamiento que permita asociarlos a eventos de escala anual o interanual debido a la alta variabilidad de los eventos extremos de precipitación, lo que supone un importante rol de la interacción suelo-atmósfera en la génesis, desarrollo y terminación de aguaceros intensos en Colombia.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 Marco Contextual

5.1.1 Cambio climático (CC) y Variabilidad climática (VC)

El cambio climático se define como una importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso más). El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, o bien a cambios persistentes antropogénicos en la composición de la atmósfera o en el uso de las tierras (Panel Intergubernamental del Cambio Climático, 2007b).

Se debe tener en cuenta que la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC), en su Artículo 1, define “cambio climático” como: “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMCC hace énfasis a que el “cambio climático” es atribuido a actividades humanas que alteran la composición atmosférica (IPCC, 2007b).

Según el IPCC la variabilidad del clima se refiere a las variaciones en el estado promedio del clima en todas las escalas temporales y espaciales, más allá de los eventos individuales del tiempo. La variabilidad se puede deber a procesos internos naturales dentro del sistema climático (variabilidad interna), o a variaciones en los forzamientos externos antropogénicos (variabilidad externa). La CMCC atribuye la “variabilidad climática” a causas naturales (IPCC, 2007a).

5.1.2 El Niño Oscilación del Sur (ENOS)

El ENOS es un fenómeno océano-atmosférico de gran escala, que altera las condiciones normales del ámbito intertropical en el Océano Pacífico, con impactos asociados que alteran el clima del planeta, y es una de las principales causas de la variabilidad climática interanual a nivel mundial (Carvajal, Jiménez y Materón, 1998).

El ENOS Consta de dos fases, las cuales están referidas a las temperaturas superficiales y subsuperficiales del Océano Pacífico ecuatorial. Además de estas temperaturas existe otro factor, representado por el Índice de la Oscilación del Sur, que constituye la componente atmosférica del fenómeno (Mesa, 2006). Estas fases se dividen en:

La fase cálida, conocida popularmente como El Niño que en Colombia se presenta como una disminución en la precipitación y en los caudales medios mensuales de los ríos, por lo que afecta a las producciones agrícolas, a la generación de energía eléctrica. El Niño tiene una recurrencia promedio entre 3 y 4 años (Poveda & Álvarez, 2012). En la Figura 1 se observa una representación de las condiciones en el océano cuando se presenta El Niño y en cuando es normal.

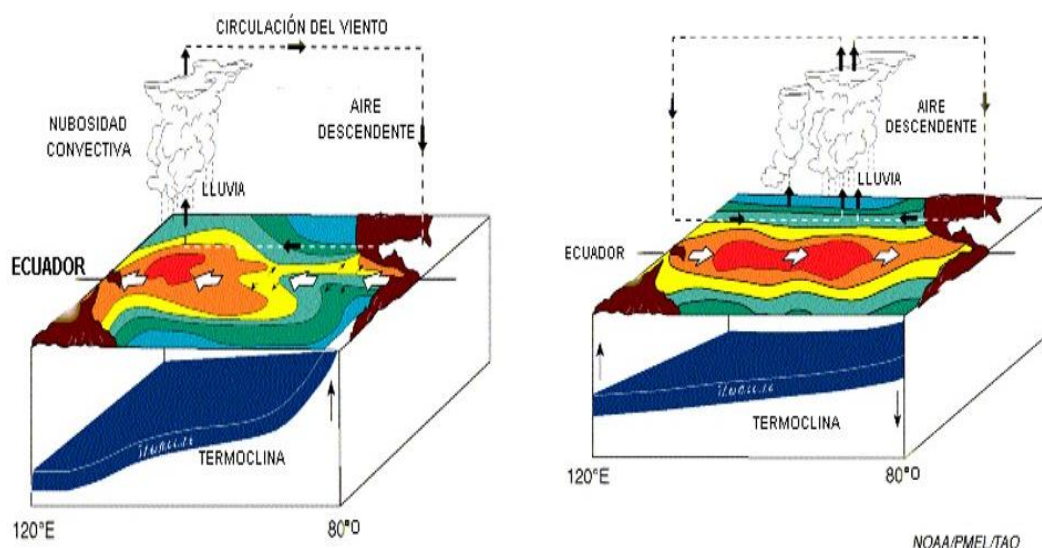


Figura 1. Representación de las condiciones en el océano Pacífico tropical a nivel superficial y en profundidad sobre la región de desarrollo de El ENOS en su fase normal y cuando está activo El Niño.

(Tomado de: http://www.imn.ac.cr/educacion/enos/eno_ocea4.html).

La fase fría de El ENOS por lo general, comienza su formación desde mediados de año con un enfriamiento de las aguas del océano Pacífico tropical central y oriental frente a las costas del Perú, Ecuador y sur de Colombia, como uno de los indicadores oceánicos; como también una intensificación de los vientos Alisios del Este, que propicia un descenso del nivel del océano sobre la zona oriental y una disminución de la temperatura superficial; “La Niña” alcanza su intensidad máxima a finales de año, cuando se acoplan todos los parámetros mencionados, junto con otras variables océano-atmosféricas propias de este evento climático; y tiende a disiparse a mediados del año siguiente. Este fenómeno causa efectos contrarios a los que presenta “El Niño”, mientras que “El Niño” reduce las precipitaciones, “La Niña” favorece el incremento de las mismas en gran parte del país en particular sobre las regiones Caribe y Andina (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, 2008). La Niña en Colombia causa también crecidas de ríos, avalanchas e inundaciones de planicies aluviales, con las consecuentes pérdidas de

vidas humanas, infraestructura y cosechas agrícolas (Poveda, 2004). Tiene una recurrencia promedio entre 6 y 8 años (Poveda y Álvarez, 2012). La Figura 2 representa gráficamente las condiciones en el océano, cuando se presenta la fase fría.

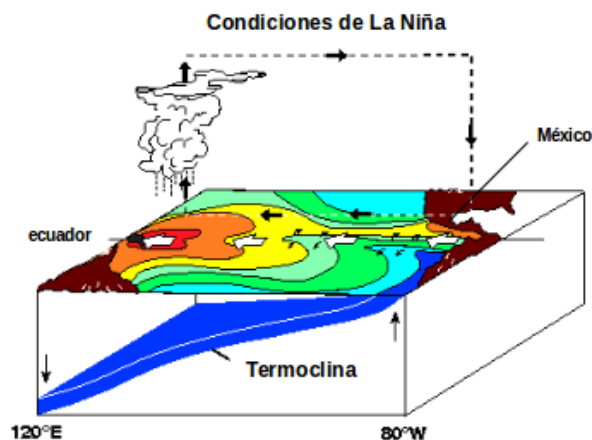


Figura 2. Representación de las condiciones en el océano Pacífico tropical a nivel superficial y en profundidad sobre la región de El ENOS en su fase fría.

(Tomado de

http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=266&Itemid=160).

En Colombia, El ENOS causa alteraciones climáticas en la escala interanual sobre todo el territorio, lo cual afecta el medio natural en general y el ciclo hidrológico, es el responsable de las principales variaciones en la precipitación originadas por cambios en el océano Pacífico. Los impactos de un evento ENOS no son fáciles de predecir por diversas razones: los efectos climáticos dependen principalmente de la extensión, intensidad y duración de las anomalías en el océano y la atmósfera (las cuáles varían para cada evento de ENOS), también la influencia de estructuras sociales, económicas y políticas determinan si las anomalías climáticas traerán severos impactos socioeconómicos en una región particular (Puertas y Carvajal, 2008).

Entre los años 1950 y 2007 se estableció con base en los reportes de desastres del Observatorio Sismológico y Geofísico del Sur-Occidente Colombiano (OSSO), y de la Dirección General para la Prevención y Atención de Desastres (DGPAD), que los desastres asociados con las lluvias tienen un incremento del 16,1% en relación con las condiciones normales durante los meses en los cuales se presenta el fenómeno de la Niña, mientras que durante el fenómeno El Niño presentan en promedio una disminución de 33,5% y en cuanto a los reportes de desastres asociados con la sequía presentan un incremento hasta del 216% durante los períodos El Niño y una reducción de 99,6% durante los períodos La

Niña (IDEAM, 2008). Todos estos cambios y sucesos han ocasionado un gran impacto de en todos los sectores tanto social, económico y ambiental.

5.1.3 Inundaciones y Avenidas

Las inundaciones son fenómenos hidrológicos recurrentes potencialmente destructivos, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente. Se producen por lluvias persistentes y generalizadas que generan un aumento progresivo del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce superando la altura de las orillas naturales o artificiales, ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas a los cursos de agua normalmente no sumergidas (IDEAM, s.f.).

Inundaciones lentas que ocurren en las zonas planas de los ríos y con valles aluviales extensos, los incrementos de nivel diario son de apenas del orden de centímetros, reporta afectaciones de grandes extensiones, pero usualmente pocas pérdidas de vidas humanas, el tiempo de afectación puede fácilmente llegar a ser del orden de meses y crecientes súbitas, que aunque las áreas de afectación son menores, el poder destructivo es potencialmente mayor y cobra el mayor número de vidas cuando se presentan, responden rápidamente a la ocurrencia de fuertes precipitaciones en las partes altas de las cuencas, los incrementos de nivel son del orden de metros en pocas horas, y el tiempo de permanencia de estas inundaciones en las zonas afectadas son igualmente de horas o pocos días, estas se presentan en todas las cuencas de alta pendiente de la región Andina principalmente (IDEAM, s.f.).

Otra definición de inundación es el aumento del agua por arriba del nivel normal del cauce. En este caso, “nivel normal” se debe entender como aquella elevación de la superficie del agua que no causa daños, es decir, inundación es una elevación mayor a la habitual en el cauce, por lo que puede generar pérdidas (Organización Meteorológica Mundial / Organización de las Naciones Unidas para la Educación y Diversificación, la Ciencia y la Cultura, 1974). Estas inundaciones se producen cuando hay precipitaciones intensas o continuas que sobrepasan la capacidad de retención e infiltración del suelo, la capacidad de los ríos es superada, por lo que ocasiona un desbordamiento del río.

Por otra parte, avenida se define como: “Una elevación rápida y habitualmente breve del nivel de las aguas en un río o arroyo hasta un máximo desde el cual dicho nivel desciende a menor velocidad” (OMM/UNESCO, 1974). Estos incrementos y disminuciones, representan el comportamiento del escurrimiento en un río.

Cabe recalcar que las inundaciones siempre han existido y el desarrollo de la humanidad se ha dado con ellas, aprovechando la abundancia y fertilidad que traen. Por ejemplo, las antiguas civilizaciones se desarrollaron en parte, gracias a estas inundaciones: la India (ríos Indo, Ganges y Brahmaputra), la China (ríos Yangtsé y Amarillo) y la Egiptia (río Nilo), entre otras, donde la fertilidad de su valle ocurría por desbordamientos periódicos del río, cuyos sedimentos fertilizaban el suelo, aumentando la producción de los cultivos en beneficio de la población (Carvajal, 2011).

5.2 Marco Conceptual

5.2.1 Estadística Hidrológica

Los procesos hidrológicos evolucionan en el espacio y en el tiempo en forma que es parcialmente predecible o determinística, y parcialmente aleatoria. Un proceso de este tipo se les conoce con el nombre de proceso estocástico (Chow et al., 1994).

Una variable aleatoria X es una propiedad o característica de un elemento que hace parte de una población. Dicha Variable es descrita por una distribución de probabilidad. Además una muestra es el conjunto de las observaciones de una variable aleatoria mientras que la población se define el conjunto de todos los elementos que presentan una característica común. Por último el conjunto de todos los posibles resultados de una experiencia aleatoria se le conoce como espacio muestral (Chow et al., 1994).

5.2.2 Probabilidad de un Evento

Es la posibilidad de que este ocurra cuando se hace una observación de la variable aleatoria (Chow et al., 1994).

Probabilidad relativa de A:
$$P(A) = \frac{n_A}{n}$$
 Ecuación 1

Probabilidad del Evento A:
$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_A}{n}$$
 Ecuación 2

Las probabilidades obedecen a los siguientes tres principios:

5.2.3 Probabilidad total

Si el espacio muestral Ω está completamente dividido en m eventos o áreas no traslapadas $A_1, A_2, \dots, A_m$, entonces:

$$P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_m) = P(\Omega) = 1 \quad \text{Ecuación 3}$$

5.2.4 Complementariedad

Si $\bar{A}$ es el complemento de A , entonces, $\bar{A} = \Omega - A$

$$P(\bar{A}) = 1 - P(A) \quad \text{Ecuación 4}$$

5.2.5 Probabilidad Condicional

Supóngase que existen dos eventos A y B que se traslapan en el espacio muestral. Por lo tanto, existe la probabilidad conjunta de que tanto A y B ocurran, $P(A \cap B)$. En consecuencia, se define la probabilidad de que ocurra B dado que ha ocurrido A , $P(B/A)$, como:

$$P(B/A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} \quad \text{Ecuación 5}$$

5.2.6 Series de Información Hidrológica

Según el análisis que se quiera realizar, en hidrología se pueden trabajar con los datos organizados de diferentes maneras. Dichos datos organizados de cierta manera recibe el nombre de serie de datos. En hidrología, respecto a los eventos extremos, se tienen las siguientes series de datos:

5.2.6.1 Serie de duración completa

Está compuesta por toda la información disponible (Chow, 1994). En la Figura 3 se puede observar como ejemplo, información total hidrológica ordenada por su tiempo de ocurrencia.

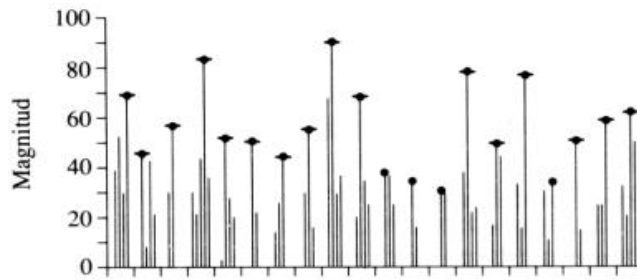


Figura 3. Información Original N=20 años.
Fuente: Chow 1994.

5.2.6.2 Serie de Duración parcial

Serie de datos seleccionados de tal manera que su magnitud es mayor que un valor base predefinido (Chow, 1994).

5.2.6.3 Series de Excedencias anual

Son los valores máximos de la serie de duración completa ordenados de mayor a menor, los cuales se seleccionan de manera que el número de valores de la serie sea igual al número de años en el registro. En la Figura 4 se puede observar solo las excedencias del total de datos de la Figura 3, dos o más valores de esta serie pueden estar compuestos por datos de una misma unidad de tiempo, siempre y cuando sean los valores máximos del total de datos, con esto se viola en cierta manera el criterio de independencia entres datos; sin embargo cuando la seria de datos es mayor a 30 años se puede observar que la seria de excedencias y de máximas convergen a los mismo valores.

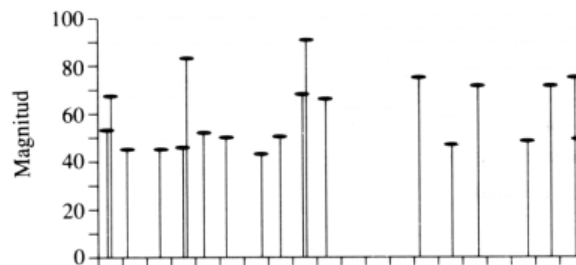


Figura 4. Excedencias Anuales.
Fuente: Chow 1994

5.2.6.4 Serie de Máximas Anual

Una serie de máximas o de valor extremo está compuesta por el valor máximo que ocurre en cada uno de los intervalos de tiempo de igual longitud del registro. La longitud del intervalo de tiempo usualmente se toma como un año. Una serie seleccionada de esta manera se conoce como serie anual. Si se utilizan valores máximos anuales es una serie anual máxima. Como se puede ver en la Figura 5 Igual que el anterior, el número de valores de la serie es igual al número de años de registro. (Chow et al., 1994).

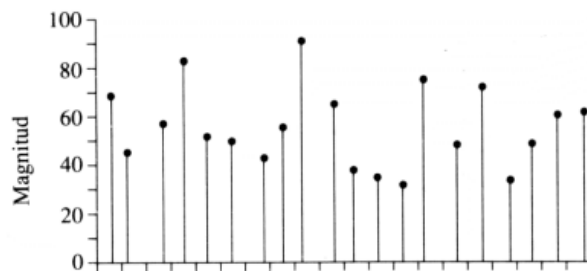


Figura 5. Máximos Anuales.
(Fuente: Chow 1994)

5.2.7 Funciones de Frecuencia y de Probabilidad

Según Chow, et al., (1994), si las observaciones correspondientes de una muestra están idénticamente distribuidas, éstas pueden ordenarse para formar un histograma de frecuencia. Así mismo si el número de observaciones n_1 en el intervalo i que cubre un intervalo dado, se divide por el número total de observaciones n , el resultado se conoce frecuencia relativa. Finalmente, la suma de los valores de frecuencia relativa hasta un punto dado, es la función de frecuencia acumulada, y en su límite, cuando $n \rightarrow \infty$ y $\Delta x \rightarrow 0$, se denomina función de distribución de probabilidad.

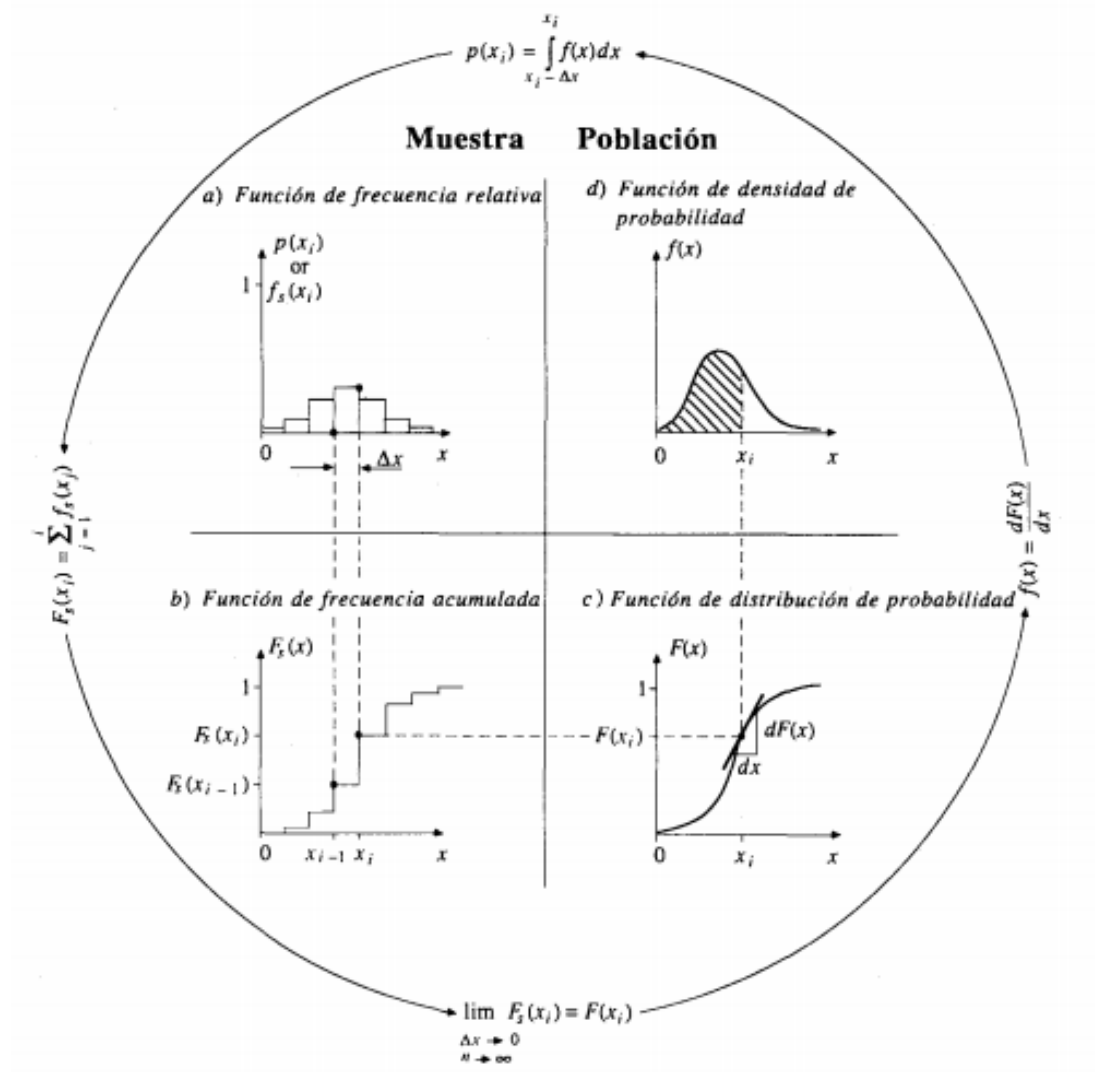


Figura 6. Funciones de frecuencia de la muestra y funciones de probabilidad de la población.

Fuente: Chow et al., 1994

5.2.8 Parámetros Estadísticos

Los parámetros estadísticos son características de una población; por ejemplo, Media (μ), Varianza (β), Coeficiente de Variación (CV), Asimetría. También son considerados como los valores esperados de alguna función de una variable aleatoria (Chow et al., 1994) y que definen que tipo de arreglo que hay entre las funciones de distribución para una serie. Los parámetros estadísticos más utilizados son los que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros estadísticos.

PARÁMETRO	ECUACIÓN	DEFINICIÓN
Media Poblacional (μ)	$E(x) = \mu = \int xf(x)dx$ $-\infty < x < \infty$	Es una medida del punto medio o “tendencia central” de la Distribución.
Varianza Poblacional (β)	$\sigma^2 = E[(x - \mu)^2]$	Es una medida de la dispersión de los datos o dispersión respecto a la media más usada en estadística (Behar y Yepes, 2007).
Desviación Estándar (σ)	$\sigma = +\sqrt{\sigma^2}$	Es una medida de la variabilidad y la raíz positiva de la varianza.
Coficiente de Asimetría (γ):	$\gamma = \frac{E[(x - \mu)^3]}{\sigma^3}$	En una muestra, indica si los datos tienden a la izquierda (asimetría negativa) o derecha (asimetría positiva).
Coficiente de Variación (Cv)	$CV = \frac{\sigma}{\mu}$ σ : Desviación Típica μ : Media	Es la relación entre desviación estándar y la media.

Fuente: Elaboración propia

5.2.9 Funciones de Distribución de Probabilidad Para Variables Hidrológicas

Una distribución de probabilidad es una función que representa la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria. Las distribuciones de probabilidad comúnmente utilizadas para el ajuste de información hidrológica son las que se presenta a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2.Funciones de distribución de probabilidad.

FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN	CARACTERÍSTICA	ECUACIÓN	PARÁMETRO	DETALLES
Normal	Es la función de probabilidad menos usada. Es útil para describir fenómenos de comportamiento razonable (ej. Caudal total anual).	$XT = \mu + \sigma \cdot KT$	$\mu, \sigma, \rho, z, w, kT$	$KT=z$ (variable normal estándar)
LogNormal	La distribución de tamaños de gotas de una lluvia.	$F(X \geq x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt$	μ, σ	
Wakeby	Puede ser utilizada para el análisis de frecuencia de crecientes con series de cualquier tamaño.	$x = -a + (1 - F)^b + c + (1 - F)^{-d} + e$ Donde $e = m+a -c$, para $m < x$		
Distribución Gumbel	La función de distribución de valores extremos tipo I se aplica mejor a las tormentas de lluvia.	$KT = \sqrt{\sigma}/\pi(y + \ln(T/(T - 1)))$	$\mu, \beta, \sigma, \alpha$	Donde $Y=0.5772$ $\alpha=1.281/\sigma$ $\beta=\mu-0,45\sigma$
LogPearson Tipo III	La distribución de probabilidades de picos decrecientes máximos anuales.	$KT = z + (x^2 - 1)k + 1/3(z^2 - \sigma z)k^2 - (z^2 - 1)k^3 + zk^4 + 1/3k^5$	μ, σ, Cs	Donde $k=Cs/\sigma$
Fréchet	Recomendada para estudios de caudales máximos. Según Poveda, 2012. Esta función produce las mayores diferencias entre los caudales estimados mediante las FDP simple y mixta.	$y = \alpha_0(\ln x - \mu_0)$	α_0, μ_0	

Fuente: Adaptado por Gaviria y Rodríguez (2014), Chow, Maidment, y Mays, (1994), Organización Meteorológica Mundial (2011), Fattorelli y Fernández (2011), Ganancias (2009).

5.2.10 Período de Retorno

El objetivo primario del análisis de frecuencia de una serie hidrológica es determinar el período de retorno de un evento de determinada magnitud.

La inversa de $P(x)$ se denomina período o tiempo de retorno o de recurrencia (TR). El período de retorno de un evento de una magnitud dada, es el tiempo promedio entre

eventos que igualan o exceden esa magnitud, o en otras palabras es el intervalo dentro del cual un evento de determinada magnitud puede ser igualado o excedido; sin que ello implique la indicación del momento en que se puede producir. Si la muestra de la variable se refiere a un año, un mes, o una estación, el TR estará referido a ese período y se cuenta en años, meses o estaciones climáticas (Yevjevich, 1972).

En realidad en diseño hidrológico, interesa saber el riesgo de falla en el período de vida útil de una estructura. La ecuación 6 permite obtener la probabilidad de ocurrencia anual, P , de un evento.

$$P = \frac{1}{T_R} \quad \text{Ecuación 6}$$

5.2.11 Probabilidad Empírica por Posición o Probabilidad de Weibull

Trabaja como la probabilidad de excedencia asignada a cada valor de la muestra, según su posición, cuando los datos están organizados de mayor a menor. Es ampliamente empleada por sus buenos resultados en hidrología, sobre todo para precipitaciones máximas anuales; se calcula mediante la Ecuación 7. La Ecuación 8 nos relaciona el tiempo de retorno con la probabilidad de Weibull (Chow et al., 1994).

$$P(X \geq x_m) = \frac{m}{n + 1} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$Tr = \frac{n + 1}{m} \quad \text{Ecuación 8}$$

Dónde:

$P(X \geq x_m)$ = Probabilidad de excedencia.

