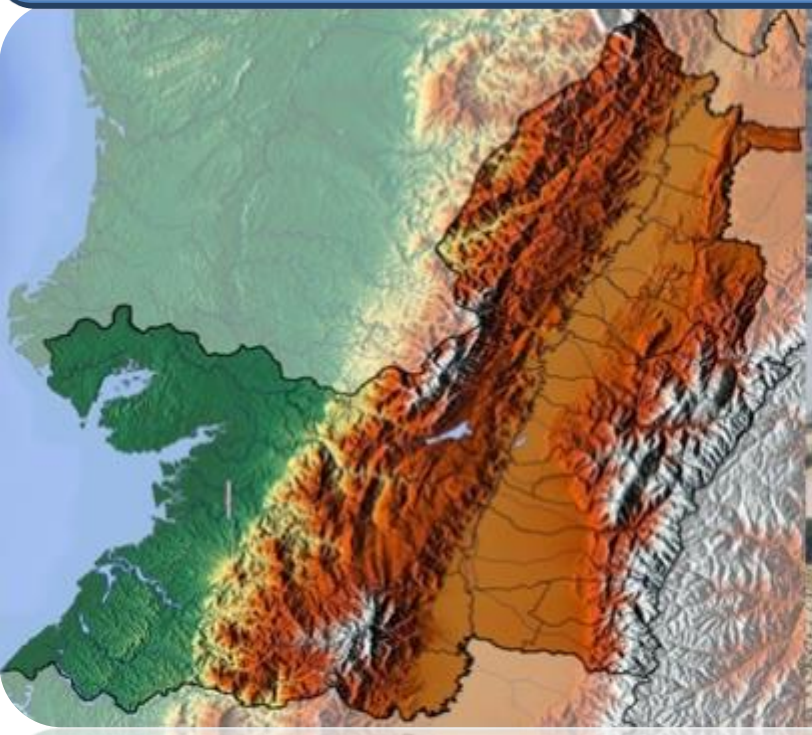
Universidad del Valle

2015

ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS DIARIAS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CAUCA, UTILIZANDO DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD





Alexander Gaviria Collazos
Ángela Jhoana Rodríguez Sarasty

EIDENAR

GRUPO IREHISA
Grupo de investigación en ingeniería de recursos hídricos y suelos

ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS DIARIAS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CAUCA, UTILIZANDO DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD

ELABORADO POR:

ALEXANDER GAVIRIA COLLAZOS Código: 0826176

ÁNGELA RODRÍGUEZ SARASTY Código: 0750897

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

2014

Nota de aceptación:

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del evaluador

_____

Firma del evaluador

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a Dios, quien me ha dado la vida y la fortaleza para continuar y ha puesto en mi corazón humildad y perseverancia para terminar este proyecto de investigación.

A toda mi familia por apoyarme de manera incondicional y desinteresada en los momentos de mayor dificultad. Pero especialmente a la memoria de mi madre, mi niña y amiga que con su partida dejó un rayito de luz para iluminar mis días y mi camino, que desde el cielo sigue siendo mi guía.

Y extensivamente a cada persona que me apoyó y acompaño en los momentos más importantes e hicieron de esta experiencia especial e inolvidable.

Ángela Jhoana Rodríguez Sarasty

Dedicatoria

A mis padres y hermanas, por su incondicional apoyo y acompañamiento en todo este proceso, por haber creído en mí, y especialmente por inculcarme los valores que me han formado como persona.

A toda mi familia, amigos y amigas por su confianza, respaldo y compañía en los momentos necesarios.

A mis compañeros y compañeras de camino, porque este sueño sí es posible.

Alexander Gaviria Collazos

AGRADECIMIENTOS

Gracias doy a Dios por la oportunidad de formarme a través de los obstáculos e inspirarme día a día por medio de cada persona con la que me he encontrado en el camino.

A mi madre Isaura Sarasty, quien fue la luz que me inspiró a seguir adelante y dejó en mi memoria un ejemplo de perseverancia ante las dificultades.

A mi padre Jesús Rodríguez y a mis Hermanos además de su apoyo económico, por su comprensión en todo momento y valiosos consejos.

Mis más sinceros agradecimientos al Grupo de investigación IREHISA quienes brindaron su colaboración y se convirtieron en la familia del aprendizaje contribuyendo a la realización de este trabajo.

Al Doctor Yesid Carvajal como líder del grupo, quien fue nuestro mentor y ejemplo a seguir en el transcurso de nuestra investigación.

Agradezco a la Ingeniera Karime Sedano y al ingeniero Álvaro Ávila, quienes nos orientaron, resolviendo muchas de nuestras inquietudes y con sus recomendaciones apoyaron a la profundización del conocimiento de nuestra investigación.

Gracias a mi compañero de trabajo Alexander Gaviria por su paciencia y comprensión en medio de las dificultades, por ser un apoyo en el momento preciso y recordarme que cada día puedo esforzarme para ser una mejor profesional.

A mis compañeras Diana Rodríguez, Ingrid Cortes, Paola Reina, Maricel Trochez y extensivamente a los innombrables pero memorables amigos y amigas que siempre tuvieron una palabra para impulsar mis pasos hacia adelante, retándome para avanzar cada día más.

A mis compañeros de CORPOICA Tumaco, especialmente al director al ingeniero Jose Ives Perez Zuñiga y Hubert Giraldo por sus consejos y colaboración en el área de telecomunicación requeridos para la realización de esta tesis.

Ángela Jhoana Rodríguez Sarasty

AGRADECIMIENTOS

"No solo no hubiéramos sido nada sin ustedes, sino con toda la gente que estuvo a nuestro alrededor desde el comienzo; algunos siguen hasta hoy. ¡Gracias… Totales!" G. CERATI

A la Universidad del Valle y profesores del plan de Ingeniería Agrícola, por sus aportes en mi formación profesional.

Al Grupo IREHISA por contagiarme de su espíritu de trabajo grupal y académico.

Al profesor Yesid Carvajal por sus consejos, aportes y acompañamiento. Su colaboración fue fundamental y precisa para culminar esta investigación.

A los Ingenieros Álvaro Ávila y Karime Sedano por su fundamental aporte y asesoría en los temas más complejos del trabajo de grado.

Y a todos a los que directa o indirectamente aportaron en este trabajo.

Alexander Gaviria Collazos

LISTA DE ABREVIATURAS

AED	Análisis Exploratorio de Datos
AF	Análisis de Frecuencia
CC	Cambio Climático
CCG	Coeficiente de correlación graficada
CV	Coeficiente de Variación
CMCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CVC	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca
ENOS	El Niño Oscilación del Sur
ECM	Error cuadrático medio
EEA	Error estándar de ajuste
CO	Estación climatológica
EV	Estación evaporimétrica
PG	Estación pluviográfica
PM	Estación pluviométrica
FDP	Funciones de Distribución de Probabilidad
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia
IREHISA	Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos
SOI	Índice de Oscilación del Sur
MEI	Índice Multivariado del ENOS
ONI	Índice Oceánico del Niño
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
MC	Macroclimáticos
MV	Máxima verosimilitud
MM	Métodos de ajuste momentos
MPP	Momentos de probabilidad ponderada
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NOA	Oscilación del Atlántico Norte
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
Tr	Períodos de retorno
PBA	Pruebas de Bondad de Ajuste
Tc	Tiempo de concentración
VA	Valle alto del río Cauca
VMT	Valor Máximo Teórico
VC	Variabilidad climática
VM	Variables Macroclimáticas
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical

RESUMEN

El presente estudio se enfoca en la aplicabilidad meteorológica de tres modelos probabilísticos, correspondientes a las funciones de distribución Gumbel, LogNormal y LogPearson Tipo III, para series máximas de precipitaciones diarias. El estudio se realizó con la red de monitoreo de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) en la región de la cuenca alta del río Cauca, cubriendo todas las principales subcuencas de la zona.

Se realizó la prueba de estacionariedad con el objetivo de observar la variable de precipitación secuencialmente en el tiempo, la cual puede ser estudiada de manera discreta o continúa; con estas prueba se intentaron 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 se realizó con las funciones de distribución de probabilidad tradicionales y con las funciones mixtas; estas últimas debido a que se parte de considerar que las poblaciones de precipitaciones máximas provienen de muestras diferentes, por lo tanto las funciones mixtas son adecuadas para enfrentar la presencia de la variabilidad y cambio climático. Estas son el resultado de la sumatoria de las funciones de distribución de probabilidad de cada muestra, multiplicada por un factor de ponderación dado por la relación entre los datos de cada muestra y los datos de la serie completa. Por medio de la prueba del error estándar de ajuste, fue posible determinar las funciones de distribución de probabilidad tradicional y mixta que mejor representan a las series de precipitaciones máximas diarias. La función tradicional LogPearson tipo III representó mejor los datos de las precipitaciones máximas diarias; 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 se investigó el impacto del fenómeno de La Niña en las lluvias máximas a través de los reportes de inundaciones, deslizamientos de tierra entre otros, registrados en noticias, y DesInventar que es una plataforma informática con reportes históricos de diferentes desastres ocurridos en toda Colombia. Se logró identificar que las lluvias máximas de todo el registro, no necesariamente se presentan en La Niña, pero estas son más continuas y frecuentes en este período, razón por la cual genera impactos en la región.

Presentación del trabajo

El siguiente trabajo de grado, se estructura en 5 partes que engloban el contenido de la investigación desarrollada:

1. Contiene la introducción, justificación y objetivos de la investigación, donde se describe la importancia de realizar el estudio de las precipitaciones máximas diarias, los principales impactos generados por la variabilidad y cambio climático, y la intención del estudio.

2. Se presentan los principales antecedentes y el marco teórico relacionados con la investigación, donde se describe los diferentes temas que inciden en la variabilidad y cambio climático, las variables macroclimáticas, el fenómeno ENOS, además de conceptualizar en el AF y las funciones de distribución de probabilidad.

3. En la tercera parte se realiza la descripción de la zona de estudio, se tratan aspectos relacionados a las estaciones analizadas y se presenta la metodología aplicada para dar cumplimiento a los objetivos de la investigación.

4. Se presentan y discuten los resultados del AED, prueba de estacionariedad, AF y relación de las precipitaciones máximas en la fase fría de El ENOS con los principales eventos de inundación registrados en el período de tiempo estudiado.

5. Contiene las principales conclusiones, recomendaciones y futuras líneas de investigación, determinadas a partir de los objetivos planteados al inicio de la investigación, además se presentan la bibliografía y anexos del trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 8
2. JUSTIFICACIÓN 10
3. OBJETIVOS 12
   3.1 GENERAL 12
   3.2 ESPECÍFICOS 12
4. ANTECEDENTES 13
5. MARCO TEÓRICO 16
   5.1 VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y CAMBIO CLIMÁTICO 16
   5.2 INUNDACIONES EN COLOMBIA POR LLUVIAS MÁXIMAS 17
   5.3 ZONA DE CONVERGENCIA INTERTROPICAL 21
   5.4 EL NIÑO OSCILACIÓN DEL SUR 21
   5.5 VARIABLES MACROCLIMÁTICAS 23
   5.6 ESTACIONARIEDAD 26
   5.7 ANÁLISIS DE FRECUENCIA 28
      5.7.1 Funciones de Distribución de Probabilidad 30
      5.7.2 FDP Mixtas 33
      5.7.3 Método Empírico 35
      5.7.4 Ajuste de distribución de probabilidad o ajuste de Curva 35
      5.7.5 Pruebas de Bondad de ajuste 36
6. METODOLOGÍA 38
   6.1 ÁRBOL METODOLÓGICO 38
   6.2 CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO 38
      6.2.1 Selección de la zona de estudio 38
      6.2.2 Descripción de la zona de estudio 39
      6.2.3 Selección de la Red de Precipitación 43
   6.3 EVALUACIÓN DE LA HIPÓTESIS DE ESTACIONARIEDAD 44
      6.3.1 Análisis Exploratorio y Confirmatorio de Datos 45
      6.3.2 Prueba de Estacionariedad 45
   6.4 ANÁLISIS DE FRECUENCIA CON FUNCIONES DE PROBABILIDAD TRADICIONALES Y MIXTAS 46
   6.5 IMPACTO DE LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS DIARIAS EN EL VALLE ALTO DEL RÍO CAUCA 48
   6.6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS 48

6.7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 48
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 49
7.1 EVALUACIÓN DE LA HIPÓTESIS DE ESTACIONARIEDAD 49
7.1.1 Análisis Exploratorio y Confirmatorio de Datos 49
7.1.2 Hipótesis de estacionariedad 56
7.2 ANÁLISIS DE FRECUENCIA 58
7.2.1 Prueba de ajuste 58
7.2.2 Funciones tradicionales y mixtas 60
7.3 IMPACTOS DE LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS DIARIAS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CAUCA 70
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 74
9. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN 76
10. BIBLIOGRAFÍA 77
11. ANEXOS 86

Índice de Figuras

Figura 1. Municipios susceptibles a procesos de inundación en Colombia 19
Figura 2. Represa de Salvajinas 20
Figura 3. Posición media de la ZCIT para los períodos enero y julio 21
Figura 4. Representación de las condiciones oceánicas y atmosféricas de los años ENOS y Normal 23
Figura 5. Regiones de la temperatura superficial del Océano Pacifico en la franja tropical 25
Figura 6. Árbol metodológico de la investigación 38
Figura 7. Cuenca hidrográfica del río Cauca 40
Figura 8. Cuenca alta río Cauca 41
Figura 9. Ubicación de las estaciones analizadas en la cuenca alta del río Cauca 49
Figura 10. Distribución espacial de las precipitaciones máximas asociadas a períodos de retorno de 5 años, con funciones Gumbel, LogNormal y LogPearson III que presentaron mejor ajuste en la cuenca alta del río Cauca 68
Figura 11. Distribución espacial de las precipitaciones máximas asociadas a períodos de retorno de 50 años, con funciones Gumbel, LogNormal y LogPearson III que presentaron mejor ajuste en la cuenca alta del río Cauca 69
Figura 12. Distribución espacial de las precipitaciones máximas asociadas a períodos de retorno de 100 años, con funciones Gumbel, LogNormal y LogPearson III que presentaron mejor ajuste en la cuenca alta del río Cauca 70

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Zonificación altitudinal y distribución porcentual de todas las estaciones 50
Gráfica 2. Precipitación (mm) de la media mensual multianual de 3 estaciones de la cuenca del río Cauca en su valle alto. 50
Gráfica 3. Valor de la precipitación (mm) máxima diaria para cada estación 52
Gráfica 4. Histogramas y diagrama de cajas de precipitaciones máximas diarias para las estaciones de Pan de Azúcar y El Retiro 53
Gráfica 5. Normal P-P de la precipitación máxima diaria para las estaciones Pan de Azúcar y el Retiro 53

Gráfica 6. Prueba de estacionariedad para series de precipitaciones máximas diarias de las estaciones: A) Coconuco, B) Dinde y C) El Tambo 57
Gráfica 7. Función de mejor ajuste para 55 estaciones con series de precipitaciones máximas diarias del valle alto del río Cauca, presentado porcentual y numéricamente 60
Gráfica 8. Período de retorno de Gumbel, LogNormal y LogPearson tipo III de precipitaciones máximas diarias con series tradicionales 61
Gráfica 9. Período de retorno de Gumbel, LogNormal y LogPearson tipo III de precipitaciones máximas diarias con series mixtas (La Niña y No Niña) 62
Gráfica 10. Período de retorno de Gumbel, LogNormal y LogPearson tipo III de precipitaciones máximas diarias con series tradicionales y mixtas de mejor ajuste (La Niña y No Niña) 63
Gráfica 11. Comparación en el período de retorno para las funciones tradicionales y mixtas de la parte baja de la zona de estudio, estaciones Puerto Molina y Juanchito 65
Gráfica 12. Comparación en el período de retorno para las funciones tradicionales y mixtas de la parte media de la zona de estudio, estaciones Dosquebradas, La Teresita, La Irlanda y El Tambo 66
Gráfica 13. Comparación en el período de retorno para las funciones tradicionales y mixtas de la parte alta de la zona de estudio, estación Bolo Blanco 67
Gráfica 14. Porcentaje de afectados por las lluvias en los períodos Niña y No Niña 72

Índice de Tablas

Tabla 1. Inundaciones históricas en el valle alto del río Cauca 20
Tabla 2. Distribuciones de Probabilidad más utilizadas en hidrología con sus respectivos parámetros 30
Tabla 3. Tendencia general para las series analizadas 35
Tabla 4. Métodos comunes para Ajuste de Distribución de Probabilidad en la hidrología 36
Tabla 5. Distribución de la Cuenca Hidrográfica del Río Cauca 39
Tabla 6. Consenso para la clasificación de los años ENOS y No ENOS (1950 a 2011), según año hidrológico (01 de Junio del año *i* y finaliza el 31 de Mayo del año *i* + 1) 44
Tabla 7. Información básica de 55 estaciones estudiadas de valle alto del río Cauca 51
Tabla 8. Variables estadísticas para 5 estaciones 54
Tabla 9. Resultado de la prueba de normalidad Shapiro-Wilk para una muestra de 6 estaciones 55

Tabla 10. Prueba no paramétrica para una muestra de 10 estaciones escogidas aleatoriamente 56
Tabla 11. EEA de las funciones tradicionales y mixtas de series de precipitaciones máximas diarias, en 55 estaciones de la cuenca alta del río Cauca 58
Tabla 12. Funciones de mejor ajuste, distribuidas porcentualmente por altura 64
Tabla 13. Años en los que se registran eventos críticos asociados a precipitaciones en años La Niña y No Niña, según año hidrológico..... 71



1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas hidrológicos son afectados por eventos extremos, tales como tormentas severas, crecientes y sequías. La magnitud de cada evento extremo está inversamente relacionada con su frecuencia de ocurrencia, es decir eventos muy severos ocurren con menor frecuencia que eventos moderados (Chow, Maidment, y Mays, 1994). El estudio de estos sistemas hidrológicos se basa en suposiciones de independencia y estacionariedad; sin embargo, frente a la Variabilidad climática (VC) y el Cambio climático (CC), estas suposiciones no se conservan y los resultados del análisis hidrológico tradicional generan mucha incertidumbre; bajo estas circunstancias, es importante recurrir a realizar otras aproximaciones que incorporen la no independencia y no estacionariedad de los extremos hidroclimatológicos (Khaliq, et al., 2006) citado en (Álvarez y Poveda, 2006).

La VC y el CC se consideran como uno de los principales problemas ambientales que enfrenta el mundo en el siglo XXI; su interrelación es una amenaza evidente con profundas implicaciones en las poblaciones más vulnerables (Carvajal, 2011a), durante el siglo XX la temperatura media en la superficie del planeta aumentó entre 0,2°C y 0,6°C presentándose un mayor incremento en los continentes que en los océanos. Con respecto a las precipitaciones se puede afirmar que han aumentado considerablemente en el Hemisferio Norte y han disminuido en regiones del Mediterráneo y África occidental; también es importante mencionar que se han aumentado los eventos extremos de precipitación así como la intensidad máxima de los ciclones tropicales y la intensidad media y máxima de las precipitaciones (Mesa, 2006).

Los efectos de la VC y el CC en Colombia han generado alarmantes situaciones para el desarrollo de las actividades humanas, económicas, agrícolas, industriales, entre otras (Carvajal, 2011a); estos efectos se enmarcan dentro de El fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) fase cálida y fría (El Niño y La Niña) y se manifiestan de manera cada vez más clara y contundente en el país en los ciclos recurrentes de sequía e inundaciones; por ejemplo las últimas temporadas de lluvias intensas han dejado al descubierto el inadecuado manejo ambiental que se ha presentado en las cuencas hidrográficas especialmente en la vertiente del Caribe como lo son el río Cauca y Magdalena, presentándose inundaciones en

29 de los 32 departamentos, con más de tres millones de personas damnificadas y los daños a la infraestructura vial del país que superan los 20 billones de pesos (El Colombiano, 2012).

En el Valle del Cauca la VC interanual está muy asociado a El ENOS reflejándose en la fase cálida (El Niño) por déficit hídrico, sequías, incendios forestales, pérdidas de cultivos, incremento de enfermedades, racionamiento de energía y en la fase fría (La Niña) por exceso de lluvias, crecientes súbitas, riesgos de inundación, desbordamientos, erosión y destrucción en la infraestructura vial e hidráulica. Según un informe de Colombia Humanitaria (2011), presentado por el gobierno nacional, se reportaron en cifras la tragedia más fuerte que ha soportado esta zona del país en su historia tras el paso del Fenómeno de La Niña, destinándose $24´285´346.072 en atención humanitaria y $118´659´644.642 en recuperación y construcción de infraestructura.

El Análisis de Frecuencia (AF) de series meteorológicas está basado en la hipótesis de estacionariedad de las Funciones de Distribución de Probabilidad (FDP), hipótesis que no se cumple ante los efectos mencionados de la VC y el CC, sumados a la recurrencia de El ENOS que es el principal mecanismo modulador del clima global a la escala de tiempo interanual; es necesario entonces encontrar métodos de AF que incorporen la VC, el CC y el fenómeno ENOS (Álvarez y Poveda, 2012). En esta investigación se realizó el análisis y comparación de frecuencia utilizando diferentes distribuciones de probabilidad con series de precipitación en la cuenca del río Cauca en su valle alto para determinar la función de distribución de mejor ajuste. Esta investigación se enmarco en el proyecto “Construcción del modelo conceptual para la restauración del corredor de conservación y uso sostenible del sistema río Cauca en su valle alto” realizado conjuntamente por la CVC y el Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos (IREHISA), y se contó con información de precipitación en 24 horas en estaciones distribuidas en la cuenca alta del río Cauca (Norte del Cauca y Valle del Cauca).

Con esta investigación se logró estudiar las precipitaciones máximas diarias por medio de la prueba de estacionariedad y AF, estableciendo cuáles son las funciones que mejor ajuste presentan con distribuciones tradicionales y mixtas con diferentes períodos de retorno (Tr) para la cuenca alta del río Cauca.



2. JUSTIFICACIÓN

El AF de precipitaciones de series máximas diarias para distintos Tr, se basa en la hipótesis de estacionariedad. Esta hipótesis es invalida ante las evidencias de los impactos de la VC y el CC, así como de la deforestación y los cambios en los usos del suelo y sobre la dinámica de los procesos hidrológicos en las cuencas hidrográficas (Álvarez y Poveda, 2012); estos análisis son necesarios para la planeación y diseño de proyectos relacionados con el agua, donde según Mesa, Poveda y Carvajal (1997) la información hidroclimatológica proviene de eventos hidrometeorológicos gobernados por las leyes del azar (Castro y Carvajal, 2010).

Los estudios realizados por Álvarez y Poveda, (2012); Puertas, Carvajal, y Quintero, (2011); Vincent, (2007); Burton, Diringer, y Smith, (2006) y Haddad, (2005), indican que si bien no se puede definir una periodicidad para la ocurrencia de los fenómenos climáticos, se puede identificar que durante las últimas décadas la ocurrencia ha sido más frecuente además de un evidente aumento en la magnitud, impactando principalmente a los países más vulnerables que generalmente son los que están en vía de desarrollo. Se ha observado que las fases de lluvias se han desplazado en Colombia, es decir, en muchos lugares del país sigue lloviendo la misma cantidad pero los registros mensuales de las estaciones hidrometeorológicas, las reportan en meses que usualmente presentan precipitaciones menores, generando implicaciones en el suministro de agua, agricultura, generación de electricidad, navegación fluvial, salud humana, diseño hidráulico e hidrológico, entre otras.

El Valle del Cauca, departamento que ha sido considerado como una de las regiones con mayor potencial de desarrollo social y económico, presenta dificultades para el aprovechamiento de los recursos naturales y la extensión de cultivos debido a las sequías e inundaciones (Carvajal, 2011b). Según Osso y la Red (2004) citados en Carvajal (2011b), se reportaron cerca de 1.000 desastres históricos entre 1921 y 2003 por inundaciones, lluvias y avenidas torrenciales que generaron pérdidas en el área plana del Valle del Cauca.

En el 2010 y 2011, el río Cauca ocasionó inundaciones en el Valle del Cauca, originando pérdidas significativas en centros poblados y sectores de la economía. La ocupación e

intervención inadecuada de las subcuencas del valle alto del río Cauca, son la causa principal de estas pérdidas (CVC, 2011a).

Desde principios del siglo XX ha existido en el país interés por monitorear el clima en todo el territorio; en el departamento del Valle del Cauca el desarrollo agroindustrial y la intensa actividad agrícola dieron lugar a la instalación de una red de estaciones para medición de las lluvias en las principales poblaciones de la región: Cali, Cartago, Tuluá, Palmira, Dagua y Buenaventura; con la intención de minimizar los impactos mencionados anteriormente (CVC y Universidad del Valle, 2007).