Tr = Período de retorno del evento en años.

n = Tamaño de la serie, número de años.

m = Número de orden del evento en la serie ordenada de mayor a menor.

5.2.12 Análisis de Frecuencia

Es un procedimiento para estimar la frecuencia o probabilidad de ocurrencia de ciertos eventos hidroclimáticos (Monsalve, 2008). El análisis de frecuencia de información hidrológica relaciona los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad (Chow et al., 1994).

La confiabilidad del análisis de frecuencia depende de la longitud y calidad de la serie histórica, además de la incertidumbre propia de la distribución de probabilidades seleccionada. Cuando se pretende realizar extrapolaciones a períodos de retorno mayores que la longitud de la serie disponible, el error relativo asociado a la distribución de probabilidades utilizada es más importante, mientras que en interpolaciones, la incertidumbre está asociada principalmente a la calidad de los datos a modelar; en ambos casos la incertidumbre es alta dependiendo de la cantidad de datos disponibles (Ashkar, Ouarda y Bobée, 1993).

5.2.13 Análisis de Frecuencia Utilizando Factores de Frecuencia

El cálculo de magnitudes de eventos extremos utilizando las funciones de probabilidad requiere que dichas distribuciones probabilísticas sean invertibles, es decir, dada una función $F(x_T)$ asociada a un Tiempo de retorno (T_r), $F(x_T) = T_r / T_r - 1$, se puede determinar x_T sin problema alguno. Sin embargo, muchas distribuciones de probabilidad no son fácilmente invertibles, por lo que se requiere un método alternativo para calcular magnitudes de eventos extremos para estas distribuciones (Chow et al., 1994).

La magnitud x_T de un evento hidrológico extremo puede representarse como la media μ más una desviación Δx_T de la variable respecto a la media (Chow et al., 1994).

$$x_T = \mu + \Delta x_T \quad \text{Ecuación 9}$$

Esta desviación con respecto a la media puede igualarse al producto de la desviación estándar σ y el factor de frecuencia K_T , es decir $\Delta x_T = \sigma * K_T$. Las desviación Δx_T y el factor de frecuencia K_T son funciones del periodo de retorno y el tipo de distribución de probabilidad a utilizarse en el análisis. La ecuación 10 se puede escribir como:

$$x_T = \mu + \sigma * K_T \quad \text{Ecuación 10}$$

Dado que por lo general se tiene solo información de la muestra, la anterior ecuación quedaría:

$$x_T = \bar{x} + s * K_T \quad \text{Ecuación 11}$$

En el caso que el evento de una variable analizada sea $y = \log x$, entonces se aplica el mismo método a las estadísticas para los logaritmos de los datos, utilizando

$$y_T = \bar{y} + s * K_T \quad \text{Ecuación 12}$$

Para una distribución dada puede determinarse una relación K–T entre el factor de frecuencia y el período de retorno la cual puede expresarse en términos matemáticos y mediante una tabla.

Algunos factores de frecuencia se presentan a continuación:

5.2.13.1 Factor de Frecuencia para la Distribución Gumbel o Valor Extremo Tipo I

Para la distribución Tipo I se dedujo la siguiente expresión (Chow et al., 1994).

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left[0.5772 + \ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \right] \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde:

T = Tiempo de Retorno (años)

5.2.13.2 Factor de Frecuencia para la Distribución LnNormal

Se asume la variable a analizar cómo $y = \ln x$, donde x es la variable de estudio a la cual se le quiere hacer el análisis de frecuencia.

El factor de frecuencia Z , tanto para la distribución normal como la LnNormal, puede expresarse con la siguiente ecuación

$$Z = w - \frac{2.515517 + 0.802853 * w + 0.010328 * w^2}{1 + 1.432788 * w + 0.189269 * w^2 + 0.001308 * w^3} \quad \text{Ecuación 14}$$

Para lo cual si $0 < p \leq 0.05$, w se calcula de la siguiente manera:

$$w = \left[\ln \left(\frac{1}{p^2} \right) \right]^{1/2} \quad \text{Ecuación 15}$$

Si $p > 0.5$, se reemplaza “p” por $1-p$ y “z” se le asigna un signo negativo. Para cualquier período de retorno (Tr), la probabilidad de excedencia es $p = \frac{1}{Tr}$ (Kite, 1988).

5.2.13.3 Factor de Frecuencia para la Distribución Log Pearson III

Se asume la variable a analizar cómo $y = \log x$, donde x es la variable de estudio a la cual se le quiere hacer en análisis de frecuencia. Usualmente se utiliza el logaritmo en base 10.

Primero se determina w tal cual como se indica en Factor de Frecuencia para la Distribución LnNormal haciendo uso de la Ecuación 15

Si $p > 0.5$, se reemplaza “p” por “ $1-p$ ” y “z” se le asigna un signo negativo.

Se calcula z tal cual como se indica en Factor de Frecuencia para la Distribución LnNormal haciendo uso de la Ecuación 14

Se determina el Coeficiente de asimetría C_s de la muestra con la siguiente ecuación:

$$C_s = \frac{n * \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(n-1)(n-2) * s^3} \quad \text{Ecuación 16}$$

Cuando:

- ◆ $C_s = 0$, el factor de frecuencia es igual a la variable normal estándar z .
- ◆ Cuando $C_s \neq 0$, el factor de frecuencia se aproxima de la siguiente manera (Kite, 1988).

$$K_T = z + (z^2 - 1)k + \frac{1}{3}(z^3 - 6z)k^2 - (z^2 - 1)k^3 + zk^4 + \frac{1}{3}k^5 \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde el factor k se calcula de la siguiente manera:

$$k = \frac{C_s}{6} \quad \text{Ecuación 18}$$

5.2.14 Prueba de Bondad de Ajuste

Se utiliza para poder identificar las diferencias significativas entre las distribuciones ajustadas y las observadas. Tienen por objetivo determinar que tanto los datos se ajustan a una determinada distribución. La bondad del ajuste de una distribución de probabilidad puede probarse comparando los valores teóricos y muestrales de las funciones de frecuencia relativa o de frecuencia acumulada (Chow et al., 1994). Algunas de las pruebas utilizadas para determinar si es adecuado el ajuste se presentan a continuación:

5.2.15 Coeficiente de Correlación Graficada (C.C.G)

El coeficiente de correlación mide la relación lineal entre dos variables aleatorias. Sirve para determinar la correlación r entre los datos observados x_i y la correspondiente cantidad calculada. Valores de r cercanos a 1 sugieren que las observaciones podrían haber sido dibujadas de una distribución ajustada (Filliben, 1975). Si $\bar{\mu}$ denota el valor promedio de las observaciones y $\bar{w}$ denota el valor promedio de las cantidades ajustadas, entonces:

$$r = \frac{\sum (x_i - \hat{\mu})(w_i - \bar{w}_i)}{[\sum (x_i - \hat{\mu})^2 \sum (w_i - \bar{w}_i)^2]^{0.5}} \quad \text{Ecuación 19}$$

Dónde:

x_i = valor real.

$\hat{\mu}$ = Media de los valores reales.

w_i = Valor estimado.

$\bar{w}_i$ = Media de los valores estimados.

5.2.16 Prueba del Error Estándar de Ajuste (E.E.A.)

Permite seleccionar la mejor opción entre diferentes modelos en competencia, para el ajuste de una muestra de datos Q_i^j para $i=1, 2, 3, \dots, n$, de un sitio j . Se considera que es el mejor de los métodos, ya que el mismo considera en la comparación de los valores observados y estimados, el número de parámetros que se utilizan para ajustar la distribución en prueba (Ganancias, 2009). Este error estándar de ajuste se obtiene con la ecuación 20.

$$EEA = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n_j} (\hat{Q}_T^j - Q_T^j)^2}{n_j - m_p} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 20}$$

La distribución de mejor ajuste será aquella que proporcione el mínimo valor del estadístico E.E.A. Si una o más distribuciones tienen valores similares del E. E. A., entonces se deberá optar por aquella distribución que tenga el menor número de parámetros.

5.2.17 Método de Interpolación Spline.

El Método Spline es una herramienta que es ejecutada por varios programas de sistemas de información geográfica (ARCGIS, GRASS Quatum GIS etc.). Esta herramienta utiliza un método de interpolación que estima valores aplicando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, resultando una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada. Este método es mejor para generar superficies que varían levemente, como la elevación, las isoyetas, la altura de las tablas de agua o las concentraciones de contaminación. La superficie de salida se logra controlar, es decir, se ajusta para un mejor resultado, mediante dos parámetros adicionales: el peso y la cantidad de puntos.

Ya que la aproximación mediante *Splines* es variacional, “está basada en la suposición de que la función de interpolación debe pasar a través (o cerca) de los puntos medidos, y al mismo tiempo, debe ser lo más suave posible” (Mitasova y Mitas, 1993, 642). Ambas condiciones son recogidas en una sola expresión.

La ecuación general de Spline fue expresada como la suma de componentes (Talmi y Gilat, 1977, en Mitasova y Mitas), en la siguiente expresión:

$$S(x, y) = T(x, y) + \sum_{j=1}^N \lambda_j R(r_j) \quad \text{Ecuación 21}$$

Dónde:

$j = 1, 2, \dots, N$

N es cantidad de puntos.

λ_j son coeficientes determinados por la solución de sistemas de ecuaciones lineales.

r_j es la distancia del punto (x, y) al punto j .

$T(x)$ es una función de tendencia.

$R(r_j)$ es una función de base radial con una forma explícita dependiendo de la elección que se haga sobre el tipo de *Spline* a ejecutar.

Existen dos opciones básicas de *Spline*. En la Tabla 3 se hace una breve descripción de ambos métodos, así como las expresiones ajustadas de T y R, según el método seleccionado.

Tabla 3. Formas del Método Spline.

REGULARIZED	TENSION
Crea una superficie suave que cambia gradualmente con los valores que pueden estar por fuera del rango de datos de muestra. Los valores más alto del peso τ producen superficies más suaves.	Controla la rigidez de la superficie de acuerdo al carácter del fenómeno modelado. Crea una superficie menos suave con valores que están más restringidos por el rango de datos de la muestra. Los valores más alto del peso φ^2 .
$T(x,y) = a_1 + a_2x + a_3y$ Donde a_i son coeficientes determinados por la solución de un sistema de ecuaciones lineales.	$T(x,y) = a_1$ Donde a_i son coeficientes determinados por la solución de un sistema de ecuaciones lineales.
$R(r_j) = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{r^2}{4} \left[\ln\left(\frac{r}{2\pi}\right) + c - 1 \right] + \tau^2 \left[K_0\left(\frac{r}{\tau}\right) + c + \ln\left(\frac{r}{2\pi}\right) \right] \right\}$ Donde: R_j es la distancia entre el punto y la muestra. τ^2 es el parámetro de peso. K_0 es la función de Bessel modificada. C es una constante igual a 0,577215	$R(r_j) = \frac{1}{2\pi\varphi^2} \left[\ln\left(\frac{r\varphi}{2}\right) + c + K_0(r\varphi) \right]$ Donde: r es la distancia entre el punto y la muestra. φ^2 es el parámetro de peso. K_0 es la función de Bessel modificada. C es una constante igual a 0,577215

Fuente: Adaptado de ARCGIS for Desktop, 2013.

6. METODOLOGÍA

6.1 Árbol Metodológico

A continuación se muestra, en la Figura 7, un esquema donde se presenta la metodología utilizada.

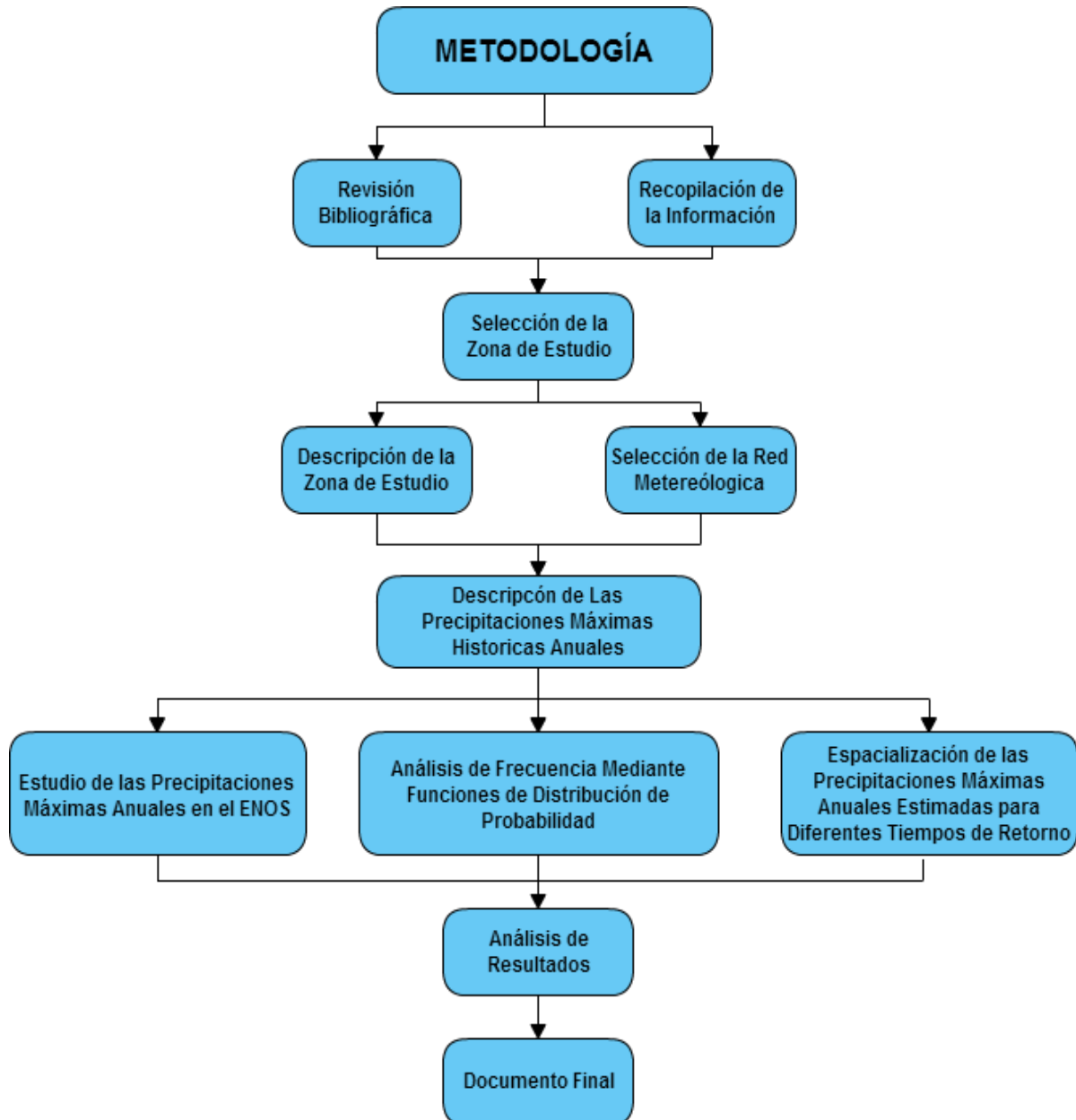


Figura 7. Árbol metodológico.

6.2 Zona de estudio

6.2.1 Selección de la zona de estudio

La cuenca del río Cauca está dividida en 4 grandes zonas: Alto Cauca, Valle Alto, Cauca Medio y Bajo Cauca (CVC y Universidad del Valle, 2007). La zona analizada en esta investigación corresponde al Alto Cauca y Valle Alto, la cual comprende desde el nacimiento del río en el páramo de Sotará y parte de su recorrido hasta llegar al municipio de La Virginia en Risaralda. Es importante resaltar que en esta zona hay un fuerte desarrollo del sector industrial y del sector agrícola tecnificado, goza de una infraestructura vial muy buena y de construcciones hidráulicas y civiles importantes, además es una plataforma exportadora hacia los países del pacífico americano. En la Figura 8 se presenta la zona de estudio.

La información utilizada en este estudio se tomó del proyecto “Construcción del modelo conceptual para la restauración del corredor de conservación y uso sostenible del sistema río Cauca en su valle alto” realizado por la CVC con el apoyo de los países bajos, dentro del cual el Grupo IREHISA en los años 2013 y 2014 realizó un análisis hidrológico y del trabajo de grado titulado “Análisis de frecuencia de precipitaciones máximas diarias en la cuenca alta del Río Cauca, utilizando distribuciones de probabilidad” elaborado por Gaviria y Rodríguez (2014).

6.2.2 Descripción general de la zona de estudio

La cuenca hidrográfica del Río Cauca se destaca en el contexto nacional como un lugar estratégico, pues en ella se localizan la industria azucarera, buena parte de la zona cafetera, las zonas de desarrollo minero y agropecuario de Antioquia y el Bajo Cauca, un sector significativo de la industria manufacturera del Occidente colombiano, dos de las ciudades más pobladas del país y tres de las consideradas intermedias, permitiendo contabilizar fácilmente cerca de unos 10'000.000 de habitantes, lo cual representa aproximadamente el 25 % de la población total del país (CVC, 2001). El río Cauca nace cerca del páramo de Sotará y desemboca en el Brazo de Ioba, en el río Magdalena, en el departamento de Bolívar. Tiene una longitud de 1.204 Km y un área de drenaje de 59.074 Km² que representa el 5% del total del territorio nacional (CVC y Universidad del Valle, 2007).

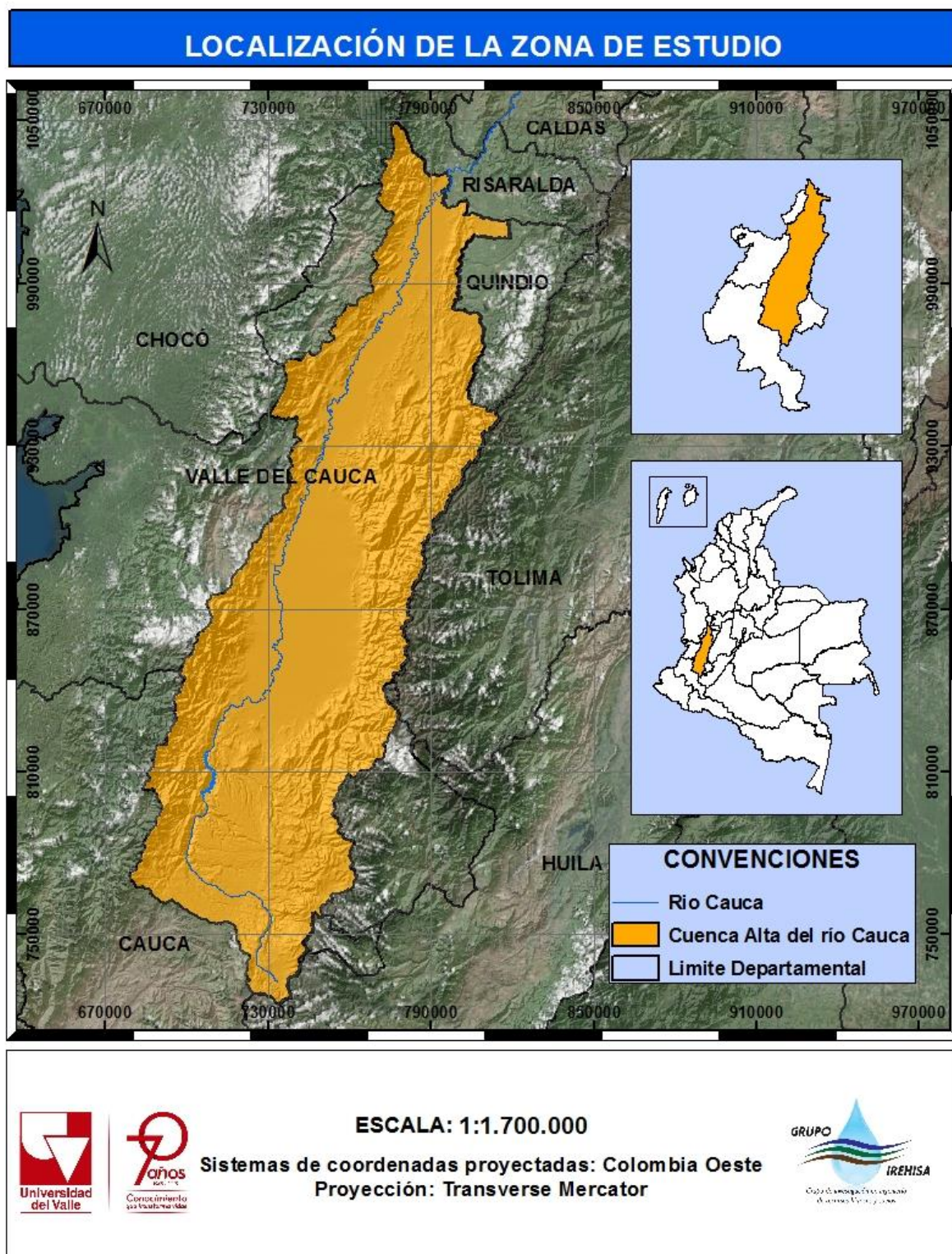


Figura 8. Ubicación de la cuenca hidrográfica del río Cauca en su valle alto.

Elaboración Propia.

Fuente: World Imagery map server - ESRI

Desde el punto de vista geológico y geográfico, el río Cauca en su valle alto se localiza en un valle interandino de suelos fértiles, producto de sedimentos aluviales depositados desde el inicio del período geológico del cuaternario, sobre una extensión cercana a los 214 Km de longitud y 20 Km de ancho, con un área que abarca 440.000 ha, plano y nivelado; se sitúa entre los 900 y los 1.000 msnm, en un piso térmico cálido-seco, con vegetación de bosque subandino. Las características fisiográficas, el clima y la fertilidad de los suelos favorecen su utilización para el desarrollo económico, centrado principalmente en la agroindustria de la caña de azúcar, con cerca de 200.000 ha cultivadas (CVC y Universidad del Valle, 2007).

La zona analizada en esta investigación corresponde al Alto Cauca y Valle Alto, la cual comprende desde el nacimiento del río en el páramo de Sotará y parte de su recorrido hasta llegar al municipio de La Virginia en Risaralda. En un piso térmico cálido-seco, con vegetación de bosque subandino, temperaturas superiores a los 24 °C y un promedio de lluvias de 1.300 mm al año.

El río Cauca en su valle alto recorre un trayecto de unos 425 Km entre las poblaciones de Timba y La Virginia (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca y Universidad del Valle, 2007). Aquí confluyen cerca de 39 tributarios que incrementan hasta tres veces el caudal medio del río, y en la mayor parte de este tramo el río puede ser aprovechado para la navegación. A su paso por el norte del departamento del Cauca y en la totalidad del departamento del valle del Cauca, el río Cauca es de tipo aluvial, se caracteriza por su forma meandriforme y discurre sobre un valle conformado por los sedimentos transportados y depositados en millones de años por acción hidráulica y morfológica de su actividad natural (CVC y Universidad del Valle, 2007).

6.3 Selección de la Red Meteorológica.

La red meteorológica utilizada en este proyecto fue la misma seleccionada en el trabajo de grado titulado “Análisis de frecuencia de precipitaciones máximas diarias en la cuenca alta del Río Cauca, utilizando distribuciones de probabilidad”, dado que este estudio también fue realizado para la zona del Valle Alto del Río Cauca y se buscaba darle una continuación a lo que ellos encontraron en su investigación.

Gaviria y Rodríguez (2015) tuvieron en cuenta la evaluación de disponibilidad de datos de precipitaciones diarias de cada estación, mediante la vigencia de funcionamiento; así como sus áreas aledañas, tomando los siguientes factores: localización, fecha de instalación, años de registro y estado actual de funcionamiento. Con esta información se definió el período

de registro en el que se trabajó que fue entre los años 1965 a 2011 y en un inicio se contó con 108 estaciones de la CVC.

Compararon la longitud de la serie de tiempo y el porcentaje de datos faltantes de las estaciones, determinando que 20 de ellas presentan períodos de registro muy cortos o presentaban valores de datos faltantes mayores al 20%, dejando para el análisis 88 estaciones. Después seleccionaron las estaciones que presentan como mínimo 9 valores de los años La Niña, consolidando una base de datos de 55 estaciones que fueron las utilizadas para la realización de este trabajo. En la Tabla 4 se presentan las estaciones escogidas para el análisis, así como el municipio y la cuenca a la que pertenecen, la entidad que las maneja y la altitud en la que se encuentran. En la Figura 9 se presenta la distribución espacial de las 55 estaciones.

Tabla 4. Información básica de las 55 estaciones seleccionadas.

ESTACIÓN	CUENCA	MUNICIPIO	ENTIDAD	ALTITUD (MSNM)
La Selva	Amaime	Palmira	CVC	3415
La Ceja	Amaime	El Cerrito	CVC	3052
La Gitana	Tuluá	Tuluá	CVC	2783
Bolo Blanco	Bolo	Pradera	CVC	2410
Coconuco	Alto Cauca	Puracé	CVC	2400
Los Alpes	Desbaratado	Florida	CVC	2380
El Diluvio	Guadalajara	Buga	CVC	2360
La Soledad	Fraile	Florida	CVC	2160
Peña Mona	Jamundí	Jamundí	CVC	2100
La Diana	Fraile	Florida	CVC	1960
La Teresita	Cali	Cali	CVC	1950
Brasilía	Cali	Cali	CVC	1864
Monteloro	Tuluá	Tuluá	CVC	1861
Piendamó	Alto Cauca	Piendamó	IDEAM	180
San Pablo	Cali	Cali	CVC	1794
Austria	Amaime	Palmira	CVC	1750
El Tambo	Alto Cauca	El Tambo	IDEAM	1740
El Topacio	Jamundí	Cali	CVC	1676
La Irlanda	Bugalagrande	Sevilla	CVC	1663
Dosquebradas	Guadalajara	Buga	CVC	1650
La Primavera	Guadalajara	Buga	CVC	1644
San Antonio	Jamundí	Jamundí	CVC	1567
Venus	Morales	Tuluá	CVC	1560
Villa Colombia	Claro	Jamundí	CVC	1505
El Trapiche	El Palo	Caloto	CVC	1500
El Caney	Mediacanoa	Yotoco	CVC	1433
El Castillo	Zabaletas	Cerrito	CVC	1424
La Magdalena	Guadalajara	Buga	CVC	1360
Mondomo	Alto Cauca	Santander De Quilichao	IDEAM	1360

ESTACIÓN	CUENCA	MUNICIPIO	ENTIDAD	ALTITUD (MSNM)
Los Cristales	Cañaveralajejo	Cali	CVC	1312
Dinde	Alto Cauca	Buenos Aires	IDEAM	1300
La Fonda	Meléndez	Cali	CVC	1298
San Emigdio	Amaime	Palmira	CVC	1272
Miravalle	Los Micos	La Victoria	CVC	1233
Las Brisas	Cañaveralajejo	Cali	CVC	1228
Angosturas	San Pedro	San Pedro	CVC	1221
El Placer	Bugalagrande	Bugalagrande	CVC	1097
Florida	Guachal	Florida	IDEAM	1078
Planta Río Cali	Cali	Cali	CVC	1070
Ing. Manuelita	Amaime	Palmira	IDEAM	1058
Cañaveralajejo	Cañaveralajejo	Cali	CVC	1056
Acueducto Tuluá	Tuluá	Tuluá	CVC	1014
El Vesubio	R.U.T.	Toro	CVC	990
Vijes	Vijes	Vijes	CVC	990
La Balsa	Timba	Buenos Aires	CVC	986
Univalle	Meléndez	Cali	IDEAM	985
Ing La Quinta	Fraile	Candelaria	CVC	980
C La Unión	R.U.T.	La Unión	IDEAM	954
El Palacio	Jamundí	Cali	CVC	950
Juanchito	Cauca	Candelaria	CVC	948
Bugalagrande	Bugalagrande	Bugalagrande	CVC	942
Garzonero	Mediacanoa	Yotoco	CVC	942
Pto Molina	R.U.T.	Obando	CVC	939
Zaragoza	Cauca	Cartago	CVC	925
La Victoria	R.U.T.	La Victoria	CVC	901

6.4 Organización de las series de precipitaciones máximas

Se realizó una suma móvil que consiste en tomar los datos diarios de precipitación e ir sumándolos consecutivamente, para obtener el valor correspondiente a la precipitación para cada duración; es decir 48 y 72 horas, 5,7,15 y 30 días. Para el caso de la suma móvil para dos días consecutivos, se tomaron dos valores seguidos de la serie de datos diarios de precipitación y se sumaron consecutivamente.

Para esta investigación se escogió el máximo valor de precipitación por año hidrológico, que inicia el 01 de Junio del año i y finaliza el 31 de Mayo del año $i + 1$ para el caso de Colombia.

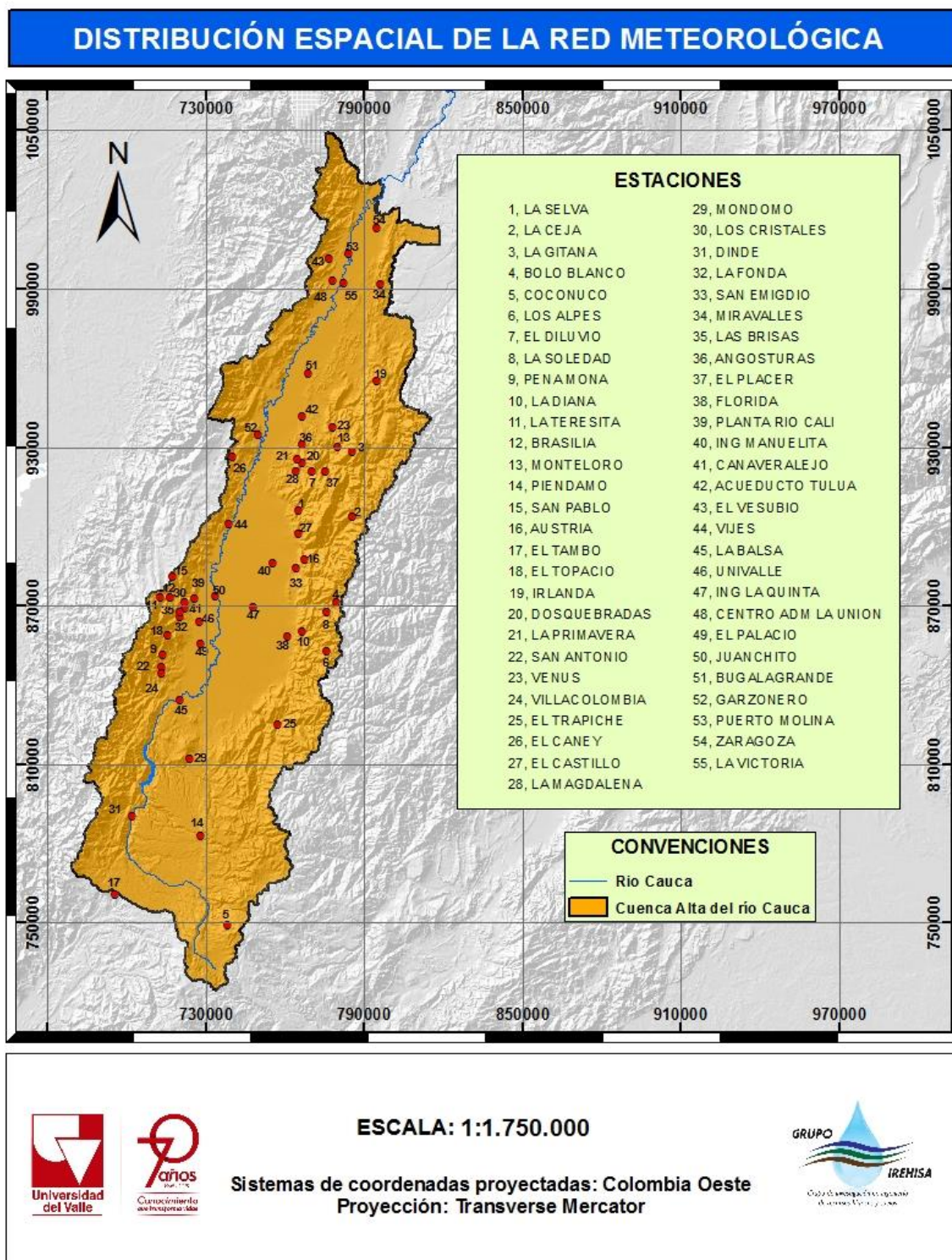


Figura 9. Distribución espacial de la red meteorológica.
 Elaboración Propia.

6.5 Descripción de las series de precipitaciones máximas

Esta parte de la investigación se dividió en dos: una asociada a la descripción de las series de precipitaciones anuales máximas para cada día consecutivo, teniendo en cuenta la variación espacial de los datos y la otra asociada a una descripción de las precipitaciones máximas anuales de 2 hasta 30 días consecutivos, con las que se buscaba definir para cada estación en qué fase del ENOS o No ENOS se presentaron las precipitaciones máximas históricas.

6.5.1 Estudio de las series de precipitaciones máximas por número de días consecutivos

Este estudio se efectuó a partir de las 48 horas, dado que Gaviria y Rodríguez (2014), realizaron el análisis de las series de precipitaciones máximas para 24 horas y lo que se busca es darle continuidad al trabajo desarrollado por ellos, para brindar información más completa del comportamiento de las precipitaciones máximas en la cuenca alta del río Cauca para futuras investigaciones.

Se tomaron los valores máximos históricos de precipitación y se procedió a identificar la estación, la fecha y los días exactos en los que ocurrió el evento; Posteriormente se tomaron los valores diarios y acumulados de precipitación que conforman el valor máximo histórico y se graficaron en un histograma para observar el comportamiento diario.

Se tomaron las series de datos de precipitaciones máximas para 48 horas y se identificó cual fue el valor máximo para los períodos estudiados (1965 a 2011) de cada una de las estaciones. Con los valores máximos se procedió a efectuar un histograma para observar el comportamiento y mapas donde se presenta la distribución espacial de las precipitaciones máximas anuales; cabe resaltar que dichos valores ocurren en diferentes fechas y que lo que se busca con los mapas es ubicar visualmente las zonas de la cuenca que presentan los focos más altos de precipitación. Además se calculó el valor máximo, mínimo y algunos estadísticos básicos como el promedio, desviación estándar y coeficiente de variación para los máximos valores de cada una de estaciones. Lo anterior también se realizó para las series de precipitaciones máximas para 72 horas y 5, 7, 15 y 30 días.

6.5.2 Estudio de las precipitaciones máximas anuales en el ENOS

Se tomaron en un periodo de 1965 – 2011 las series de precipitaciones máximas de cada una de las estaciones para los tiempos de 2 a 30 días consecutivos. Posteriormente se clasificaron tres subseries de cada una las series anteriormente formadas, las cuales se componen por los datos de precipitaciones máximas anuales que se generaron en los años hidrológicos asociados a las fases fría y cálida del ENOS y a la Fase Normal, esta última corresponde a los años en los que no se presenta ninguna de las fases extremas del ENOS. Esta división se basa en un consenso de la clasificación de las diferentes fases del ENOS según los siguientes índices: Índice Oceánico del Niño (ONI), Índice Multivariado del ENOS (MEI) y Índice de Oscilación del Sur (SOI). Dicho consenso se presenta en la Tabla 5 propuesta por el IDEAM (Bedoya, Contreras, y Ruiz, 2010).

Tabla 5. Consenso para la clasificación de los años ENOS y No ENOS.

El Niño			La Niña			Normal o No ENOS	
Débil	Moderado	Fuerte	Débil	Moderado	Fuerte		
1963-64	1951-52	1965-66	1954-55	1950-51	1955-56	1952-53	1953-54
1968-69	1957-58	1972-73	1956-57	1970-71	1973-74	1958-59	1959-60
1969-70	1977-78	1982-83	1962-63	1998-99	1975-76	1960-61	1961-62
1976-77	1987-88	1991-92	1964-65	2000-01	1988-89	1966-67	1978-79
1986-87	1994-95	1997-98	1967-68	2007-08	2010-11	1979-80	1980-81
1992-93	2002-03	1971-72				1981-82	1983-84
2004-05	2009-10	1974-75				1985-86	1989-90
2006-07	1984-85					1990-91	1993-94
1995-96						1996-97	2001-02
1999-00						2003-04	2005-06
2008-09							

Fuente: Adaptado de la tabla de la NOAA (2013) por Bedoya, Contreras & Ruiz, (2010).

Con las subseries de La Niña, El Niño y No ENOS se procedió a determinar los valores máximos de cada una. De esta manera se determinó para cada estación según el número de días consecutivos en qué fase se presentó el mayor valor de precipitación. Luego se calcularon los porcentajes asociados al número de estaciones que presentan las precipitaciones máximas en cada una de las 3 fases.

6.6 Análisis de Frecuencia

Este análisis de frecuencia se realizó para los Tr de 5, 20 y 50 años y se desarrolló a partir de las series de precipitaciones máximas consecutivas de 48 y 72 horas, 5, 7, 15 y 30 días para cada uno de los años del período de análisis. En este caso el período de trabajo fue el año hidrológico.

Para la realización del AF se procedió inicialmente a utilizar el método empírico, en particular la distribución de Weibull, ya que es una distribución de probabilidad continua muy usada en probabilidad y estadísticas avanzadas (Coras, P. M., Arteaga, R., Vázquez, M. 2005), dicha probabilidad se determinó con las ecuaciones 7 y 8.

Las funciones de distribución de probabilidad estudiadas fueron Gumbel, Log-Normal y Log-Pearson III. El AF se desarrolló mediante el uso hojas de cálculo utilizando factores de frecuencia, que para el caso de la distribución Gumbel o Valor Extremo Tipo I se utilizó la ecuación 13, el factor de frecuencia para la distribución LnNormal se utilizaron las ecuaciones 14 y 15 y para el factor de frecuencia de la distribución Log Pearson III se utilizaron en el siguiente orden las ecuaciones 15, 14, 16, 17 y 18; en el numeral 5.2.13.3 de este mismo trabajo se detalla cuáles son los pasos a realizar.

6.7 Prueba de bondad de Ajuste

Para la prueba de bondad de ajuste se utilizó el Error Estándar de Ajuste (EEA) descrito en la ecuación 20, ya que es la más utilizada al ser considerada como el método de mejor ajuste con respecto a las expresiones empíricas de probabilidad de no excedencia (Castro y Hoyos, 2004), su criterio de selección es que con respecto a la media muestral no debe ser mayor de un 15%.

6.8 Espacialización

A partir de las precipitaciones estimadas para cada tiempo de retorno respecto a los días consecutivos trabajados, se procedió a generar unos mapas con la distribución espacial de las precipitaciones máximas, tomando la función de distribución de mejor ajuste según cada estación. Esto nos permite analizar espacialmente el comportamiento de las precipitaciones y observar para cada tiempo de retorno cuales son las zonas más susceptibles a presentar precipitaciones máximas con valores de gran magnitud.

De acuerdo con Hofierka, Parajka, Mitsova y Mitsova (2002) en un estudio realizado para determinar el método más efectivo de interpolación para datos de precipitación de Suiza y Eslovenia. Se demostró que RST (*Regularized spline with tension*) es un método flexible y efectivo para la interpolación espacial de datos de precipitación promedio en términos diarios y anuales.

Resulta adecuada para aplicaciones que requieren interpolaciones para múltiples periodos de tiempo (días, horas) usando datos tomados en las mismas localizaciones, porque, tanto el ajuste de los parámetros y la computación de la grilla resultante se obtienen relativamente rápido.

A pesar de esto, cuando hay ausencia de datos la interpolación por *Spline* “tiende” a la tendencia: donde la superficie resultante tiene valores bajos, estos deberían ser más bajos; y donde los valores son altos deberían ser más altos. Esta es una característica conservadora que puede ser deseable en ciertas circunstancias: por ejemplo, cuando se busca definir un patrón espacial (donde se localizan los valores más altos o bajos). “Sin embargo, dicha auto-correlación espacial entre objetos insuficientes y rebasamientos, es un indicador de que el patrón espacial de los cambios en la precipitación es bien representada por la superficie resultante: así en general los valores más bajo se localizan en las partes bajas de la superficie, y viceversa” (Hargrove, 2001).

Por lo anterior se define que el método de interpolación adecuado para esta investigación es el método de *Spline* con tensión.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Análisis de las Precipitaciones Máximas

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta un resumen de los alores históricos de precipitación máxima anual para dos o más días consecutivos en donde se observa que la estación Peña Mona registró los valores de precipitación máxima más altos en 48 y 72 horas, 5 y 7 días y para 15 y 30 días se presentaron en la estación Las Brisas.

Tabla 6. Resumen de la precipitación máxima histórica para dos o más días consecutivos.

ACUMULADOS	PRECIPITACIÓN MÁXIMA (mm)	FECHA	ESTACIÓN
48 Horas	293	19-11-67	Peña Mona
72 Horas	385	20-11-67	Peña Mona
5 Días	492	23-11-88	Peña Mona
7 Días	656	25-11-88	Peña Mona
15 Días	1177	23-12-66	Las Brisas
30 Días	1893	23-12-66	Las Brisas

A continuación en las Figura 10, Figura 11, Figura 12 y Figura 13 se presentan las precipitaciones diarias y acumuladas para los eventos en 48 y 72 horas, 5, 7, 15 y 30 días.

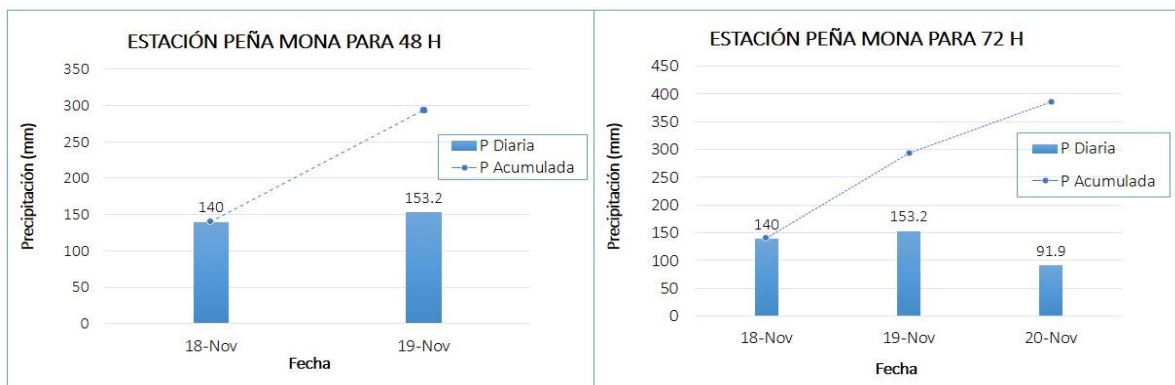


Figura 10. Precipitaciones diarias del evento en 48 y 72 horas.

Al momento de analizar los eventos en 48 y 72 horas en la estación Peña Mona se puede evidenciar que estos ocurrieron el mismo año, el mismo mes y por los mismos días, es decir entre el 18 y 20 de noviembre de 1967. Se graficaron en barras las precipitaciones diarias que hacen parte de 48 y 72 horas y la precipitación acumulada en una línea (ver Figura 10).

Se observó que las precipitaciones diarias reportadas para los dos primeros días presentan valores más altos que la del tercer día y al analizar las precipitaciones acumuladas para 48 horas se encontró que el valor de precipitación máxima fue de 293 mm y para 72 h de 385 mm por lo que se deduce que las precipitaciones máximas consecutivas para 48 horas generan las de 72 horas.

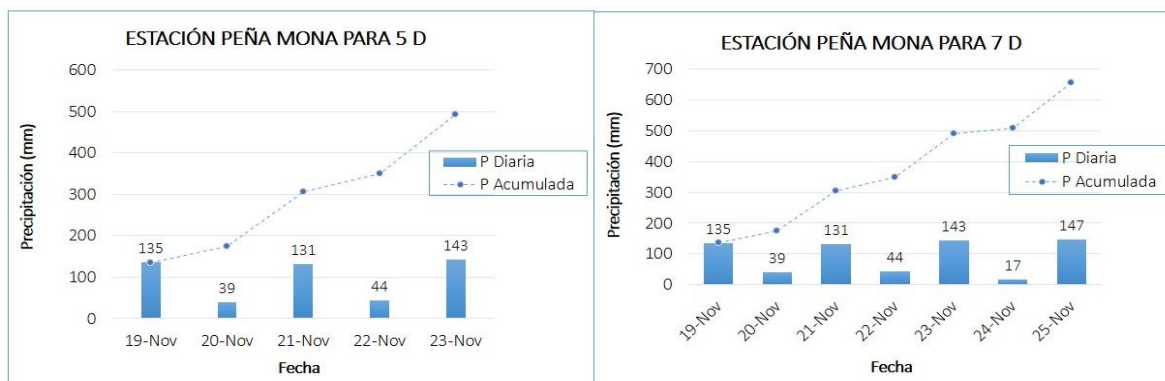


Figura 11. Precipitaciones diarias del evento en 5 y 7 días.

Las precipitaciones máximas para 5 y 7 días consecutivos, como ya se mencionó, tuvieron un valor máximo en la estación Peña Mona, ocurren en el mismo año y mes. Al revisar y graficar en barras las precipitaciones diarias para los días consecutivos estudiados y la precipitación acumulada en una línea (ver Figura 11), se observa que tienen un comportamiento muy fluctuante, es decir un día son altas y al otro día disminuyen, como ejemplo se tiene que para el 19 noviembre se presenta una precipitación de 135 mm y al otro día de 39 mm, este comportamiento se mantiene hasta el día de la máxima precipitación; lo que significa que las precipitaciones máximas consecutivas de duraciones mayores se generan a partir de las de menor duración.



Figura 12. Precipitaciones diarias del evento en 15 días.



Figura 13. Precipitaciones diarias del evento en 30 días.

Para 15 y 30 días los valores históricos de las precipitaciones máximas se presentaron no solo en la misma estación sino que también el mismo año, mes y día. Al revisar los reportes de precipitaciones (ver Figura 12 y Figura 13), se encontró que en todos los días consecutivos se registraron precipitaciones con valores significativamente altos, además fueron en la época de noviembre y diciembre que son uno de los meses históricamente más lluviosos en la región.

Cabe resaltar que los mayores valores de las precipitaciones máximas para dos o más días consecutivos ocurrieron en su mayoría al sur occidente de la cuenca y que estos se dieron en la segunda temporada de lluvias del país que es la más lluviosa.

Las precipitaciones máximas en 48 horas para la zona de estudio oscilan aproximadamente entre 100 mm y 295 mm y el valor de precipitación más alto se presentan en la estación Peña Mona con un valor de 293 mm. Esta estación hace parte de la cuenca del río Jamundí y se encuentra ubicada cerca a la barrera montañosa que crea la Cordillera Occidental. Otras de las estaciones que presentan altos valores son la estación las Brisas con 257 mm y Cañaveralejo con 253 mm, ubicadas en la zona sur de la cuenca (ver Figura 14).

En la distribución espacial de las precipitaciones máximas para 48 horas se observa que las mayores magnitudes se presentan en el sur de la cuenca, a la altura de los Farallones de Cali. También se presentan focos de precipitaciones con altas magnitudes en el departamento del Cauca y entre los municipios de Cerrito y Palmira en el Valle del Cauca. Las precipitaciones con menor magnitud se presentan en el noroccidente del Valle del Cauca (ver Figura 16).

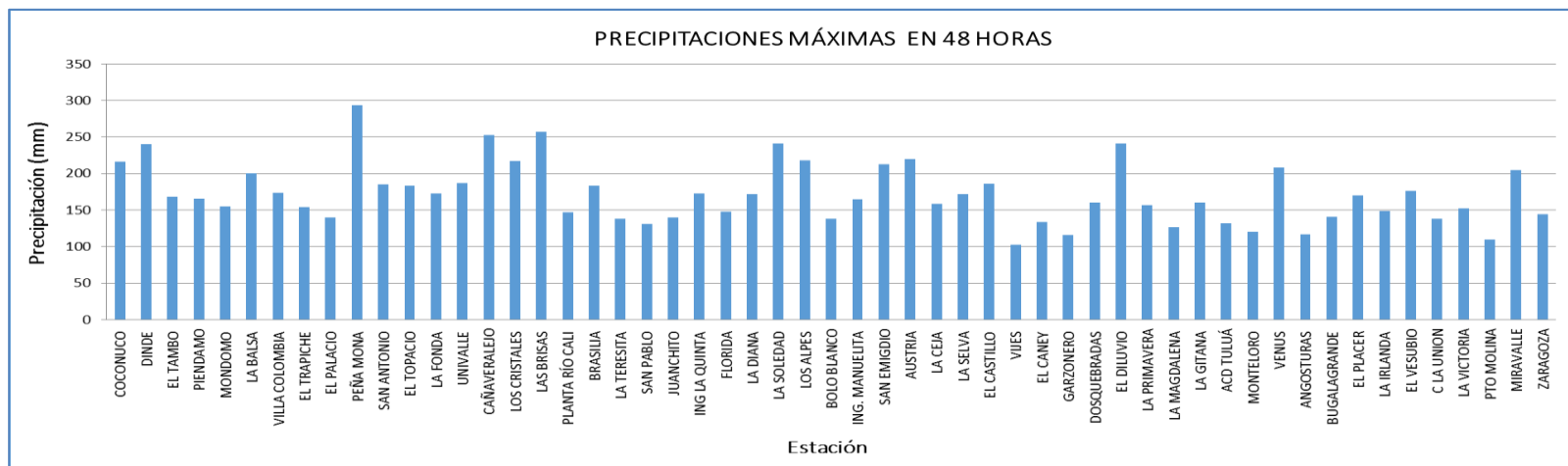


Figura 14. Valores de precipitación máxima en 48 h para las estaciones estudiadas.

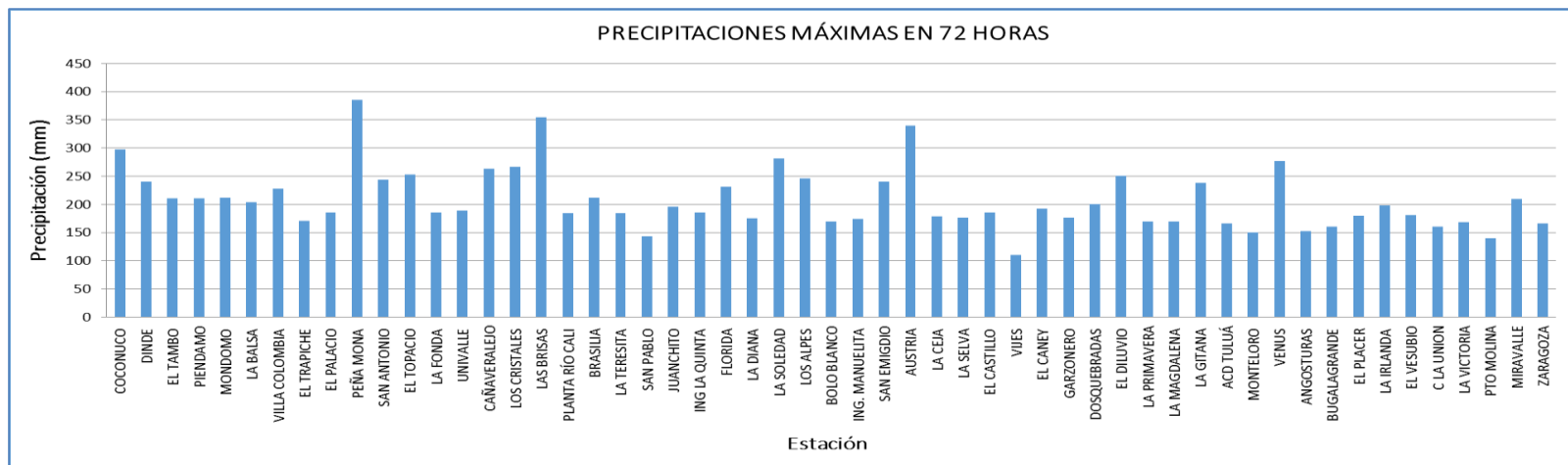


Figura 15. Valores de precipitación máxima en 72 h para las estaciones estudiadas.