La planificación de acciones que minimicen esos impactos, requiere del análisis y detección de las modificaciones históricas de las variables climáticas, para lo cual se han estudiado las Funciones de Distribución de Probabilidad (FDP) utilizadas tradicionalmente en la hidrología. Álvarez y Poveda (2012) concluyen para el caso de caudales y lluvias máximas, los eventos muy extremos tienen probabilidades muy exiguas de ser superados tendiendo rápidamente a 1, es decir, que la probabilidad es muy escasa, pequeña o insuficiente de acuerdo a lo que tradicionalmente se determina tendiendo lentamente a 1 donde los eventos extremos tienen alta probabilidad de ser superados.

Es necesario estudiar las alteraciones de la precipitación en escalas de lluvia total-anual, semestral, trimestral y eventos máximos diarios, mensuales, trimestrales, semestrales y anuales asociados al ENOS en el marco de la VC y el CC, con AF ya que éstas generan muestras estadísticas provenientes de funciones de probabilidad diferentes, para ajustar adaptaciones frente a los cambios actuales y futuros, comprendiendo los cambios históricos espacio-temporales en el patrón regional de lluvias del Valle del Cauca, con FDP mixtas que representan mejor el comportamiento de la precipitación a nivel interanual.

En este trabajo se realizó el AF de eventos máximos de precipitaciones diarias, utilizando FDP tradicionales y mixtas en la cuenca alta del río Cauca, presentando los siguientes objetivos.



3. OBJETIVOS

3.1 GENERAL

Estudiar las series de precipitaciones máximas diarias según año hidrológico con análisis de frecuencia, utilizando funciones de distribución de probabilidad para la cuenca alta del río Cauca.

3.2 ESPECÍFICOS

1. Seleccionar la serie de precipitaciones máximas diarias según año hidrológico y evaluar la hipótesis de estacionariedad para la serie escogida.

2. Realizar el análisis de frecuencia con series de precipitaciones máximas diarias con las funciones de distribución de probabilidad Gumbel, LogNormal y LogPearson tradicional y funciones mixtas para las muestras La Niña y La No Niña.

3. Identificar el impacto de las precipitaciones máximas diarias, con relación al fenómeno ENOS fase fría (La Niña) y La No Niña (años Normales y El Niño) en la cuenca alta del río Cauca.



4. ANTECEDENTES

Diversos autores han realizado estudios sobre AF, FDP, VC, CC, ENOS, caudales máximos y precipitaciones máximas en el Valle del Cauca, en Colombia y en todo el continente; estos han explicado los fenómenos Macroclimáticos (MC) y las implicaciones presentadas en cuencas del País, otros han abordado los temas MC con las estimaciones estadísticas de frecuencia con FDP utilizadas en hidrología. A continuación se presentan algunos de estos autores que son referencia para la línea de investigación de este estudio.

Poveda y Álvarez, (2012), muestran las evidencias del no cumplimiento de la hipótesis de estacionariedad usando registros hidrológicos de Colombia, e implementan varios métodos para estimar caudales extremos a través de FDP Mixtas, que permiten considerar los efectos de la VC en las series de caudales extremos. Concluyen que al aplicar estos modelos en los registros de caudales extremos en ríos colombianos, se encuentra que, de manera general, la función de distribución Mixta Weibull Tipo I, presenta buenos estimativos en los caudales mínimos extremos, y la función Mixta Fréchét Tipo I es adecuada para estimar caudales máximos extremos.

Stedinger, (2012), realiza análisis de frecuencia de crecientes a partir de los registros de la VC histórica y el CC ya que el riesgo de inundación existente en áreas particulares tienden a ser limitados, plantea si el calentamiento global va a incrementar o a disminuir el riesgo de inundación. Concluye que la evidencia de las variaciones naturales en el sistema climático que se supone que son relativamente estables, claramente han cambiado, están cambiando, y continuarán haciéndolo, los factores antrópicos influye aún más, agravando el peligro inevitable de las variaciones naturales del clima.

Piñeros et al., (2012), rastrean los fenómenos de la VC en el país y reúnen información sobre los impactos más importantes de la VC y el CC sobre los sistemas de agua dulce en Colombia, hacen un recuento de algunos puntos claves respecto a la estimación de la vulnerabilidad de los recursos hídricos frente a dichos impactos, describiendo modelos de análisis, resultados y pasos a seguir en la generación de conocimientos que puedan mejorar el manejo del recurso hídrico en Colombia.

Puertas, Carvajal, y Quintero, (2011), estudian las alteraciones en la oferta hídrica asociada a la VC y al CC; éste estudio es importante para ajustar adaptaciones frente a los cambios actuales y futuros del clima. Analizan las tendencias de la precipitación mensual de la serie de 1975 a 2006 en la cuenca alta-media del río Cauca. Concluyen que existen cambios en el régimen interanual de la precipitación y, tras comparar las tendencias en la precipitación anual con variables geográficas como altitud, latitud y longitud, por encima de los 1.500 msnm y en latitud menor a 3º52'N en la cordillera de los Andes, existe reducción generalizada en la lluvia. Dichos cambios, afectarán negativamente la generación y la disponibilidad de la escorrentía, que representa la oferta hídrica en la cuenca.

Álvarez y Poveda, (2006), aplican una metodología para la estimación de eventos extremos de caudales máximos diarios en ríos de Colombia, mediante el uso de FDP mixtas que representan mejor el comportamiento de la hidrología a nivel interanual. Concluyen que es necesario modelar el comportamiento de caudales máximos con FDP mixtas que consideren las dos fases del ENOS. Este enfoque hace necesario replantear los análisis tradicionales de caudales extremos de distintos Tr en tareas de diseño hidrológico.

Raynal y García, (2005), estudian la FDP general de valores extremos para tres poblaciones (TPGVE) en caudales máximos anuales, se propone también un procedimiento para estimar sus parámetros, basado en el método de máxima verosimilitud (MV). Han concluido principalmente que el modelo ha funcionado muy bien en la mayoría de las muestras de caudales máximos hasta ahora analizadas y que el modelo propuesto ha resultado ser la mejor opción de ajuste a los datos de muestra provenientes de varias poblaciones, cuando ha sido comparado con dos distribuciones de probabilidad de una población y con otro modelo de tres poblaciones.

Raynal y Raynal, (2004), presentan una metodología para la obtención de los límites de confianza para la distribución de probabilidad de valores extremos tipo I para dos poblaciones. La metodología está basada en la aplicación de MV para calcular los parámetros y los límites de confianza de los valores de diseño. Estos son obtenidos por medio de la matriz de varianza-covarianza de los parámetros y con la suposición de que los valores de diseño poseen una distribución normal. Los resultados obtenidos indican que es una metodología promisoria ya que en varios casos se ha encontrado una reducción en el ancho de los límites de confianza además de un mejor ajuste de la FDP propuesta a los datos de muestra.

Castro y Hoyos, (2004), desarrollan 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), 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).

Heredia, (1998), plantea para la costa ecuatoriana, la evidencia de que las series hidrológicas de máximos en regiones afectadas por el fenómeno ENOS son series compuestas por probabilidades mixtas y las distribuciones de probabilidad clásicas, no son suficientes para describir este proceso; presenta una metodología regional apropiada para tratar el AF de los extremos hidrológicos en regiones afectadas por "El Niño" basada en una distribución de probabilidad de doble componente TCEV. Concluye que el uso de la distribución compuesta permite modelar de manera satisfactoria los procesos provenientes de diversos tipos de eventos. Mientras la aplicación de un procedimiento de regionalización permite suplir la insuficiencia de datos.

Carvajal, Jiménez y Materón, (1998b), presentan algunas de las manifestaciones de ENOS y el impacto que ocasiona en la disponibilidad hídrica del Valle del Cauca durante la fase cálida y fría. Concluye que la variabilidad mensual de los caudales medios en la zona de estudio está fuertemente determinada por el fenómeno ENOS en sus fases cálida y fría. La tendencia es a un clima más seco cuando el Pacífico está en su fase cálida y la oscilación del sur es negativa, mientras que la fase fría está acompañada de mayores lluvias. Recomiendan que el CC global y su impacto regional deba ser una prioridad en la investigación ya que cada vez los riesgos son mayores y los investigadores evidencian señales claras, que sugieren la ocurrencia de eventos más extremos y frecuentes.

Waylen y Caviedes, (1986), estudian la distribución Gumbel mixta de tres componentes; modelando las frecuencias de las inundaciones anuales observadas de los ríos en el norte de Perú, que muestran los picos característicos de las inundaciones anuales. Obtienen que los parámetros del modelo revelan tendencias espaciales marcadas en la severidad y magnitud de las inundaciones durante cualquier conjunto de condiciones en alta mar y los cambios geográficos en las características de frecuencia de inundaciones regionales entre tales condiciones.



5. MARCO TEÓRICO

5.1 VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y CAMBIO CLIMÁTICO

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC), define este término como una importante variación en el estado del clima, que persiste durante un período prolongado, este 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 los suelos (Escobar, 2008). El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) lo define como todo cambió en el clima producido a lo largo del tiempo, debido a variabilidad natural o a la actividad humana (IPCC, 2007b) citado en (Carvajal, 2011a).

El concepto de variabilidad climática denota las variaciones del estado medio y otras características estadísticas (desviación típica, sucesos extremos, etc.) del clima en todas las escalas espaciales y temporales más amplias que las de los fenómenos meteorológicos. La variabilidad puede deberse a procesos internos naturales del sistema climático (variabilidad interna) o a variaciones del forzamiento externo natural o antropogénico (variabilidad externa) (IPCC, 2007a).

Impactos de la VC y el CC

Como resultado de las fuerzas naturales y antrópicas la VC y el CC han producido cambios en el clima de la tierra; y la temperatura de la superficie terrestre y marina ha cambiado incidiendo sobre las diferentes variables meteorológicas, induciendo a su vez cambios en los patrones de precipitación y aumentado la frecuencia e intensidad de los fenómenos asociados con El Niño y la Niña lo largo del siglo XX (IPCC, 2002).

De acuerdo con lo anterior, la VC y el CC, afecta la disponibilidad hídrica, y todos los sistemas asociados a ella, como su gestión, las prácticas agrícolas y los ecosistemas (Puertas, Carvajal,

y Quintero, 2011), y Colombia no ha sido ajena a los cambios inevitables del clima global. Por ejemplo, uno de los periodos más críticos en términos de precipitación promedio anual, se evidenció en el año 2010, que ha sido el más lluvioso de los últimos 30 años (García, et al., 2012).

Además de lo anterior, la presencia de fuertes precipitaciones, y sequías prolongadas, afectan la calidad de agua, y trae consigo efectos como la erosión, desertificación y salinización de los suelos, y en general los cambios que ocurren a los ecosistemas (IPCC, 2002). Es por ello que es imprescindible la planificación de acciones que minimicen esos impactos requiere del análisis y detección de las modificaciones históricas, así, se convierte en una necesidad, a la cual debemos enfrentar como sociedad organizada (Puertas, Carvajal y Quintero, 2011).

5.2 INUNDACIONES EN COLOMBIA POR LLUVIAS MÁXIMAS

Definición de inundación

Es un evento natural y recurrente que se produce en las corrientes de agua, como resultado de lluvias intensas o continuas que, al sobrepasar la capacidad de retención del suelo y de los cauces, desbordan e inundan llanuras de inundación, en general, aquellos terrenos aledaños a los cursos de agua. Las inundaciones se pueden dividir de acuerdo con el régimen de los cauces en: lenta o de tipo aluvial, súbita o de tipo torrencial y encharcamiento (IDEAM, 2013).

Inundación de tipo aluvial o lenta

Se produce cuando hay lluvias persistentes y generalizadas dentro de una gran cuenca, generando un incremento paulatino de los caudales de los ríos hasta superar la capacidad máxima de almacenamiento; se produce entonces el desbordamiento y la inundación de las áreas planas aledañas al cauce principal. Las crecientes así producidas son inicialmente lentas y tienen una gran duración. En Colombia, se dan en las partes bajas de las cuencas de los ríos Magdalena, Cauca, Sinú, San Jorge, Orinoquia y Amazonia (IDEAM, 2013).

Creciente o Inundación de tipo torrencial (inundación súbita)

Producida en ríos de montaña y originada por lluvias intensas. El área de la cuenca aportante es reducida y tiene fuertes pendientes. El aumento de los caudales se produce cuando la cuenca recibe la acción de las tormentas durante determinadas épocas del año, por lo que las crecientes suelen ser repentinas y de corta duración. Estas inundaciones son generalmente las que causan los mayores estragos en la población por ser intempestivas. En Colombia se presentan con regularidad en las cuencas de la región Andina (IDEAM, 2013). La cuenca del río Dagua es catalogada como torrencial, por lo tanto, en esta cuenca se presentan este tipo de crecientes o avenidas torrenciales.

Encharcamiento

Fenómeno a causa de la saturación del suelo, caracterizado por la presencia de láminas delgadas de agua sobre la superficie del suelo en pequeñas extensiones y por lo general, presente en zonas moderadamente onduladas a planas. El fenómeno puede durar desde pocas horas hasta unos pocos días (IDEAM, 2013).

Nivel crítico o nivel de inundación

Corresponde al nivel de un río al que comienzan los desbordamientos y anegamientos que pueden causar inundaciones en el sitio o las áreas aledañas localizadas aguas abajo o aguas arriba del punto de referencia. Estos niveles están asociados topográficamente a las estaciones automáticas o a aquellas hidrométricas cuya información puede recibirse en tiempo real o diariamente, a través de radio o teléfono; de esta manera, en caso de un evento extremo se da un aviso o una alerta oportuna. En general, las zonas inundables corresponden a la planicie inundable de la zona baja de las cuencas (IDEAM, 2013).

Inundaciones en Colombia

Las inundaciones, se han convertido en tema central para la comunidad investigativa de los fenómenos hidrometeorológicos, los gobiernos y las personas que se ven afectadas de manera directa o indirecta. Las inundaciones son más intensas en los lugares donde hay precipitaciones máximas, aunque la lluvia no es el único generador de las inundaciones. La

mayoría de las inundaciones tardan horas e incluso días en formarse cuando se presentan en zonas planas o donde el tiempo de concentración (tc) es largo, pero otras se generan rápidamente y sin aviso como el caso de las cuencas torrenciales andinas donde el tc es corto.

La VC y el CC en las últimas décadas, ha intensificado las inundaciones generando cuantiosas pérdidas humanas, sociales y económicas (OCDE, 2013). Según el periódico de la Universidad Nacional (2009) del total de muertes por todos los desastres en los últimos 30 años en el mundo, el 55% corresponden a eventos catastróficos por inundaciones.

Las inundaciones en Colombia se presentan en casi todo el territorio, especialmente en zonas de alta precipitación. El director general del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), señala que las zonas afectadas por la temporada de lluvia del año 2011 asciende a 2'091.871 Ha y otras 10'471.013 están en riesgo de inundarse si se presenta otra temporada de lluvia con las mismas precipitaciones. Según el monitoreo que realiza diariamente el IGAC, se destaca que la afectación de los predios es de 150.481 inundados lo que abarca un área de terreno de 9.000 Ha, 29.076 predios parcialmente para un total de 180 mil predios, y esto obedece a que las inundaciones que tenemos son las más grandes en los últimos 100 años (Gómez, 2012). En la figura 1, se presentan los municipios susceptibles a inundaciones en el país, que resulta siendo la mayor parte.



Figura 1. Municipios susceptibles a procesos de inundación en Colombia
Fuente: Sistema de Información Ambiental de Colombia (2014)

Los efectos climáticos de los últimos años empezaron a sentirse por el incremento de las lluvias en las regiones Caribe y Andina. Los mayores impactos se presentaron en la segunda temporada de lluvias del 2010 y durante la primera temporada de lluvias del 2011, manifestándose en un aumento significativo de los niveles de los ríos y con ello la eminente inundación en gran parte del área rural, crecientes súbitas en las zonas de alta pendiente y aumento en la probabilidad de deslizamientos de tierra, generando arrastre de sedimentos de gran volumen que aguas abajo ocasionan desbordamiento de los ríos (Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE, IDEAM, IGAC, 2011). Esto lo que ha demostrado es que los desastres ocurridos por inundaciones no son desastres naturales, son desastres de tipo administrativo que han dado las condiciones necesarias tanto políticas como económicas para que la sociedad sea más vulnerable a estos eventos.

Las cifras presentadas por Sedano, Ávila y Carvajal, (2012) registran que las temporadas de lluvia y el fenómeno de La Niña 2010/2011 dejaron: 3´219.492 damnificados; 444 muertos; 524 heridos; 71 desaparecidos; 1.027 municipios afectados; 28 departamentos impactados, para un total de 1´080.000 hectáreas, con un costo por daños totales que ascendió a $762.000 millones de pesos.

En la tabla 1 se presenta el área afectada por las inundaciones, en el Valle del Cauca, se debe tener en cuenta que después de 1985 se construyó la represa de La Salvajina, regulando el caudal del río Cauca y disminuyendo las inundaciones en el Valle alto de río Cauca a consecuencia de las crecientes de este caudal.

Tabla 1. Inundaciones históricas en el valle alto del río Cauca

Años	Áreas (Ha)
1966	36.400
1967	16.000
1971	59.000
1974	40.000
1975	41.000
1982	11.000
1984	23.000
1988	8.000
1997	5.400
1999	11.500
2008	8.382
2010	41.173
2011	48.440

Fuente: CVC, 2011b

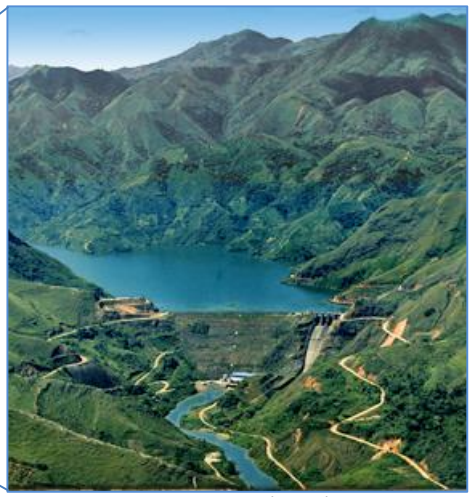


Figura 2. Represa de Salvajinas
Fuente: EPSA (2014)

5.3 ZONA DE CONVERGENCIA INTERTROPICAL

La Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) es una estrecha banda zonal de vigorosa convección, que se manifiesta por el desarrollo de cúmulus que señala la convergencia entre los vientos alisios del norte y sur. En la ZCIT los vientos Alisios del Noreste que se originan como un flujo alrededor de las altas presiones del Atlántico Norte se reúnen con los vientos alisios del Sureste generados como un flujo alrededor de las altas del Pacífico Sur y Atlántico Sur. El flujo proveniente de la alta del Pacífico Sur rutinariamente cruza el ecuador y se recurva hacia el Oriente, en tales casos se conocen como los suroestes u oestes ecuatoriales. La penetración de este aire depende de la época del año y de la localización alta del Pacífico Sur. Debido al flujo convergente, la ZCIT es la zona de máxima nubosidad y lluvia (León, Zea y Eslava, 2000). En la figura 3, se presenta la posición media de la ZCIT para los períodos de enero y julio.

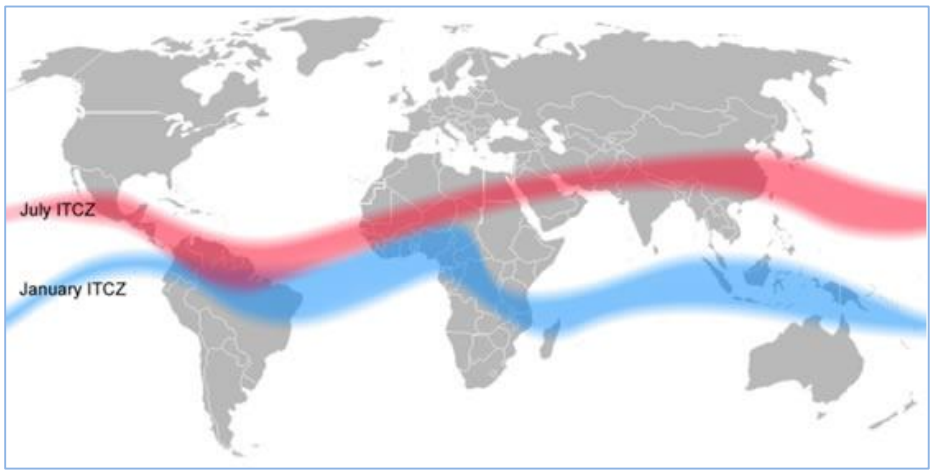


Figura 3. Posición media de la ZCIT para los períodos enero y julio
Fuente: CIOH - Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, 2014

5.4 EL NIÑO OSCILACIÓN DEL SUR

El ENOS es un evento natural entre el océano Pacífico y la atmósfera en la región del Océano Pacífico Ecuatorial. La ocurrencia de El Niño es cíclica, no periódica, es el conjunto de variaciones climáticas interanuales más poderoso a escala planetaria, este patrón climático ocurre en promedio cada 4 años, con variaciones entre 2 y 7 años y un año aproximado de

duración. El patrón de cambios incluye aguas superficiales anormalmente calientes en el Océano Pacifico tropical, presión atmosférica anormalmente baja en Tahití y alta en Darwin, precipitaciones extraordinarias en la costa tradicionalmente seca de Perú, norte de Chile y sur de Ecuador, mayor precipitación en regiones de Norteamérica, sureste de Suramérica y África ecuatorial (Mesa, 2006).

El ENOS presenta dos componentes para el desarrollo de sus fuerzas:

Oceánica: El Niño calentamiento anómalo de las aguas superficiales del centro y este del pacífico Tropical, que produce una profundización del gradiente térmico entre las aguas superficiales más cálidas y las más frías a mayores profundidades, considerada también como "termoclina" del océano, el cual se encuentra asociado con el debilitamiento de los vientos alisios del Este (Carvajal, Jiménez y Materón, 1998a).

Atmosférica: Oscilación Sur, onda estacionaria en la masa atmosférica que produce un gradiente de presiones en el oeste y este del Pacífico Ecuatorial. Generalmente un centro de alta presión se localiza cerca de Tahití, mientras que otro de baja presión se localiza en Indonesia y Norte de Australia; este gradiente de presiones atmosféricas se representa comúnmente con el SOI, definido como la diferencia estandarizada de las presiones atmosféricas en ambos sitios (Carvajal, Jiménez y Materón, 1998a).

El Niño se caracteriza por temperaturas oceánicas por encima del promedio a lo largo de las costas de Ecuador, Perú y el norte de Chile, así como a lo largo de la zona ecuatorial del Pacífico oriental, que persiste en promedio 12 meses, con una recurrencia de 2 a 7 años. En condiciones normales, la superficie del océano en la zona oeste del Pacífico tropical siempre es caliente, la presión atmosférica es baja y las precipitaciones son frecuentes e intensas. Mientras que en el extremo opuesto del Pacífico cercano a Suramérica, el agua es relativamente fría, la presión atmosférica es alta y hay poca lluvia. Cuando se presenta El Niño (ver figura 4), las aguas cálidas de Asia, se dispersan hacia el Este (Suramérica). Las regiones de baja presión y las lluvias torrenciales también migran hacia el Este. En consecuencia, la zona central y oriental del pacífico se calienta y se torna más lluviosa, mientras que en el extremo occidental del Pacífico las condiciones son más secas y frescas, (IDEAM, 2010; Carvajal, 2011b; Sedano, 2012).