PRECIPITACIONES MÁXIMAS HISTÓRICAS

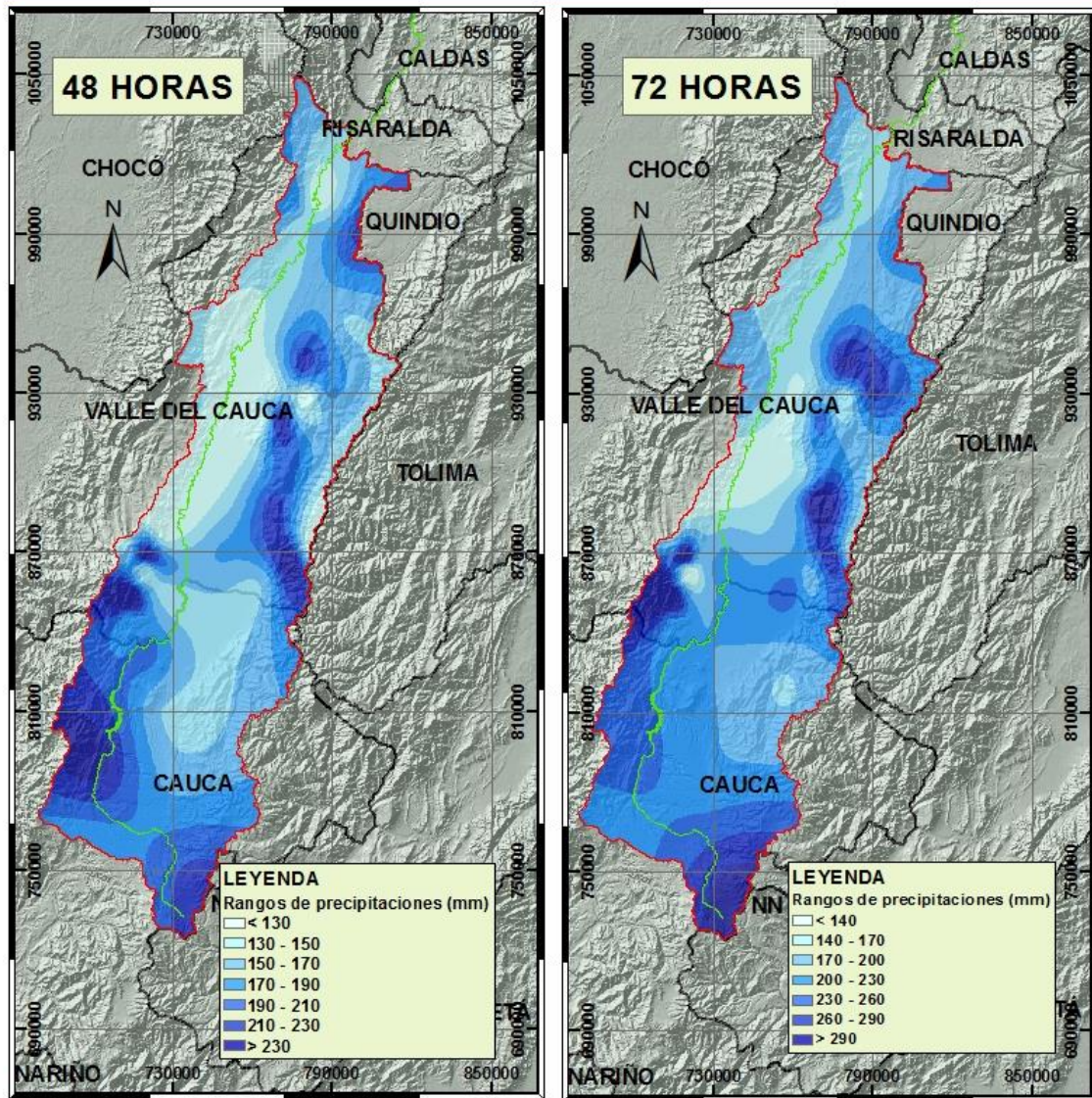


Figura 16. Distribución espacial de las precipitaciones máximas históricas para 48 y 72 horas.

En la Figura 15 se observan bien marcados los valores máximos de precipitación, donde la estación Peña Mona sigue reportando el mayor valor con 385 mm, seguida de las Brisas con 355 mm y Austria con 340 mm que se encuentran ubicadas en el municipio de Palmira. También se presenta un alto valor de precipitación máxima de 298 mm en la estación Coconuco ubicada en una de las zonas más alta del Cauca. Cabe resaltar que para 72 h las precipitaciones máximas oscilan entre 110 mm y 385 mm.

En la distribución espacial de las precipitaciones máximas para 72 horas que se presenta en la Figura 16 se observa que las precipitaciones máximas con los valores más altos se presentan en las mismas zonas que para 48 horas, pero se empieza a identificar otros focos en la parte este del departamento del Valle del Cauca. Las precipitaciones máximas en la mayor parte de la cuenca han aumentado y se encuentran entre 170 mm y 290 mm.

En la Figura 17 se observa que la precipitación máxima en 5 días se dio en la estación Peña Mona con 492 mm, seguida de las estaciones Brisas con 472 mm y Austria con 470 mm, que se encuentran ubicadas en los municipios de Jamundí y Cali la margen izquierdo del río Cauca y Palmira la margen derecho. También aparece la estación Coconuco (zona central del departamento del Cauca) con 396 mm, Venus con 381 mm y la Gitana con 380 mm al norte de la cuenca. Las precipitaciones oscilan entre 130 mm y 500 mm, pero la mayoría de las estaciones registran valores más bajos a 300 mm.

Para 5 días la distribución espacial presenta los valores más altos de precipitación máxima entre los municipios de Cali y Jamundí (sur del Valle del Cauca), en la zona central del departamento del Cauca y otro foco en la parte oriental del departamento del Valle del Cauca con límites cercanos al departamento de Quindío. Las precipitaciones máximas con las magnitudes más bajas se encuentran en el noroccidente de la cuenca (ver Figura 19).

Los valores máximos para 7 días se ven bien marcados en la Figura 18, donde la estación Peña Mona con 656 mm es la que reporta el mayor valor, seguida por la estación Austria con 620 mm, las Brisas con 604 mm ubicadas al sur del departamento del Valle del Cauca. Las precipitaciones máximas en la zona de estudio se encuentran entre 150 mm a 660 mm, sin embargo gran parte de las estaciones estudiadas reportan valores menores a 300 mm.

En la distribución espacial para 7 días se puede observar que los valores máximos se dieron en las mismas zonas que para 5 días y que los valores mínimos se encontraron entre 220 mm y 280 mm, estos se dieron en la parte central de la cuenca por los municipios de San Pedro, Buga, Guacarí, el Cerrito y en la parte occidental de la cuenca (ver Figura 19).

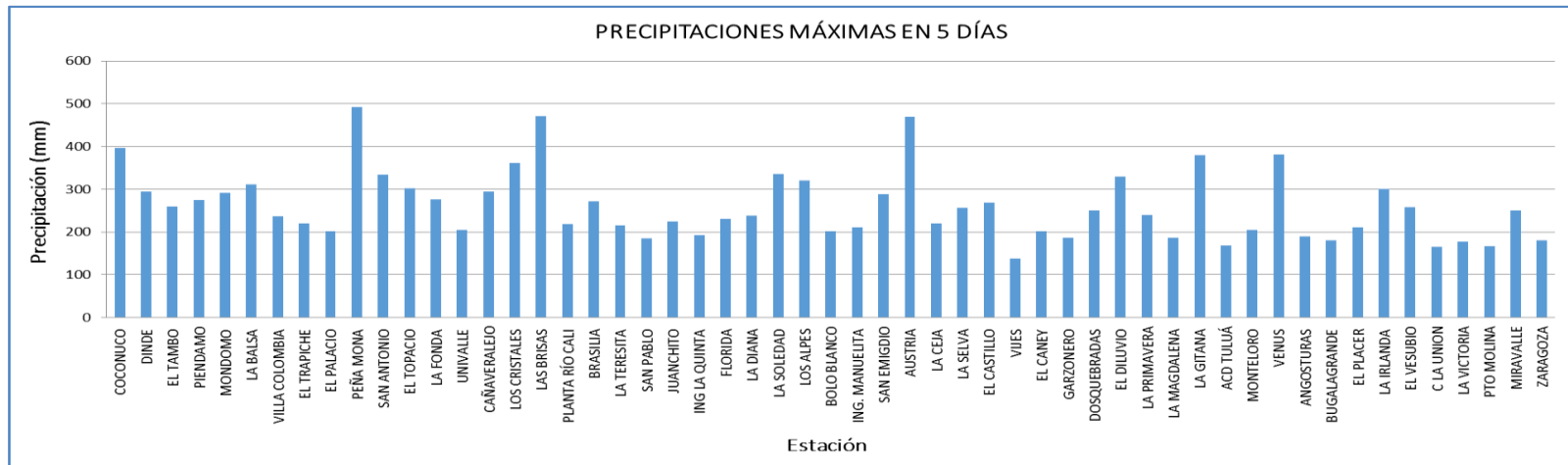


Figura 17. Valores de precipitación máxima en 5 d para las estaciones estudiadas.

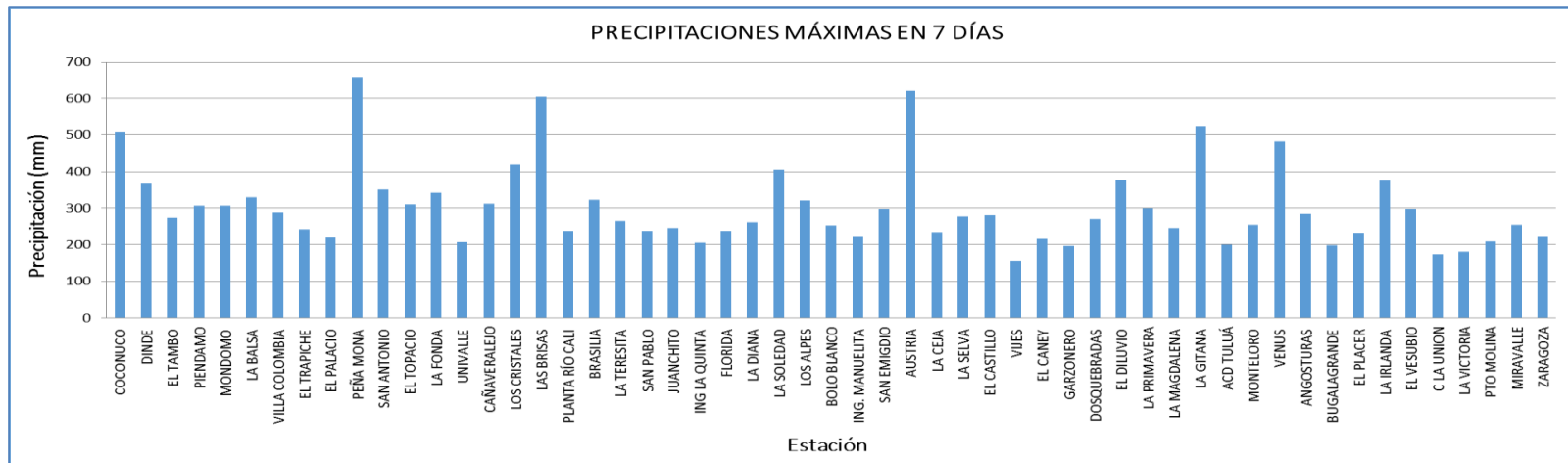


Figura 18. Valores de precipitación máxima en 7 d para las estaciones estudiadas.

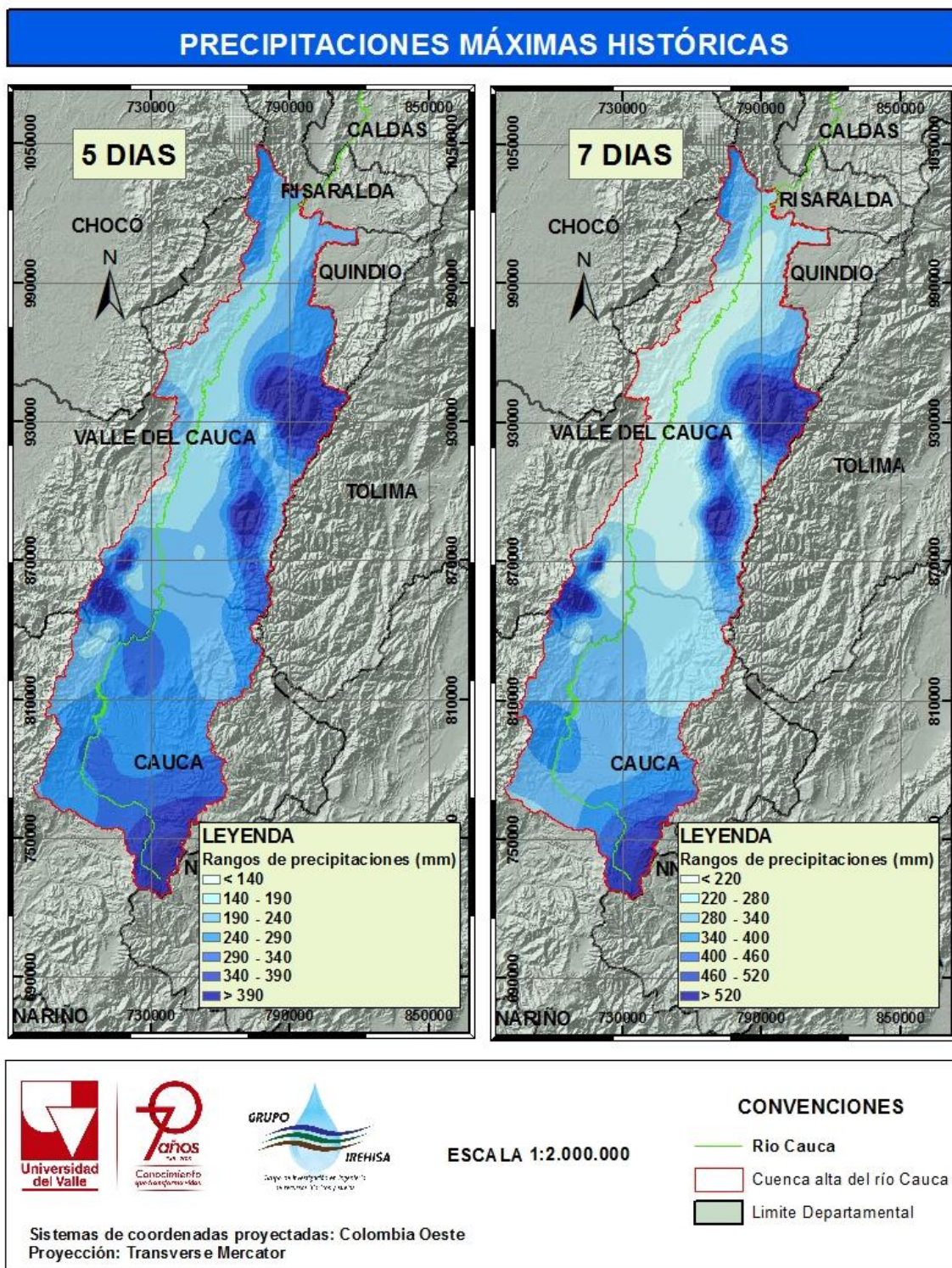


Figura 19. Distribución espacial de las precipitaciones máximas históricas para 5 y 7 días.
Elaboración Propia.

En la Figura 20 se observa una marcada diferencia entre 5 estaciones que reportan precipitaciones mayores a 780 mm y las demás con valores que no sobre pasan los 600 mm. Los máximos se presentan en las mismas estaciones que para los otros días consecutivos estudiados, esto se puede deber en gran parte a que los eventos anteriores influyen sobre las sumas móviles. La estación las Brisas con 1177 mm para los 15 d es la que reporta el mayor valor, superando a Peña Mona que es la que presentó los valores más altos en 48 y 72 horas y 5 y 7 días.

En la Figura 22 se presenta la distribución espacial para 15 días, donde se encuentra que las precipitaciones más altas se presentaron en la Cordillera Central, entre los municipios de Cali y Jamundí (sur departamento del Valle del Cauca), en la zona central del departamento del Cauca (suroriente de la cuenca) y en la parte oriental del departamento del Valle del Cauca con limites cercanos al departamento de Quindío. Las precipitaciones entre 300 mm y 400mm que fueron las más bajas se dieron en el noroccidente de la cuenca.

Las precipitaciones máximas en 30 días oscilan entre 279 mm y 1900 mm, aunque en términos generales las estaciones presentaron valores por debajo de 1000 mm (ver Figura 21). La estación las Brisas con 1893 mm reportó el mayor valor de precipitación máxima, seguida de Peña Mona con 1659 mm, la Gitana con 1643 mm y Coconuco con 1589 mm ubicadas en la zona sur de la cuenca del río Cauca y la estación Vijes con 279 mm ubicada al lado izquierdo de la margen del río Cauca reportó el menor valor.

Para 30 días en la distribución espacial las precipitaciones máximas más altas se dan en las mismas zonas que para 15 días, con la diferencia que en toda la cuenca se presenta un aumento de las precipitaciones, las cuales se encuentran por encima de 480 mm y en la zona central de la cuenca y al lado derecho del río Cauca se presenta un pequeño foco de precipitaciones máximas entre 280 mm y 480 mm que son las más bajas (ver Figura 22).

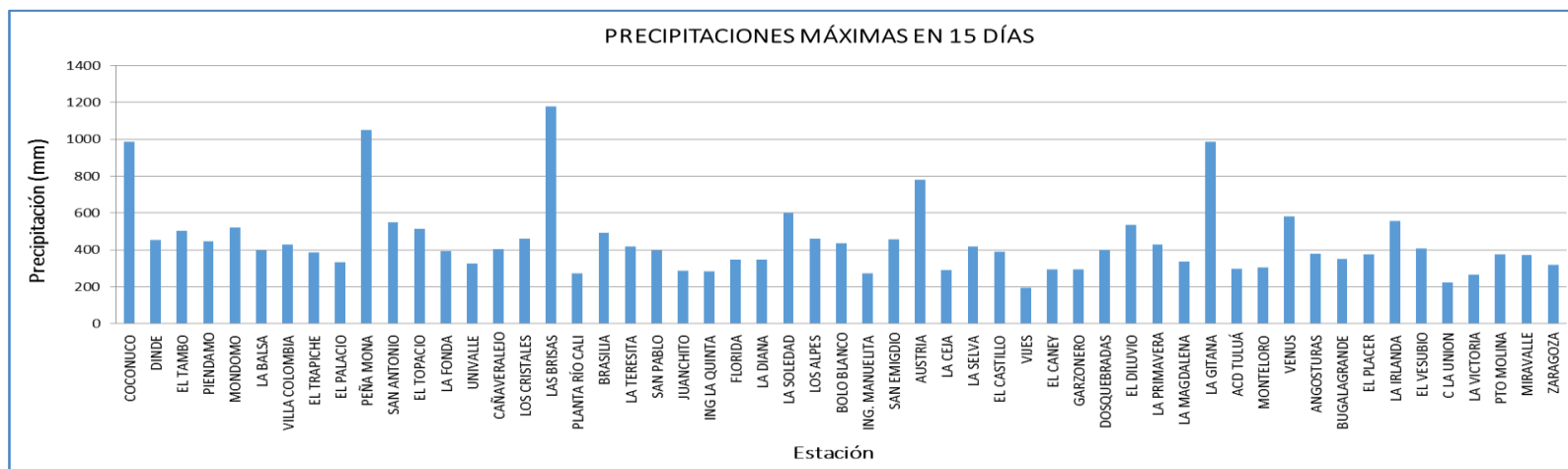


Figura 20. Valores de precipitación máxima en 15 d para las estaciones estudiadas.

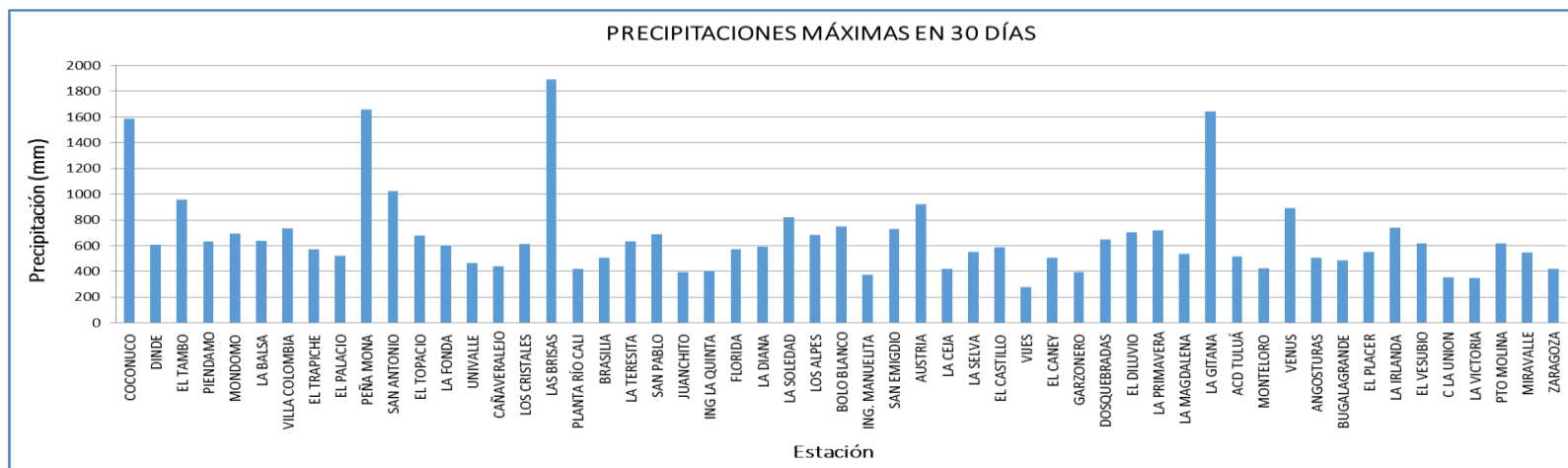


Figura 21. Valores de precipitación máxima en 30 d para las estaciones estudiadas

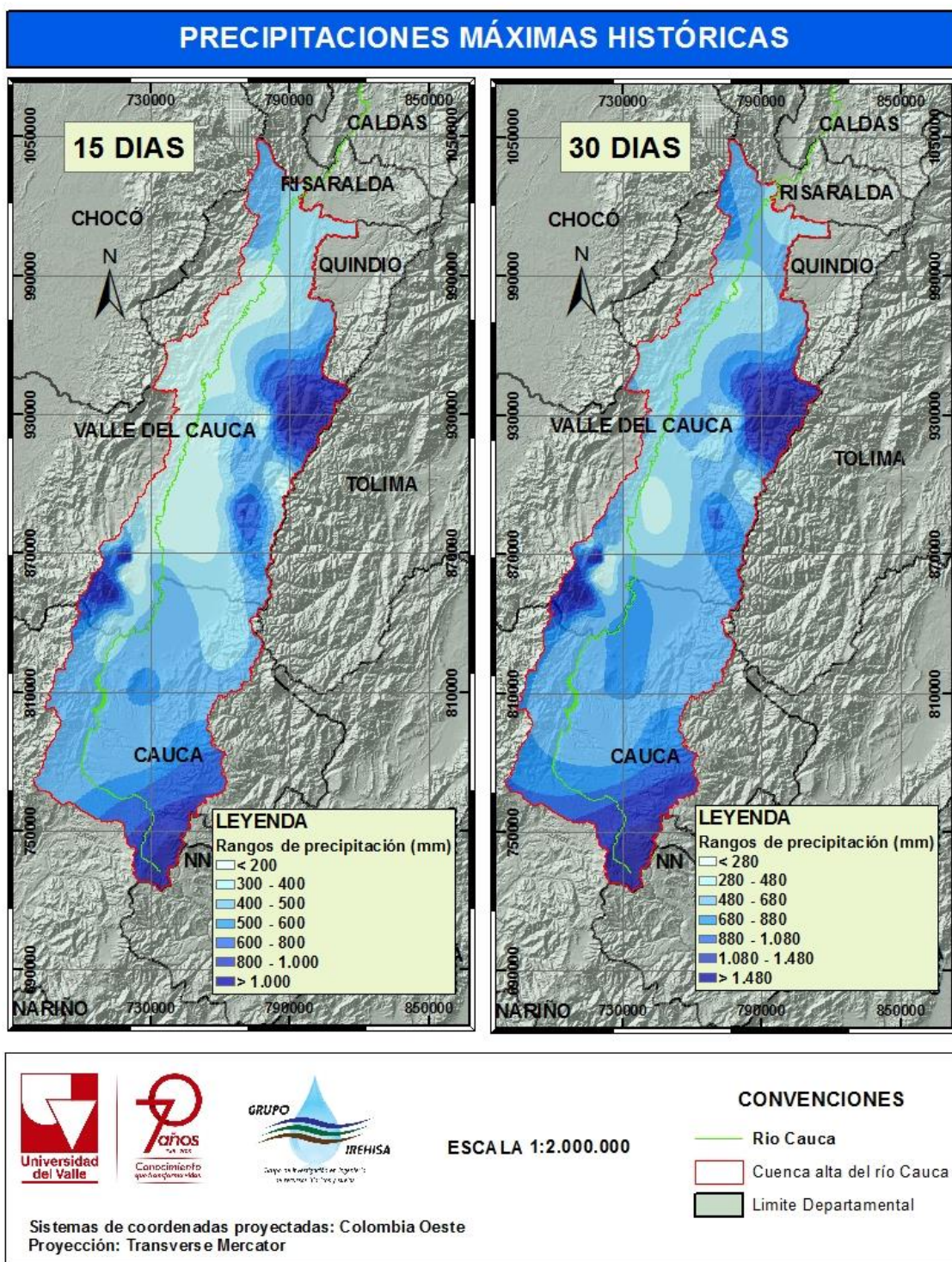


Figura 22. Distribución espacial de las precipitaciones máximas históricas para 15 y 30 días.
Elaboración Propia.

Se procedió a determinar el comportamiento de las series de máximas anuales expuestos en las gráficas anteriores, por medio del cálculo de los estadísticos básicos y se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Estadísticos básicos de la serie de máximas anuales para dos y más días consecutivos.

TEMPORALIDAD	MÁXIMO	MÍNIMOS	PROMEDIO	DESV. ESTÁNDAR	COEFICIENTE VARIACIÓN (%)
48 Horas	293	103	172	41	24
72 Horas	385	110	208	54	26
5 Días	492	138	260	80	31
7 Días	656	156	302	112	37
15 Días	1177	195	446	201	45
30 Días	1893	279	670	331	49

Para las temporalidades estudiadas los valores máximos oscilan entre 293 y 1893 mm y los mínimos entre 103 y 279 mm y la media se encuentra entre 172 a 670 mm (ver Tabla 7).

La desviación estándar para las diferentes temporalidades se encuentra entre 41 y 331, siendo mayor en 30 días por los valores altos de precipitación reportados. Si se compara la desviación estándar con respecto a la media se observa que para 48 h se tiene el valor de 41 que es el más pequeño y los otros valores se encuentran entre 54 a 331 que son los más altos lo que quiere decir que el promedio de diferencia entre la media y los datos es significativamente alto. El coeficiente de variación para las temporalidades estudiadas se encuentran en un rango de 24 al 49 %, siendo 30 días la temporalidad más variable con un valor de 49 % y la de 48 horas con 24 % la más homogénea, puesto que presenta el menor CV.

7.2 Estudio de las precipitaciones máximas anuales en El ENOS

El fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) es el evento climático de escala global que con mayor intensidad afecta la situación hidroclimática de Colombia, desde la escala mensual hasta la interanual (Poveda, 1998). Además, el análisis de la información histórica, indica que las alteraciones que se producen en el régimen de lluvias en Colombia son explicadas en buena parte, por la variabilidad climática interanual, relacionada con este fenómeno (Montealegre, 2007). Las fluctuaciones climáticas son de mucho interés tanto por la presencia de períodos secos como por los períodos de excesos de lluvias, inundaciones y crecientes. Ambas situaciones tienen implicaciones socio-económicas y ambientales importantes en Colombia (Poveda, 1998).

Se recuerda que el período histórico analizado en toda la investigación es 1965 - 2011. Se ha podido establecer claramente que la intensidad de los fenómenos El Niño y La Niña está en función directa con la magnitud de las anomalías registradas en la temperatura superficial y subsuperficial del océano y con el área cubierta por las mismas (Montealegre, 2007). Además, la señal del ENOS y las variables hidrológicas en Colombia (como en todas partes) no presentan una relación de uno a uno. Varios factores las producen: la intensidad, la amplitud y la duración de las fases del ENOS varían de evento a evento, además otros fenómenos influyen para modular la hidrología, a través de interacciones no lineales con el ENOS así como de las interacciones no lineales y de retroalimentación entre los fenómenos geofísicos que suceden en diferentes escalas de tiempo y la componente aleatoria de los mismos (Poveda y Mesa, 1996).

Las precipitaciones máximas históricas generadas en la cuenca de estudio se han presentado en alguna de las fases extremas del ENOS incluso en las temporadas no ENOS. Se reitera, que las series que se utilizaron como base para cada número de días consecutivos fueron divididas en 3 subseries, dos de ellas asociadas a las fases extremas del ENOS y la restante asociada a los años considerados No ENOS, división que se hizo teniendo en cuenta la tabla de la NOAA (2013) adaptada por Bedoya, Contreras & Ruiz, (2010). La Figura 23 muestra el número de estaciones y sus porcentajes asociados para cada temporalidad según las precipitaciones máximas históricas generadas en las fases del ENOS y en el No ENOS.

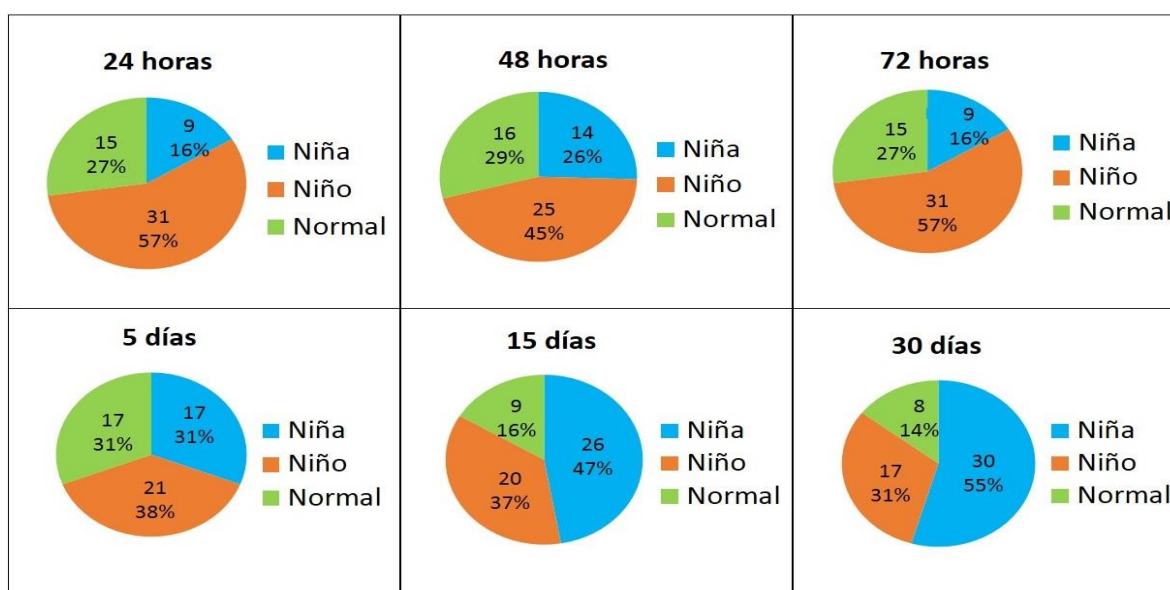


Figura 23. Precipitaciones máximas históricas en las fases extremas del ENOS y el No ENOS para dos o más días consecutivos.

El 45% de las estaciones seleccionadas para la zona de estudio, que equivale a 25 estaciones, presentan las precipitaciones máximas históricas en la fase cálida del ENOS para la temporalidad de trabajo de 48 horas consecutivas. De la misma manera para 72 horas el 57% (31 estaciones) presentan las precipitaciones máximas históricas en la misma fase cálida del ENOS. Esto da un indicio que no siempre la temporada de lluvias extremas máximas se presenta únicamente en la fase fría del ENOS como comúnmente se ha pensado. La profundidad de esta investigación no llegó hasta conocer el momento en el que ocurrió la precipitación histórica dentro de cada fase, es decir, que no se definió si la precipitación histórica ocurrió al inicio, en el intermedio, o al final de la fase en la que se presentó. Es posible que en las fases cálidas del ENOS, después de una temporada fuerte de sequía, se presenten precipitaciones intensas y de gran magnitud que generan lo que se encontró para estas temporalidades de estudio. Esto queda para futuras investigaciones.

Al aumentar el número de días consecutivos, se observa que para cada fase, el número de estaciones que presentan las precipitaciones máximas históricas es similar. Para el caso de 5 días consecutivos, el 31% (17 estaciones), presentan las precipitaciones máximas históricas en la fase fría del ENOS, mientras que el 38% (21 estaciones) se presentan en la fase cálida del ENOS. De manera similar ocurre para 7 días consecutivos, ya que 35% (19 estaciones), presentan las máximas históricas en la fase fría del ENOS, mientras que el 40% (22 estaciones) presentan las máximas en la fase cálida, es decir en El Niño.

Se observa que en las temporalidades de mayor número de días consecutivos, el número de estaciones que presentan las precipitaciones máximas históricas en la fase fría del ENOS aumentan. De esta manera, para 15 días consecutivos se observa que el 47% (26 estaciones), presentan las precipitaciones máximas históricas en la fase fría del ENOS. Además, para 30 días consecutivos, el número de estaciones que presentan las máximas históricas en la misma fase fría del ENOS aumenta a 30 estaciones (55%). Este aumento se genera debido a que en la fase fría del ENOS las precipitaciones aumentan en el tiempo de manera más homogénea, lo que da cuenta que la distribución de las precipitaciones históricas se extienden a toda la región.

Este análisis no define la fase del ENOS en la que es más propenso a presentarse las precipitaciones máximas, ya que solo se trabajó con las precipitaciones máximas históricas. Sin embargo, presenta un indicio a tener en cuenta para trabajar no solo con el valor máximo histórico, sino con un número definido de las precipitaciones de mayor valor. Es importante reiterar que cada evento asociado a una de las fases del ENOS tiene sus propias

particularidades en lo que a su génesis, desarrollo, efectos e impactos se refiere (Montealegre, 2007).

7.3 Análisis de frecuencia

El AF realizado se hizo con el fin de conocer la magnitud de los eventos máximos de precipitación con sus correspondientes Tr y probabilidad de ser igualado o excedido en la zona de la cuenca alta del Río Cauca.

Las tablas resumen con los tiempos de retorno, los resultados y los gráficos del AF para los días consecutivos estudiados de las 55 estaciones se presentan en los apéndices 3 y 4. Como se mencionó en la metodología el análisis del comportamiento de las precipitaciones máximas para tiempos de retornos de 5, 20 y 50 años se realizó de forma temporal para 48 y 72 horas, 5, 7, 15 y 30 días; para cada uno de estos días consecutivos se tomó al azar una muestra de 3 estaciones ubicadas al sur del departamento del Valle del Cauca y entre las Cordilleras Occidental y Central, la cuales son: Bolo Blanco ubicada en la ribera oriental del río Cauca, Peña Mona y Planta Río Cali en la ribera occidental.

7.3.1 Análisis de frecuencia para precipitaciones máximas en 48 horas

En la Figura 24 se presenta la distribución del AF de las funciones Gumbel, LogNormal y LogPearson III para 48 horas en la estación Bolo Blanco, Peña Mona y Planta Río Cali.

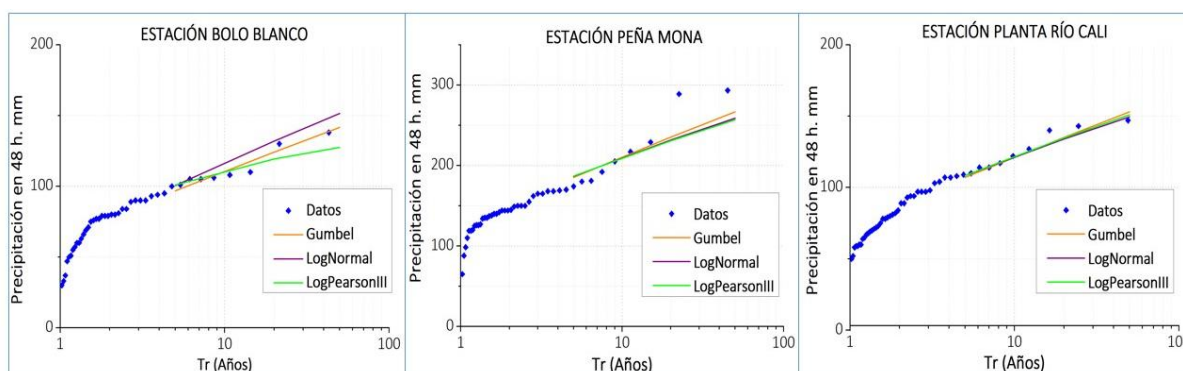


Figura 24. Período de retorno de Gumbel, LogNormal y LogPearson tipo III de precipitaciones máximas en 48 h.

Bolo Blanco: la función de distribución que más se ajusta a los datos de probabilidad empírica es la LogPearson tipo III, aunque para los Tr mayores de 20 años los datos no se ajustan a la función. Los valores obtenidos para la función LogNormal presentan el

comportamiento más alejado al de los datos de probabilidad empírica (ver Figura 24). En esta estación la función de mejor ajuste numéricamente fue LogPearson tipo III y La precipitación máxima para el Tr de 5 años en la estación es de 101 mm, para el Tr de 20 años es de 119 mm y para 50 años es de 127 mm (ver Tabla 8).

Peña Mona: los datos de probabilidad empírica tienen un comportamiento variado y sus valores no difieren en gran cantidad hasta Tr menores o iguales a 20 años y para los mayores a este valor se presenta un aumento significativamente grande lo que se puede relacionar con los altos valores de precipitación máxima registrados en esta estación (ver Figura 24). Gráficamente ninguna de las funciones de distribución se ajusta a los datos, aunque numéricamente la de mejor ajuste fue Gumbel y el valor de la precipitación máxima para el Tr de 5 años en la estación es de 185 mm, para el Tr de 20 años es de 235 mm y el Tr de 50 años es de 267 mm (ver Tabla 8).

Planta Río Cali: las tres funciones estudiadas presenta un comportamiento que tiende a los mismos valores de precipitación máxima para cada Tr; la función LogPearson tipo III es la que presenta mejor ajuste para los datos de probabilidad empírica (ver Figura 24), esta misma función fue la de mejor ajuste numéricamente y el valor de precipitación máxima para el Tr de 5 años es de 108 mm, para el Tr de 20 años es de 135 mm y el Tr de 50 años es de 151 mm (ver Tabla 8).

Comportamiento general de la cuenca del río Cauca en su valle alto para 48 horas

Los valores de precipitación máxima en 48 horas para los tiempos de retorno de 5, 20 y 50 años de la función de mejor ajuste de las estaciones La Gitana, Bolo Blanco, Peña Mona, Planta Río Cali, Cañaveralejo, Vijes e Ingenio La Quinta se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Valores de precipitación máxima en 48 horas para Tr 5, 20 y 50 años.

ESTACIÓN	FUNCIÓN DE MEJOR AJUSTE	Tr		
		5	20	50
La Gitana	LogPearson III	103	135	155
Bolo Blanco	LogPearson III	101	119	127
Peña Mona	Gumbel	185	235	267
Planta Río Cali	LogPearsonIII	108	135	151
Cañaveralejo	LogPearsonIII	121	169	205
Vijes	LogPearsonIII	76	86	89
Ingenio La Quinta	Gumbel	102	126	142

Los valores de precipitación máxima para Tr de 5 años para las 55 estaciones se encuentran entre 76 mm y 185 mm, para Tr de 20 años de 86 mm a 235 mm y para Tr de 50 años de 89 mm a 267 mm (ver apéndice 4). Las magnitudes más bajas de Tr para 48 horas se presentan en la estación Vijes ubicada al sur del Valle del Cauca, al lado izquierdo de la margen del río Cauca y los más altos en Peña Mona, esto era de esperarse, ya que es donde se presentan los valores de precipitación más altos de toda la cuenca (ver Tabla 8).

7.3.2 Análisis de frecuencia para precipitaciones máximas en 72 horas

En la Figura 25 se muestra la distribución del AF de las funciones Gumbel, LogNormal y LogPearson III para 72 horas en la estación Bolo Blanco, Peña Mona y Planta Río Cali.

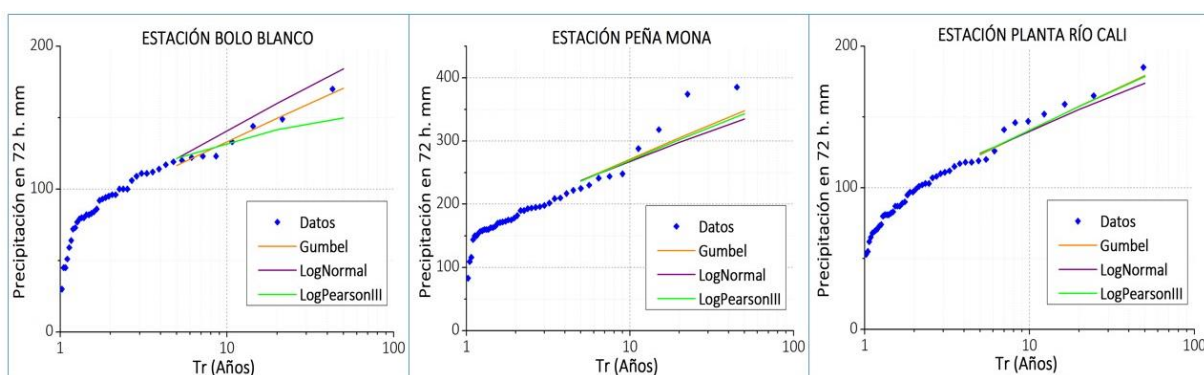


Figura 25. Período de retorno de Gumbel, LogNormal y LogPearson tipo III de precipitaciones máximas en 72 h.

Bolo Blanco: presenta un comportamiento variado en los datos de probabilidad empírica, en especial para los valores registrados para los Tr mayores a 10 años donde las magnitudes tienen aumentos más marcados. La función LogPearson tipo III es la que más se ajusta a los datos, aunque los tres últimos valores se ajustan más a la función Gumbel (ver Figura 25). Numéricamente la función de mejor ajuste fue LogPearson tipo III y el valor de precipitación máxima para el Tr de 5 años es de 122 mm, para el Tr de 20 años es de 142 mm y el Tr de 50 años es de 150 mm (ver Tabla 9).

Peña Mona: las funciones de distribución tiene un comportamiento similar, se podría decir que los valores de precipitación para los Tr menores de 10 años son casi iguales, por lo que las tres funciones pueden ser la de mejor ajuste para los datos de probabilidad empírica, para los valores mayores a este Tr la función que trata de seguir el comportamiento de los datos es la Gumbel, aunque sus valores no se ajusta del todo (Ver Figura 25). Numéricamente la función de mejor ajuste para la estación fue Gumbel y el valor de

precipitación máxima para el Tr de 5 años fue de 237 mm, para el Tr de 20 años de 305 mm y el Tr de 50 años de 348 mm (ver Tabla 9).

Planta Río Cali: las tres funciones estudiadas presenta un comportamiento similar hasta Tr de 10 años, después de este tiempo las funciones LogPearson tipo III y Gumbel registran valores de precipitación máxima para cada Tr casi iguales; estas dos funciones son las que más se ajustan a los datos de probabilidad empírica, pero debido a que su comportamiento es muy similar no se puede definir visualmente cuál de las dos es la de mejor ajuste (ver Figura 25). Numéricamente la función de mejor ajuste para esta estación fue Gumbel y el valor de precipitación máxima para el Tr de 5 años es de 123 mm, para el Tr de 20 años es de 158 mm y el Tr de 50 años es de 179 mm (ver Tabla 9).

Comportamiento general de la cuenca del río Cauca en su valle alto para 72 horas

Los valores de precipitación máxima en 72 horas para los tiempos de retorno de 5, 20 y 50 años de la función de mejor ajuste de las estaciones La Gitana, Bolo Blanco, Peña Mona, Planta Río Cali, Cañaveralejo, Vijes e Ingenio la Quinta se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Valores de precipitación máxima en 72 horas para Tr 5, 20 y 50 años.

ESTACIÓN	FUNCIÓN DE MEJOR AJUSTE	Tr		
		5	20	50
La Gitana	LogPearsonIII	132	185	226
Bolo Blanco	LogPearsonIII	122	142	150
Peña Mona	Gumbel	237	305	348
Planta Río Cali	Gumbel	123	158	179
Cañaveralejo	LogPearsonIII	135	183	217
Vijes	LogPearsonIII	83	94	98
Ingenio La Quinta	LogNormal	117	146	162

Los valores de precipitación máxima para Tr de 5 años para las 55 estaciones se encuentran entre 83 mm y 237 mm, para Tr de 20 años de 94 mm a 305 mm y para Tr de 50 años de 98 mm a 348 mm (ver apéndice 4). En la Tabla 9 se puede observar para 72 horas las magnitudes más bajas y altas de Tr se presentaron en las mismas estación que para 48 horas, las cuales fueron Vijes y Peña Mona.

7.3.3 Análisis de frecuencia para precipitaciones máximas en 5 días

En la Figura 26 se muestra la distribución del AF de las funciones Gumbel, LogNormal y LogPearson III para 5 días en la estación Bolo Blanco, Peña Mona y Planta Río Cali.

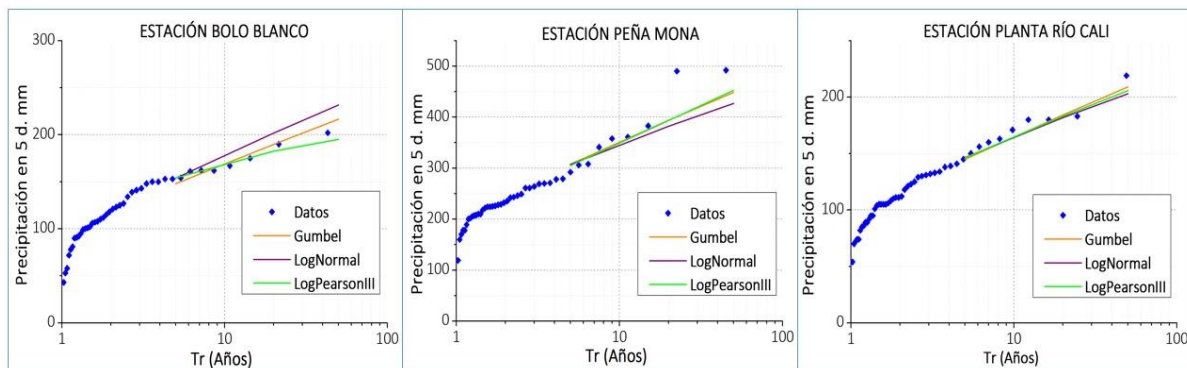


Figura 26. Período de retorno de Gumbel, LogNormal y LogPearson tipo III de precipitaciones máximas en 5 d.

Bolo Blanco: la función LogPearson tipo III es la que se ajusta mejor a los datos y las otras dos funciones los sobreestiman, en especial la LogNormal que reporta los mayores valores de precipitación máxima para cada Tr (ver Figura 26). Numéricamente la función de mejor ajuste para esta estación también fue la LogPearson tipo III y sus valores de precipitación máxima para el Tr de 5 años es de 154 mm, para el Tr de 20 años es de 183 mm y el Tr de 50 años es de 195 mm (ver Tabla 10).

Peña Mona: las funciones LogPearson tipo III y Gumbel tienden a los mismos valores en los Tr calculados menores a 20 años, después de este tiempo LogPearson tipo III es la que mejor se ajusta a los datos de probabilidad empírica y la Lognormal los subestima (ver Figura 26). Numéricamente la función de mejor ajuste también fue LogPearson III y el valor de precipitación máxima para el Tr de 5 años es de 305 mm, para el Tr de 20 años es de 393 mm y el Tr de 50 años es de 453 mm, valores que son los más altos de la zona para 5 días (ver Tabla 10).

Planta Río Cali: las tres funciones estudiadas presenta un comportamiento similar hasta Tr de 20 años, después de este tiempo la función Gumbel es la que más se ajusta a los datos de probabilidad empírica (ver Figura 26). Numéricamente la función de mejor ajuste para la estación también fue Gumbel y el valor de precipitación máxima para el Tr de 5 años es de 145 mm, para el Tr de 20 años es de 263 mm y el Tr de 50 años es de 304 mm (ver Tabla 10).

Comportamiento general de la cuenca del río Cauca en su valle alto para 5 días

Los valores de precipitación máxima en 5 días para los tiempos de retorno de 5, 20 y 50 años de la función de mejor ajuste de las estaciones La Gitana, Bolo Blanco, Peña Moná, Planta Río Cali, Cañaveralejo, Vijes e Ingenio la Quinta se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Valores de precipitación máxima en 5 días para Tr 5, 20 y 50 años.

ESTACIÓN	FUNCIÓN DE MEJOR AJUSTE	Tr		
		5	20	50
La Gitana	LogPearsonIII	178	267	341
Bolo Blanco	LogPearsonIII	154	183	195
Peña Moná	LogPearsonIII	305	393	453
Planta Río Cali	Gumbel	145	263	304
Cañaveralejo	LogPearsonIII	156	393	453
Vijes	LogNormal	100	179	211
Ingenio La Quinta	Gumbel	131	160	167

Los valores de precipitación máxima para Tr de 5 años se encuentran entre 100 mm y 305 mm, para Tr de 20 años de 160 mm a 393 mm y para Tr de 50 años de 167 mm a 453 mm (ver apéndice 4). Peña Moná es la estación que presenta en 5 días la mayor magnitud para los Tr de toda la cuenca y la estación Cañaveralejo reporta los mismos valores de Tr para 20 y 50 años que Peña Moná. Los valores más bajos para Tr de 5 años se dio en Vijes con 100 mm, para Tr de 20 y 50 años en la estación Ingenio la Quinta ubicado en el sur del departamento del Valle del Cauca y al lado derecho de la margen del río Cauca (ver Tabla 10).

7.3.4 Análisis de frecuencia para precipitaciones máximas en 7 días

En la Figura 27 se muestra la distribución del AF de las funciones Gumbel, LogNormal y LogPearson III para 7 días en la estación Bolo Blanco, Peña Moná (parte media) y Planta Río Cali (parte baja).

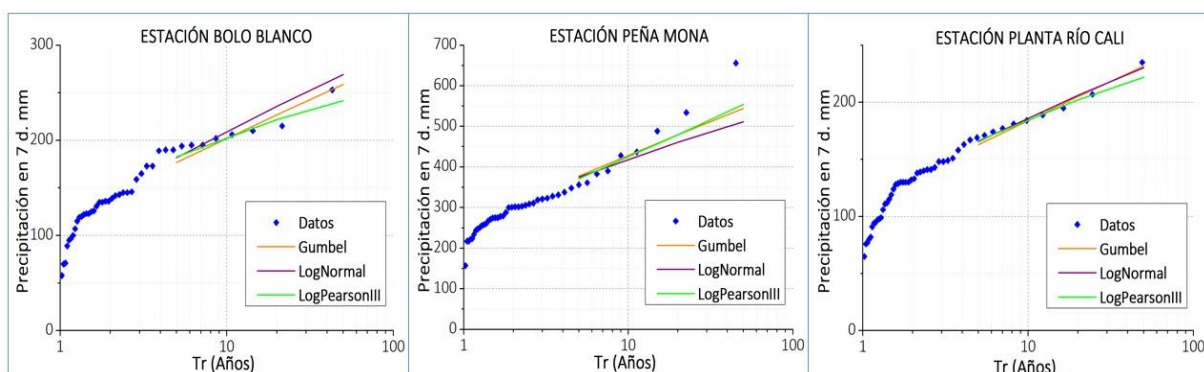


Figura 27. Período de retorno de Gumbel, LogNormal y LogPearson tipo III de precipitaciones máximas en 7 d.