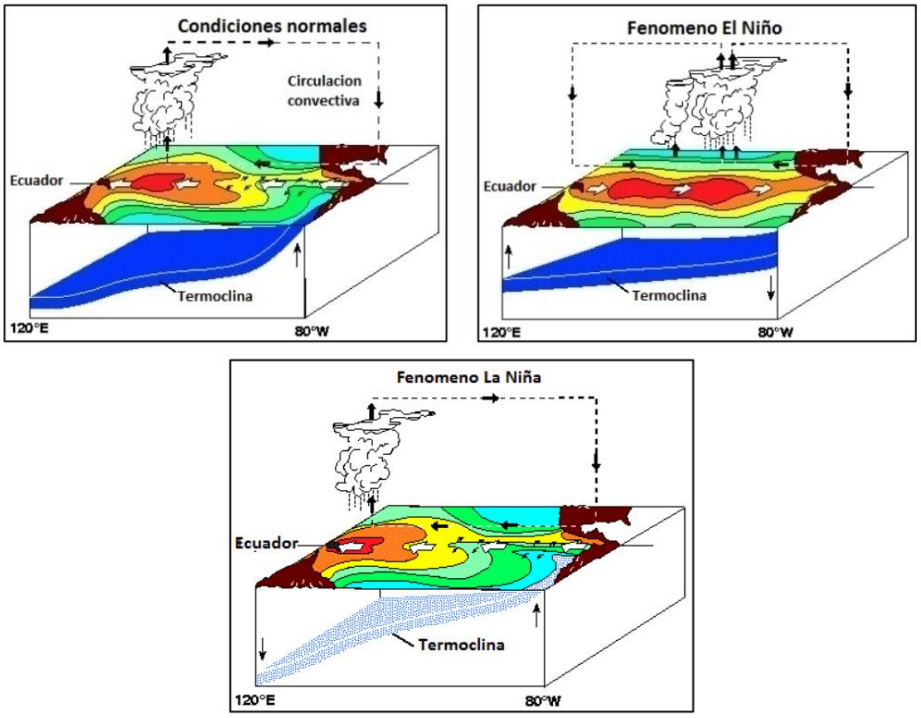


Figura 4. Representación de las condiciones oceánicas y atmosféricas de los años ENOS y Normal
Fuente: NOAA y TAO (2011)

La Niña que se caracteriza por enfriamiento en la temperatura superficial del Océano Pacífico Oeste y variaciones acopladas de la presión atmosférica en dicha región, produciendo cambios en el patrón de vientos atmosféricos sobre el Océano Pacífico tropical (Carvajal, 2011b). En la figura 3 se presentan las condiciones típicas del fenómeno de La Niña. La termoclina está muy cerca de la superficie en el este del océano y, mucho más profunda en el occidente (Australia). Las precipitaciones se producen en el occidente del océano, sobre el sector indonesio y australiano. El área azulada sobre el ecuador muestra la gran extensión del fenómeno. El viento circula en los niveles bajos, muy cercanos a la superficie del mar, de la parte este a la parte oeste del ecuador.

5.5 VARIABLES MACROCLIMÁTICAS

Las Variables Macroclimáticas (VM) son empleadas para clasificar fenómenos climáticos como años ENOS (Niño y Niña) y años normales. Se hace a partir de diferentes variables océano-atmosféricas (también llamados índices macroclimáticos) implementados por

agencias climáticas, como la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), quienes realizan evaluaciones de anomalías sobre registros hidroclimáticos, como series de lluvias y caudales (Bedoya et al., 2010). Las VM son:

Índice Multivariado del ENOS

El Índice Multivariado del ENOS (MEI por sus siglas en inglés) se estima con seis variables principales observadas en el Pacífico tropical: presión atmosférica a nivel del mar, componente zonal (este oeste) y meridional (norte-sur) del viento en superficie, temperatura de la superficie del océano, temperatura del aire en superficie, y cantidad total de nubosidad. Los valores positivos del MEI representan la fase cálida (El Niño) y valores negativos la fase fría (La Niña) (Guarín y Ochoa, 2011).

Oscilación del Atlántico Norte

La Oscilación del Atlántico Norte (NAO por sus siglas en inglés) es la alternación de la masa atmosférica entre las regiones subtropical y subpolar del océano Atlántico Norte, se caracteriza por variaciones en el gradiente de presiones a nivel del mar en escalas mensual y estacional, en los vientos del oeste en las latitudes medias, en las temperaturas superficiales del océano y en el clima de las regiones continentales adyacentes. Se define en términos de la variabilidad de la presión en dos sitios claves, un centro de presión en las islas Azores, influenciado por el centro de alta presión subtropical, y el otro centro de presión sobre Islandia, lugar donde predominan las bajas de presiones. Cuando la alta subtropical está anormalmente fuerte y simultáneamente está anormalmente profunda la baja de Islandia, se presenta el modo positivo de la NAO y es cuando los vientos del oeste del Atlántico están anormalmente fuertes. La fase negativa se da cuando ambos centros de presión están anormalmente débiles lo que implica disminución en los vientos (Mesa 1997).

Índice de Oscilación del Sur

El Índice de Oscilación del Sur (SOI por sus siglas en inglés) representa la componente atmosférica de El ENOS, llamada Oscilación del Sur (SO), que es una onda estacionaria en la masa atmosférica que produce un gradiente de presiones entre el oeste y el este del Pacífico Ecuatorial. El índice SOI se define como la diferencia entre las presiones atmosféricas

estandarizadas entre un centro de alta presión cerca de Tahití (18°S, 150°O) y un centro de baja presión en Darwin (12°S, 131°E). Las anomalías negativas del SOI están asociadas a los eventos cálidos sobre el océano (El Niño), y las anomalías positivas están asociadas con los eventos fríos (La Niña) (Guarín y Ochoa, 2011).

Temperatura Superficial en el Océano Pacífico

La variabilidad de la Temperatura Superficial del Océano en la franja tropical del Pacífico, se mide en cuatro regiones (Guarín y Ochoa, 2011), como se observa en la figura 5:

Región Niño 4: Entre las latitudes 5° Norte y 5° Sur y las Longitudes 160° Este y 150° Oeste.

- Región Niño 3: Entre las latitudes 5° Norte y 5° Sur y las Longitudes 90° y 150° Oeste.
- Región Niño 3-4: Entre las Latitudes 5° Norte y 5° Sur y las Longitudes 120° y 170° Oeste.
- Región Niño 1+2: Entre las Latitudes 0° y 10° Sur y las Longitudes 90° y 80° Oeste.

Temperatura superficial en la región Niño 1+2: Temperatura Promedio de la superficie del océano en las regiones NIÑO1 y NIÑO2.

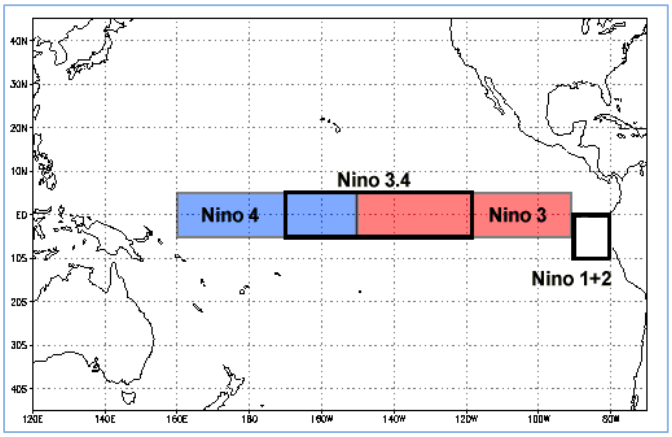


Figura 5. Regiones de la temperatura superficial del Océano Pacifico en la franja tropical
Fuente: NOAA, 2014

Temperatura superficial en la región Niño 3-4: Temperatura Promedio de la superficie del océano en las regiones NIÑO 3 y NIÑO 4. Históricamente, los científicos han clasificado a la intensidad de El Niño sobre la base de las anomalías de temperatura superficial del océano

que superen un umbral preseleccionado en una determinada región del Pacífico ecuatorial. La región más comúnmente utilizada es el Niño 3,4 y el umbral más comúnmente usado es una salida positiva SST a partir de normal mayor que o igual a 0,5°C. Dado que esta región abarca la mitad occidental de la región de lengua fría ecuatorial, proporciona una buena medida de los cambios importantes en los gradientes de temperatura superficial del océano y SST que producen cambios en el patrón de la convección tropical profunda y la circulación atmosférica. Los criterios, que a menudo se utilizan para clasificar los episodios de El Niño.

Índice Oceánico del Niño

El Índice Oceánico del Niño (ONI por sus siglas en inglés) es calculado como la media móvil de tres puntos de la serie mensual de anomalías de la temperatura de la superficie del océano en la Región Niño 3-4. Valores positivos del ONI, mayores o iguales a 0,5 por 5 meses consecutivos o más indican la ocurrencia de un evento El NIÑO. Valores negativos del ONI, inferiores o iguales a -0,5 por 5 meses consecutivos o más indican la ocurrencia de un evento La NIÑA (Guarín y Ochoa, 2011).

5.6 ESTACIONARIEDAD

Una serie temporal es una colección de observaciones de una variable recogidas secuencialmente en el tiempo. Estas observaciones se suelen recoger en instantes de tiempo equiespaciados. Está puede ser discreta o continua y si se puede predecir exactamente los valores, se dice que las series son determinísticas, si ésta se puede determinar de modo parcial por las observaciones pasadas, se considera que los futuros valores tienen una distribución de probabilidad que está condicionada a los valores pasados por lo que se considera que la serie es estocástica. Las series temporales se pueden clasificar en:

Estacionarias: Una serie es estacionaria cuando es estable, es decir, cuando la media y la variabilidad son constantes a lo largo del tiempo. Esto se refleja gráficamente en que los valores de la serie tienden a oscilar alrededor de una media constante y la variabilidad con respecto a esa media también permanece constante en el tiempo. Es una serie básicamente estable a lo largo del tiempo, sin que se aprecien aumentos o disminuciones sistemáticos de sus valores.

No Estacionarias: Son series en las cuales la media y/o variabilidad cambian en el tiempo. Los cambios en la media determinan una tendencia a crecer o decrecer a largo plazo, por lo que la serie no oscila alrededor de un valor constante.

Procesos estocásticos estacionarios y no estacionarios

Los AF utilizados tradicionalmente en los procesos Hidrometeorológicos, se realizan asumiendo que las series de tiempo en su mayoría son estacionarias. Sin embargo, los procesos hidrometeorológicos son considerados aleatorios o estocásticos; debido a que se encuentran regidos por la probabilidad, y cuentan con un nivel de incertidumbre o u una probabilidad de ser igualados o excedidos en un periodo de tiempo (García, 2010) y según Cramer y Leadbetter (1968), citado por (Medel, 2001), la estacionariedad es una propiedad que tienen los sistemas de la naturaleza estocástica en análisis de dos métodos de estimación.

Entonces, el análisis estocástico estacionario, es aquel en el que las propiedades estadísticas del proceso no varían en el tiempo. Es por eso, que a partir de las series históricas se pueden calcular los datos faltantes, ya que las series deben mostrar propiedades estadísticas similares (García, 2010). Por otro lado, los proceso estocásticos no estacionarios, pueden confundirse con procesos estocásticos estacionarios, ya que presentan tendencias claras a su evolución temporal (Mauricio, 2007), es decir, no presentan finalidad a algún valor constante en el tiempo, debido a que su dispersión no es constante, al tratarse de series estacionales.

Ante estas características probabilísticas de las series de tiempo, la validación de la No estacionariedad, es fundamental para la elección de las funciones de distribución de probabilidad de mejor ajuste. Consecuentemente, Mahía (1999) propone los siguientes métodos utilizados para detectar la no estacionariedad de una serie:

- El test Durbin-Watson,
- El test simple Dickey-Fuller
- Test DF y proceso generador de datos.
- Contraste de raíces unitarias múltiples.

- Test DF en modelos autor regresivos de orden superior. Contraste ADF, y aunque existen más métodos, estos son algunos de los más utilizados.

5.7 ANÁLISIS DE FRECUENCIA

La probabilidad y la estadística se han convertido en herramientas de suma importancia en los análisis hidrológicos, ya que con ellas se pueden presentar los datos organizados, facilitando la interpretación y predicción de los eventos futuros de los procesos hidrológicos, con el fin de desarrollar obras hidráulicas, que en parte permitan abordar la gestión integral de riesgo y otras situaciones que se derivan de la adaptación del hombre al medio. El análisis estadístico de datos hidrológicos también permite estimar las precipitaciones, intensidades o caudales máximos, de acuerdo con el requerimiento, para diferentes Tr mediante la aplicación de modelos probabilísticos (discretos o continuos), que luego pueden ser representados mediante una función de distribución de probabilidad ajustada, para determinar la frecuencia de los eventos de acuerdo a esta función; logrando así, alcanzar altos niveles de confiabilidad, al ser un elemento clave en múltiples estudios (Organización Meteorológica Mundial-OMM, 2011).

El manejo de los datos, para realizar el AF se lleva a cabo por medio de series de Tiempo Hidrometeorológicas, las cuales son entendidas como un evento observado en forma discreta a intervalos de tiempo *dt*, que son registradas en un intervalo o registradas en forma continua en un tiempo, t, por ejemplo, caudales medios, diarios, promedio de caudales instantáneos a través de un intervalo discreto de un día (Fattorelli y Fernández, 2011).

Se identifican como series de excedencia anual, cuando el valor base se selecciona de tal manera que el número de valores en la serie es igual al número de años en el registro y serie de valor extremo, que incluye el valor máximo o mínimo que ocurre en cada uno de los intervalos de tiempo de igual longitud del registro (Chow, Maidment, y Mays, 1994).

Las series son comúnmente utilizadas para la calibración y validación de modelos hidrológicos. Además, pueden ser modificadas, para la creación de escenarios que evalúen el impacto hidrológico y la sensibilidad de la hidrología local frente al cambio climático, generando posibles escenarios climáticos y simulación de impactos (Heredia, 1998).

De acuerdo con (Fattorelli y Fernández, 2011), el objetivo principal del AF de una serie hidrológica, es determinar el Tr, que corresponde a un período de tiempo en el que se presenta un evento de determinada magnitud. Cuando la variable aleatoria considerada es una magnitud relacionada con algún fenómeno natural (precipitación, caudal, entre otros), es conveniente referirse a Tr en lugar de probabilidades de ocurrencia. Si p es la probabilidad de que una variable x supere un dado valor X en cierto lapso, el Tr T representará el número de unidades de tiempo que transcurrirán en promedio entre dos oportunidades en que la variable supere dicho valor, es decir:

Ecuación 1.

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

Entonces:

Ecuación 2.

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

De donde se entiende que la Probabilidad de Excedencia es la probabilidad asociada al Tr. Luego, la probabilidad de que la variable aleatoria tome un valor igual o inferior a cierto número X, está dado por la función de distribución de probabilidad (Pizarro, et al 2001).

Los AF permite estimar la frecuencia con que puede ocurrir un evento; para este caso que sean igualados o excedidos los valores máximos de precipitaciones en cada período (Álvarez y Poveda, 2006). Para el caso especial de los fenómenos hidrológicos que responden a una distribución teórica de valores extremos no existe una función que se adapte a todos los casos sino que cada uno debe ser analizado individualmente para aplicar luego la ley de mejor ajuste. Chow, Maidment y Mays (1994) demostraron que una variable aleatoria hidrológica x, puede ser representada por una combinación lineal de su valor medio y su desviación estandar:

Ecuación 3.

$$x = \bar{X} + k\sigma_X$$

Se basaron en que cada valor de x puede expresarse como la media aritmética más un desplazamiento Δx proporcional a la desviación estándar, conocida como expresión general para el análisis hidrológico de frecuencias.

Ecuación 4.

$$x = \bar{X} + \Delta x$$

5.7.1 Funciones de Distribución de Probabilidad

Una FDP según Chow, Maidment, y Mays, (1994) "es una función que representa la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria"; y la precipitación por su comportamiento, se considera como un proceso estocástico en un intervalo de tiempo, lo que permite analizarla por medio de funciones estadísticas continuas debido al comportamiento de las variables de las mismas.

Tabla 2. Distribuciones de Probabilidad más utilizadas en hidrología con sus respectivos parámetros

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)	$\mathrm{XT} = \mu + \sigma . \mathrm{KT}$	$\mu, \sigma, \rho, z, w, kT$	KT=z (variable normal estándar
LogNormal	La distribución de tamaños de gotas de una lluvia.	$\mathrm{F}(X \geq x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} exp\left[-\frac{(Int-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt$	$\mu, \sigma.$	
Wakeby	Puede ser utilizada para el análisis de frecuencia de crecientes con series de cualquier tamaño.	$\mathrm{x} = -\mathrm{a} * (1-\mathrm{F})^{\mathrm{b}} + \mathrm{c} * (1-\mathrm{F})^{-\mathrm{d}} + \mathrm{e}$ 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.	$\mathrm{KT} = \sqrt{\sigma}/\pi \left(\mathrm{y} + \mathrm{In}(\mathrm{T}/(\mathrm{T}-1))\right)$	$\mu, \beta, \sigma, \alpha$	Donde y=0.5772 α=1.281/σ y β=μ-0.45σ
LogPearson Tipo III	La distribución de probabilidades de picos decrecientes máximos anuales.	$KT = z + (x^2-1)\,k + 1/3\,(z^2 - \sigma z)k^2 - (z^2-1)k^3 + zk^4 + 1/3\,k^5$	μ, σ, Cs	Donde k=Cs/σ
Fréchet	Recomendada para estudios de caudales máximos. Según G. Poveda, 2012. Ésta función produce las mayores diferencias entre los caudales estimados mediante las FDP simple y mixta.	$y = \alpha_0(Inx - \mu_0)$	$\alpha_0\mu_0$	

Resumen de: Chow, Maidment, y Mays, (1994), Organización Meteorológica Mundial (2011), Fattorelli y Fernández (2011), Ganancias (2009).

En la tabla 2, se muestra una recopilación literaria de algunas de las funciones de Distribución de probabilidad más usadas en la hidrología, como lo son Gumbel, LogNormal y Pearson, entre otras distribuciones de probabilidad que también tienen importancia en los cálculos estadísticos hidrológicos, los cuales se presentan con su respectiva descripción y parámetros.

Al momento de utilizar las FDP se agrupan teniendo en cuenta el Ajuste de Distribución de Probabilidad y Pruebas de Bondad de Ajuste (PBA), que permiten a la función acoplarse mejor al comportamiento real de la precipitación.

Distribución Gumbel

La distribución general de valores extremos ha sido ampliamente utilizada para representar el comportamiento de lluvias máximas, crecientes, sequías. A partir de la distribución general de valores extremos, se pueden derivar tres tipos de distribuciones: la tipo I, comúnmente conocida como Gumbel, la tipo II y la tipo III, llamada también Weibull (Chow, Maidment y Mays, 1994); (Waylen y Cavides, 1990). Ellas difieren entre sí por el valor del parámetro de forma. La expresión general de la función de densidad de probabilidades para la distribución extrema tipo I o Gumbel es:

Ecuación 5.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha}\exp\left[-\frac{x-\beta}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right]$$

Donde:
α: parámetro de escala
β: parámetro de origen

La función de distribución acumulada es:

Ecuación 6.

$$f(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right]$$

El factor de frecuencia para la distribución Gumbel es calculado mediante:

Ecuación 7.

$$K = -\frac{\sqrt{6}}{\pi}\{0.577 + \ln[lntr - ln(tr-1)]\}$$

Donde:
Tr: Período de retorno
Los límites de confianza son estimados de acuerdo a:
Límite superior de confianza:

Ecuación 8.

$$L_{T,\alpha} = \bar{x} + t_{1-\alpha}s_e$$

Límite inferior de confianza:

Ecuación 9.

$$U_{T,\alpha} = \bar{x} - t_{1-\alpha} s_e$$

Donde:

$t_{1-\alpha}$: Variable normal estandarizada para una probabilidad de no excedencia α-1

Ecuación 10.

$$s_e = \frac{\delta \cdot s_x}{\sqrt{n}}$$

Ecuación 11.

$$\delta = \sqrt{1 + 1.1396 K_T + 1.1 K_T}$$

Distribución LogNormal

En el cálculo hipotético de la precipitación en una cuenca, se debe considerar que está determinado por el producto de varios factores aleatorios, como la temperatura, la topografía, la velocidad de los vientos, entre otros. En general, cuando la variable aleatoria ***X*** es el producto de un gran número de otras variables aleatorias, la distribución de los logaritmos de ***X*** puede aproximarse a la Normal, ya que los logaritmos de ***X*** son la suma de los logaritmos de los factores contribuyentes. Si se tiene una variable aleatoria ***X*** y ln ***X*** = ***Y*** se ajusta a una distribución Normal, se dice que la variable aleatoria ***X*** es log normalmente distribuida (Chow, Maidment y Mays, 1994).

Ecuación 12.

$$f(x) = \frac{1}{\mathrm{x}\, \sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(y - \mu_y)^2}{2{\sigma_y}^2} \right)$$

Se debe tener en cuenta que esta función es para dos parámetros por lo que solo se puede aplicar a eventos con valores positivos (*X*> 0), donde:

X: Variable aleatoria
Y: Logaritmo natural de la variable aleatoria *X*
μ_y: parámetro de escala
σ_y: parámetro de forma

Distribución LogPearson tipo III

La distribución LogPearson tipo III es ampliamente usada en el mundo para el AF de eventos máximos. Si los logaritmos de la variable aleatoria ***X*** se ajustan a una distribución Pearson Tipo III, se dice que la variable aleatoria ***X*** se ajusta a una distribución LogPearson Tipo III. La Ecuación 13 muestra la función de densidad de la distribución LogPearson Tipo III (Chow, Maidment, y Mays, 1994).

Ecuación 13.

$$F(X \geq x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)}\left(\frac{\ln(x) - y_0}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{\ln(x) - y_0}{\alpha}\right)$$

Donde,

$y_0 \leq y < \alpha$ para $\alpha > 0$

$\alpha \leq y \leq y_0$ para $\alpha < 0$

α y β son los parámetros de escala y forma, respectivamente, y y_0 es el parámetro de localización.

Ecuación 14.

$$\hat{\beta} = \left(\frac{2}{\hat{\gamma}_y}\right)^2$$

Ecuación 15.

$$\hat{\alpha} = \hat{\sigma}_y \frac{\hat{\gamma}_y}{2}$$

Ecuación 16.

$$\hat{y}_0 = \hat{\mu}_y - \hat{\alpha}\hat{\beta}$$

Donde $\hat{\mu}_y$, $\hat{\sigma}_y$ y $\hat{\gamma}_y$ son la media, la desviación estándar y coeficiente de asimetría, calculados usando los logaritmos de los datos, respectivamente.

5.7.2 FDP Mixtas

Las FDP mixtas son adecuadas para enfrentar la presencia de la VC y el CC. Estas son el resultado de la sumatoria de la FDP de cada muestra, multiplicada por un factor de ponderación dado por la relación entre los datos de cada muestra y los datos de la serie completa (Poveda y Álvarez, 2012). En la ecuación 17 se presenta la representación de la mezcla según las FDP mixtas:

Ecuación 17.

$$F_T(X \geq x) = \rho_1 F_1(X \geq x) + \rho_2 F_2(X \geq x) + \cdots + \rho_i F_i(X \geq x)$$

$$\sum_{i=1}^{n} \rho_i = 1$$

Donde:

F_T: FDP de toda la muestra.

F_i: FDP de cada muestra resultante (Niña y No Niña).

ρ_i: Factor de ponderación de cada muestra que se determina relacionando el número de datos de cada muestra con el número de datos totales, como se indica en el siguiente ejemplo para una población con dos muestras:

$$\rho_1 = \frac{Datos_{muestra\ 1}}{Datos_{Totales}};\ \rho_2 = \frac{Datos_{muestra\ 2}}{Datos_{Totales}}$$

FDP Mixtas Tipo I

Las FDP mixtas basado en el uso de factores de ponderación asociados con la frecuencia de ocurrencia de las distintas fases del fenómeno ENOS, para lo cual se realiza la muestra:

Muestra 1: Precipitaciones durante	(1) El Niño y Normal
	(2) La Niña y Normal (2 poblaciones)
Muestra 2: Precipitaciones durante	(1) Niño
	(2) No ENOS
	(2) La Niña (3 poblaciones)

FDP Mixtas Tipo II

Las FDP mixtas están condicionadas a la estacionariedad del ciclo anual de precipitaciones influenciada por el fenómeno climático presente en la zona, para este caso se trabaja de acuerdo al régimen bimodal presente en el año hidrológico en Colombia con la siguiente muestra:

$$Serie\ Anual \left[\frac{Precipitaciones\ máximas\ en\ la\ segunda\ época\ de\ altas\ lluvias\ en\ el\ año\ i \left(\frac{La\ Niña}{\frac{El\ Niño}{No\ ENOS}}\right)}{Precipitaciones\ máximas\ en\ la\ primera\ época\ de\ altas\ lluvias\ en\ el\ año\ i+1 \left(\frac{La\ Niña}{\frac{El\ Niño}{No\ ENOS}}\right)} \right]$$

5.7.3 Método Empírico

Para la representación probabilística de una serie determinada, se emplean métodos empíricos, con la cual se logra establecer el contraste con los resultaos de las distribuciones estadístico-pirobalísticas (Materón y Carvajal, 1997). Chow, Maidment, y Mays, (1994), recomienda el método de Weibull para las series máximas anuales, argumentando que éste reduce el estudio previo de los datos únicamente a una inspección, con el fin de identificar posibles datos anómalos o tasa de fallos probables que distorsionen los resultados. Diferentes estudios han demostrado que Weibull, es la probabilidad empírica que representa en la mayoría de las ocasiones mejor las funciones, es usada tradicionalmente por muchos investigadores quienes la recomiendan para todas las funciones. Castro y Hoyos, (2004), recomiendan el uso de las distribuciones y el método de ajuste y probabilidad empírica de acuerdo al número de datos que se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Tendencia general para las series analizadas

Función de distribución	Probabilidad Empírica	Longitud de la serie
LogNormal MM	Weibull	<30
LogNormal MPP	Gringorten	>30
Gumbel MM	Blom. Cunnane	<30
Gumbel MV	Weibull	>30
Wakeby MPP	Landwerh	<30 y >30

Fuente: (Castro y Hoyos, 2004)

5.7.4 Ajuste de distribución de probabilidad o ajuste de Curva

Para realizar el AF se hace necesario calcular los parámetros estadísticos que son requeridos por la distribución de probabilidad utilizando diferentes métodos, es decir, el ajuste a la distribución del conjunto de datos hidrometeorológicos se resume en una función.

Este procedimiento se puede hacer por diversos métodos, pero los más comunes en la hidrología son: MM, MV y MPP expresados en la tabla 4. Éste ajuste se logra, utilizando algunos parámetros estadísticos cómo la media poblacional, varianza poblacional y desviación estándar.

Tabla 4. Métodos comunes para Ajuste de Distribución de Probabilidad en la hidrología

Método	Características
MV	Posee un único parámetro.
	No es un método que se aplique comúnmente debido a su complejidad.
MM	Se basa en igualar lo momentos muestrales con los correspondientes a la distribución, tomando los momentos con respecto al origen.
	Tiene como objetivo hallar la recta que mejor se ajuste a una nube de puntos.
MPP	Este método es usado para encontrar los parámetros de las distribuciones de probabilidad *F(x).*
	La ventaja del *MPP* es que al encontrar los parámetros estas expresiones no tienen la variable *x* elevada a ninguna potencia.

Resumen de: Organización Meteorológica Mundial (2011); Fattorelli y Fernández (2011)

5.7.5 Pruebas de Bondad de ajuste

Permiten rechazar o aprobar una hipótesis mediante una comparación de valores teóricos y muéstrales de las funciones de frecuencia relativa o acumulada. Con ésta herramienta permite mediante un criterio de ajuste, aceptar o rechazar la hipótesis inicial. Es por ello que la selección del valor más adecuado para el factor de ponderación es crucial en el éxito de la modelización de la serie y la previsión de valores futuros (González, 1992). Todos los métodos utilizados para esta selección se basan en minimizar alguna función de los errores de ponderación, y para ello, las pruebas más destacables son:

Coeficiente de Correlación Graficada

El CCG representa la correlación entre los datos obtenidos y calculados, se determinara un buen ajuste si el valor del CCG de la serie analizada se encuentra cercano a uno (Castro y Hoyos, 2004).

Error Estándar de Ajuste

En una muestra de dato Q_i^j para $i = 1, 2, 3, \dots, n_i$ de un sitio *j*; determinar el mejor ajuste mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 18.

$$EEA = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n_j}\left(\hat{Q}_T^j - Q_T^j\right)^2}{n_i - m_j}\right]^{1/2}$$

A continuación se presentan las equivalencias de cada variable, necesaria para calcular el Error Estándar de Ajuste:

Q_T^j : Corresponde a los eventos (Q_i^j) ordenados de mayor a menor con un Tr asignado $T = \left(\frac{n_j + 1}{m}\right)$ y una probabilidad de excedencia.
$\hat{Q}_T^j$: Eventos estimados por cierta distribución de probabilidad para cada Tr *T* asignado a la muestra ordenada (Q_i^j).
m*:* Número de orden del registro.
n_j : Longitud del registro analizado, en años.
m_j : Número de parámetros de la distribución ajustada.

La distribución que proporcione el mínimo valor estadístico del Error estándar de ajuste (EEA), será la que mejor ajuste represente. Pero, en caso tal de que una o más distribuciones tengan valores similares del EEA entonces se deberá preferir aquella distribución que tenga el menor número de parámetros (Ganancias, 2009).

Error Cuadrático Medio

El promedio de los cuadrados de los errores de previsión; es una forma de valorar la calidad de las estimaciones introduciendo alguna función que calcule la distancia del parámetro al estimador(Pepió, 2001). Así define el error cuadrático medio (ECM) de un estimador:

Ecuación 19.

$$ECM = \pm\frac{S}{\sqrt{N}} = \pm\sqrt{\frac{\sum \delta^2}{n(n-1)}}$$

$$x = \bar{x} \pm ECM$$

Debido a que en la literatura el ECM, es el que, en general, presenta mejores propiedades que otros métodos, es el más recomendado como coeficiente de ponderación (Ledesma, 2009).



6. METODOLOGÍA

6.1 ÁRBOL METODOLÓGICO

La metodología realizada se presenta de forma esquemática en la Figura 6. Cabe anotar, que la revisión bibliográfica fue un proceso continuo a lo largo de la investigación.

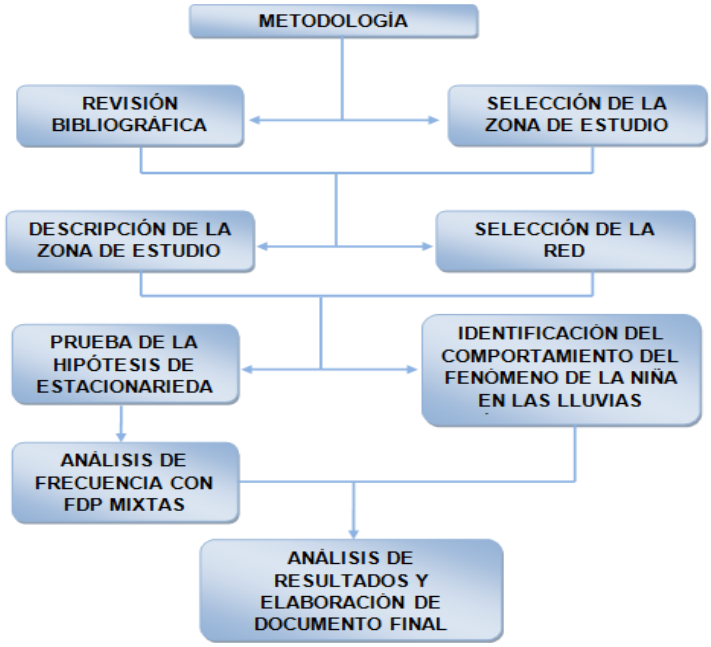


Figura 6. Árbol metodológico de la investigación

6.2 CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

6.2.1 Selección de la zona de estudio

Para realizar ésta investigación, se seleccionó la zona alta del Río Cauca (norte del Cauca y Valle del Cauca), debido a la importancia estratégica para la región del Sur-Occidente

Colombiano, ya que es fuente de abastecimiento y en ella se desarrollan actividades socioeconómicas para las áreas urbanas y rurales. La información cartográfica e hidrometeorológica y los registros de precipitación fueron tomados del proyecto "Construcción del Modelo Conceptual Para la Restauración del Corredor de Conservación y Uso Sostenible del Sistema Río Cauca en su Valle Alto", desarrollado por la CVC y el Grupo IREHISA en los años 2013 y 2014, información confiable para el desarrollo de la investigación.

6.2.2 Descripción de la zona de estudio

La cuenca hidrográfica del río Cauca ocupa dentro del contexto nacional un lugar estratégico y excepcional, puesto que en ella se localizan las industrias azucareras, la mayor parte de la zona cafetera y un sector significativo de la industria manufacturera del Occidente Colombiano (CVC, 2000). El río Cauca nace en el Macizo Colombiano, entre las Cordilleras Occidental y Central de los Andes, cerca del Páramo Sotará en el Departamento del Cauca, y desemboca en el Brazo de Loba del río Magdalena frente al Municipio de Pinillos, en el Departamento de Bolívar convirtiéndose en su principal afluente. El río Cauca tiene una longitud de 1.350 Km y una hoya hidrográfica de unos 59.071 Km^2 aproximadamente. Se puede dividir en cuatro tramos: Alto Cauca, Valle Alto, Cauca Medio y Bajo Cauca (Ver figura 7 y tabla 8). El presente estudio se centra en la zona Alto Cauca desde el municipio de Purace en la estación Paletará a los 2.900 m.s.n.m. hasta la zona del Valle alto a la salida del departamento del Valle del Cauca en la cuenca Cañaverales municipio de El Águila (CVC y Universidad del Valle, 2007).

Tabla 5. Distribución de la Cuenca Hidrográfica del Río Cauca

Zona	Área Parcial (Km^2)	Porcentaje del área total (%)
Alto Cauca	4.814	8
Valle Alto	15.757	27
Cauca Medio	19.750	33
Bajo Cauca	18.750	32

Fuente: CVC (2000)

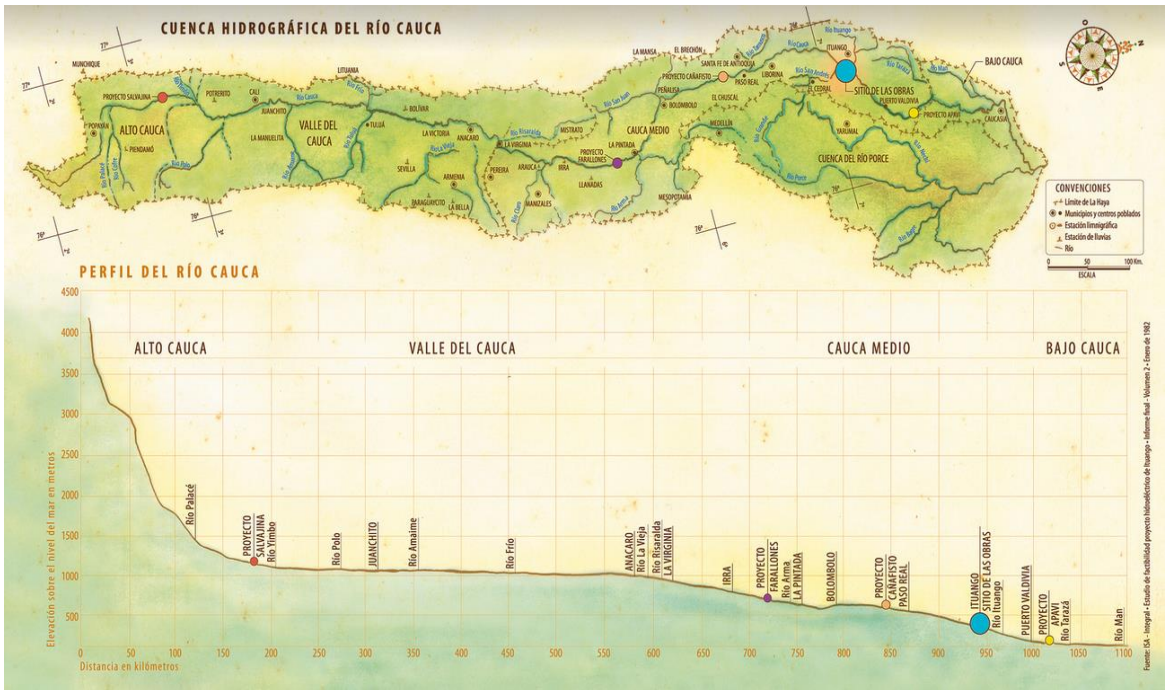


Figura 7. Cuenca hidrográfica del río Cauca
Fuente: Hidroeléctrica Ituango, (2012)

La cuenca alta del río Cauca (Ver Figura 8), recorre unos 425 km entre las poblaciones de Timba en el departamento del Cauca y La Virginia en el departamento de Risaralda. En esta área confluyen cerca de 39 tributarios que triplican el caudal medio del río, y la mayor parte de este tramo el río puede ser aprovechado para la navegación. Se localiza entre las Cordilleras Occidental y Central, posee 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, siendo un valle amplio con inundaciones recurrentes; el cauce principal se sitúa entre los 900 y los 1.000 msnm, 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. 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 223.905 ha cultivadas (CVC y Universidad del Valle, 2007).

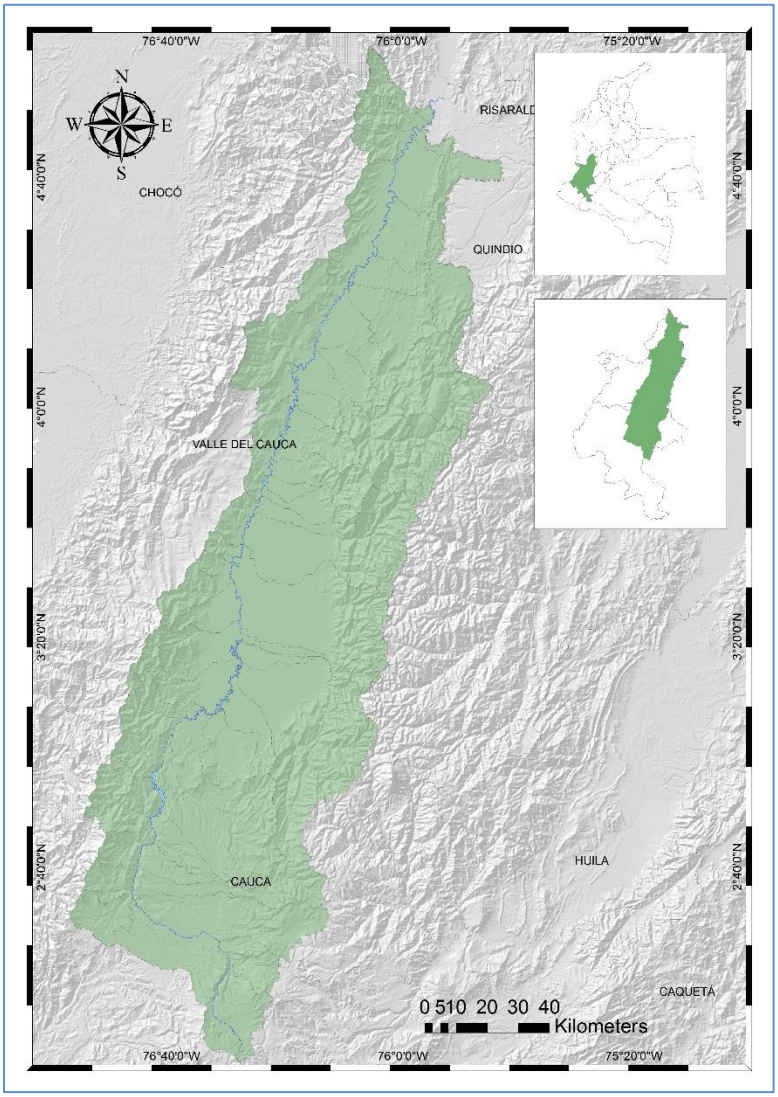


Figura 8. Cuenca alta río Cauca

Desde el punto de vista geomorfológico la cuenca del río Cauca presenta varias unidades de paisaje: zona de vertiente o montañosa (correspondiente a las cordilleras Central y occidental), zona de colinas bajas (representadas por rocas sedimentarias de edad terciaria o de principios del cuaternario), zona de abanicos antiguos y recientes y planicie aluvial del río Cauca, conformada por los depósitos dejados por el río Cauca. Esta característica geomorfológica hace que el tiempo de concentración sea menor en las cuencas tributarias del río Cauca, causando en períodos de lluvias y en condiciones de saturación del suelo un aumento de la escorrentía superficial que genera aumento del caudal del río Cauca e inundaciones en la zona plana del valle geográfico (CVC y Universidad del Valle, 2007).

Características Climáticas

La cuenca alta del río Cauca es una zona de gran insolación, presenta un clima tropical caracterizado por temperaturas anuales de 15 °C a 34 °C. Se caracteriza por la presencia de períodos o estaciones de diferente pluviosidad en el año. La franja comprendida entre las latitudes 0° y 10° N y las longitudes 75° y 80° W transporta aire muy húmedo proveniente del océano Pacífico, con presencia de brisa marina que penetra al Valle del Cauca a través del boquerón del Madroñal y por un sitio cercano a la población de Bolívar.

En la zona del valle geográfico del Río Cauca las tendencias de variación que presentan en promedio las temperaturas máximas, medias y mínimas a escala mensual, se pueden considerar uniformes durante todo el año. La duración del brillo solar presenta una tendencia de variación anual: mayor en los meses secos y menor en los húmedos. En relación con la humedad relativa los valores promedios varían entre el 65% y el 90% (CVC y Universidad del Valle, 2007).

Las características de la precipitación se distribuyen de dos formas:

1) Dependiendo de la migración norte-sur de la ZCIT, que normalmente divide el año en dos temporadas de lluvia comprendidas por los meses de marzo-mayo, septiembre-noviembre y dos épocas secas entre diciembre-febrero y junio-agosto. La ZCIT se localiza en el sur durante los meses de enero y febrero, comienza su desplazamiento hacia el norte a mediados de marzo, concluyendo su recorrido a mediados del año. Durante el mes de septiembre inicia el desplazamiento hacia el sur, el cual termina durante el mes de enero.

2) La segunda es la distribución de las lluvias que resulta sensiblemente afectada por la orografía, altura y el régimen de vientos, puesto que éstos son los que permiten u obstaculizan el tránsito de las masas nubosas en un territorio determinado. Las cordilleras Central y Occidental, como fronteras que atraviesan de sur a norte toda la cuenca, marcan los patrones que dan lugar a la formación de la lluvia y, en consecuencia, originan una diferencia notable en el régimen climático e hidrológico, con marcadas diferencias espaciales y temporales en la distribución de la lámina de lluvia. En las partes más altas se concentra el aire caliente ascendente que a menudo transporta agua evaporada en forma de vapor de agua y a una cierta altitud el aire se enfría hasta el punto de rocío, que es la temperatura en la que el aire se satura y el vapor de agua comienza a condensarse en gotas de agua. Esta es la altitud en la que las nubes comienzan a formarse, y recibe el nombre de nivel de condensación, de esta manera en la zona de estudio se tiene una mayor precipitación en la

parte alta que en la parte baja. Por lo general, la precipitación se comporta de forma típica en el transcurso del año hidrológico; con una clara distribución en el tiempo y el espacio (CVC y Universidad del Valle, 2007).

6.2.3 Selección de la Red de Precipitación

La definición de la red de precipitación es importante porque determina la cobertura espacial y temporal de la investigación; por eso y de acuerdo a la proximidad de las estaciones climatológicas (CO), pluviométricas (PM), pluviográficas (PG) y evaporimétricas (EV), en la zona de estudio, se evaluó la disponibilidad de datos de precipitaciones diarias de cada estación, teniendo en cuenta 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. Todo lo anterior se incluye en la selección del período común de registro para las pruebas estadísticas descriptivas a 108 estaciones de la CVC entre los años 1965 y 2011; se comparó la longitud de la serie de tiempo y el porcentaje de datos faltantes, determinando que 20 de ellas presentan longitudes muy cortas o el valor de los datos faltantes es superior al 20%, dejando para el análisis 88 estaciones. Después se seleccionó la serie de valores máximos según año hidrológico y fenómeno ENOS (La Niña y No Niña), identificando que se presentan máximo 11 valores que corresponden a 11 años de La Niña, finalmente se trabajó con las estaciones que presentan como mínimo 9 valores de los años La Niña, consolidando una base de datos de 55 estaciones para la prueba de estacionariedad y el AF.

Definición de los períodos de La Niña y No Niña

La definición de la serie de los años de LA Niña y No Niña, se hace a partir de los estudios realizados por Ávila, Carvajal, y Gutiérrez, (2014); Gutiérrez y Carvajal, (2013); Misir, Arya, y Murumkar, (2013); IDEAM, (2012); Carvajal, (2011b); Pinilla y Pinzón, (2011); Bedoya, Contreras, y Ruiz, (2010); Puertas y Carvajal, (2008); Poveda, (2004); Martínez, et al., (2002); Poveda, et al., (2002); Waylen y Poveda, (2002); Poveda y Mesa, (1997), quienes han relacionado las diferentes VM océano-atmosféricas estudiadas por agencias climáticas, como la NOAA, con registros hidroclimáticos de lluvias y caudales a partir de cálculos de coeficientes de correlaciones de Pearson, Spearman Rho, pruebas de ANOVA y Kruskall-wallis

entre otras; estos estudios recomiendan la tabla de la NOAA para clasificar los años ENOS (El Niño y La Niña) y los años No ENOS o Normales.

Para este trabajo se tomó como referencia la tabla propuesta por el IDEAM (Bedoya, Contreras, y Ruiz, 2010), quienes adaptan la tabla de la NOAA apartir de un consenso con las VM (ONI, MEI, y SOI), clasificando los años de El Niño y La Niña en débil, moderado y fuerte como se indica en la tabla 6, el año hidrologico seleccionado inicia el 01 de Junio del año *i* y finaliza el 31 de Mayo del año *i* + 1.

Tabla 6. Consenso para la clasificación de los años ENOS y No ENOS (1950 a 2011), según año hidrológico (01 de Junio del año *i* y finaliza el 31 de Mayo del año *i* + 1)

El Niño			Normal o No ENOS			La Niña	
1951-1952	1957-1958	1963-1964	1952-1953	1953-1954	1958-1959	1950-1951	1954-1955
1965-1966	1968-1969	1969-1970	1959-1960	1960-1961	1961-1962	1955-1956	1956-1957
1971-1972	1972-1973	1974-1975	1966-1967	1978-1979	1979-1980	1962-1963	1964-1965
1976-1977	1977-1978	1982-1983	1980-1981	1981-1982	1983-1984	1967-1968	1970-1971
1984-1985	1986-1987	1987-1988	1985-1986	1989-1990	1990-1991	1973-1974	1975-1976
1991-1992	1992-1993	1994-1995	1993-1994	1996-1997	2001-2002	1988-1989	1998-1999
1995-1996	1997-1998	1999-2000	2003-2004	2005-2006		2000-2001	2007-2008
2002-2003	2004-2005	2006-2007				2010-2011	
2008-2009	2009-2010						

Fuente: Adaptado de la tabla de la NOAA (2013); y Bedoya, Contreras y Ruiz, (2010)

Una vez seleccionada la red de precipitación, se procedió a realizar las pruebas descritas en los numerales siguientes, evaluando la zona de estudio por la división de alturas propuesta por Carvajal, Jiménez, y Urrego, (2010), y Tobón, (2008); donde se clasificó la zona alta aquellos estaciones localizados por encima de los 2.400 msnm; zona media, las localizadas en un rango altitudinal entre los 1.200 y los 4.500 msnm, y zona baja, aquellas que se encuentran por debajo de los 1.200 msnm.

6.3 EVALUACIÓN DE LA HIPÓTESIS DE ESTACIONARIEDAD

Para la evaluación de la hipótesis de estacionariedad se realizó el análisis exploratorio datos (AED) que consiste en pruebas estadísticas descriptivas y gráficas, con el objetivo de conocer el comportamiento de la serie de datos y consolidar la serie histórica de máximas diarias.

6.3.1 Análisis Exploratorio y Confirmatorio de Datos

Análisis gráfico y descriptivo numérico: Se graficaron histogramas para observar la forma, el número de picos y si hay cambios o tendencias en la series de precipitaciones máximas diarias; diagramas de cajas para determinar el comportamiento de los datos y hallar posibles datos atípicos y gráficos de las precipitaciones máximas mensuales multianuales para identificar el comportamiento anual de las precipitaciones. El análisis numérico se realizó por medio de las medidas de tendencia central, en este caso la media; las medidas de dispersión, desviación estándar, varianza y el coeficiente de variación; y las medidas de simetría, coeficiente de asimetría y coeficiente de Curtosis.

Detección de datos atípicos: Se analizó la longitud de la serie de datos para establecer si los valores son errores de la muestra o de sistematización, el criterio para decidir sobre esos casos atípicos, fue un chequeo de estos valores apoyándose en las estaciones cercanas dentro de la misma cuenca hidrográfica y/o con igual elevación.

Prueba de Normalidad y prueba Paramétrica o No Paramétrica: Se realizó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk recomendada para muestras menores a 50 años, para confirmar o no la posible distribución normal de los datos y se finalizó con el análisis confirmatorio por medio de la prueba no paramétricas de U Mann-Whitney, la hipótesis nula de contraste es que las dos muestras, de tamaño *n1* y *n2* respectivamente, proceden de poblaciones continuas idénticas; la hipótesis alterna puede ser unilateral o bilateral y únicamente supone que la tendencia central de una población difiere de la otra, pero no una diferencia de forma o de dispersión. Para un grado de significancia estadística $p>0,05$, se acepta la hipótesis nula de la no existencia de diferencias significativas entre los valores medios de las muestras.

6.3.2 Prueba de Estacionariedad

La evaluación del supuesto de estacionariedad, parte con la hipótesis de que la estacionariedad es inválida mientras se presenten señales e impactos de la VC, y otros factores antrópicos asociados a estos. Para esta etapa se realizó un análisis gráfico de las series de tiempo en el que se emplearon los valores máximos anuales y luego se identificaron las series que presentan cambios significativos en la tendencia y/o varianza ya que en una

serie no estacionaria la varianza y la estacionariedad son constantes en el tiempo (Escobar, 2008).