Bolo Blanco: la función LogPearson tipo III es la que se ajusta mejor a los datos y las otras dos funciones los sobreestiman, en especial la LogNormal que reporta los mayores valores de precipitación máxima para cada Tr. Esta estación se comporta muy similar para la temporalidad de 72 horas que se analizó anteriormente, esto se puede deber a la gran influencia que tienen las precipitaciones máximas acumuladas (ver Figura 27). Numéricamente la función de mejor ajuste para esta estación fue la LogPearson tipo III y sus valores de precipitación máxima para el Tr de 5 años es de 183 mm, para el Tr de 20 años es de 222 mm y el Tr de 50 años es de 242 mm (ver Tabla 11).

Peña Mona: las funciones LogPearson tipo III y Gumbel tienden a los mismos valores en los Tr menores a 20 años, después de este tiempo LogPearson tipo III presenta un aumento de los valores de precipitación que permiten que sea la función de mejor ajuste con respecto a los datos de probabilidad empírica y la Lognormal los subestima; este comportamiento es muy similar al que tuvo la estación para 5 días (ver Figura 27). Numéricamente la función de mejor ajuste para la estación fue LogPearson III y el valor de precipitación máxima para el Tr de 7 años es de 371 mm, para el Tr de 20 años es de 479 mm y el Tr de 50 años es de 554 mm (ver Tabla 11).

Planta Río Cali: la función que mejor se ajusta a los datos de probabilidad empírica es LogPearson tipo III y que las funciones Gumbel y LogNormal reportan valores muy similares en Tr mayores a 10 años (ver Figura 27). Al comparar lo observado con lo obtenido numéricamente se encontró que para los dos casos la función de mejor ajuste para la estación fue LogPearson tipo III y el valor de precipitación máxima para el Tr de 5 años es de 166 mm, para el Tr de 20 años es de 202 mm y el Tr de 50 años es de 222 mm (ver Tabla 11).

Comportamiento general de la cuenca del río Cauca en su valle alto para 7 días

Los valores de precipitación máxima en 7 días para los tiempos de retorno de 5, 20 y 50 años de la función de mejor ajuste de las estaciones La Gitana, Bolo Blanco, Peña Mona, Planta Río Cali, Cañaveralejo, Vijes e Ingenio la Quinta se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Valores de precipitación máxima en 7 días para Tr 5, 20 y 50 años.

ESTACIÓN	FUNCIÓN DE MEJOR AJUSTE	Tr		
		5	20	50
La Gitana	LogPearsonIII	224	345	449
Bolo Blanco	LogPearsonIII	183	222	242
Peña Mona	LogPearsonIII	371	479	554
Planta Río Cali	LogPearsonIII	166	202	222
Cañaveralejo	Gumbel	182	229	259
Vijes	LogPearsonIII	116	134	142
Ingenio La Quinta	LogPearsonIII	150	180	198

Los valores de precipitación máxima para Tr de 5 años los cuales se encuentran entre 116 mm y 371 mm, para Tr de 20 años de 134 mm a 479 mm y para Tr de 50 años de 142 mm a 554 mm (ver apéndice 4). La estación Vijes presenta la menor magnitud y Peña Mona las mayores magnitudes para los Tr de esta temporalidad, al igual que para las anteriores (ver Tabla 11).

7.3.5 Análisis de frecuencia para precipitaciones máximas en 15 días

En la Figura 28 se muestra la distribución del AF de las funciones Gumbel, LogNormal y LogPearson III para 15 días en la estación Bolo Blanco, Peña Mona y Planta Río Cali.

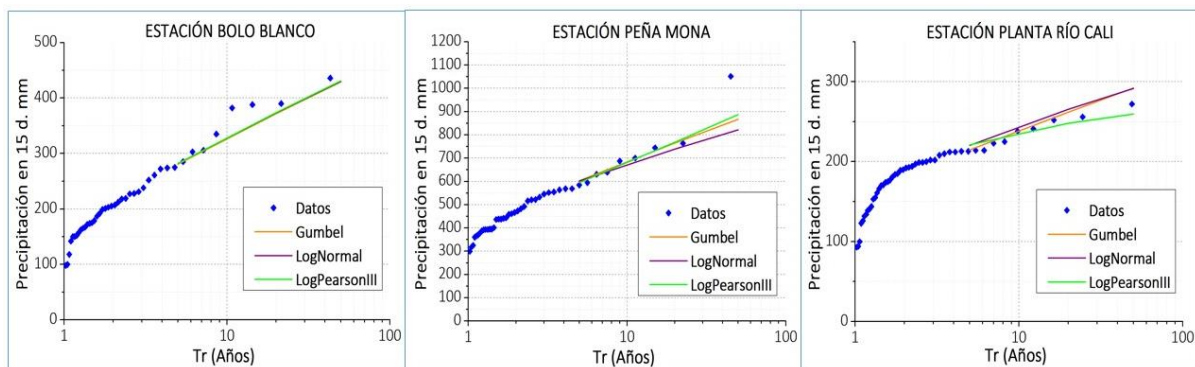


Figura 28. Período de retorno de Gumbel, LogNormal y LogPearson tipo III de precipitaciones máximas en 15 d.

Bolo Blanco: las tres funciones tienden a los mismos valores en los Tr calculados, por lo que visualmente las tres podrían ajustarse a los datos de probabilidad empírica, aunque estos en algunos períodos tienen un comportamiento muy variado (ver Figura 28). Al comparar los resultados de la gráfica con los obtenidos numéricamente se encuentra que la función de mejor ajuste para la estación fue la LogPearson tipo III y sus valores de precipitación máxima para el Tr de 5 años es de 282 mm, para el Tr de 20 años es de 374 mm y el Tr de 50 años es de 431 mm (ver Tabla 12).

Peña Mona: las funciones LogPearson tipo III y Gumbel tienden a los mismos valores en los Tr calculados menores a 20 años, después de este tiempo LogPearson tipo III es la que mejor se ajusta a los datos de probabilidad empírica y la Lognormal los subestima; este comportamiento en la estación se viene presentando desde los 7 días (ver Figura 28). Numéricamente la función de mejor ajuste para la estación fue LogPearson III y el valor de precipitación máxima para el Tr de 5 años es de 595 mm, para el Tr de 20 años es de 768 mm y el Tr de 50 años es de 887 mm (ver Tabla 12).

Planta Río Cali: la función que mejor se ajusta a los datos de probabilidad empírica es LogPearson tipo III y que las funciones Gumbel y LogNormal los sobreestiman (ver Figura 28). Al comparar lo observado con lo obtenido numéricamente se encontró que para los dos casos la función de mejor ajuste para la estación fue LogPearson tipo III y el valor de precipitación máxima para el Tr de 5 años es de 221 mm, para el Tr de 20 años es de 248 mm y el Tr de 50 años es de 260 mm (ver Tabla 12).

Comportamiento general de la cuenca del río Cauca en su valle alto para 15 días

Los valores de precipitación máxima en 15 días para los tiempos de retorno de 5, 20 y 50 años de la función de mejor ajuste de las estaciones La Gitana, Bolo Blanco, Peña Mona, Planta Río Cali, Cañaveralejo, Vijes e Ingenio la Quinta se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Valores de precipitación máxima en 15 días para Tr 5, 20 y 50 años.

ESTACIÓN	FUNCIÓN DE MEJOR AJUSTE	Tr		
		5	20	50
La Gitana	LogPearsonIII	360	593	814
Bolo Blanco	LogPearsonIII	282	374	431
Peña Mona	LogPearsonIII	595	768	887
Planta Río Cali	LogPearsonIII	221	248	260
Cañaveralejo	Gumbel	243	296	329
Vijes	LogPearsonIII	161	182	191
Ingenio La Quinta	LogNormal	211	253	278

Los valores de precipitación máxima para Tr de 5 años los cuales se encuentran entre 161 mm y 595 mm, para Tr de 20 años de 182 mm a 768 mm y para Tr de 50 años de 191 mm a 887 mm (ver apéndice 4). Para 15 días las estaciones con menor y mayor magnitud siguen siendo Vijes y Peña Moná respectivamente (ver Tabla 12).

7.3.6 Análisis de frecuencia para precipitaciones máximas en 30 días

En la Figura 29 se muestra la distribución del AF de las funciones Gumbel, LogNormal y LogPearson III para 30 días en la estación Bolo Blanco, Peña Moná y Planta Río Cali.

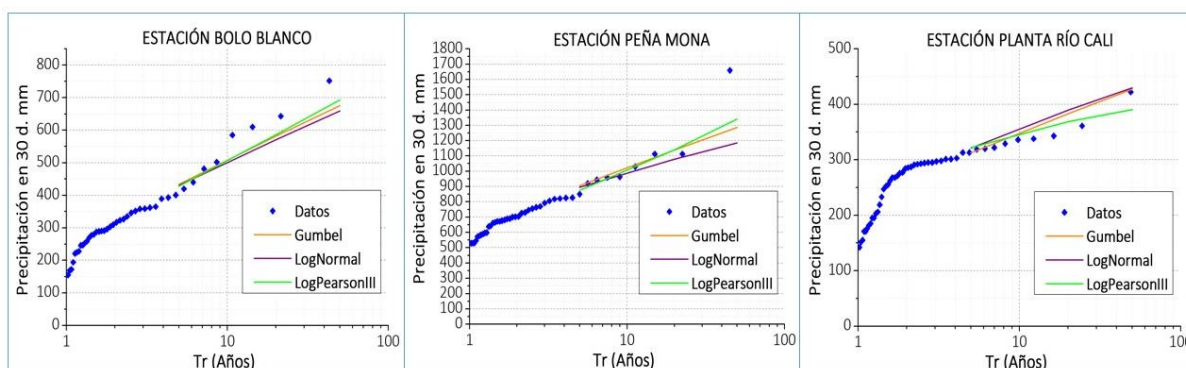


Figura 29. Período de retorno de Gumbel, LogNormal y LogPearson tipo III de precipitaciones máximas en 30 d.

Bolo Blanco: las tres funciones tienen un comportamiento muy similar para los valores de Tr menores a 10 años y después de este tiempo la función que mejor se ajuste a los datos de probabilidad empírica es la LogPearson tipo III (ver Figura 29). Al comparar los resultados de la gráfica con los obtenidos numéricamente se encuentra que coinciden en que la función de mejor ajuste para la estación fue la LogPearson tipo III y sus valores de precipitación máxima para el Tr de 5 años es de 428 mm, para el Tr de 20 años es de 586 mm y el Tr de 50 años es de 693 mm (ver Tabla 13).

Peña Moná: las tres funciones tratan de seguir el comportamiento variado de los datos de probabilidad empírica, pero la función que mejor se ajusta es la LogPearson tipo III (ver Figura 29), resultado que concuerda con lo obtenido numéricamente. Los valores de precipitación máxima para el Tr de 5 años es de 874 mm, para el Tr de 20 años es de 1140 mm y el Tr de 50 años es de 1341 mm. Se encuentra que los valores obtenidos en esta estación son los más altos de la zona para todas las temporalidades estudiadas (ver Tabla 13).

Planta Río Cali: la función que mejor se ajusta a los datos de probabilidad empírica es LogPearson tipo III y que las funciones Gumbel y LogNormal los sobreestiman, este comportamiento también se presentó en la estación para los 15 días (ver Figura 29). Al comparar lo observado con lo obtenido numéricamente se encontró que para los dos casos la función de mejor ajuste para la estación fue LogPearson tipo III y el valor de precipitación máxima para el Tr de 5 años es de 322 mm, para el Tr de 20 años es de 368 mm y el Tr de 50 años es de 390 mm (ver Tabla 13).

Comportamiento general de la cuenca del río Cauca en su valle alto para 30 días

Los valores de precipitación máxima en 15 días para los tiempos de retorno de 5, 20 y 50 años de la función de mejor ajuste de las estaciones La Gitana, Bolo Blanco, Peña Moná, Planta Río Cali, Cañaveralejo, Vije y Ingenio la Quinta se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Valores de precipitación máxima en 30 días para Tr 5, 20 y 50 años.

ESTACIÓN	FUNCIÓN DE MEJOR AJUSTE	Tr		
		5	20	50
La Gitana	LogPearsonIII	579	999	1415
Bolo Blanco	LogPearsonIII	428	586	693
Peña Moná	LogPearsonIII	874	1140	1341
Planta Río Cali	LogPearsonIII	322	368	390
Cañaveralejo	LogPearsonIII	349	396	423
Vije	LogPearsonIII	229	260	274
Ingenio La Quinta	LogNormal	294	349	382

Los valores de precipitación máxima para Tr de 5 años los cuales se encuentran entre 229 mm y 874 mm, para Tr de 20 años de 260 mm a 1140 mm y para Tr de 50 años de 274 mm a 1415 mm (ver apéndice 4). La estación Peña Moná presentó la mayor magnitud para los Tr de 5 y 20 años, para el Tr de 50 años fue La Gitana y la de menor magnitud se siguió dando en Vije (ver Tabla 13).

Para las temporalidades estudiadas se encontró que la función LogPearson tipo III fue la de mejor ajuste y que las funciones de distribución utilizadas describen mejor las series de precipitación máxima hasta tiempos de retorno de 50 años. También se observó que gráficamente en algunas de las estaciones las funciones de distribución no estaban ajustando correctamente y que los resultados obtenidos numéricamente no concuerdan con los gráficos, esto se puede deber a múltiples factores como lo son la calidad de los datos, microclimas o porque el comportamiento de los datos es no estacionario, ya que

estudios como el de Poveda y Álvarez, (2012) han mostrado que la hipótesis de estacionariedad colapsa ante los efectos del CC.

7.4 Prueba de ajuste

Los resultados obtenidos en la prueba de ajuste del EEA para las funciones estudiadas en series de precipitaciones máximas de 48, 72 horas, 5, 7, 15 y 30 días en las 55 estaciones de la cuenca alta del río Cauca se presentan en el apéndice 5, donde se especifica en números y porcentaje cuantas estaciones presentaron mejor ajuste en cada una de las funciones.

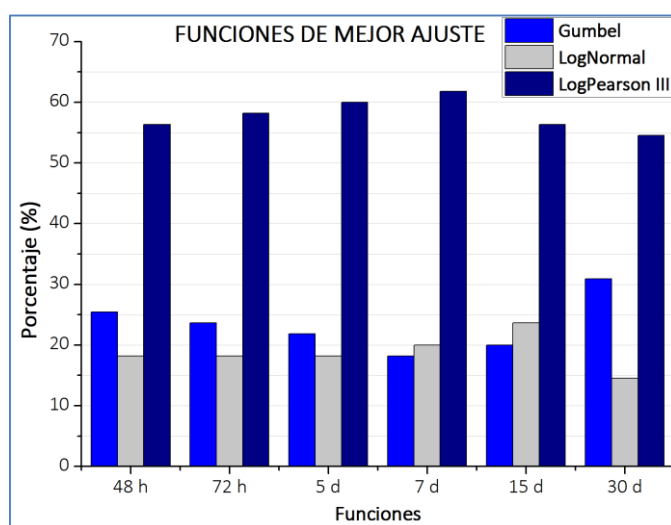


Figura 30. Funciones de mejor ajuste para 55 estaciones con series de precipitaciones máximas para 48 y 72 horas, 5, 7, 15 y 30 días.

En la Figura 30 se relacionan las funciones de mejor ajuste para cada día consecutivo estudiado con su correspondiente porcentaje en donde se observa que la función de mejor ajuste para 48 horas fue LogPearson tipo III con 56 % que equivale a 31 estaciones, seguida de Gumbel con 25 % que equivale a 14 estaciones y finalmente LogNormal con 18 % que equivale a 10 estaciones, para 72 horas LogPearson tipo III con 58 % que equivale a 32 estaciones, seguida de Gumbel con 24 % que equivale a 13 estaciones y finalmente LogNormal 18 % que equivale a 10 estaciones, para 5 días LogPearson tipo III con 60 % que equivale a 33 estaciones, seguida de Gumbel con 22 % que equivale a 12 estaciones y finalmente LogNormal 18 % que equivale a 10 estaciones, para 7 días LogPearson tipo III 62 % que equivale a 34 estaciones, seguida de LogNormal 20 % que equivale a 11 estaciones y finalmente Gumbel 20 % que equivale a 11 estaciones, para 15 días LogPearson tipo III 56 % que equivale a 31 estaciones, seguida de LogNormal 24 % que equivale a 13 estaciones y

finalmente Gumbel 20 % que equivale a 11 estaciones y para 30 días LogPearson tipo III 55 % que equivale a 30 estaciones, seguida de Gumbel 31 % que equivale a 17 estaciones y finalmente LogNormal 15 % que equivale a 8 estaciones.

Para el caso de 24 h la función de mejor ajuste para las estaciones analizadas fue LogPearson tipo III con 34 estaciones que representan el 62%, seguida de LogNormal con 13 estaciones que representan el 24% y finalmente Gumbel con 8 estaciones que representan el 14% resultado tomado del trabajo de grado de Gaviria y Rodríguez(2014). De lo anterior se puede decir que para los días consecutivos desde 24 h hasta los 30 días la función de mejor ajuste es la LogPearson tipo III.

Como se observó en la Figura 30 la función LogPearson tipo III para las temporalidades estudiadas fue la de mejor ajuste, demostrando que por sus 3 parámetros permite representar de forma más adecuada los datos de precipitación que por su naturaleza son muy variables y que Gumbel y LogNormal presentaron mejor ajuste en porcentajes más bajos; esto se puede deber a que se contaban muchas veces con series de longitudes hasta de 47 años y estas funciones por sus dos parámetros son usualmente preferidas para cuando se dispone de pocos datos.

7.5 Distribución espacial de las precipitaciones máximas asociadas a períodos de retorno para cada número de días consecutivos en la cuenca alta del río Cauca.

A partir del análisis de frecuencia que se realizó, se procedió a especializar las precipitaciones estimadas para las temporalidades de estudio de 48 y 72 horas, 5, 7, 15 y 30 días consecutivos, solo para los tiempos de retorno de 5, 20 y 50 años, ya que para estos periodos de retorno las funciones de distribución mostraron mejor ajuste. Dicha especialización de las precipitaciones máximas se realizó mediante el método de interpolación geoestadístico llamado Spline.

En general, la interpolación de las precipitaciones máximas tiene una distribución muy similar para los diferentes números de días consecutivos y para los diferentes periodos de retorno. De esta manera se observa, que en el sur de la zona de estudio, el cual corresponde principalmente al norte del departamento del cauca y sur del Valle del Cauca, se presentan mayores valores de precipitaciones máximas, que van aumentando en área y magnitud a medida que el tiempo de retorno se incrementa. Además, en la zona central de la cuenca, por los municipios de Yotoco y Vijes, se observa un foco de precipitaciones máximas con magnitudes de menor valor comparadas con las demás zonas. Otro comportamiento general que se logra distinguir son las zonas del norte de la cuenca de

estudio, en donde se observa que las precipitaciones máximas adquieren magnitudes bajas, sin embargo no tanto como la zona central. Por último, se presenta uno focos de precipitaciones máximas de alta magnitud por los lados de los municipios de Andalucía y Tuluá y por los Farallones de Cali, que se intensifican para los tiempos de retorno de 20 y 50 años. A continuación se hace una descripción para cada número de días consecutivos, teniendo en cuenta los tiempos de retorno de 5, 20 y 50 años.

7.5.1 Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 48 horas.

En la Figura 31 se muestra la distribución espacial de las precipitaciones máximas en 48 horas para tiempos de retorno de 5, 20 y 50 años, utilizando la distribución de mejor ajuste. En términos generales se observa en los 3 gráficos que al sur de la cuenca se presenta una zona muy pequeña con valores altos de precipitación, a la altura de los Farallones de Cali, el cual aumenta en área hacia el sur a medida que incrementa el tiempo de retorno. Además en el norte y centro de la cuenca a la altura de los municipios de Guacarí y El Cerrito, se presentan focos de precipitaciones máximas con magnitudes de menor valor, que disminuyen en área a medida que aumentan los tiempos de retorno. Las precipitaciones máximas según cada tiempo de retorno se distribuyen de la siguiente manera:

- ♦ Para el tiempo de retorno de 5 años, las precipitaciones máximas en 48 horas oscilan entre 80 mm y 185 mm. La zona en donde se presentan las precipitaciones de mayor valor se concentran en el flanco oriental de la Cordillera Occidental en Farallones de Cali, alcanzando valores mayores a 190 mm. Se puede observar que el rango de precipitaciones máximas entre 110 y 125 mm, se presentan en la mayor parte del área, extendiéndose desde el norte del Valle hasta el sur del sistema en el Cauca. Las precipitaciones máximas con menor magnitud menores de 80 mm y se presentan en dos focos: hacia el occidente de la cuenca entre los municipios de Guacarí y El Cerrito, y otro al norte entre los municipios de Obando y La Victoria.

PRECIPITACIONES MÁXIMAS ASOCIADAS A PERÍODOS DE RETORNO DE 5, 20 Y 50 AÑOS EN 48 HORAS

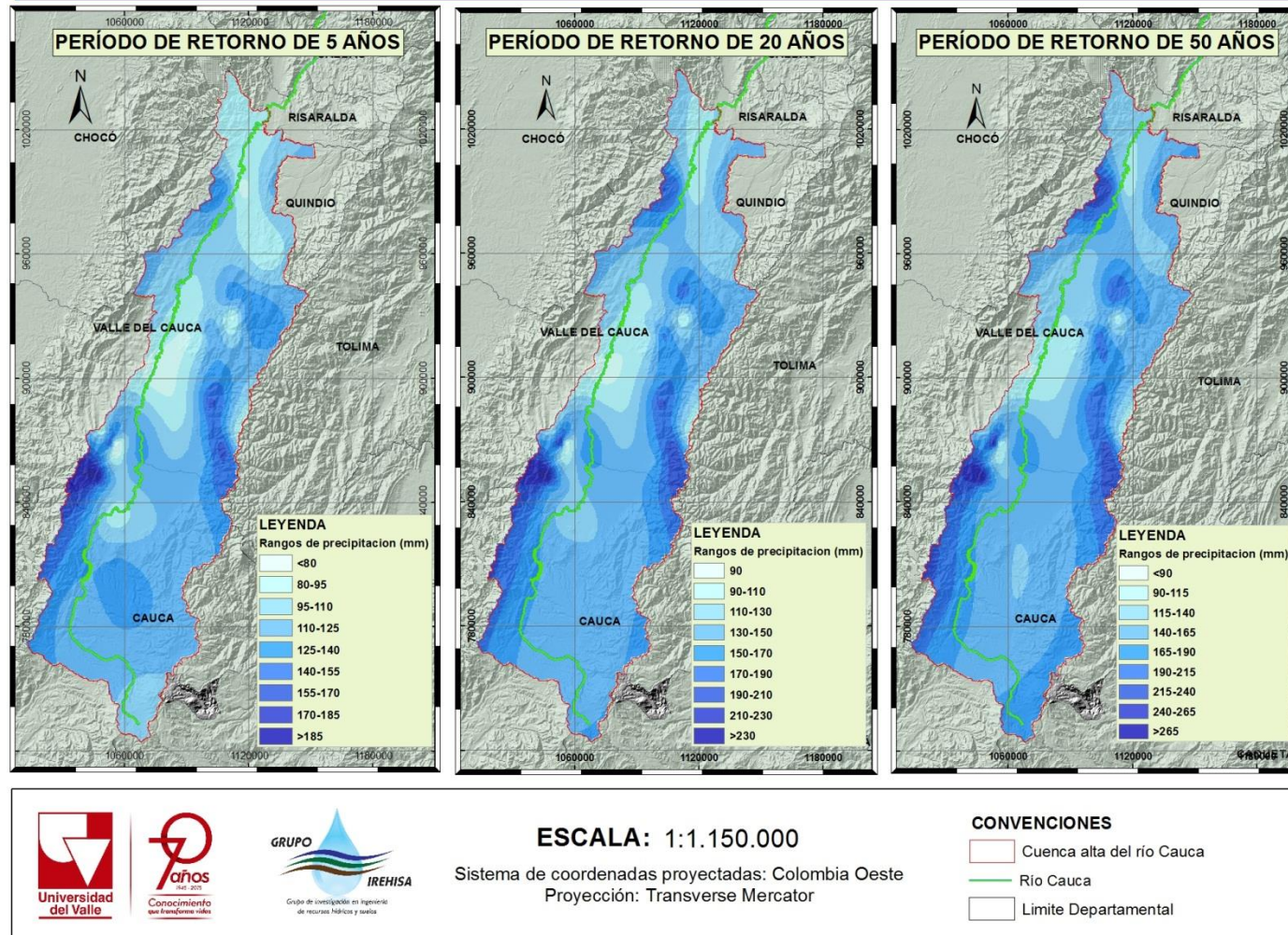


Figura 31. Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 48 horas para períodos de retorno de 5, 20 y 50 años, mediante el uso de la función de distribución de mejor ajuste.