La elaboración de la gráfica se hizo por medio del índice Rx1day, estimado en el programa RClimDex que funciona bajo la plataforma de R Project, con la metodología implementada por Benavides (2010), con un grado de significancia estadística del 95% (p-value ≤ 0,05). Según Klein, Zwiers, y Zhang (2009) si no se detecta una tendencia con significancia estadística alta, no indica, que dicha tendencia no sea válida o que no haya probabilidad de que algún cambio se halla presentado en el clima, solo que la información o las series de datos no es lo suficientemente robusta para identificar los cambios de forma estadísticamente significativa, por lo tanto estos resultados no fueron descartados en esta investigación, en los casos de las estaciones sin significancia estadística se realizó una revisión del valor de *p* y del porcentaje de datos faltantes en la serie histórica.

6.4 ANÁLISIS DE FRECUENCIA CON FUNCIONES DE PROBABILIDAD TRADICIONALES Y MIXTAS

El AF se hizo a través del comportamiento de las variables en 24 horas, para los Tr de 5, 10, 20, 30, 50 y 100 años, para esto se realizó la selección de series máximas anuales según año hidrológico, separando la serie de datos según valores de precipitación en período de la Niña y No Niña, con base en la tabla 5; se utilizaron hojas de cálculo con las fórmulas de las FDP descritas en las ecuaciones 6, 12 y 13 (Gumbel, LogNormal y LogPearson), de acuerdo a la metodología planteada por Waylen y Caviedes (1990) citado en Poveda y Álvarez (2012) para dos poblaciones conocidas como FDP Mixtas Tipo I descritas a continuación:

Muestra 1: Precipitaciones durante (1) No Niña
(2) La Niña

La expresión 20 representa la FDP empleada para este estudio:

Ecuación 20.

$$F_T(X \geq x) = \rho_1 F_1(X \geq x) + \rho_2 F_2(X \geq x)$$

Ecuación 21.

$$\rho_1 = \frac{D_{Niña}}{D_T}\ ;\ \rho_2 = \frac{D_{No\ Niña}}{D_T}$$

Donde:

F_1: FDP para la población de la Niña.

ρ_1: Factor de ponderación para la población de La Niña.

F_2 : FDP para la población de No Niña.

ρ_2: Factor de ponderación para la población de No Niña.

D_T: Numero de datos de toda la población.

$D_{Niña}$: Numero de datos de la población de La Niña.

$D_{No\ Niña}$: Numero de datos de la población de No Niña.

Se compararon las FDP tradicionales y mixtas, graficando la función que presento el mejor ajuste con la población de datos.

Método Empírico

Dada la importancia de la utilización de métodos empíricos, y en particular la distribución Weibull al ser una distribución de probabilidad continua usada en probabilidad y estadística avanzada, por ser un método práctico y que es ampliamente empleado por sus buenos resultados; se trabajó el método que se expresa con la ecuación 22:

Ecuación 22.

$$\mathrm{tr} = \frac{\mathrm{n}+1}{\mathrm{m}}$$

Donde:

tr = Periodo 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.

Pruebas de bondad de ajuste

Se utilizó el método EEA descrito en la ecuación 18, este por ser uno de los que presentan los mejores ajuste 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%, para las funciones mixtas se realizó la estimación por longitud de

registro (Niña y No Niña) y se sumó de la misma manera que en el AF de las mixtas (sumatoria ponderada).

6.5 IMPACTO DE LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS DIARIAS EN EL VALLE ALTO DEL RÍO CAUCA

La identificación del impacto de La Niña en las precipitaciones máximas diarias, se hace de acuerdo a la determinación de las series de La Niña y No Niña descritas en la tabla 5, donde se consultaron en bases de datos virtuales, reportes de prensa y en paginas web, para comparar si se presentaron avalanchas, deslizamientos de tierra, inundaciones o desbordamientos en estos períodos de La Niña, y de esta forma establecer su relación con las precipitaciones máximas.

6.6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El análisis se desarrolló con base a los resultados de las gráficas y valores numericos obtenidos en el AED, la prueba de estacionariedad, el AF de las funciones tradicionales y mixtas, y el comportamiento de las precipitaciones máximas diarias en la fase fría de El ENOS.

6.7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de los resultados y del análisis de los mismos, se generaron conclusiones y recomendaciones de acuerdo a los objetivos planteados inicialmente. Finalmente se plantearon futuras lineas de estudio que se estimaron convenientes y pertinentes, para el desarrollo de nueva investigación cientifica enfocada al campo de la Ingeniería Agrícola.



7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 EVALUACIÓN DE LA HIPÓTESIS DE ESTACIONARIEDAD

7.1.1 Análisis Exploratorio y Confirmatorio de Datos

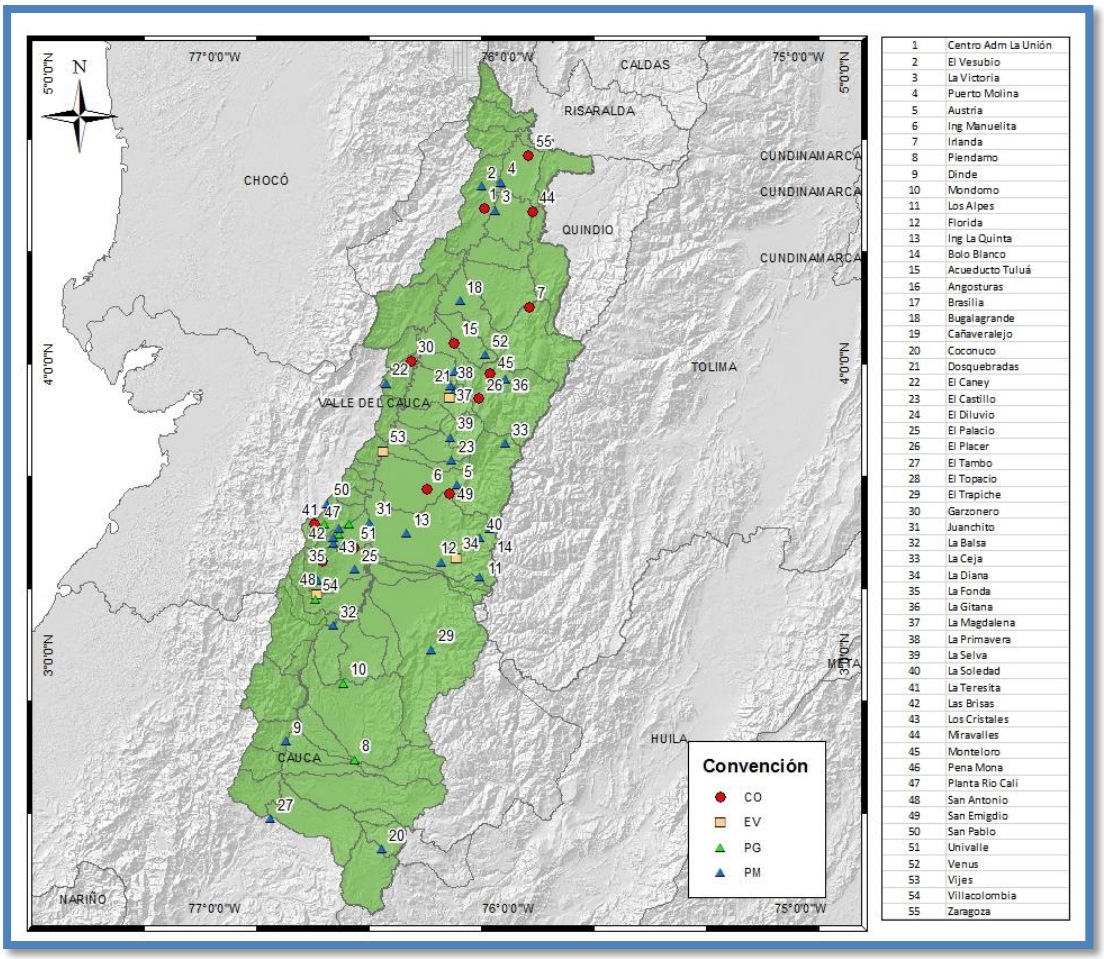
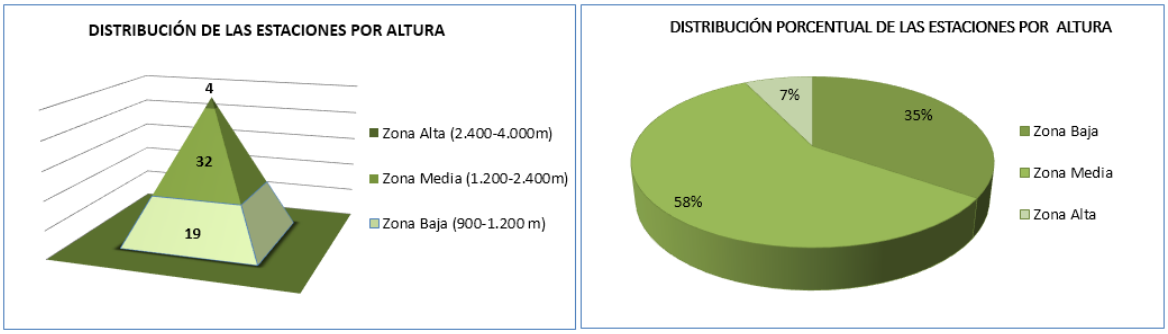


Figura 9. Ubicación de las estaciones analizadas en la cuenca alta del río Cauca

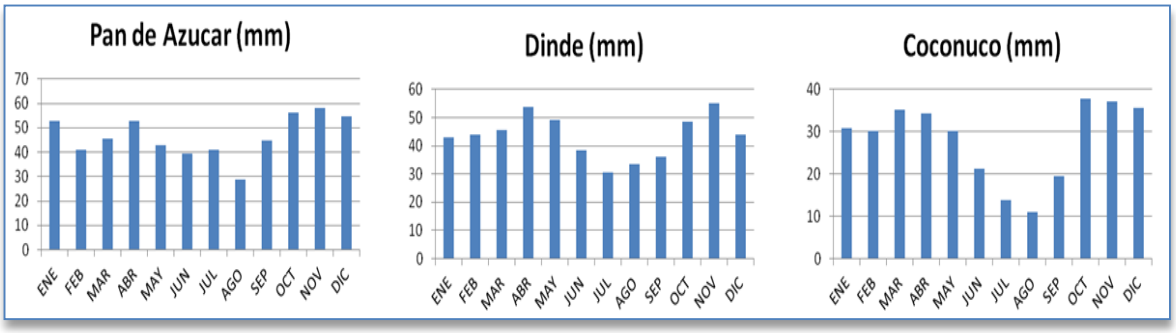
Como se describió en la selección de la red de precipitación, para el AED, se trabajó con 88 estaciones que presentan alturas desde los 901 m.s.n.m. (estación La Victoria en el municipio de La Victoria) hasta los 3.415 m.s.n.m. (estación La Selva en el municipio de Palmira); todas

estas estaciones se encuentran ubicadas a lo largo del flanco oriental de la cordillera occidental, flanco occidental de la cordillera central, en la cuenca alta del río Cauca (ver figura 7 y 8) obteniéndose diferencias en la precipitación, debido a las múltiples relaciones que tiene ésta, con las variables geográficas. En el anexo 1 se presenta la información básica de las 88 estaciones estudiadas en el AED, donde se presenta la alturas, coordenadas, cuenca, tipo de estación y entidad encargada; en el anexo 2 se presenta la base de datos de precipitaciones máximas diarias según año hidrológico de las 55 estaciones finales utilizadas para la prueba de estacionariedad y el AF (ver figura 9, ubicación de las 55 estaciones, y ver tabla 7, información básica de las 55 estaciones). En la gráfica 1 se presenta la distribución altitudinal y porcentual de las estaciones, distribuyéndose así: para la zona baja 19 estaciones, para la zona media, 32 estaciones y para la zona alta 4 estaciones.



Gráfica 1. Zonificación altitudinal y distribución porcentual de todas las estaciones

En un estudio realizado por el Grupo IREHISA (2014) se identificó un patrón bimodal en las series de precipitación mensual, que índica la presencia de dos períodos secos y dos períodos lluviosos que coinciden con el régimen de lluvia asociado al año hidrológico de la zona tropical andina y ocurre a lo largo de la zona de estudio (ver gráfica 2).



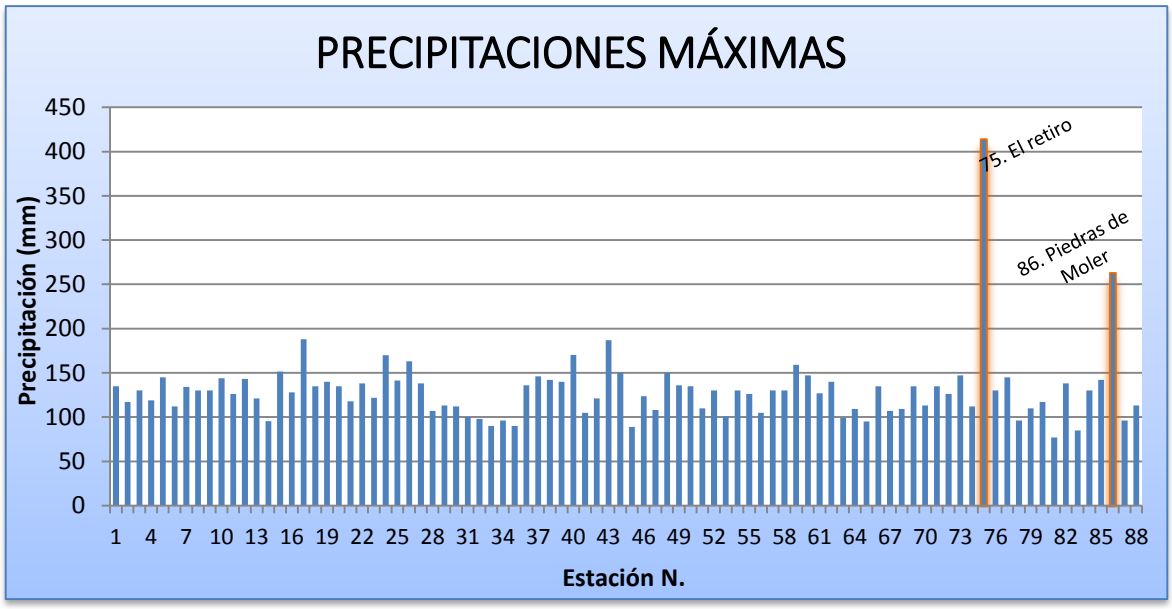
Gráfica 2. Precipitación (mm) de la media mensual multianual de 3 estaciones de la cuenca del río Cauca en su valle alto.

Tabla 7. Información básica de 55 estaciones estudiadas de valle alto del río Cauca

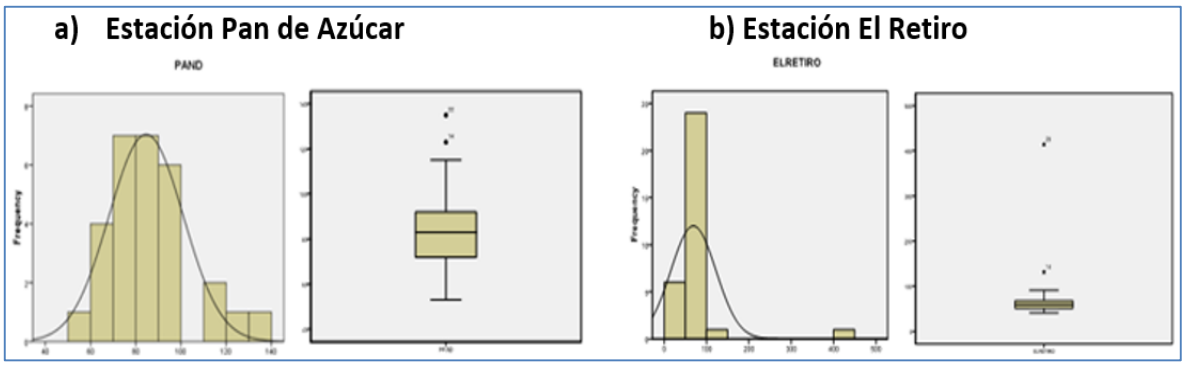
ESTACIÓN	CUENCA	ENTIDAD	CATEGORÍA	LATITUD (NORTE)	LONGITUD (OESTE)	ALTITUD (MSNM)
La Victoria	R.U.T.	CVC	PM	4,52	76,03	901
Zaragoza	Cauca	CVC	CO	4,72	75,93	925
Puerto Molina	R.U.T.	CVC	PM	4,62	76,03	939
Garzonero	Mediacanoa	CVC	CO	4,02	76,32	942
Bugalagrande	Bugalagrande	CVC	PM	4,22	76,17	942
Juanchito	Cauca	CVC	LG	3,35	76,47	948
El Palacio	Jamundí	CVC	PM	3,30	76,53	950
C La Unión	R.U.T.	IDEAM	CO	4,52	76,12	954
Ingenio La Quinta	Fraile	CVC	PM	3,42	76,35	980
Univalle	Meléndez	IDEAM	CO	3,38	76,53	985
La Balsa	Timba	CVC	PM	3,10	76,60	986
Vijes	Vijes	CVC	EV	3,70	76,43	990
El Vesubio	R.U.T.	CVC	PM	4,62	76,08	990
Acueducto Tuluá	Tuluá	CVC	CO	4,07	76,18	1.014
Cañaveralejo	Cañaveralejo	CVC	PG	3,42	76,58	1.056
Ing. Manuelita	Amaime	IDEAM	CO	3,57	76,27	1.058
Planta Río Cali	Cali	CVC	PG	3,43	77,05	1.070
Florida	Guachal	IDEAM	PM	3,32	76,23	1.078
El Placer	Bugalagrande	CVC	CO	4,10	76,10	1.097
Angosturas	San Pedro	CVC	PM	3,98	76,20	1.221
Las Brisas	Cañaveralejo	CVC	PM	3,40	76,60	1.228
Miravalle	Los Micos	CVC	CO	4,52	75,92	1.233
San Emigdio	Amaime	CVC	CO	3,55	76,20	1.272
La Fonda	Meléndez	CVC	PM	3,38	76,60	1.298
Dinde	Alto Cauca	IDEAM	PM	2,68	76,75	1.300
Los Cristales	Cañaveralejo	CVC	PM	3,43	76,58	1.312
Mondomo	Alto Cauca	IDEAM	PG	2,90	76,53	1.360
La Magdalena	Guadalajara	CVC	EV	3,87	76,18	1.360
El Castillo	Zabaletas	CVC	PM	3,07	76,20	1.424
El Caney	Mediacanoa	CVC	PM	3,92	76,43	1.433
El Trapiche	El Palo	CVC	PM	3,02	76,27	1.500
Villa Colombia	Claro	CVC	PG	3,18	76,70	1.505
Venus	Morales	CVC	PM	4,07	76,08	1.560
San Antonio	Jamundí	CVC	EV	3,22	76,07	1.567
La Primavera	Guadalajara	CVC	PM	3,92	76,20	1.644
Dosquebradas	Guadalajara	CVC	PM	3,92	76,18	1.650
La Irlanda	Bugalagrande	CVC	CO	4,18	75,97	1.663
El Topacio	Jamundí	CVC	CO	3,32	76,65	1.676
El Tambo	Alto Cauca	IDEAM	PM	2,45	76,80	1.740
Austria	Amaime	CVC	PM	3,60	76,10	1.750
San Pablo	Cali	CVC	PM	3,03	76,07	1.794
Piendamó	Alto Cauca	IDEAM	PM	2,63	76,53	1.800
Monteloro	Tuluá	CVC	CO	3,97	76,05	1.861
Brasilia	Cali	CVC	PG	3,43	76,65	1.864
La Teresita	Cali	CVC	CO	3,45	76,07	1.950
La Diana	Fraile	CVC	EV	3,03	76,18	1.960
Peña Mona	Jamundí	CVC	PM	3,25	76,72	2.100
La Soledad	Fraile	CVC	PM	3,40	76,10	2.160
El Diluvio	Guadalajara	CVC	PM	3,88	76,15	2.360
Los Alpes	Desbaratado	CVC	PM	3,27	76,10	2.380
Coconuco	Alto Cauca	CVC	PM	2,25	76,45	2.400
Bolo Blanco	Bolo	CVC	PM	3,43	76,07	2.410
La Gitana	Tuluá	CVC	PM	3,93	76,00	2.783
La Ceja	Amaime	CVC	PM	3,72	76,02	3.052
La Selva	Amaime	CVC	PM	3,53	76,08	3.415

En la gráfica 3 del valor de la precipitación máxima cada estación, se muestran que en las estaciones El Retiro y Piedras de Moler hay datos que se encuentran por encima de las precipitaciones máximas de las demás estaciones. Esto coincide con los eventos de precipitación máximas de los años 2007 y 2011, en los cuales se presenta excesos de pluviosidad. Sin embargo, el grado de detalle de análisis, no ofrece certeza sobre el origen de este resultado, y también es probable que sean consecuencia de los errores de registro.

Los datos representados en el histograma de la precipitación máxima diaria (ver gráfica 4) indican que más del 80% de las series se ajustan a la curva de distribución normal; en estaciones como Monteloro, Galicia, El Placer, El Retiro y Piedras de moler, se observó asimetría bien pronunciada hacia la derecha. Significa entonces, que la mayoría de los valores registrados en estas estaciones, se encuentran por debajo de la media y mediana de los mismos, con la presencia de datos poco usuales que afectan la distribución de los mismos. Por otro lado, en el diagrama de cajas también se identificaron datos atípicos extremos en El Placer, El Retiro y Piedras de moler, que alteran la tendencia de las mismas. En la gráfica 4 se muestran las medidas de dispersión: histogramas y diagramas de cajas de las estaciones Pan de Azúcar y El Retiro y en el Anexo 3 el extenso de las gráficas.

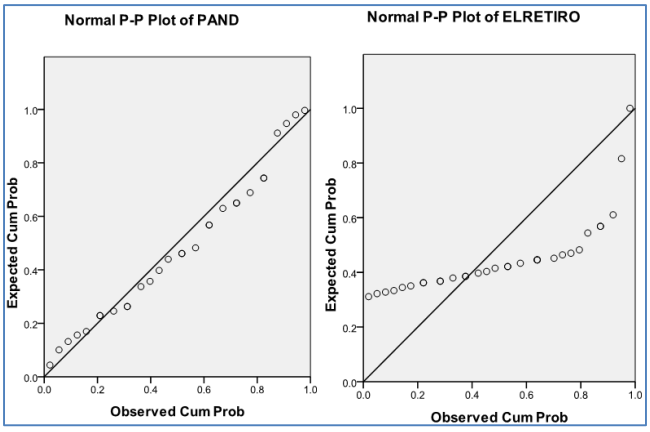


Gráfica 3. Valor de la precipitación (mm) máxima diaria para cada estación



Gráfica 4. Histogramas y diagrama de cajas de precipitaciones máximas diarias para las estaciones de Pan de Azúcar y El Retiro

Las gráficas Normal P-P (ver gráfica 5) las cuales representan un ajuste probabilístico, que se realiza por medio de una trasformación de los datos suministrados, en el que cada dato es un punto en el tiempo, y las estaciones se ajustan linealmente para verificar el cumplimiento del supuesto de normalidad dentro de los registros de precipitación de una misma serie. En consecuencia, se verificó que las estaciones de Dapa, Juanchito, Bolo Blanco, Mediacanoa, La Magdalena, Angosturas y Bugalagrande, entre otras, conforman más del 80% de las series que presentan mejor ajuste a la distribución normal. No obstante, en estaciones como el Retiro y Piedras de Moler, se indica claramente un desajuste probabilístico directamente relacionado con la presencia de datos atípicos, para ambos casos. Este resultado coincide con el resultado obtenido por medio de los histogramas. En la gráfica 5 se presenta un ejemplo del comportamiento de las estaciones Pan de Azúcar y El Retiro, y en el Anexo 3 el extenso de las gráficas.



Gráfica 5. Normal P-P de la precipitación máxima diaria para las estaciones Pan de Azúcar y el Retiro

Los valores de la media en las precipitaciones máximas diarias de la zona de estudio, se encuentran alrededor de los 73 mm y oscilan en un amplio rango, limitado por los máximos y mínimos correspondientes a cada estación. Por otro lado, otros indicadores de aleatoriedad de los registros, son las medidas de dispersión, como es el caso de la varianza que es una variable dependiente de la desviación estándar. Por ejemplo, en la estación El Retiro y Piedras de Moler se presentaron las mayores varianzas (ver gráfica 3).

El coeficiente de variación (CV) indica baja heterogeneidad de los datos, presentándose en más del 89% de las estaciones, dado que la base de datos empleada corresponde a los valores máximos anuales en 24 horas. Sin embargo, en el Retiro y Piedras de Moler los coeficientes de variación son superiores al 40% debido a la presencia de valores atípicos en los años hidrológicos comprendidos entre 2007-2008 y 2010-2011 respectivamente.