- ✦ Para el tiempo de retorno de 20 años las magnitudes de las precipitaciones máximas estimadas aumentan en rango a valores que oscilan entre 90 y 230 mm en 48 horas. La mayor parte del área de la cuenca presentan precipitaciones entre 130 y 150 mm. Las precipitaciones máximas de mayor magnitud se localizan al occidente sobre los municipios de Jamundí y Cali, otro a la altura de los municipios de Florida, Pradera y el oriente de Palmira rangos de precipitaciones del orden de 170 a 210 mm. De la misma manera hacia el distrito de riego RUT, compuesto por los municipios de Roldanillo, La Unión y El Toro, se presenta un foco de precipitaciones máximas con valores que oscilan entre 170 y 190 mm. Los valores más bajos de las precipitaciones máximas se hallan hacia el occidente sobre los municipios de Guacarí y El Cerrito.
- ✦ Las precipitaciones máximas en 48 horas para un tiempo de retorno de 50 años, por su parte, presentan valores que oscilan entre 90 y 265 mm. En este caso no hay un área definida que represente la mayor área para un rango de precipitación máxima específica, sin embargo, se observa que las precipitaciones de menor magnitud disminuyen en área, respecto a los anteriores de tiempos de retorno, hacia el centro de la cuenca, a la altura de los municipios de Guacarí, el occidente de Buga y el Cerrito, dichas precipitaciones para este tiempo de retorno van desde 90 a 115 mm. Los valores de mayor magnitud se localizan de nuevo hacia el suroccidente del sistema, en el área municipal de los municipios de Jamundí y Cali, alcanzando valores mayores de 230 mm.

Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 72 horas.

En la Figura 32 se observa que las precipitaciones máximas en 72 horas oscilan entre 90 y 340 mm. Existe un comportamiento muy parecido respecto a la distribución de las precipitaciones máximas para los 3 tiempos de retorno estudiados. El sur de la cuenca, en el flanco oriental de la Cordillera Occidental, se sigue presentando focos con precipitaciones de mayores magnitudes. De la misma manera, en el centro de la cuenca, en el flanco occidental de la Cordillera Central, se observa otros focos con magnitudes altas de precipitación, que ha mostrado un leve aumento en cuanto al área que cubren a medida que aumentan los tiempos de retorno. Se observa además, que las áreas asociadas a las precipitaciones de menor magnitud disminuyen a medida que los tiempos de retorno aumentan. Las precipitaciones máximas en 72 horas según cada tiempo de retorno se distribuyen de la siguiente manera:

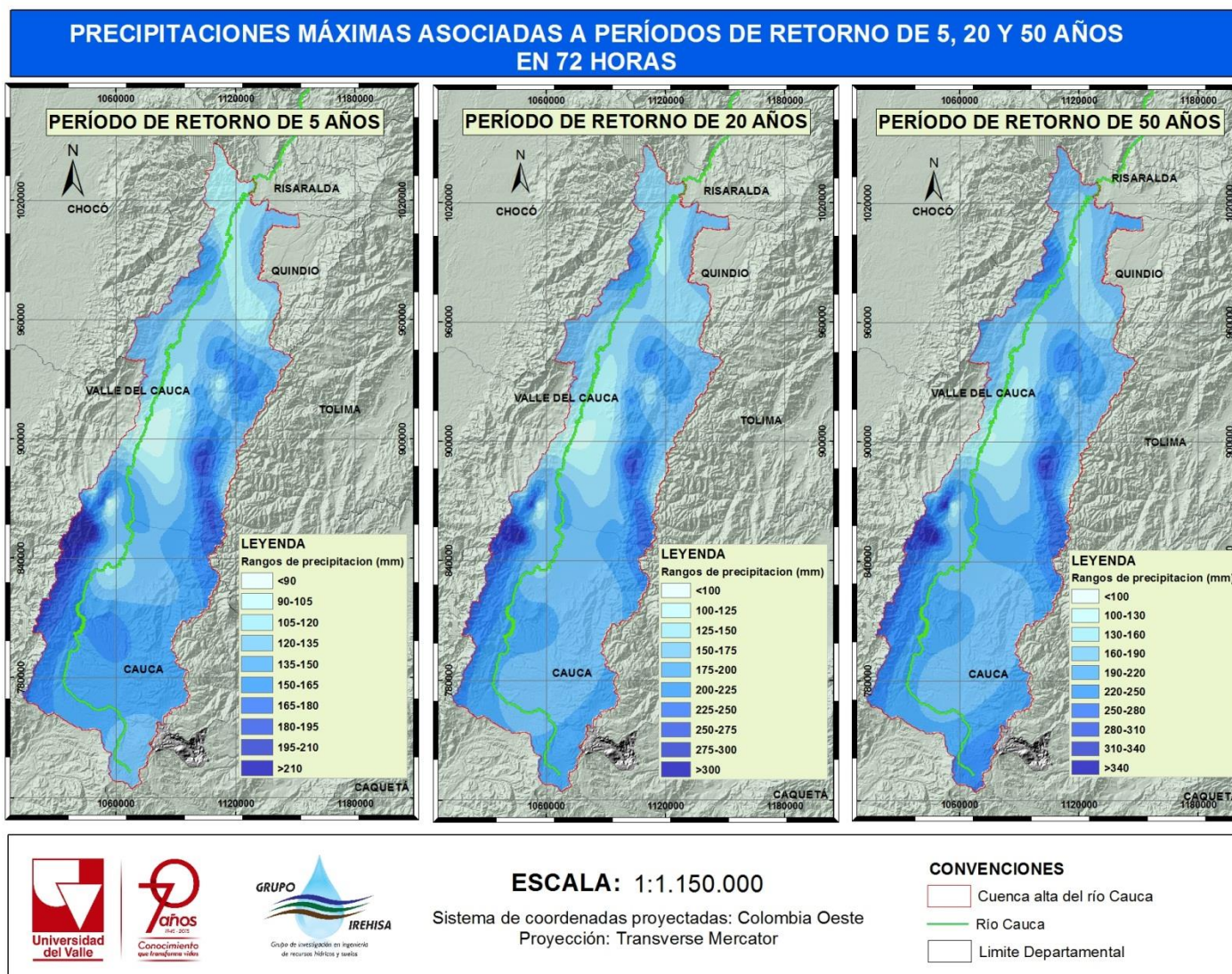


Figura 32. Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 72 horas para períodos de retorno de 5, 20 y 50 años, mediante el uso de la función de distribución de mejor ajuste

- ✦ Para el tiempo de retorno de 5 años, las precipitaciones máximas en 72 horas oscilan entre 90 y 210 mm. Se observa que la zona con las precipitaciones máximas de mayor magnitud se siguen presentando en el sur de la cuenca, hacia el flanco oriental de la Cordillera Occidental, a la altura de los Farallones de Cali, con valores mayores a 210 mm. Además, en el norte de la cuenca se presentan unos focos de precipitaciones máximas donde se observan valores de magnitudes mínimas. De igual manera sucede en el centro de la cuenca donde se presenta un área con precipitaciones máximas de menor magnitud, precipitaciones que son menores o iguales a 90 mm. El rango de precipitaciones máximas que mayor área cubre la cuenca esta entre 135 y 150 mm, rango que se distribuye en mayor parte hacia el sur de la cuenca.
- ✦ Respecto al tiempo de retorno de 20 años, las precipitaciones máximas oscilan entre 100 y 300 mm en 72 horas. Las precipitaciones máximas con mayor magnitud ubicadas en el flanco oriental de la Cordillera Occidental, a la altura de los Farallones de Cali, aumentan en áreas al sur de esta zona hacia los municipios de Jamundí, Buenos Aires y Suarez, con precipitaciones que son mayores a 300 mm en 72 horas. Por otra parte, hacia el centro de la cuenca, entre los municipios de Buga, Guacarí, El Cerrito y el noroccidente de Palmira, se presentan precipitaciones máximas de menor magnitud, con valores menores a 100 mm.
- ✦ Las precipitaciones máximas en 72 horas para el tiempo de retorno de 50 años presentan una distribución muy parecida a la de 20 años. En este caso las precipitaciones máximas van desde 100 hasta 340 mm. Las precipitaciones máximas que se generan a la altura de los Farallones de Cali, disminuyeron en área respecto a los tiempos de retronó menores, con precipitaciones mayores a 340 mm en 72 horas. Se observa un pequeño foco de precipitaciones máximas de alta magnitud en el oriente del municipio de Palmira con un rango de 310 a 340 mm. En el norte de la cuenca se presentan en general precipitaciones de baja magnitud del orden de 100 a 160 mm, específicamente entre los municipios de Cartago, Obando, La Victoria y Sevilla. Al Occidente del municipio El Cerrito se presenta un foco de precipitaciones de baja magnitud con valores menores 100 mm. Las precipitaciones que mayor cubren en área a la cuenca corresponden al rango de 160 a 220 mm.

7.5.2 Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 5 días.

En la Figura 33 se presentan la distribución de las precipitaciones máximas en 5 días para los tiempos de retorno propuestos para este trabajo. En general, y como se ha visto en las otras distribuciones se concentra un foco de precipitaciones en el flanco oriental de la

Cordillera Occidental, que corresponde con el parque natural nacional los Farallones de Cali. A pesar de esto, los focos de precipitación máxima del norte, que corresponde a los municipios de Roldanillo, La Unión y Toro, tienden a desaparecer. Las precipitaciones máximas en 5 días según cada tiempo de retorno se distribuyen de la siguiente manera:

- ✦ Para el período de retorno de 5 años, las precipitaciones oscilan entre 105 y 305 mm en 5 días. Se observa que el foco de precipitación de los Farallones se mantiene constante alcanzando valores superiores a 305 mm. Cabe notar que los rangos de precipitaciones menores entre los 105 a 155 mm se concentran al occidente y se extiende desde el norte hasta la parte central de la cuenca. En oriente de la cuenca, sobre los municipios de Buga, Tuluá, Palmira y El Cerrito, se puede apreciar la formación de posibles focos de precipitación con valores medios entre los rangos 180 a 205 y 205 a 230 mm.
- ✦ Respecto al tiempo de retorno de 20 años se puede apreciar la aparición de dos focos de precipitaciones máximas con rangos entre 310 y 340 mm: hacia el oriente entre los municipios de El Cerrito y Palmira, y hacia al nororiente sobre los municipios de Tuluá, Buga y Andalucía. Las precipitaciones máximas de menor magnitud se extiende desde el norte hacia los extremos occidentales de los municipios El Cerrito, Guacarí, Buga y Ginebra, presentando rangos menores de 130 mm. Los rangos intermedios de precipitaciones máximas entre 130 a 190 mm, se extiende desde el norte del Valle hasta el norte del Cauca (Buenos Aires, Caloto, Villa Rica, principalmente), estos son los que más área cubren en la zona de estudio.
- ✦ Para el tiempo de retorno de 50 años se puede apreciar que las precipitaciones máximas de mayor magnitud se concentran persistentemente hacia el flanco oriental de la Cordillera Occidental, correspondiente con los municipios de Jamundí y Cali con valores mayores a 420 mm. Hacia el oriente de la cuenca, entre los municipios de Palmira y El Cerrito, se presentan precipitaciones de alta magnitud, con rangos entre 385 y 420 mm. Los rangos de menor magnitud se localizan de igual manera que los dos anteriores tiempos de retorno, hacia el noroccidente de la cuenca y se extiende en sentido sur hasta el centro de esta, con valores que oscilan entre 140 a 190 mm.

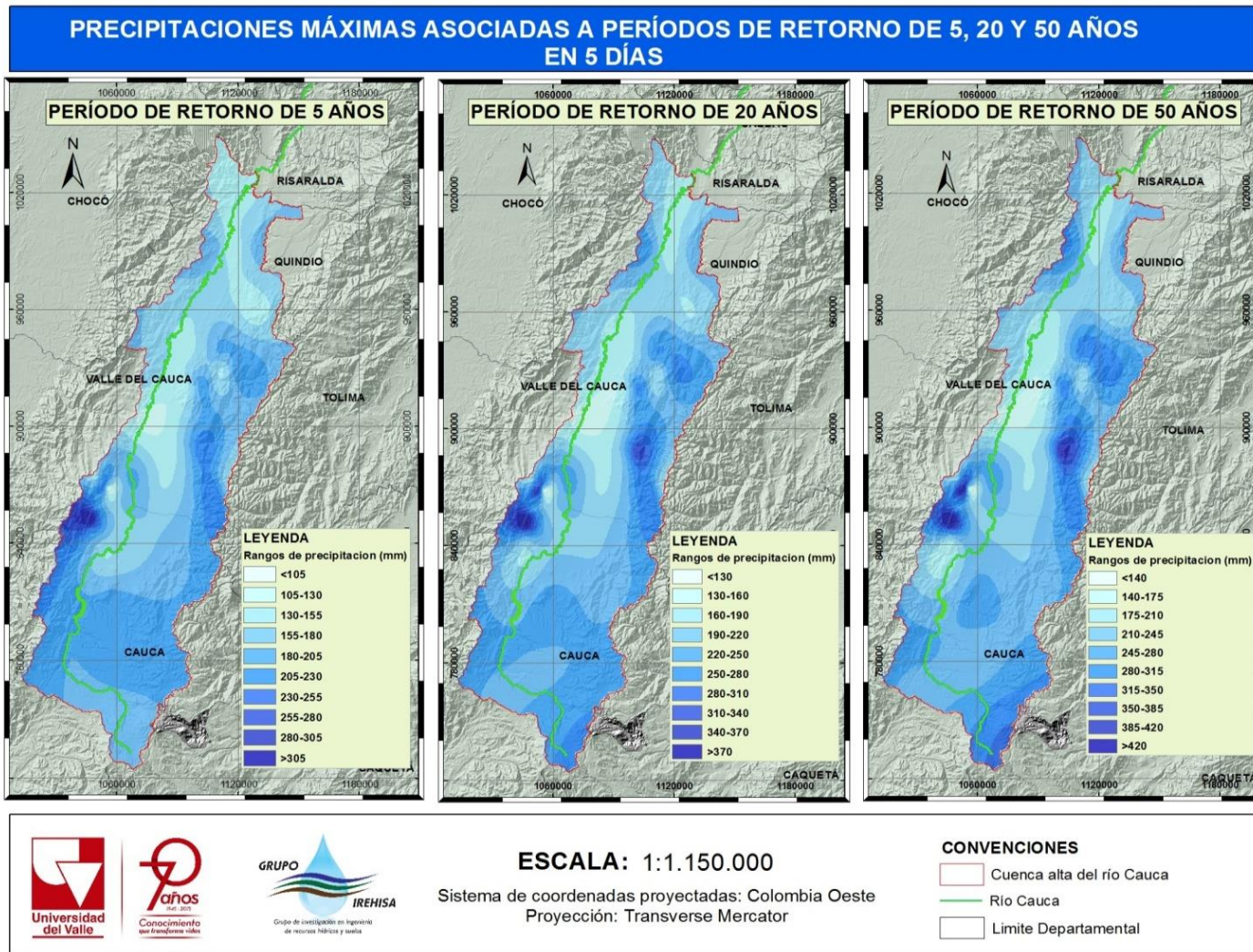


Figura 33. Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 5 días para períodos de retorno de 5, 20 y 50 años, mediante el uso de la función de distribución de mejor ajuste.

7.5.3 Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 7 días.

En la Figura 34 se puede observar la distribución espacial de las precipitaciones máximas estimadas para 7 días consecutivos. Las precipitaciones para esta temporalidad oscilan entre 120 mm y 550 mm. Se puede observar una formación de focos de precipitaciones máximas de gran magnitud en el norte de la cuenca hacia el oriente de los municipios de Tuluá y Buga, que se hacen más intensos a medida que aumenta el tiempo de retorno. Las precipitaciones máximas en 7 días según cada tiempo de retorno se distribuyen de la siguiente manera:

- ✦ Para el tiempo de retorno de 5 años las precipitaciones máximas oscilan entre 120 y 360 mm en 7 días consecutivos. A la altura de los Farallones de Cali se presentan lluvias máximas de alta magnitud del orden 360 mm o mayores. Por otro lado, a la altura del oriente de los municipios de Bugalagrande, Andalucía y Tuluá se presentan también precipitaciones máximas de alta magnitud con un rango de 300 a 330 mm. Igualmente, hacia el occidente de Palmira también se presentan lluvias máximas de alta magnitud con el mismo rango de precipitación. El rango de las precipitaciones máximas que más se presenta a lo largo de la cuenca esta entre 180 y 210 mm.
- ✦ Respecto al tiempo de retorno de 20 años, se observa que las precipitaciones máximas van desde 140 a 460 mm en 7 días consecutivos. Los Farallones de Cali reportan los valores más altos de precipitación respecto a toda la cuenca, con precipitaciones mayores a 460 mm. El otro foco de precipitaciones máximas de alta magnitud que sigue se presenta en la zona del oriente del municipio de Palmira con un rango de precipitación de 380 a 420 mm. Se observa además en el sur de la cuenca, que corresponde al norte del Cauca, una zona de precipitación de distribución homogénea donde la lluvia que se presenta es del orden de 260 a 300 mm en 7 días consecutivos.
- ✦ Las precipitaciones máximas en 7 días consecutivos para el tiempo de retorno de 50 años oscilan entre 150 y 550 mm. Los Farallones de Cali presentan precipitaciones entre 500 y 550 mm en 7 días. Por otro lado, los dos focos de precipitaciones máximas de alta magnitud que siguen se presentan al oriente del municipio de Palmira y al oriente de los municipios de Bugalagrande, Andalucía y Tuluá, los cuales presentan precipitaciones que están en el rango de 450 a 500 mm. Además, el foco de precipitaciones máximas de menor magnitud que se presenta entre los municipios de Guacarí y El Cerrito presentan valores que oscilan entre 150 y 200 mm.

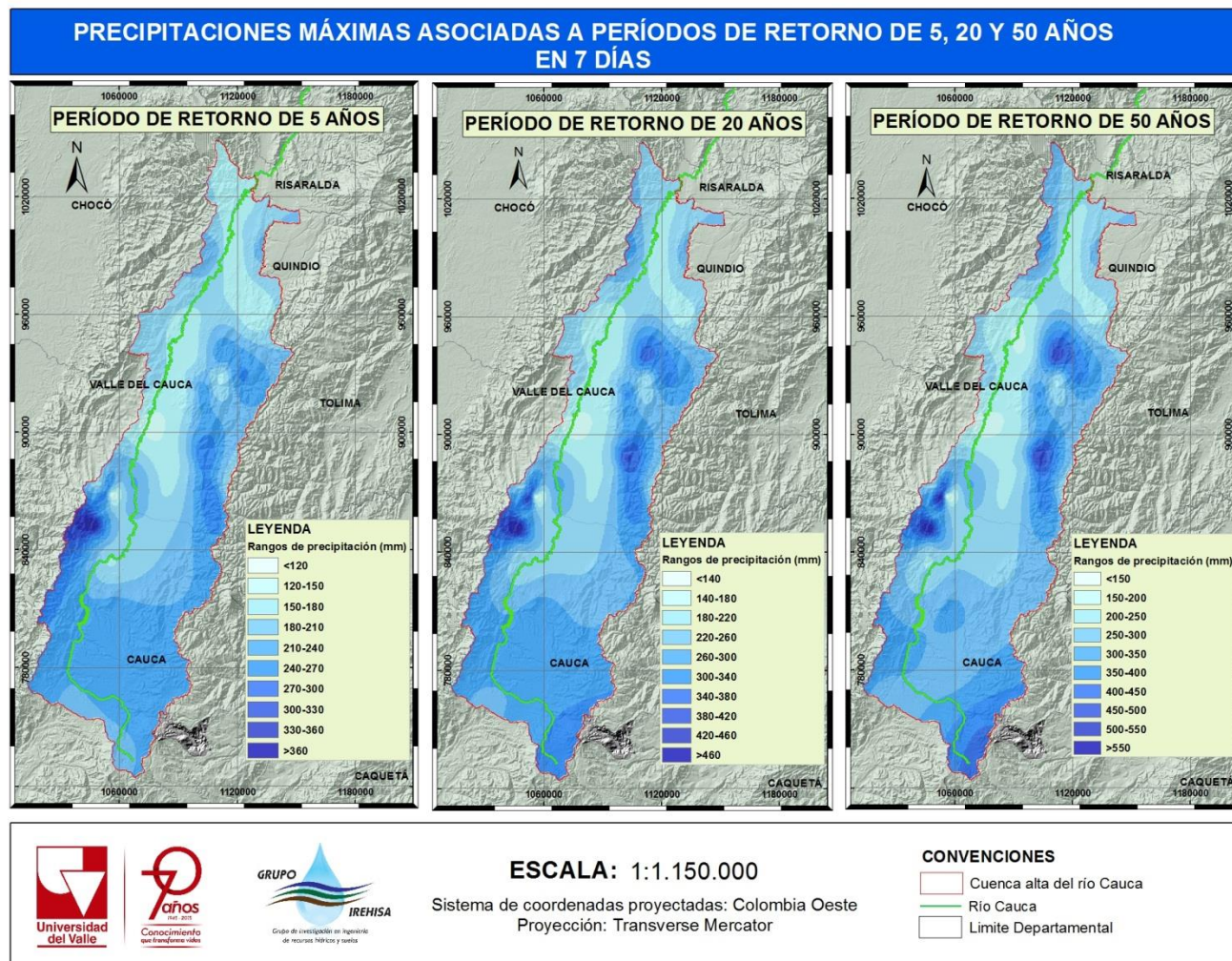


Figura 34. Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 7 días para períodos de retorno de 5, 20 y 50 años, mediante el uso de la función de distribución de mejor ajuste.

7.5.4 Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 15 días.

En la Figura 35 se puede observar para las distribuciones de las precipitaciones máximas en 15 días acumulados oscilan entre valores que van desde 170 a 880 mm. Se observa la presencia de un foco de precipitaciones máximas constante para los tiempos de retornos propuestos, los cuales tienden a localizarse en el sur de la vertiente oriental de la Cordillera Occidental. Además, se puede observar también la variación en área de los focos de precipitación máximas que tienden a reducirse, pese a su comportamiento aumentar en magnitud en el tiempo, como se ha analizado anteriormente. Cabe notar que hacia el sur del sistema, los valores tienden acrecentarse mostrando un aumento en la magnitud de las precipitaciones máximas. Las precipitaciones máximas en 15 días según cada tiempo de retorno se distribuyen de la siguiente manera:

- ♦ Respecto a la distribución espacial de las lluvias para el tiempo de retorno de 5 años, se aprecia que los rangos de precipitaciones máximas oscilan entre los 170 y 570 mm. Por su parte, las precipitaciones máximas de menor magnitud que oscilan entre 170 y 220, se extienden desde norte del Valle (incluyendo los municipios risaraldenses de Balboa, La Celia, Santuario y Pereira) hasta el norte del Cauca (comprendiendo los municipios Buenos Aires, Caloto, Villa Rica). Se localiza al flanco occidental de la Cordillera Central una zona que comprende al menos tres focos de precipitaciones máximas con valores que oscilan entre rangos de 220 a 270 mm, de 270 a 320 mm y de 320 a 370 mm; estos rangos se extiende hasta alcanzar gran parte los municipios caucanos dentro del área de la cuenca. El primero se localiza sobre los municipios de Andalucía, Buga y Tuluá. El segundo se localiza sobre El Cerrito, Palmira y Ginebra, y se conecta con la primera zona en Buga. Y el tercero se manifiesta sobre los municipios de Pradera y Florida y se extiende hasta alcanzar el foco de precipitaciones de El Cerrito-Palmira.
- ♦ Para el tiempo de retorno de 20 años las precipitaciones oscila entre 190 y 250 mm. Se observa que los valores más bajos de precipitaciones máximas se tienden a localizar hacia el occidente del sistema alcanzado valores menores a 190 mm, comprendiendo el área municipal de Yotoco, Vijes, El Cerrito, Guacarí y Ginebra. Los rangos con valores entre 220 y 270 mm, y entre 260 y 330 mm, presentan una mayor área y se extiende hasta los municipios caucanos de Santander de Quilichao, Buenos Aires, Suarez, Morales y Cajibío. Los valores más altos para las precipitaciones máximas se hallan en el foco de los Farallones de Cali, sobre el municipio de Jamundí, alcanzando valores superiores a 540 mm. Hacia el oriente de la cuenca se presentan focos con rangos intermedios entre 400-470 mm y 470-540 mm: el más notorio se localiza sobre Palmira.

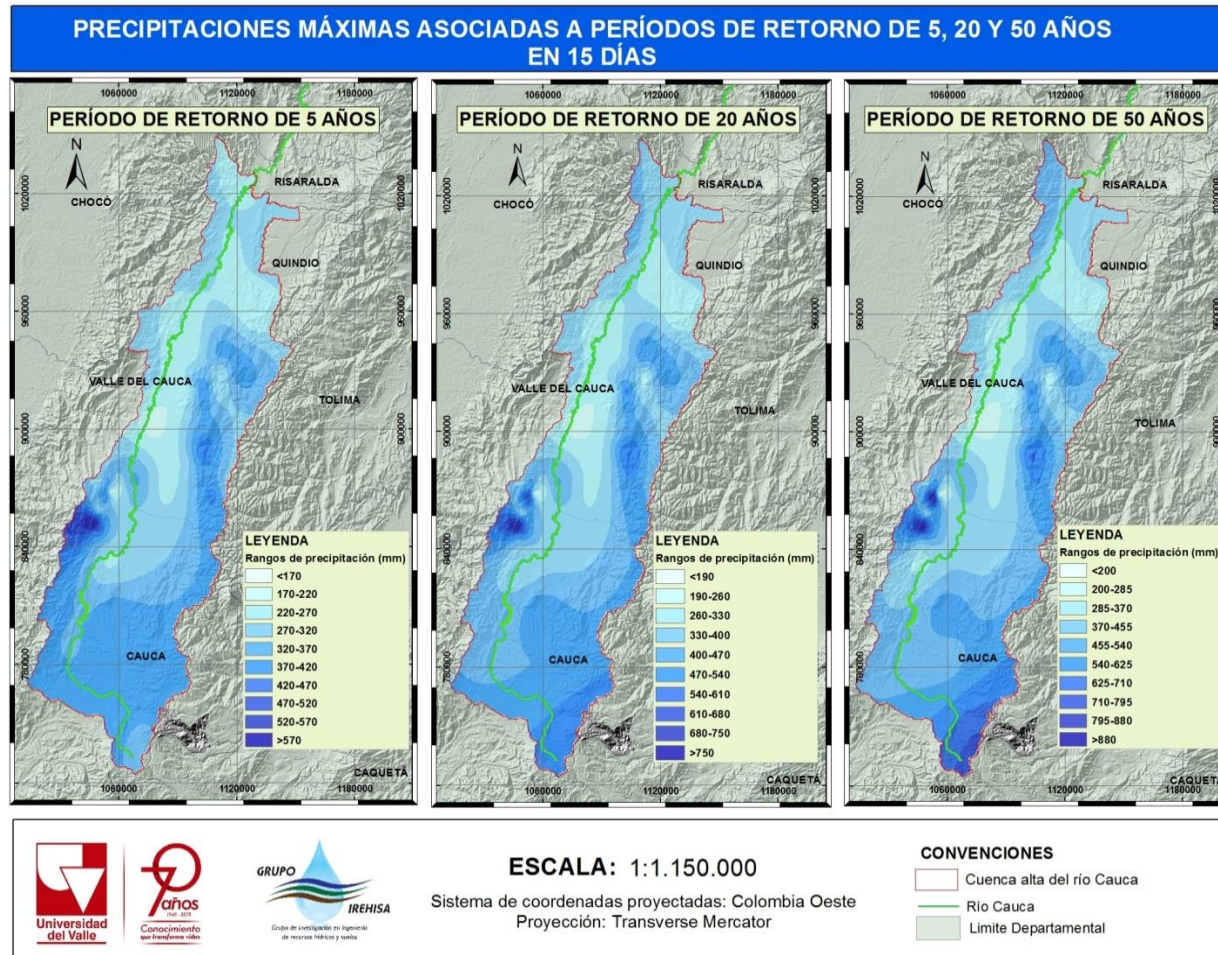


Figura 35. Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 15 días para períodos de retorno de 5, 20 y 50 años, mediante el uso de la función de distribución de mejor ajuste.