Por otro lado, la distribución de los datos según el coeficiente de Curtosis, indican una gran concentración de valores para más del 60% de las estaciones monitoreadas, y sólo el 32% son estaciones con una reducida concentración de los datos alrededor de los valores centrales de la distribución (*Platicúrtica*).

Se identificaron 8 estaciones con valores extremos mayores y/o iguales al 40% del Valor Máximo Teórico (VMT), con diferencias superiores al 100%. En cambio, la serie de máximas no presenta datos atípicos extremos, que interfieran en el desarrollo de la investigación, ya que son considerados aceptables con respecto a los registros de las serie de máximas en 24 horas. En la tabla 8 se presenta los estadísticos descriptivos de 5 estaciones y en el anexo 4 se agrupan los resultados en extenso de todas las estaciones.

Tabla 8. Variables estadísticas para 5 estaciones

Estación	Media (mm)	Desviación Estándar (mm)	Varianza (mm^2)	Curtosis	Coeficiente Variación (%)	VTM (mm)
Pan de Azúcar	85	18,63	347	0,93	22,45	141
Coconuco	54	12,54	157	-0,02	24,63	92
Dinde	74	11,00	121	-0,59	15,39	107
Piendamó	72	26,49	701	1,73	37,05	152
El Retiro	73	64,72	4188	26,96	108,77	267
Piedras de Moler	83	41,74	1742	17,13	54,92	209

Análisis Confirmatorio

De la prueba de Normalidad de Shapiro Wilk (ver tabla 9), se obtuvieron valores de significancia menores de 0,05 para 70 estaciones; es decir que la hipótesis de normalidad se cumple para el 80% de las estaciones, indicando que los registros de estas estaciones se encuentran distribuidos alrededor de un valor medio dentro de una misma serie de precipitación. Sin embargo, las estaciones como Piendamó, El Trapiche, no presentan distribución normal, éstas se encuentran agrupadas en zonal baja entre las cordillera Occidental y Central al sur oeste. En el anexo 5 se presentan los resultados de la prueba de normalidad.

Tabla 9. Resultado de la prueba de normalidad Shapiro-Wilk para una muestra de 6 estaciones

Estación	Shapiro-Wilk	
	Estadísticas	Significancia
Pan de Azúcar	0,93	0,19
Coconuco	0,91	0,09
Dinde	0,90	0,07
El Tambo	0,95	0,50
Piendamó	0,88	0,03
Villarrica	0,95	0,35

Prueba no paramétrica

Aunque la prueba no paramétrica U Mann Whitney, es empleada principalmente para muestras que no siguen una distribución normal; en este análisis, se utilizó para determinar si existen semejanzas en una muestra aleatoria de 10 estaciones: La Balsa (1), Villa Colombia (2), Tacueyo (3), Jambaló (4), La Argentina (5), Brasilia (6), Ingenio la Quinta (7), Venecia (8), Puerto Frazadas (9) y Zaragoza (10).

De la prueba, se obtuvo que 5 de las 10 series muestreadas, presentan semejanzas con el 50% de la muestra restante, con la excepción de la estación de Jambaló (4), la cual, no indicó relación alguna con las demás series de tiempo seleccionadas (ver tabla 10).

A pesar de la variabilidad en las series de precipitaciones diarias, la prueba no paramétrica indica que las series de máximas provienen de una misma población y al ser transformadas por medio de la prueba no paramétrica, puede ser considerada homogéneas entre sí.

Tabla 10. Prueba no paramétrica para una muestra de 10 estaciones escogidas aleatoriamente

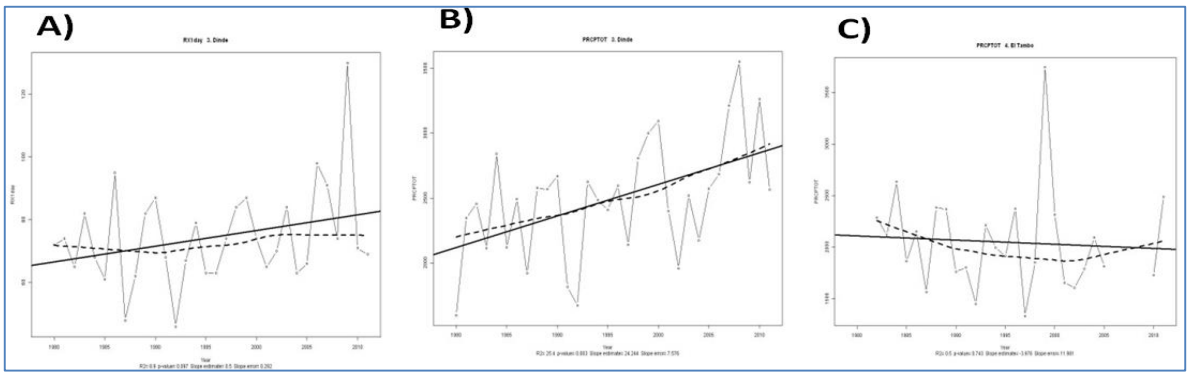
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,280	0,040	0,000	0,049	0,000	0,020	0,329	0,086	0,001
2		0,005	0,000	0,209	0,000	0,001	0,059	0,003	0,000
3			0,002	0,001	0,151	0,894	0,190	0,416	0,599
4				0,000	0,021	0,000	0,000	0,000	0,002
5					0,000	0,000	0,008	0,000	0,000
6						0,052	0,001	0,008	0,290
7							0,169	0,351	0,478
8								0,530	0,200
9									0,061

Realizado el AED, se recomienda emplear la serie de 55 estaciones mencionadas en la tabla 6 y figura 5, descartando 53 estaciones de las 108, por datos faltantes, valores atípicos y poca confiabilidad de los registros.

7.1.2 Hipótesis de estacionariedad

La frecuente ausencia de registros de precipitación en la cuenca alta del río Cauca, influyen en las variaciones de tendencia de la media y la varianza de una serie y por consiguiente en la interpretación de la estacionariedad en la zona de estudio, ya que la hipótesis es válida, si y solo sí la varianza y la media son constantes a lo largo del tiempo. Por ejemplo, en este análisis, se considera estacionaria la serie, si los registros de precipitación se encuentran aparentemente alrededor de la media y la varianza se desplaza en un rango pequeño y tiende a cambiar.

De acuerdo con la prueba de la hipótesis (ver gráfica 6), se identificó inestabilidad en los fenómenos climatológicos para el 80% de las estaciones, es decir, que no cumplen con la hipótesis de estacionariedad (ver Anexo 6, resultados de la prueba de estacionariedad y ver Anexo 7, gráficas de la prueba de estacionariedad) y coinciden parcialmente con los reportes históricos de eventos máximos de precipitación de los últimos 30 años, en los que se reportan fluctuaciones irregulares en las precipitaciones máximas anuales y se asocian con la pérdida de cultivos, obras civiles rurales y urbanas principalmente en la zona baja de la cuenca del río Cauca (Desinventar, 2014).



Gráfica 6. Prueba de estacionariedad para series de precipitaciones máximas diarias de las estaciones: A) Coconuco, B) Dinde y C) El Tambo

En las series no estacionarias la mayor precipitación fue de 188 mm/día en la zona media de la cuenca; en la misma zona se registró la menor precipitación de 8 mm/día. Este último ocurrió reiteradamente tanto en la fase fría (La Niña) del ENOS como en los demás años hidrológicos de la serie (El Niño y Normal, y se consideró como un valor anómalo, dado que dentro de los registros de precipitaciones máximas diarias es de difícil ocurrencia.

En el 20% de las estaciones se identificó estabilidad y se encuentran distribuidas en la zona alta, media y baja de la cuenca del río Cauca, con precipitaciones máximas que fluctúan entre los 8 mm y 170 mm.

La ausencia de estacionariedad en series de caudal se asocia a la presencia de variabilidad climática, cambios del uso del suelo, entre otros (Poveda, 2004; Zeng, Feng, y Li, 2014). Sin embargo, a diferencia de las series de caudal, las series de precipitación máximas, son eventos puntuales que provocan aumento de las magnitudes de las lluvias y como consecuencia provocan deslizamientos y desbordamientos que frecuentemente no están relacionados con la presencia del fenómeno ENOS fase fría (La Niña), puesto que ésta tiene períodos de duración que van desde 9 meses hasta 3 años.

Las variables de la media y la varianza no resultaron constantes en el tiempo en el cual se realizó la prueba de estacionariedad. Lo que indica una no estacionariedad de las precipitaciones máximas diarias. Estos resultados, no implican que los datos representados deban ser ajustados por medio de regresiones, puesto que la falta de estacionariedad en hidroclimatología no representa un modelo, sino un fenómeno natural; ya que la hipótesis se hace inválida mientras se presenten impactos de la VC, y otros factores antrópicos asociados a estos (Poveda y Álvarez, 2012).

Físicamente la no estacionariedad presentada en la zona de estudio, se ve reflejada en el aumento y/o disminución de los fenómenos climatológicos de los últimos 30 años donde se han intensificado los eventos máximos y mínimos de las lluvias y las sequías, originando pérdidas en cultivos, obras civiles rurales y urbanas, y la evidente vulnerabilidad de la población que padece las consecuencias de la VC.

7.2 ANÁLISIS DE FRECUENCIA

La importancia del AF se basa en asignar a cada evento máximo diario de precipitación registrada, el Tr correspondiente y la probabilidad de ser igualado o excedido, esto con el fin de conocer la magnitud de tales eventos en la zona de estudio.

7.2.1 Prueba de ajuste

En la tabla 11 se presentan los resultados obtenidos en la prueba de ajuste del EEA para las funciones estudiadas. En ésta tabla se identificó que las tres funciones del AF tradicional presentan menor EEA comparados con el AF de las mixtas; se atribuye este comportamiento a que al trabajar las funciones mixtas se divide la longitud de registro en dos series (La Niña y No Niña), siendo la longitud de los datos La Niña muy corta, lo que aumenta la dispersión de los datos e influye en el aumento del EEA.

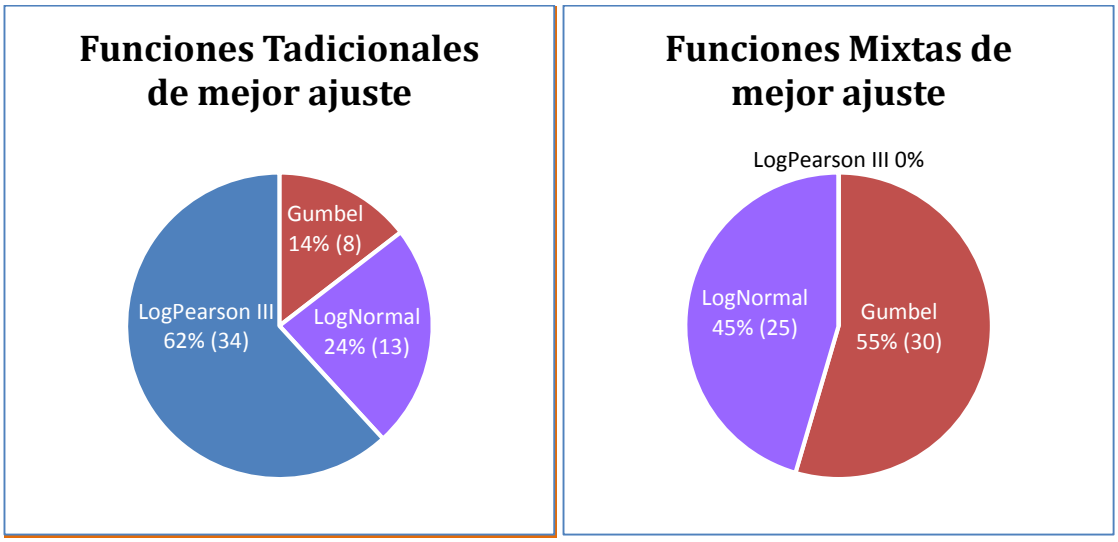
Tabla 11. EEA de las funciones tradicionales y mixtas de series de precipitaciones máximas diarias, en 55 estaciones de la cuenca alta del río Cauca

ESTACIONES	TRADICIONALES			MIXTAS		
	Gumbel	LogNormal	LogPearson III	Gumbel	LogNormal	LogPearson III
Coconuco	3,48	3,72	**3,44**	**5,00**	5,37	12,06
Dinde	3,00	3,67	**2,99**	**3,65**	4,36	8,09
El Tambo	3,73	2,99	**2,87**	4,16	**3,42**	8,47
Piendamó	**9,59**	21,75	11,28	**10,10**	19,43	19,88
Mondomo	5,15	**5,10**	7,28	**4,73**	4,87	12,98
La Balsa	3,93	4,02	**3,89**	4,85	**4,73**	10,31
Villa Colombia	**3,50**	4,28	3,62	**4,73**	5,30	13,02
El Trapiche	3,79	4,88	**3,42**	**4,36**	5,02	7,46
El Palacio	**2,81**	3,21	2,91	**3,67**	4,21	11,02
Peña Mona	5,42	**4,44**	4,86	8,59	**8,49**	20,84
San Antonio	**2,90**	3,05	2,94	**3,51**	3,64	9,22
El Topacio	3,09	**2,33**	2,36	3,61	**2,70**	4,85
La Fonda	2,45	3,47	**2,34**	**3,33**	3,96	9,14
Univalle	3,23	3,54	**3,19**	**4,16**	4,66	10,73

ESTACIONES	TRADICIONALES			MIXTAS		
	Gumbel	LogNormal	LogPearson III	Gumbel	LogNormal	LogPearson III
Cañaveralejo	5,10	6,29	**4,28**	**6,64**	7,51	15,39
Los Cristales	4,19	**3,60**	4,10	5,28	**4,36**	15,24
Las Brisas	3,89	4,58	**3,66**	**5,26**	5,66	12,40
Planta río Cali	3,63	4,09	**3,43**	**5,00**	5,26	11,23
Brasilia	2,92	**2,44**	2,50	3,47	**3,06**	8,51
La Teresita	3,71	3,11	**2,66**	4,22	**3,43**	8,57
San Pablo	**4,94**	6,22	7,72	**5,32**	6,77	10,85
Juanchito	5,11	6,64	**3,08**	**5,80**	6,72	10,21
Ing. La Quinta	3,12	4,07	**2,79**	**3,95**	4,34	7,14
Florida	4,02	5,25	**3,67**	**5,58**	6,43	12,17
La Diana	3,49	4,25	**3,42**	**5,08**	5,39	18,27
La Soledad	6,80	5,42	**3,61**	7,18	**5,78**	15,93
Los Alpes	4,87	**4,16**	5,27	7,18	**6,83**	19,75
Bolo Blanco	3,48	3,45	**2,34**	4,98	**4,55**	11,95
Ing. Manuelita	3,90	4,93	**3,31**	**4,66**	5,25	13,98
San Emigdio	7,86	8,94	**6,95**	**8,06**	8,85	14,23
Austria	4,32	3,01	**2,82**	5,10	**3,91**	17,28
La Ceja	3,41	**2,94**	3,36	5,50	**5,29**	12,69
La Selva	3,01	2,12	**2,08**	3,38	**2,52**	9,08
El Castillo	3,77	3,84	**3,57**	4,82	**4,59**	9,83
Vijes	**2,69**	2,97	2,70	**3,54**	3,74	7,55
El Caney	3,28	**2,69**	2,74	3,96	**3,42**	10,12
Garzonero	2,84	**2,84**	2,88	3,44	**3,37**	6,70
Dosquebradas	5,59	5,97	**5,07**	**6,17**	6,25	12,14
El Diluvio	4,80	**4,11**	5,30	**6,15**	6,27	8,98
La Primavera	**4,97**	5,26	5,06	**5,52**	5,68	10,93
La Magdalena	2,72	2,90	**2,67**	**3,54**	3,69	8,86
La Gitana	2,15	**1,90**	1,98	3,08	**2,98**	8,39
Acueducto Tuluá	3,36	2,49	**2,10**	3,74	**2,86**	7,86
Monteloro	2,92	**2,72**	3,70	**3,22**	3,49	7,02
Venus	3,70	**3,26**	3,29	5,08	**4,26**	16,23
Angosturas	3,11	2,28	**2,22**	4,03	**3,28**	9,27
Bugalagrande	3,50	2,82	**2,73**	4,07	**3,39**	7,34
El Placer	5,05	5,74	**4,44**	**6,11**	6,48	10,75
La Irlanda	4,34	3,43	**3,41**	5,65	**4,70**	9,11
El Vesubio	4,65	4,42	**4,29**	6,09	**5,96**	20,13
C La Unión	3,81	4,39	**3,62**	**5,67**	6,18	11,11
La Victoria	**5,55**	5,58	6,59	**5,97**	6,00	10,94
Puerto Molina	4,30	3,56	**2,08**	4,53	**3,75**	6,76
Miravalle	2,50	2,01	**2,00**	4,01	**3,62**	11,77
Zaragoza	3,26	3,84	**3,12**	**4,18**	4,66	9,81

En la tabla 11 se observa para las funciones estudiadas con las funciones tradicionales, la de mejor ajuste 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%. Para el caso de las funciones mixtas, la de mejor ajuste fue Gumbel con 30 estaciones que representan el 55%, seguida de LogNormal con 25 estaciones (45%), para este caso la función LogPearson III no presentó ninguna estación con buen ajuste ya que una de sus características principales es la de ser empleada para longitudes de registros largas y para este caso no se cumpliría porque la cantidad máxima de datos de La Niña sería

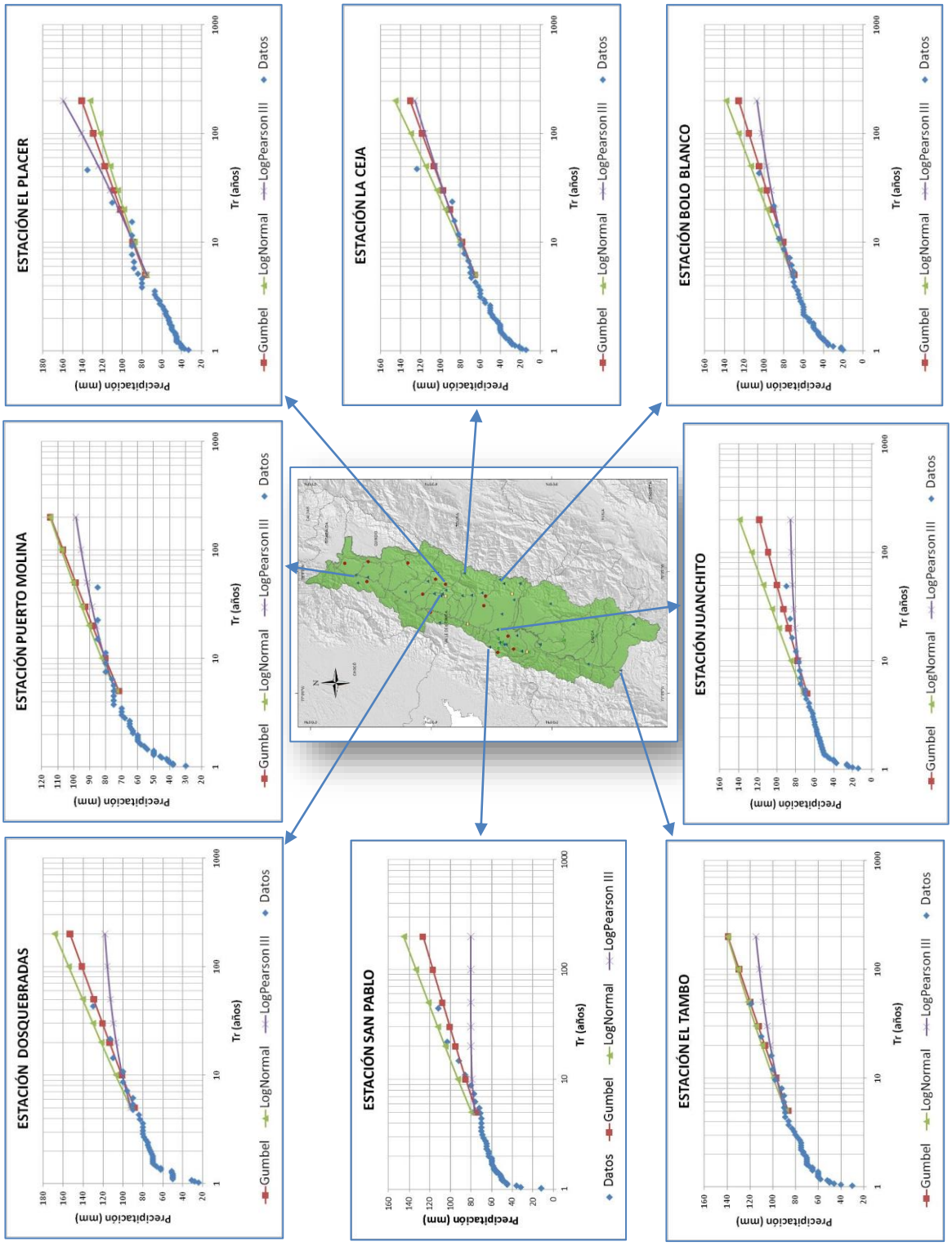
11, por los 11 eventos registrados. Estos resultados se presentan en la gráfica 7 con el consolidado de las funciones de mejor ajuste.



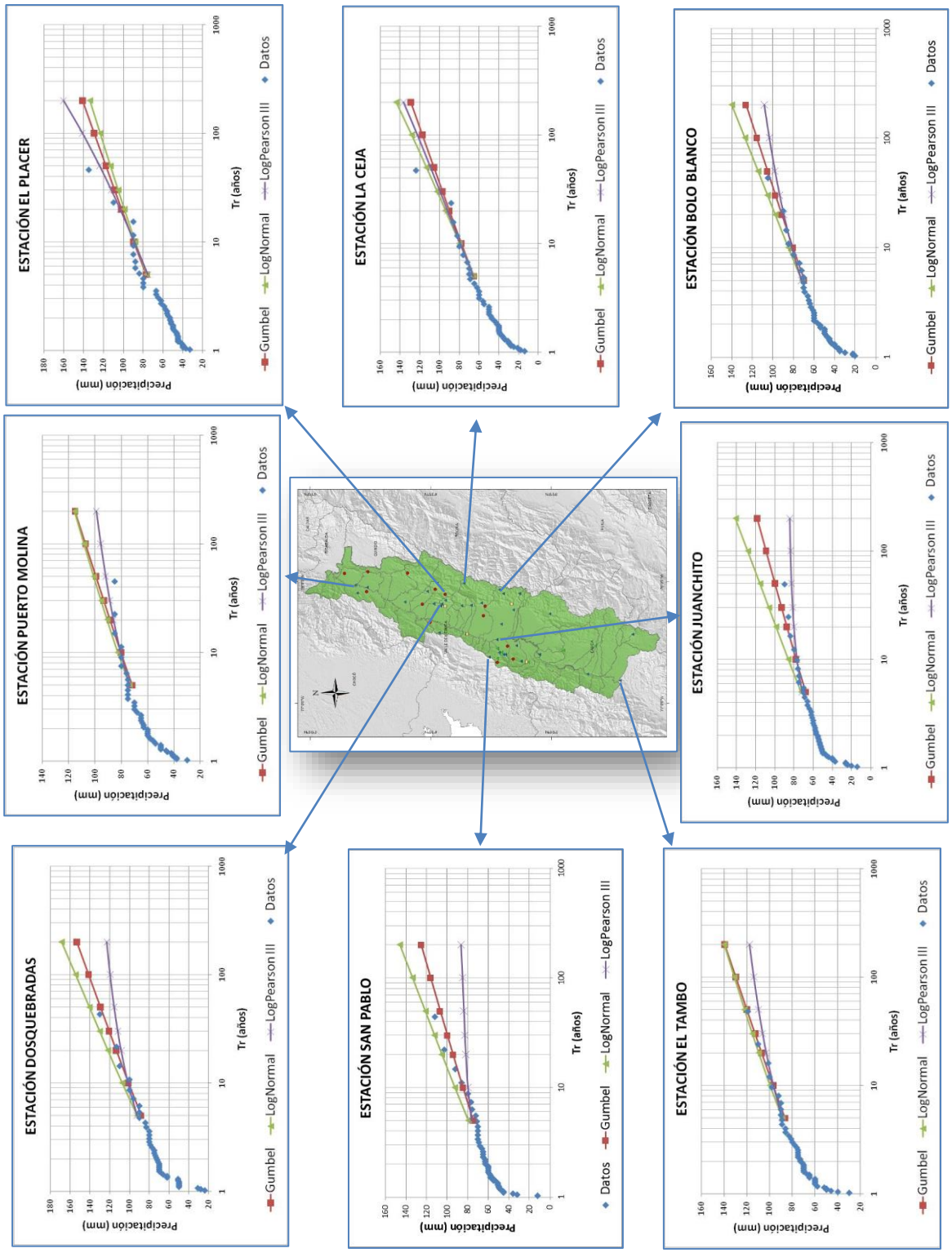
Gráfica 7. Función de mejor ajuste para 55 estaciones con series de precipitaciones máximas diarias del valle alto del río Cauca, presentado porcentual y numéricamente

7.2.2 Funciones tradicionales y mixtas

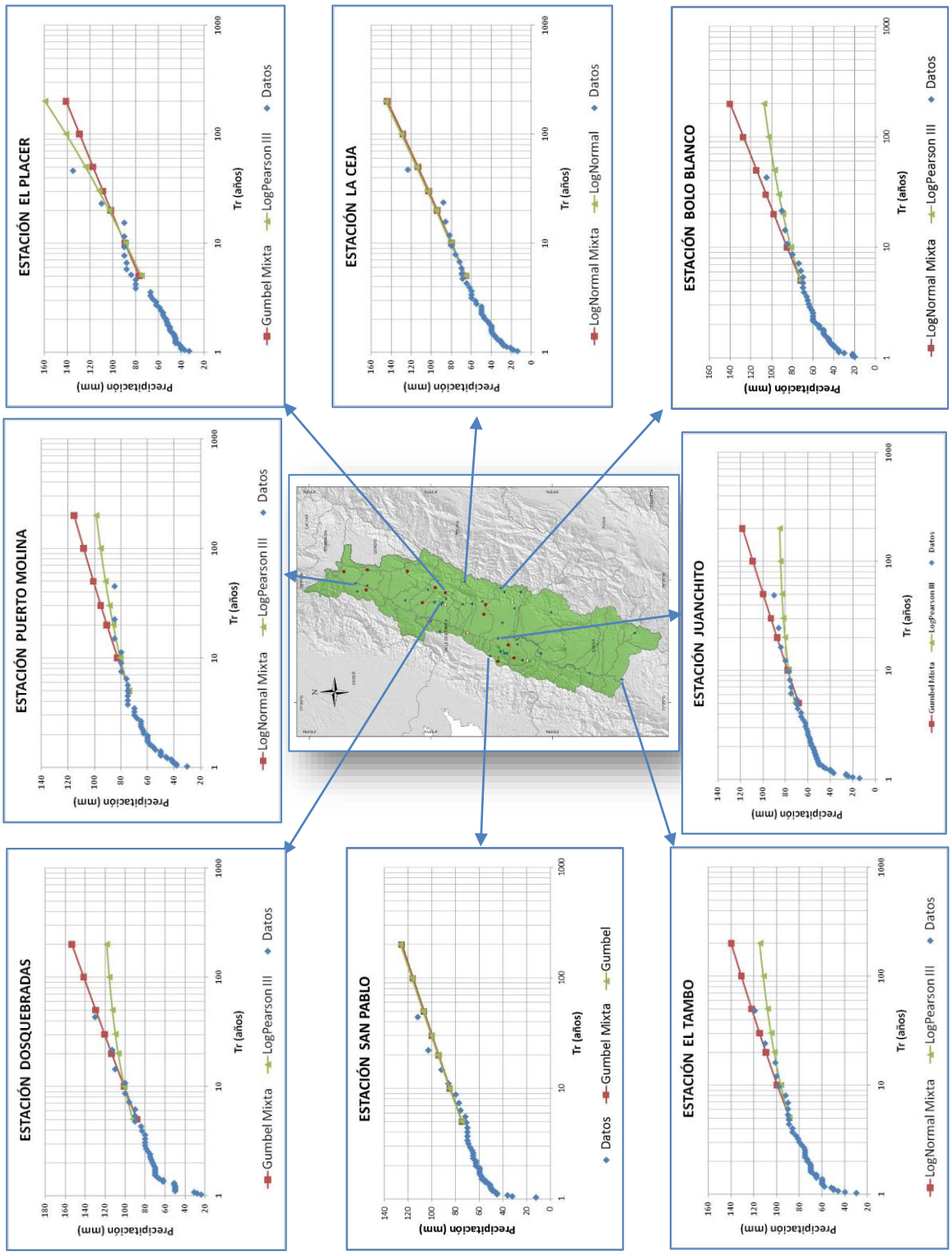
A continuación se presentan los resultados del AF con las funciones tradicionales y mixtas, divididas por alturas. Para lo cual se pone de ejemplo una muestra de 8 estaciones distribuidas de la siguiente manera: tres en la parte baja de la cuenca, tres en la parte media de la cuenca y 2 en la parte alta de la cuenca. En las gráficas 8 (funciones tradicionales), 9 (funciones mixtas) y 10 (funciones de mejor ajuste tradicional y mixta) se presentan las distribuciones del AF de las funciones Gumbel, LogNormal y LogPearson III. En el Anexo 8 se presenta el extenso de los resultados del AF con funciones tradicionales y mixtas, con las gráficas realizadas.



Gráfica 8. Período de retorno de Gumbel, LogNormal y LogPearson tipo III de precipitaciones máximas diarias con series tradicionales



Gráfica 9. Período de retorno de Gumbel, LogNormal y LogPearson tipo III de precipitaciones máximas diarias con series mixtas (La Niña y No Niña)



Gráfica 10. Período de retorno de Gumbel, LogNormal y LogPearson tipo III de precipitaciones máximas diarias con series tradicionales y mixtas de mejor ajuste (La Niña y No Niña)

El Placer: LogPearson III que fue la de mejor ajuste para el caso de las funciones tradicionales, estima los mayores valores de precipitación máxima diaria para cada Tr en comparación con las otras dos funciones, las cuales tienden a ser más conservadoras a partir del Tr de 20 años (ver gráfica 8). Para el caso de las mixtas, Gumbel es la de mejor ajuste, los valores obtenidos en LogNormal subestiman estos resultados y LogPearson tipo III los sobreestima (ver gráfica 9). Comparando las dos gráficas de mejor ajuste (ver gráfica 10), se observa que la función mixta subestima los valores de la función LogPearson III cuando aumenta el Tr.

Puerto Molina: La función Gumbel y LogNormal tienden a los mismos valores en los Tr calculados, a diferencia de LogPearson III que subestima los valores de las funciones tradicionales (ver gráfica 8). Las mixtas presentan un comportamiento similar a las funciones tradicionales, la diferencia está en que la de mejor ajuste es Gumbel (ver gráfica 9). En la gráfica 10 se puede observar los datos graficados en azul, que representan la probabilidad empírica, tienden a LogPearson III, a diferencia de la mixta que sobreestima los datos.

Juanchito: Las funciones Gumbel y LogNormal sobreestiman los valores de la función LogPearson III que es la de mejor ajuste para las tradicionales, tendiendo a un mismo valor (85 mm) después del Tr de 20 años (ver gráfica 8). La función mixta LogNormal sobreestima los valores comparada con Gumbel mixta que es la que mejor ajusta a los datos; LogPearson II subestima estos valores (ver gráfica 9). Los datos de la probabilidad empírica de weibull se representan mejor a la función Gumbel mixta como se observa en la gráfica 10.

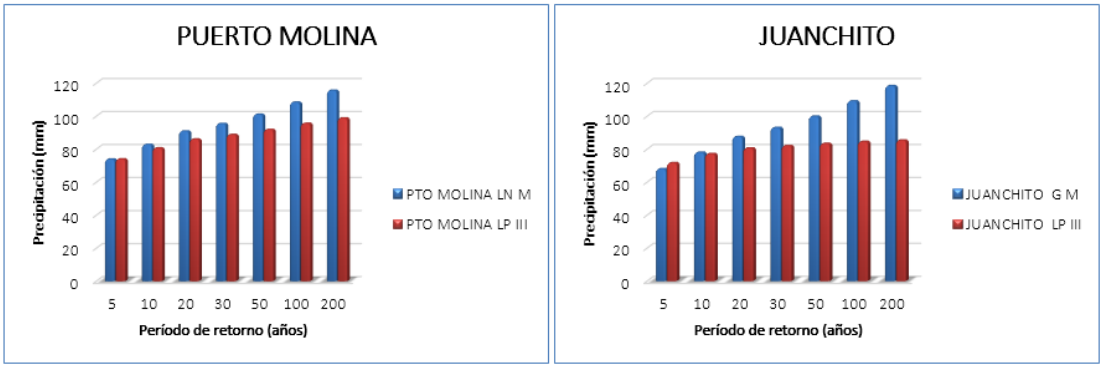
Comportamiento general de la parte baja de la cuenca del río Cauca en su valle alto

Tabla 12. Funciones de mejor ajuste, distribuidas porcentualmente por altura

Zona de la cuenca	TRADICIONAL			MIXTA		
	Gumbel	LogNormal	LogPearson III	Gumbel	LogNormal	LogPearson III
Baja	16% (3)	5% (1)	79% (15)	68% (13)	32% (6)	0% (0)
Media	19% (6)	31% (10)	50% (16)	53% (17)	47% (15)	0% (0)
Alta	0% (0)	50% (2)	50% (2)	0% (0)	100% (4)	0% (0)

Las funciones que mejor representa los datos de precipitaciones máximas diarias en la parte baja es LogPearson III tradicional (79%) y Gumbel mixta (68%) como se observa en la tabla 12; en las 19 estaciones se identifica diferencia de los valores de Tr para las estaciones Puerto

Molina y Juanchito (ver gráfica 11), siendo la función tradicional, más conservadora. Los valores estimados empiezan a variar a partir de los 20 años de Tr llegando a diferencias de 33 mm para el caso de Juanchito en el Tr de 200 años.



Gráfica 11. Comparación en el período de retorno para las funciones tradicionales y mixtas de la parte baja de la zona de estudio, estaciones Puerto Molina y Juanchito

Parte media de la cuenca del río Cauca en su valle alto

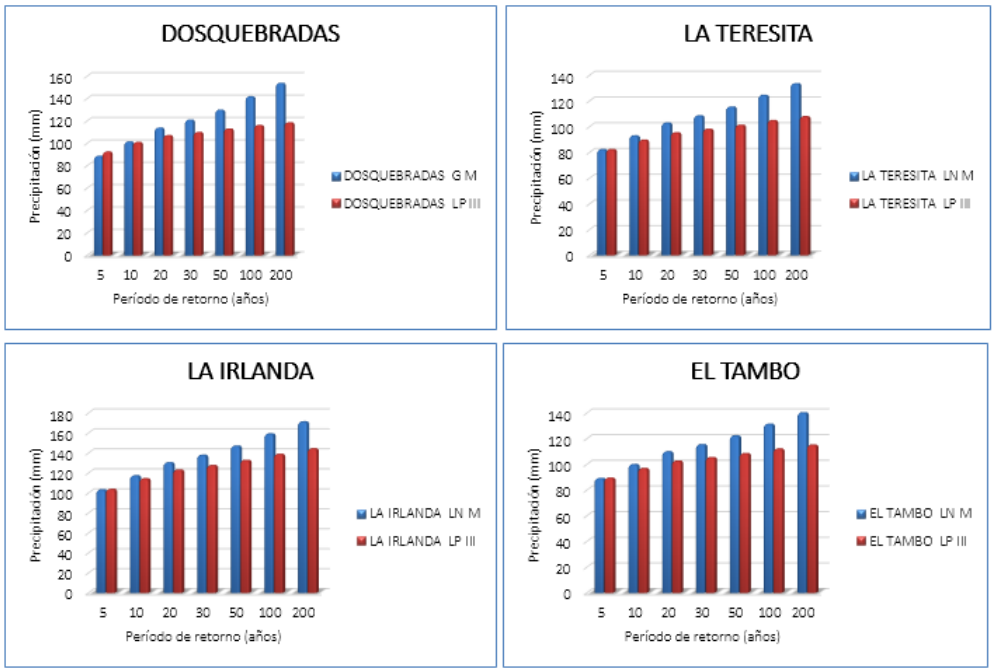
El Tambo: Los Tr de Gumbel y LogNormal tradicional (ver gráfica 8) sobreestiman los valores de LogPearson III que es la que mejor se ajusta a la serie de precipitaciones máximas diarias; a diferencia de las mixtas donde la función LogNormal es la que mejor representa los datos (ver gráfica 9). Para ambos casos las funciones Gumbel y LogNormal presentaron los mismos valores en los Tr (ver gráfica 10).

San Pablo: Gumbel presentó buen ajuste para ambos casos; LogNormal sobreestima los valores de Gumbel y LogPearson los subestima, esta última función tiende a 80 mm después de los 10 años de Tr (ver graficas 8, 9 y 10).

Dosquebradas: Las funciones tradicionales Gumbel y LogNormal no son tan conservadoras comparadas con LogPearson III que es la de mejor ajuste (ver gráfica 8); en las mixtas la función Gumbel es más conservadora que LogNormal pero LogPearson III conserva más los datos (ver gráfica 9). Comparando la función mixta y tradicional, se observa que la tradicional es más conservadora que la función mixta (ver gráfica 10).

Comportamiento general de la parte media de la cuenca del río Cauca en su valle alto

Se evidencia que para las funciones tradicionales, LogPearson III fue la de mejor ajuste (50%) y para las mixtas, Gumbel fue la de buen ajuste (53%). Estos valores se presentan en la tabla 12. De la comparación de las funciones seleccionadas con buen ajuste, se observa diferencia en 4 de las 32 estaciones (Dosquebradas, La Teresita, La Irlanda y El Tambo). Esta diferencia radica en que al igual que sucede en la parte baja, las funciones mixtas sobreestiman los valores de los Tr, llegando a valores que difieren en 35 mm en el valor de 200 años (ejemplo de la estación Dosquebradas) como se observa en la gráfica 12.



Gráfica 12. Comparación en el período de retorno para las funciones tradicionales y mixtas de la parte media de la zona de estudio, estaciones Dosquebradas, La Teresita, La Irlanda y El Tambo

Parte alta de la cuenca del río Cauca en su valle alto

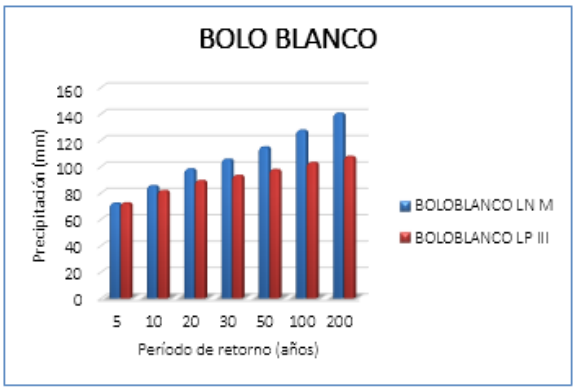
Bolo Blanco: La función LogPearson III es más conservadora que las funciones LogNormal y Gumbel tradicional, siendo la función LogNormal la que más sobreestima los valores (ver gráfica 8). Las funciones mixtas presentan un comportamiento similar a las tradicionales, se diferencian en la función de mejor ajuste que para las tradicionales es LogPearson III y para

las mixtas es LogNormal. La función mixta subestima los valores obtenidos en la tradicional (ver gráfica 10).

La Ceja: La función LogNormal que no es tan conservadora respecto a Gumbel y LogPearson III, es la que mejor se ajusta a los datos y a la probabilidad empírica de Weibull para ambos casos (tradicionales y mixtas) como se observa en las gráficas 8, 9 y 10.

Comportamiento general de la parte media de la cuenca del río Cauca en su valle alto

En la parte alta, LogNormal y LogPearson III fueron las que presentaron mejor ajuste, 50% cada una; en las mixtas todas ajustaron a LogNormal (ver tabla 12). Se presentó diferencia (33 mm) en la estación Bolo Blanco para los Tr determinados con la función mixta y tradicional de mejor ajuste (ver gráfica 13).



Gráfica 13. Comparación en el período de retorno para las funciones tradicionales y mixtas de la parte alta de la zona de estudio, estación Bolo Blanco

Cabe anotar, que las estaciones presentadas en las gráficas 11, 12 y 13, corresponden a estaciones con diferencia en el valor estimado de Tr, donde la función tradicional es más conservadora que la mixta, y todas son LogPearson III, a diferencia de las mixtas que son Gumbel y LogNormal. En general, la serie de precipitaciones máximas diarias del área de estudio tiene aceptable confiabilidad cuando se efectúan predicciones con grandes Tr según la función LogPearson Tipo III para el caso de las funciones tradicionales, aunque también es adaptable a los parámetros de la media de los logaritmos y desviación estándar de los logaritmos de la función LogNormal con valores centrados en la media. En las funciones mixtas la serie se ajusta mejor a la distribución Gumbel siendo la más recomendada para

eventos extremos máximos, obteniendo valores probables en distintos períodos de retorno; además, es recomendable su uso por su rapidez y facilidad de cálculo.

Distribución espacial de las precipitaciones máximas asociadas a períodos de retorno en la cuenca alta del río Cauca

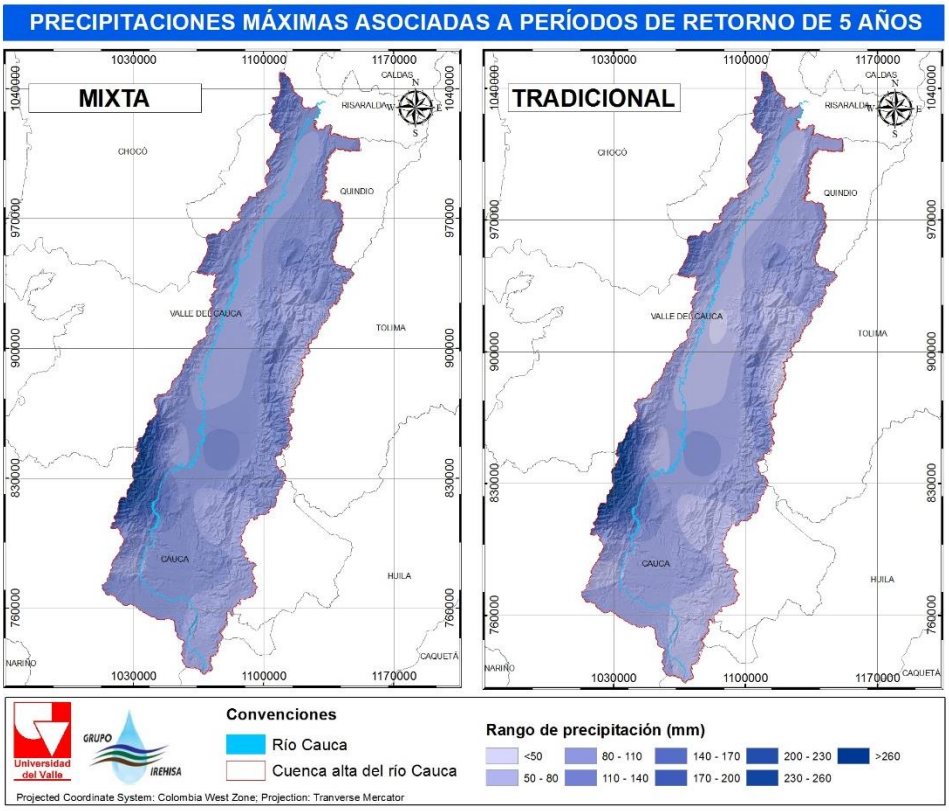


Figura 10. Distribución espacial de las precipitaciones máximas asociadas a períodos de retorno de 5 años, con funciones Gumbel, LogNormal y LogPearson III que presentaron mejor ajuste en la cuenca alta del río Cauca

La distribución espacial se realizó con el método geoestadístico spline, se emplearon las funciones de mejor ajuste para Tr de 5, 50 y 100 años. Se observa que para los tres períodos de retorno la mayor parte de la cuenca presenta precipitaciones mayores a 80 mm y a medida que va aumentado el Tr aumenta éste valor (ver figuras 10, 11 y 12). Es crítico para la zona sur del Valle del Cauca y norte del Cauca donde las precipitaciones superan los 230 mm. En el Tr de 50 se empieza a notar focos con precipitaciones mayores a 140 mm en la margen derecha del río Cauca y va teniendo mayor cobertura espacial en el Tr de 100 años.

En la distribución espacial no se notan precipitaciones máximas en zonas de reserva natural y de páramo, como los Farallones de Cali y el páramo de Las Hermosas que en estudios antecedentes a este, se han identificado como zonas de altas precipitaciones, que a su vez, hacen un gran aporte de aguas que modifica el caudal del río Cauca. Estos estudios se han realizado con lluvias diarias acumuladas en períodos de La Niña donde se ha generado la mayor afectación por inundaciones y deslizamientos ocasionados por avenidas torrenciales generados por la La Niña. Es importante considerar futuros estudios de AF que contemplen las lluvias maximas diarias acumuladas.

En el Anexo 10 se presentan el conjunto de la distribución espacial con Tr asociados a 5, 10, 20, 30, 50, 100 y 200 años.

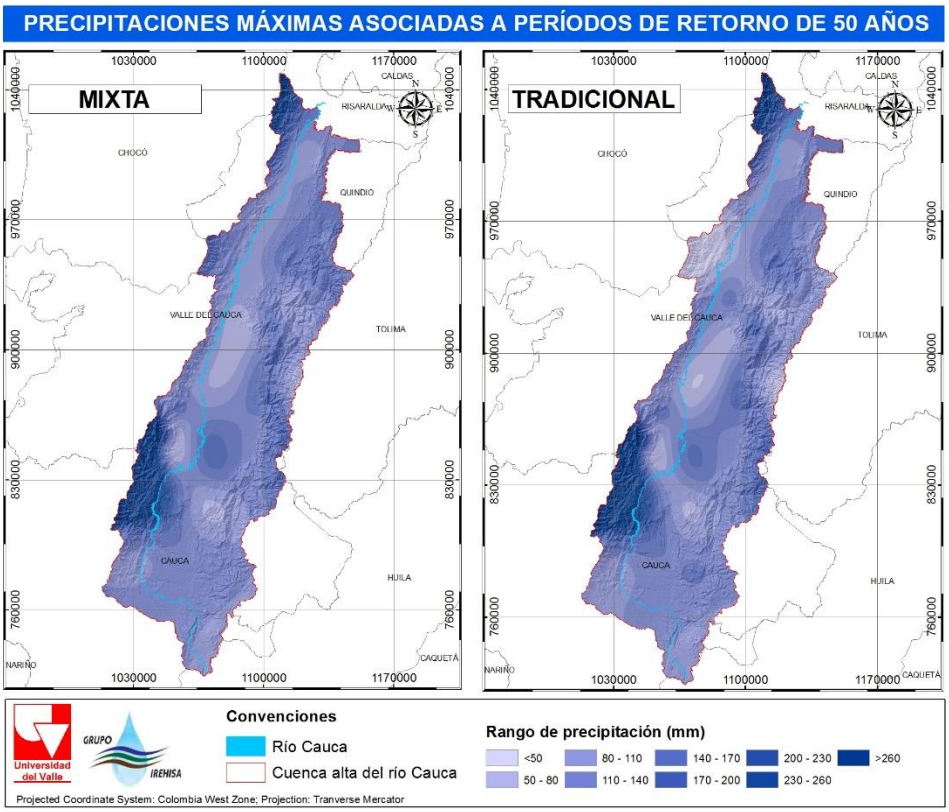


Figura 11. Distribución espacial de las precipitaciones máximas asociadas a períodos de retorno de 50 años, con funciones Gumbel, LogNormal y LogPearson III que presentaron mejor ajuste en la cuenca alta del río Cauca

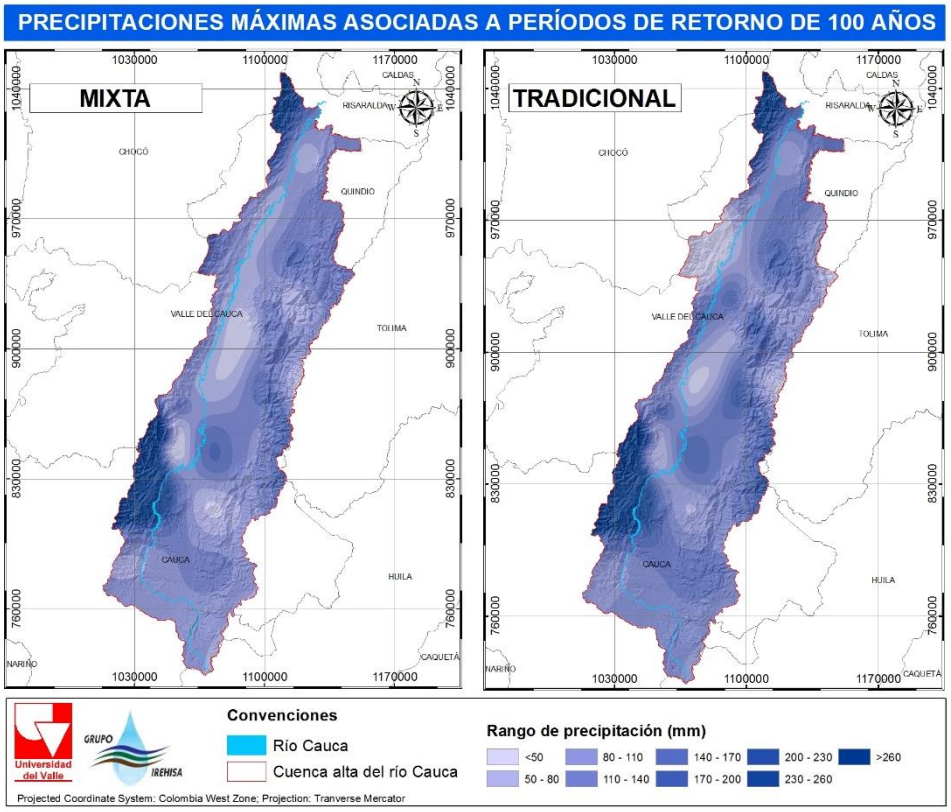


Figura 12. Distribución espacial de las precipitaciones máximas asociadas a períodos de retorno de 100 años, con funciones Gumbel, LogNormal y LogPearson III que presentaron mejor ajuste en la cuenca alta del río Cauca

7.3 IMPACTOS DE LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS DIARIAS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CAUCA

La información de inundaciones se tomó de periódicos locales, páginas web y los reportes registrados en la base de datos de DesInventar que es una herramienta conceptual y metodológica para la construcción de bases de datos de pérdidas, daños o efectos ocasionados por emergencias o desastres. Se presentaron 11 años con períodos La Niña y 36 años con períodos No Niña según años hidrológico en el período de registro estudiado.