- Las precipitaciones máximas asociadas a un periodo de retorno de 50 años oscilan entre 200 y 880 mm. Se observa que las lluvias de mayor magnitud se siguen localizando hacia el occidente de la parte de la cuenca del río Cauca, con la presencia de dos focos de precipitaciones: uno sobre los Farallones de Cali, que muestra ser constante, con valores, 710 a 795 mm y superiores a 880 mm, el otro más pequeño sobre el municipio de Cali con valores desde 795 a 880 mm. Se presenta otro foco con valores intermedios (entre 540 hasta 625 mm) sobre el municipio de Palmira. Las menores magnitudes se localizan hacia el occidente de la cuenca con valores que no superan los 200 mm sobre el área municipal de Guacarí, Ginebra y El Cerrito. También se presenta tres zonas con valores entre 200 y 285 mm: una se extiende desde Bolívar hasta Pradera, otro desde Obando- La Victoria hasta Caicedonia en la parte nororiental, y un foco aislado hacia el oriente (sobre Buga exactamente).

7.5.5 Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 30 días.

En la Figura 36, se puede observar el comportamiento de las precipitaciones máximas para 30 días las cuales oscilan entre 230 y 1.400 mm. En general se puede observar como los valores bajos se extiende desde el norte hasta el sur de la cuenca, esta tendencia se prolonga hasta el periodo de retorno de 50 años donde se aprecia que ocupa gran parte del área de la cuenca. Las mayores magnitudes se siguen manifestando en focos muy localizados principalmente en los flancos de las Cordilleras Occidental y Central que miran hacia el valle geográfico del río Cauca, siendo el foco de precipitaciones de los Farallones el que permanece constante en el tiempo. Las precipitaciones máximas en 30 días según cada tiempo de retorno se distribuyen de la siguiente manera:

- Las precipitaciones máximas para el periodo de retorno de 5 años oscilan entre 230 y 870 mm. Se puede observar que la mayoría del área al norte de la cuenca es ocupada por rangos de valores entre 310 a 390 mm y de 390 a 470 mm. Se presentan dos regiones de precipitaciones máximas de baja magnitud con rangos entre 230 y 310 mm, que se localizan contiguamente: una al norte sobre los municipios de Obando, La Victoria, Zarzal, Sevilla y Caicedonia. La otra se localiza al oeste de la cuenca extendiéndose desde Bolívar hasta Pradera. El valor más bajo de precipitaciones máximas, con valores por debajo a 230 mm, se registra sobre los municipios de Guacarí y El Cerrito. Los rangos de mayor magnitud se localizan en el foco de los Farallones registrando valores desde 710 mm hasta 870 mm. Al oriente de la cuenca la presencia de un foco de precipitaciones máximas intermedias con valores entre 550 y 630 mm sobre Palmira. Se presentan dos focos de precipitaciones con rangos intermedios entre 470 y 550 mm. : el primero más

notorio se extiende desde Buga hasta el sur de la cuenca (departamento del Cauca). El segundo se localiza al norte del primero sobre los municipios de Tuluá y al extremo oriental de Buga al extremo occidental del municipio de Palmira y parte de Candelaria.

- ✦ Para el período de retorno de 20 años las precipitaciones máximas oscilan entre 270 y 1.110 mm, se observa que los rangos menores de precipitaciones máximas (menores de 270, entre 270 y 375 mm, de 375 a 480 mm y de 480 a 585 mm) se han extendido en área, no obstante siguen ocupando la misma distribución espacial desde el norte en dirección oeste hasta al departamento de Cauca sobre los municipios de Cajibío, Morales y Piendamó. Se presenta un pequeño foco con valores menores de 270 mm, que se localiza cerca de un foco de precipitaciones de magnitud mayor (entre 1.005 a 1.100 mm) en el área municipal de Cali. Los rangos intermedios (585 a 690 mm y de 690 a 795 mm) se han reducido en área, a pesar de ello se localizan en tres zonas claramente definidas: una al nororiente en inmediaciones de los municipios Buga, Bugalagrande y Tuluá, con dos pequeños focos con precipitaciones de magnitud entre 690 y 795 mm. Otra en el centro-oriental de la cuenca con un foco de precipitaciones máximas entre 690 a 795 mm. Una última zona se localiza hacia el sur de la cuenca y con dirección noroccidental hasta el foco de precipitaciones de mayor magnitud de los Farallones de Cali. En el extremo suroriental se puede apreciar que los rangos para las precipitaciones oscilan entre 690 y 900 mm, pero esto puede ser por precipitaciones por fuera del sistema de la cuenca. Por último, se presentan dos focos consecutivos de precipitaciones máximas con rangos de mayor magnitud hacia el occidente sobre los Farallones (superiores 1.110 mm) y la ciudad de Cali (con valores entre 1.005 hasta 1.110 mm). En ambos se aprecia que existen aledaños a estos focos, zonas con rangos de precipitaciones desde 690 hasta 1.005 mm.
- ✦ Para el tiempo de retorno de 50 años las precipitaciones oscilan entre 280 y 1400 mm. Las precipitaciones máximas de mayor magnitud se localizan hacia el occidente de la cuenca, sobre los municipios de Jamundí y Cali, con valores entre 1.260 a 1.400 mm, y superiores a 1.400 mm. Las precipitaciones que presentan rangos entre 280 a 700 mm, se extiende en gran parte de la cuenca desde el norte hacia el occidente y hasta el sur, sobre los municipios de Morales, Cajibío, Piendamó y Silvia. Se presenta un foco de precipitaciones de baja magnitud (menores de 280 mm) sobre los municipios de Guacarí, El Cerrito y Ginebra. Se puede apreciar modificaciones hacia el oriente de la cuenca, donde los rangos de precipitaciones máximas tienden a disminuir a medida que el tiempo de retorno aumenta, a pesar de esto se mantiene un foco con valores entre 840 a 980 mm sobre el municipio de Palmira.

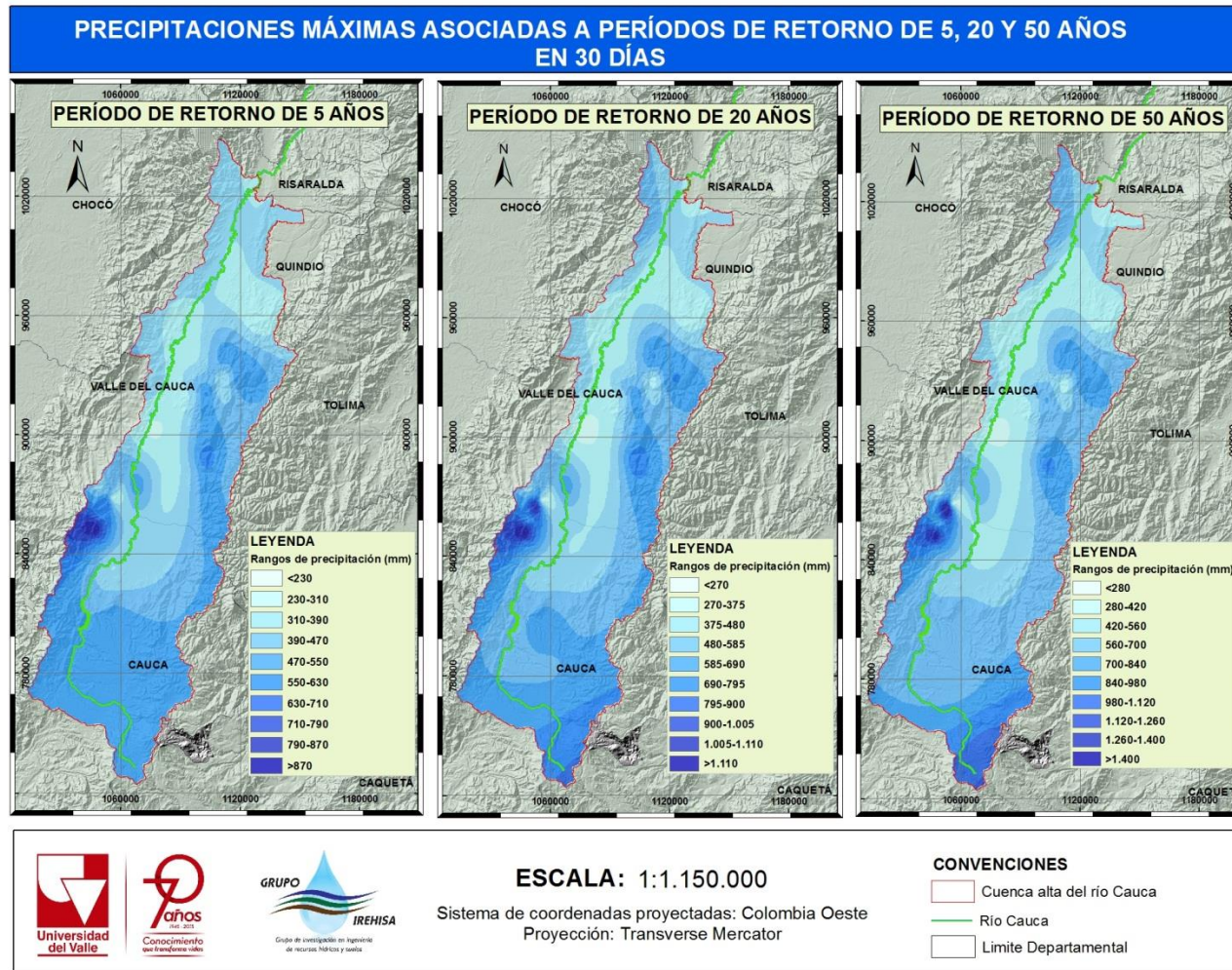


Figura 36. Distribución espacial de las precipitaciones máximas en 30 días para períodos de retorno de 5, 20 y 50 años, mediante el uso de la función de distribución de mejor ajuste.
Elaboración propia.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

OBJETIVO 1

Se encontró que los valores más altos de precipitación máxima histórica para 2, 3, 5, 7, 15 y 30 días consecutivos fueron respectivamente de 293, 385, 492, 656, 1177 y 1893 mm y ocurrieron en su mayor parte al sur occidente de la cuenca, específicamente en la estación Peña Mona y las Brisas.

Las magnitudes con mayores valores de precipitación máxima para los días consecutivos estudiados oscilaron entre 293 mm para 48 horas y 1893 mm para 30 días, las cuales se dieron en general en el sur de la cuenca a la altura de los farallones de Cali, al suroriente de la cuenca y en la parte oriental del departamento del Valle del Cauca. Las precipitaciones máximas con menores magnitudes para los días consecutivos estudiados oscilaron entre 103 mm para 48 horas y 279 mm para 30 días, precipitaciones que se presentaron en la zona central y al noroccidente de la cuenca.

OBJETIVO 2

Se puede evidenciar que no siempre la temporada de lluvias extremas máximas se presenta únicamente en la fase fría del ENOS como comúnmente se ha pensado. Se encontró que para 2 y 3 días consecutivos, el 45% y 57% de las estaciones respectivamente, reportaron su precipitación máxima histórica en la fase cálida del ENOS (El Niño), situación que no se podría explicar con los alcances de esta investigación. Para futuras investigaciones se puede estudiar el comportamiento de las fases cálidas del ENOS, para conocer si dichas fases pueden estar acompañadas al inicio o final por eventos de precipitaciones fuertes e intensas que son las responsables de lo reportado en este análisis.

Se observó que para 15 y 30 días consecutivos, el 47 y 55% de las estaciones respectivamente se presentaron durante la fase fría del ENOS (La Niña). Este aumento se genera debido a que en esta fase las precipitaciones aumentan en el tiempo de manera más homogénea y las lluvias son más constantes.

OBJETIVO 3

Para las temporalidades estudiadas la función de mejor ajuste fue LogPearson tipo III, de esta manera, para 2, 3, 5, 7, 15 y 30 días consecutivos, el porcentaje del número de estaciones que presentaron el mejor ajuste con esta función de probabilidad fueron de 56, 58, 60, 62, 56 y 55 % respectivamente, seguida de Gumbel y finalmente LogNormal con porcentajes de estaciones entre 15 y 25 %.

Se recomienda explorar otras funciones de distribución como la Wakeby que ha dado buenos resultados en series de cualquier tamaño y utilizar software como GS+ Geostatistics for the Environmental Sciences y Static Graphic que poseen varias opciones de funciones de distribución y que permiten visualizar fácil y rápidamente cual da un mejor ajuste a los datos; ya que gráficamente las funciones de distribución estudiadas no están ajustando correctamente y en algunas de las estaciones los resultados obtenidos numéricamente no concuerdan con los gráficos, además estas solo describieron mejor las series de precipitación máxima hasta tiempos de retorno de 50 años.

OBJETIVO 4

En general se observa que la distribución espacial de las precipitaciones máximas tiene un comportamiento muy similar tanto para los diferentes números de días consecutivos, como para los 3 tiempos de retornos graficados. En los Farallones de Cali se observa un pequeño foco de precipitaciones máximas de gran magnitud; algunas veces este muestra una leve ampliación de su área hacia el norte, como una prolongación hacia la zona urbana de Cali, con precipitaciones del orden de 185 mm para 48 horas hasta 1400 mm para 30 días.

Se observó una tendencia constante de focos de precipitaciones máximas de magnitudes considerables, en el flanco occidental de la cordillera central, a la altura de los municipios de Pradera, Palmira, El Cerrito, Ginebra, Buga, Andalucía, Sevilla y Bugalagrande. Esta zona muestra una dinámica muy marcada respecto a las precipitaciones máximas, no permanecen confinadas en una zona determinada, como el foco de Farallones de Cali.

Por otro lado, se observaron rangos intermedios de precipitación en el centro de la cuenca, estos presentan una mayor distribución en el área de la misma y se extiende desde el norte del Valle del Cauca hasta los municipios del norte y centro del Cauca. Por último, se destacan algunas precipitaciones de baja magnitud que muestran cierta dinámica en el tiempo, las cuales se dan en el norte de la cuenca, entre los municipios de Sevilla hasta La Celia en Risaralda.

9. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Se recomiendan como futuras líneas de investigación para complementar este trabajo de grado lo siguiente:

- ◆ Analizar las precipitaciones máximas historias respecto a las fases extremas del ENOS, teniendo en cuenta las etapas de desarrollo de cada fase.
- ◆ Realizar el análisis de frecuencia para las series de precipitaciones máximas en dos y más días consecutivos utilizando otras funciones de distribución de probabilidad que reporten un mejor ajuste a los datos.
- ◆ Hacer un análisis de frecuencia para 2 o más días consecutivos teniendo en cuenta la hipótesis de estacionariedad y la aplicación de las funciones de distribución de probabilidad mixtas cuando se requieran.
- ◆ Espacializar las precipitaciones estimadas del análisis de frecuencia utilizando diferentes métodos de interpolación, para escoger el que más se adecue a la zona de estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, D., y Poveda, G. (2006). Análisis de Frecuencia de los Caudales Máximos Diarios en Ríos de Colombia Considerando las Fases del Fenómeno ENSO. In: XVII Seminario Nacional Hidráulica e Hidrología: Conocimiento e ingeniería para la conservación y aprovechamiento del agua, 15-16 de septiembre, Popayán, Colombia.
- ARCGIS for Desktop (2013). Como funciona spline. Environmental Systems Research Institute, Inc. ESRI. Recuperado el 6 de noviembre de 2015, de <http://desktop.arcgis.com/es/desktop/latest/tools/3d-analyst-toolbox/how-spline-works.htm>
- Ashakar, F.; T.B.M.J Ouarda, R. Roy & B. Bobée. (1993). *Robust estimators in hydrologic frequency analysis, in Engineering Hydrology*. Edited by C.Y, pp. 347-352.
- Banco Mundial. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas*. Primera Edición. Bogotá, Colombia, p. 438.
- Behar, R. y Yepes, M. (2007). *Estadística un enfoque descriptivo*. Cali, Colombia: Taller gráficos de impresora FERIVA S.A.
- Bedoya, M., Contreras, C., y Ruiz, F. (2010). Alteraciones del Régimen Hidrológico y de la Oferta Hídrica por Variabilidad y Cambio Climático. Capítulo 7. Bogotá, D.C.: IDEAM, *Estudio Nacional del Agua*: pp 281-320.
- Castro, L., & Hoyos, C. (2004). Análisis de Frecuencia de Crecientes Con Diferentes Distribuciones De Probabilidad. Popayán: Trabajo de Grado, Universidad del Cauca.
- Cardona, F., Ávila, A., Carvajal, Y. y Jiménez, H. (2014). "Tendencias en las series de precipitación en dos cuencas torrenciales andinas del Valle del Cauca (Colombia)". *Tecno Lógicas*, vol. 17, núm. 32, pp. 85-95.
- Carvajal, Y., Enciso, A., Rojas, J. y Loaiza, W. (2014). Isoyetas de precipitación máxima durante las crecientes históricas del río Cauca en su valle alto (1988 - 2011). HIREISA, CVC. Santiago de Cali, Colombia, pp.57.
- Carvajal, Y. (2011). Inundaciones en Colombia. ¿Estamos preparados para enfrentar la variabilidad y el cambio climático? *Revista Memorias*, vol. 9, núm. 16, pp. 105-119.

- Carvajal, Y; Jiménez, H. y Materón, H. (1998). Efectos ecológicos del ENSO en Colombia. (Coautor). IV Congreso Latinoamericano de Ecología, II Congreso Peruano de Ecología. Arequipa, Perú, pp. 10.
- Carvajal, Y., y Marco, J.B. (2005). Modelos multivariados de predicción de caudal mensual utilizando variables macroclimáticas. Caso de estudio Río Cauca. *Ingeniería y Competitividad*, vol. 7, núm. 1, pp. 18-32.
- Chow, V. T., Maidment, D., y Mays, L. (1994). Hidrología Aplicada. Santafé de Bogotá, Colombia: McGRAW-HILL INTERAMERICANA.
- Corporación autónoma del Valle del Cauca (CVC). (2001). Caracterización del río cauca y sus tributarios. En Modelación matemática del Río Cauca. (Volumen VIII). Proyecto de Modelación del Río Cauca – PMC. Convenio con la Universidad del Valle. Recuperado de <http://www.cvc.gov.co/cvc/Mosaic/>
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y Universidad del Valle, (2007). El Río Cauca en su valle alto. Un aporte al conocimiento de uno de los ríos más importantes de Colombia. Cali, Colombia: Programa Editorial Universidad del Valle.
- Coras M., P. M., R. Arteaga R. y M. Vázquez P. 2005. Análisis de frecuencias de lluvias máximas con fines de drenaje superficial local, Tabasco, México. *Terra* 23: 113-120.
- Fattorelli, S., y Fernández, P. C. (2011). *Diseño Hidrológico*. Segunda Edición. Zaragoza.
- Fernández, F. (1995). *Manual de Climatología Aplicada. Clima, Medio Ambiente y Planificación. Primera Edición*. Madrid, España, 285 p.
- FILLIBEN, J. J. (1975) "The Probability Plot Correlation Test for Normality", *Technometrics*, 17(1), pp 111 -117.
- Ganancias, F. (2009). Cátedra de hidrología y procesos hidráulicos. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.
- García, M., Piñeros, A., Bernal, F., y Ardila, E. (2012). Variabilidad climática, cambio climático. *Revista Ingeniería*, 36, 60 – 64.
- Gaviria, A. y Rodríguez, A. (2015). Análisis de Frecuencia de Precipitaciones Máximas Diarias en la Cuenca Alta del Río Cauca, Utilizando Distribuciones de Probabilidad. Tesis de Pregrado. Universidad del Valle, Cali, Colombia.

- Gutiérrez, S., Carvajal, Y. y Ávila, A. (2013). Analysis of the Influence of Phenomena El Niño - Southern Oscillation in the Water Supply of the Dagua River Drainage Watershed. *Entre Ciencia e Ingeniería*, año 7, núm. 13, pp. 26-33.
- Hargrove, W. W. (2001). Interpolation of rainfall in Switzerland using a regularized spline with tension. Geographic Information and Spatial Technologies Group, book Ridge National laboratory. Recuperado de <http://www.geobabble.org/~hwnw/sic97/>
- Hofierka, J; Parajka, J; Mitasova, H y Mitas, L. (2002). Multivariate interpolation of precipitation using regularized spline with tension. En: Transactions in GIS. 6 (2). pp 135-150. Recuperado de <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1467-9671.00101/epdf>
- IDEAM. (2008). Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia. Estudio Nacional del Agua: Relaciones de demanda de agua y oferta hídrica.
- IDEAM. (s.f). Agua. Modelación hidrológica. Amenazas inundación. [En línea]. Recuperado en junio de 2015, de: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion>
- IPCC. (2007a). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra.
- IPCC. (2007b). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. IPCC; Working Grupo I, IV Assessment Report IPCC. New York.
- KITE, G. W. (1988). Frequency and Risk analysis in Hydrology. Water Resources Publications, Littleton, Colo. Chapter 3, 6, 8.
- Maidment, D. (1993). *Handbook of Hydrology*. United States of America: McGRAW – HILL.
- Mesa, Ó. J. (2006). ¿A dónde va a caer este Globo? Acerca del futuro de la Tierra. *Avances en Recursos Hidráulicos*, núm. 14, pp. 97-99.
- Mitasova, H., & Mitas, L. (1993). Interpolation by regularized spline with tension: I. Theory and implementation. *Mathematical geology*, 25(6), 641-655. Recuperado de <http://www4.ncsu.edu/~hmitaso/gmslab/papers/MG-I-93.pdf>
- Montealegre, J. (2007). Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM – Subdirección de Meteorología. Bogotá, D.C, 81 pp.

- Moreno, H. A., Vélez, M. V., Montoya, J. D., & Rhenals, R. L. (2013). La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. *Revista EIA*, 3(5), 59-69.
- NOAA. (2013). National Oceanic and Atmospheric Administration. Retrieved 12 01, 2013, from <http://www.noaa.gov/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura OMM/UNESCO, (1974), “Glosario hidrológico internacional”, WMO/OMM/BMO, No. 385, Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial, Suiza.
- OMM. (2011). Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas Vol. II. En Guía de prácticas hidrológicas. Ginebra.
- POLANCO, C. (2001). Inventario y sistematización de los desastres naturales ocurridos en los municipios del departamento de Antioquia, exceptuando los municipios del valle del Aburrá, entre 1920-1999. Universidad Eafit. Medellín.
- Poveda, G y Mesa, O. (1996). Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la hidrología de Colombia. *Ingeniería Hidráulica*, Vol. XI, pp. 27-23.
- Poveda, G. (1998). El Fenómeno El Niño/Oscilación del Sur y su Influencia sobre el Clima de Colombia. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia : una síntesis desde la escala inter-decadal. *Ciencias de la tierra*, 28(107), 201–222.
- Poveda, G. Agudelo P., Arias, P., Moreno, H., Mesa, O., Toro, V., y Salazar, L. (2002). Diagnóstico del Ciclo Anual y Efectos del ENSO sobre la intensidad máxima de lluvias de duración entre 1 y 24 horas en los Andes de Colombia. *Meteorología Colombiana*. 5, 67 – 74.
- Poveda, G., y Álvarez, D. (2012). El Colapso de la hipótesis de estacionariedad por cambio y variabilidad climática: Implicaciones para el diseño hidrológico en ingeniería. *Revista de Ingeniería*, 36, 65 – 76.
- Puertas, O., y Carvajal, Y. (2008). “Incidencia de El Niño Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, utilizando el Climate Explorer”. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, vol. 23, pp. 104-118.

Puertas, O., Carvajal, Y., y Quintero, M. (2011). Estudio de tendencias de la precipitación mensual en la cuenca alta - media del río Cauca, Colombia. *Dyna*, Nro. 169, pp. 112 - 120.

Sedano, K., Carvajal, Y., y Ávila, Á. (2013). Análisis de aspectos que incrementan el riesgo de inundaciones en Colombia. *Luna Azul*, vol. 37, pp. 219-238.

Yevjevich, V. (1972). *Stochastic Processes in Hydrology*. *Water Resources Publications*.

Imagen de portada

El País. (9 de Mayo de 2014). El río Cauca se encuentra con niveles cercanos a la inundación y desbordamiento. Obtenido de <http://www.elpais.com.co/elpais/cali/rio-cauca-encuentra-con-niveles-cercanos-inundacion-y-desbordamiento>

APÉNDICES

Los apéndices se encuentran adjuntos en el CD y se presentan en el siguiente orden:

- ◆ Apéndice 1 – Base de datos series.
- ◆ Apéndice 2 - AF de las 55 estaciones para las temporalidades estudiadas.
- ◆ Apéndice 3 - Valores de precipitación para Tr 5, 20 y 50 años.
- ◆ Apéndice 4 - Prueba de ajuste 55 estaciones.