Al comparar estos años con los reportes de prensa, noticias web entre otras del comportamiento histórico de las inundaciones y los afectados, encontramos una gran diferencia entre los años Niña y No Niña, como se puede observar en la tabla 13. En esta, se

registran la vulnerabilidad de la zona, y depende de las precipitaciones, del manejo y uso del suelo, el control y mantenimiento de alcantarillado, el plan de ordenamiento territorial, entre otras. Además geográficamente, se observa que las comunidades más vulnerables se encuentran asentadas en zonas de riesgo, en este caso, el corredor del río Cauca.

En los 11 años de La Niña se reportaron oficialmente 327.690 personas afectadas y en los 36 años de la No Niña 165.501 afectados, estos a causa de las inundaciones, deslizamientos, entre otros problemas ocasionados por las lluvias, que indican el aumento de las precipitaciones en períodos de La Niña como se puede observar en la gráfica 14, donde el porcentaje de afectados es de 66% en la Niña y de 34% en la No Niña. A pesar de que este fenómeno de La Niña ocurre con menor frecuencia, los impactos producidos por inundaciones y deslizamientos provocan mayores afectados, principalmente sobre las poblaciones asentadas en zonas aledañas al río Cauca.

Tabla 13. Años en los que se registran eventos críticos asociados a precipitaciones en años La Niña y No Niña, según año hidrológico

Año hidrológico	Niña		No Niña	
	No. Afectados	Evento	No. Afectados	Evento
1964-1965	4.500	Inundación		
1965-1966			1.500	Inundación
1966-1967	600	Inundación		
1968-1969			2.401	
1969-1970			1.200	Inundación
1970-1971	22.024	Deslizamientos e Inundaciones		
1974-1975			2.500	Inundación
1975-1976	33.040	Inundación		
1980-1981			4.200	Inundación
1981-1982			2.800	Inundación
1983-1984			20.000	Inundación
1984-1985	24.300	Inundación		
1985-1986			2.400	
1988-1989	11.408	Inundación		
1990-1991			4.000	Inundación
1991-1992			1.150	Inundación
1993-1994			900	Inundación
1995-1996			12.000	Inundación
1996-1997			5.220	Inundación
1997-1998			48.455	Inundación
1998-1999	44.155	Deslizamientos e Inundaciones		
1999-2000			5.494	Inundación
2000-2001	5.060	Inundación		

Año hidrológico	Niña		No Niña	
	No. Afectados	Evento	No. Afectados	Evento
2001-2002			27.400	Inundación
2002-2003			1.710	Inundación
2004-2005			950	Inundación
2005-2006			720	Inundación
2006-2007			2.215	Vendaval-Granizo
2007-2008	9.796	Inundación		
2008-2009			5.556	Inundación
2009-2010			12.730	Vendaval-Inundaciones
2010-2011	172.807	Deslizamientos e Inundaciones		
TOTAL	327.690		165.501	

Tomado de DesInventar (2014)



Gráfica 14. Porcentaje de afectados por las lluvias en los períodos Niña y No Niña

Estos resultados ponen en evidencia la incidencia de La Niña en las avenidas torrenciales generadoras de inundaciones y deslizamientos, que a su vez, son indicadores de la variabilidad climática presente en la cuenca alta del río Cauca. Las precipitaciones máximas estudiadas de La Niña no son las que ocasionan las principales afectaciones. Las lluvias acumuladas en estos períodos de La Niña son las que generan el impacto. Esto se da por porque al ser más frecuente las lluvias, saturan el espacio poroso del suelo e impiden la infiltración del agua, aumentando la escorrentía superficial. Esta dinámica no es ajena al cambio de uso del suelo y a la canalización de los ríos tributarios del río Cauca. Así mismo se da para las inundaciones presentadas en La No Niña. A estas dos series, se les realizó la prueba paramétrica de U Mann-Whitney con valor de p de 5%, arrojando como resultado similitud en las dos muestras en el valor de la media, es decir, no se presentó diferencia estadísticamente significativa. Esto pone en manifiesto que en los períodos de la Niña no necesariamente se presentan las lluvias máximas de la serie de tiempo pero en los períodos de La Niña las lluvias máximas presentan alta frecuencia y esto es lo que puede generar las cifras de afectados.



8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Objetivo 1

El comportamiento del régimen de precipitaciones en la zona de estudio es bimodal, característico de las cuencas andinas, con distribución normal en todas las alturas. Para el estudio de las lluvias máximas diarias, teniendo en cuenta la incidencia de El ENOS (La Niña y No Niña), se recomienda utilizar las 55 estaciones trabajadas en esta investigación, debido a la confiabilidad de los datos que arrojaron las pruebas realizadas en el AED. Se recomienda que a las 53 estaciones descartadas, hacerles control de calidad y homogenización a los datos, para obtener series más confiables y así tener toda la información posible para futuras investigaciones que puedan generar criterios de decisión por parte de las entidades pertinentes.

El 80% (44 estaciones) presentó comportamiento No Estacionario, lo que se representa en variaciones de los valores de la media y la varianza de la serie de precipitaciones máximas diaria. Esto se da por la incidencia de la VC en la zona de estudio, que altera el régimen de lluvias, ocasionando picos altos y bajos de manera discontinua en las precipitaciones. Este comportamiento estadísticamente se representa como una población (toda la serie de datos) con diferentes muestras (La Niña y No Niña). Para series de comportamiento No Estacionario, se recomienda realizar el AF con funciones mixtas, ya que estas contemplan la incidencia de varias muestras en una población de datos. Pero se debe tener en cuenta que la longitud de la serie debe ser representativa para que la dispersión de los datos no aumente y el error de ajuste sea menor.

Objetivo 2

La función tradicional de mejor ajuste fue LogPearson tipo III (62% de las estaciones), seguida de LogNormal (24% de las estaciones) y finalmente Gumbel (14% de las estaciones); para el caso de las funciones mixtas, la de mejor ajuste fue Gumbel (55% de las estaciones) y LogNormal (45% de las estaciones). Las serie de precipitaciones máximas diarias presentaron buena confiabilidad en Tr largos para la función tradicional LogPearson III; la serie también

se adaptó a los parámetros de la media y desviación estándar de los logaritmos de la función LogNormal con valores centrados en la media.

Se presentó diferencia entre las funciones de mejor ajuste tradicionales y mixtas en 4% de las estaciones para los valores de Tr estimados, donde la función tradicional LogPearson III tiende a ser más conservadora a partir de los 20 años que las funciones mixtas (LogNormal y Gumbel). Aunque los valores de las funciones mixtas reflejan la incidencia de la variabilidad climática, se recomienda emplear los resultados obtenidos con las funciones tradicionales LogPearson III que presentan menor error de ajuste; emplear funciones mixtas implica trabajar con muestras cortas que aumentan la dispersión de los datos y el error de ajuste. Se recomienda usar las funciones mixtas con longitudes de registro superiores a 30 años.

Se recomienda evaluar la serie dividiendo por los puntos donde cambió la varianza y la media, en lugar de dividir la serie en muestras de La Niña y No Niña porque la incidencia que tiene la longitud de los registros en los resultados.

Objetivo 3

En la cuenca alta del río Cauca, se han registrado la mayor cantidad de damnificados por inundaciones y deslizamientos de tierra generados por avenidas torrenciales en períodos de La Niña (327.690 afectados) en relación a La No Niña (165.501 afectados) en los años comprendido entre 1965 a 2011. Estos resultados muestran que en los períodos de la Niña no necesariamente se presentan las lluvias máximas de la serie, pero en los períodos de La Niña las lluvias máximas son más frecuentes y esto es lo que puede generar alteraciones a las condiciones normales de la cuenca como el aumento del nivel de los ríos, hectáreas inundadas y mayor número de afectados.



9. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Continuando con la investigación empezada con este trabajo de grado, se proponen las siguientes líneas futuras de estudio que pueden complementar los resultados obtenidos:

- Evaluar la hipótesis de estacionariedad con precipitaciones máximas acumuladas a diferentes temporalidades y para muestras de LA Niña, El Niño y años Normales.

- Estudiar las variaciones de la media y la varianza de las precipitaciones máximas diarias del comportamiento No Estacionario, agrupando muestras en picos altos y bajos.

- Analizar las lluvias máximas acumuladas y su relación con los períodos de La Niña.

- Hacer análisis de frecuencia para series de precipitaciones máximas acumuladas a diferentes temporalidades.



10. BIBLIOGRAFÍA

Agudelo, O., & Suárez, C. (2009, abril). Inundaciones en Colombia: un desastre que no es natural. [Versión electrónica] *UN Periódico*. Vol 121.

Álvarez, D. M., & Poveda, G. (2006, septiembre). Análisis de frecuencia de los caudales máximos diarios en ríos de Colombia considerando las fases del fenómeno ENSO. *XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología* (pp 184-193). Envigado.

Álvarez, D. M., & Poveda, G. (2012). El colapso de la hipótesis de estacionariedad por cambio y variabilidad climática: implicaciones para el diseño hidrológico en ingeniería. *Revista de Ingeniería*, Vol 36: pp 65-76.

Ávila, Á., Carvajal, Y., & Gutiérrez, S. (2014). Análisis de la Influencia de El Niño y La Niña en la Oferta Hídrica Mensual de la Cuenca del Río Cali. *Revista Tecnura*. Vol 18, No 41: pp 120-133.

Bedoya, M., Contreras, C., & Ruiz, F. (2010). Alteraciones del Régimen Hidrológico y de la Oferta Hídrica por Variabilidad y Cambio Climático. Capitúlo 7. Bogotá, D.C.: IDEAM, *Estudio Nacional del Agua*: pp 281-320.

Benavides, H. (2010). Evidencias del cambio climático en Colombia - análisis de tendencias de precipitación y temperatura para diferentes pisos térmicos. Colombia: IDEAM. ISBN: 978-958-8067-25-4. 45-50p.

Burton, I., Diringer, E., & Smith, J. (2006). Adaptation to climate change: international policy options. Estados Unidos: Pew Center on Global Climate Change.

Carvajal, E. Y.; Jiménez, H. y Materón, H. (1998a). Efectos ecológicos del ENSO en Colombia. (Coautor). IV Congreso Latinoamericano de Ecología, II Congreso Peruano de Ecología. 10 pp, 1998, Arequipa. Perú.

Carvajal, Y., Jiménez, H., & Materón, H. (1998b). Incidencia del Fenómeno ENSO en la Hidroclimatología del Valle del Río Cauca-Colombia. Revista de la Academia colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales, 743-751.

Carvajal, Y., Jiménez, H., Urrego, J. (2010) La información climatológica en la gestión integral del recurso hídrico en el occidente colombiano. Revista de investigaciones. Universidad Católica de Manizales.

Carvajal, Y. (2011a). Efectos de la Variabilidad Climática (vc) y el Cambio Climático (cc) en los Recursos Hídricos de Colombia. Entre Ciencia e Ingeniería, 33-61.

Carvajal, Y. (2011b). Inundaciones en Colombia. ¿Estamos preparados para enfrentar la variabilidad y el cambio climático? Revista Memorias, vol. 9, núm. 16 , 105-119.

Castro, L., & Carvajal, Y. (2010). Análisis de Tendencia y Homogeneidad de Series Climatológicas. Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, 15-25.

Castro, L., & Hoyos, C. (2004). Análisis de Frecuencia de Crecientes Con Diferentes Distribuciones De Probabilidad. Popayán: Trabajo de Grado, Universidad del Cauca.

Chow, V. T., Maidment, D., & Mays, L. (1994). Hidrológia Aplicada. Bogotá: McGraw Hill.

CIOH - Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas . (25 de Noviembre de 2014). Zona de Confluencia Intertropical. Obtenido de http://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/ClimatologiaCaribe3.php

Colombia Humanitaria. (2011). Colombia Humanitaria en el Valle del Cauca. Cali: Presidencia de la República.

Cramer, H., & Leadbetter, M. (1968). Stationary and Related Stochastic Processes: Sampling Function Properties and Their Applications. John Wiley & Sons. Inc , 120 - 122.

CVC. (2000). Caracterización del río Cauca tramo Salvajina – La Virginia. Volumen I. Proyecto de Modelación del río Cauca, Subdirección de Gestión Ambiental. Santiago de Cali: Universidad del Valle.

CVC. (2011a). Gobernación del Valle del Cauca. Retrieved Marzo 19, 2014, from Proyecto Piloto en la Zona Hidrográfica del Alto Cauca. Propuesta para Enfrentar el Cambio Climático. Construcción de un modelo conceptual para la restauración del corredor de conservación y uso sostenible del sistema río Cauca en su Valle alto: http://www.valledelcauca.gov.co/reconstruccion /publicaciones.php?id=17731

CVC. (2011b). La protección contra inundaciones en el Valle del Cauca Historia y nuevo paradigma. Cali: Gestión integral de inundaciones.

CVC, Universidad del Valle. (2007). El río Cauca en su Valle Alto. Santiago de Cali: Programa editorial Universidad del Valle.

DANE, IDEAM, IGAC. (2011). Reporte No. 4 de áreas afectadas por inundaciones 2010 - 2011. Bogotá.

DesInventar. (s.f.). DesInventar.org. Recuperado el 18 de Julio de 2014, de Sistema de inventario de efectos de desastres: http://www.desinventar.org/es/

El Colombiano. (22 de Marzo de 2012). El Colombiano. Recuperado el 22 de Septiembre de 2012, de http://www.elcolombiano.com/BancoConocimiento/E/el_turbio_panorama_del_agua/el_turbio_panorama_del_agua.asp

Escobar, L. A. (2008). Cambio Climático ¿Una caja de pandora? Medellín: Oficina Asesora de Comunicaciones.

Fattorelli, S., & Fernández, P. C. (2011). Diseño Hidrológico. Biblioteca Virtual de la WASA-GN.

Ganancias, F. (2009). Catedra de hidrología y procesos hidráulicos. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.

García, F. (2010). Modelación Hidrológica Estocástica: Desarrollo de un modelo de Generación Sintética de Series Temporales. Santa Cruz: Universidad Autónoma Gabriel René Morreno.

García, M., Piñeros, A., Bernal, F., & Ardila, E. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. Revista de Ingeniería , 36, 61-62

Gómez, I. (2012). Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Recuperado el 10 de Septiembre de 2012, de http://www.igac.gov.co/wps/portal/igac/raiz/iniciohome/AreasEstrategicas/!ut/p/c5/

González, M. (1992). Error cuadrárico medio de predicción para modelos estructurales de series temporales. Revista Estadistica Española Vol. 3 (129), 117-135.

Grupo IREHISA. (2014). Modelamiento hidrológico. Análisis del sistema de información y de la base de datos del SI monitoreo CVC. Santiago de Cali: Construcción del modelo conceptual para la restauración del corredor de conservación y uso sostenible del sistema río Cauca en su valle alto.

Guarín, G. & Ochoa, A. (2011). Impacto de la variabilidad climática en la producción de banano en el Urabá Antioqueño. Numeral 10: Índices macroclimáticos, precipitación y producción en Urabá. Tesis de Maestría en Ingeniería de Recursos Hídricos, Universidad Nacional de Colombia.

Gutiérrez, S., & Carvajal, Y. (2013). Análisis de la Influencia de el Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur en la Oferta Hídrica de la Cuenca Hidrográfica del Río Dagua, Valle del Cauca.

Haddad, B. (2005). Ranking the adaptive capacity of nations to climate change when socio-political goals are explicit. Global Environmental Change, 165-176.

Heredia, E. (1998). Una metodología de análisis regional de frecuencia de lluvias intensas adecuada para zonas bajo los efectos de "El Niño". Bulletin de l'Institut français d'études andines , 667 - 673.

Hidroeléctrica Ituango. (14 de Julio de 2012). Flickr. Obtenido de Cuenca hidrográfica del río Cauca: https://www.flickr.com/photos/mai_vera/7568626242/in/ photostream/

IDEAM. (2010). Estudio nacional del agua 2010. Bogotá DC: Instituto de Hidrología, Meterologia y Estudios Ambientales, 2010.

IDEAM. (2012). Posibles Efectos Naturales y Socioeconómicos del Fenómeno “El Niño” en el Periodo 2012-2013 en Colombia . Bogotá, D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IDEAM. (7 de Julio de 2013). Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales. Obtenido de http://institucional.ideam.gov.co/jsp/index.jsf

IPCC. (2002). Cambio Climatico y Biodiversidad. Unidad de Apoyo Técnico del Grupo de Trabajo II de IPCC.

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.

Khaliq, M. N., Ouarda, T. M., Ondo, J. C., Gachon, P., & Bobée, B. (2006). Frecuency analysis of a secuance of dependent and or non stationary hydro-meteorological. A review. Journay of Hydrology, 534–552.

Klein, A. M., Zwiers, F. W., & Zhang, X. (2009). Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. Canada: Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 72.

Ledesma, A. (2009). Introducción a la inferencia estadística estimación puntual. Cátedra Estadística, Facultad de Ingeniería.

Leon G, J. Zea, & J. Eslava. (2000): Circulación general del trópico y la Zona de Confluencia Intertropical en Colombia. Meteorol. 1:31-38. ISSN 0124-6984. Santa Fe de Bogotá, D.C. – Colombia.

Mahía, R. (1999). Revisión de los procedimientos de análisis de la estacionariedad de las series temporales.

Martínez, R., Zambrano, E., Vera, L., Briones, K., & Leila, Z. (2002). Índice Multivariado de El Niño en el Ecuador. Acta Oceanográfica del Pacífico , Vol 11, N-1.

Materón M., H., & Carvajal, Y. (1997). Curvas de Intensidad, Frecuencia y Duración de Lluvias para Cali: Actualización y Consideraciones. Ciencia y tecnología , 29-32.

Mauricio, J. A. (2007). Introducción al Análisis de Series Temporales. Madrid: universidad Complutense de Madrid.

Medel J, d. (2001). Análisis de Dos Métodos de Estimación para Sistemas Lineales Estacionarios e Invariantes en el tiempo con Perturbaciones Correlacionadas con el Estado Observable del tipo: Una Entrada una Salida. Computación y Sistemas, 2015-222.

Mesa, O. (2006). ¿A dónde va a caer este Globo? Acerca del futuro de la Tierra. Medellín.

Mesa, O., Poveda, G., & Carvajal, L. (1997). Introducción al Clima de Colombia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Misir, V., Arya, D. S., & Murumkar, A. R. (2013). Impact of ENSO on River Flows in Guyana. Water Resour Manage , 4611-4621.

NOAA. (2013). National Oceanic and Atmospheric Administration. Retrieved 12 01, 2013, from http://www.noaa.gov/

NOAA. (2014). *Equatorial Pacific Sea Surface Temperatures*. Obtenido de http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/sst.php

NOAA & TAO. (2011). EL NIÑO theme page. acces to distributed information on El Niño. [En línea] 11 de 2011. http://www.pmel.noaa.gov/tao/elnino/ nino_normal.html.

OCDE. (7 de Julio de 2013). OECD better policies for better lives. Obtenido de http://www.oecd.org/

OMM. (2011). Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas Vol. II. En Guía de prácticas hidrológicas. Ginebra.

Osso-La red, (2004), “Base de datos DesInventar Cali, 1950-2000”, disponible en: http://online.desinventar.org/omm, recuperado: 14 de febrero del 2011.

Pepió, M. (2001). Series Temporales. Universidad Politecnica de Cataluña. Barcelona: Ediciones UPC.

Pérez, M., Rojas, J., & Ordóñez, C. (2010). Desarrollo Sostenible, principios, aplicaciones y lineamientos de política para Colombia. Colombia: Artes Gráficas del Valle del Cauca.

Pinilla, M., & Pinzón, C. (2011). Influencia del Ciclo ENOS Sobre la Precipitación en los Municipios de Betulia, San Vicente de Chucurí, Zapatoca y Girón, Departamento de Santander, Colombia. Grupo técnico Convenio Fundación Natura Colombia - ISAGEN E.S.P , 581-592.

Piñeros, A., Bernal, F., García, M., & Ardila, E. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. Revista de ingeniería. Universidad de los Andes, 60-64.

Pizarro, R., Flores, J., Sangüesa, C., & Martínez, (2001). E. Leyes de distribución de procesos Hidrológicos. Sociedad estándares de ingeniería para aguas y suelos LTDA.

Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales , 201-222.

Poveda, G., & Álvarez, D. M. (2012). El colapso de la hipótesis de estacionariedad por el cambio y variabilidad climática:imlicaciones para el diseño hidrológico en ingeniería. Revista de ingeniería , págs. 65-72.

Poveda, G., & Mesa, O. (1997). Feedbacks between Hydrological Processes in Tropical South America and Large-Scale Ocean–Atmospheric Phenomena. American Meteorological Society. Journal of Climate , 2690-2702.

Poveda, G., Vélez, J., Mesa, O., Hoyos, C., Salazar, L., Mejía, J., y otros. (2002). Influencia de Fenómenos Macroclimáticos Sobre el Ciclo Anual de la Hidrología Colombiana: Cuantificación Lineal, No Lineal y Percentiles Probabilísticos. Meteorología Colombiana, 121-130. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. Colombia.

Puertas, O. L., & Carvajal, Y. (2008). Incidencia de El Niño-Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, utilizando el Climate Explorer. Ingeniería y Desarrollo, núm. 23 , 104-118.

Puertas, O., Carvajal, Y., & Quintero, M. (2011). Estudio de tendencias de la precipitación mensual en la cuenca alta-media del río Cauca, Colombia. Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal, 112-120.

Raynal, J., & García, L. (2005). Análisis de Caudales Máximos Anuales usando la Distribución GVE para tres Poblaciones. Información Tecnológica Vol. 16 N°4 , 69 - 75.

Raynal, J., & Raynal, M. (2004). Cálculo de los límites de confianza de la Distribución de Probabilidad de valores extremos tipo i para dos poblaciones. Información Tecnológica - Vol. 15 N° 1 , 87 - 94.

Sedano, K. (2012). Gestión Integrada del Riesgo de Inundaciones en Colombia. Trabajo de grado de Maestría. Valencia: Universidad Politécnica de Valéncia.

Sedano, K., Ávila, Á., & Carvajal, Y. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia. Revista Semillas, 47-53.

Sistema de Información Ambiental de Colombia. (21 de Noviembre de 2014). *Áreas afectadas por inundaciones 2010-2011*. Obtenido de Municipios susceptibles a procesos de inundación (2011): https://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=623&conID=915

Stedinger, J. R. (2012). Statistical Methods for Assesing Flood Risk and the Climate Challange. Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes, 48-53.

Tobón, C. (2008). Los Bosques Andinos y el Agua. Serie investigación y Sistematización N° 4. Programa Regional ECOBONA – INTERCOOPERATION, CONDESAN. Quito.

Vincent, K. (2007). Uncertainty in adaptive capacity and the importance of scale. Global Environ.

Waylen, P., & Caviedes, C. (1986). El Niño and anual floods on the north Peruvian littoral. Journal of Hydrology 89 , 141 - 156.

Waylen, P., & Caviedes, C. N. (1990). Annual and Seasonal Fluctuations of Precipitation and Streamflow in the Aconcagua River Basin, Chile. Journal of Hydrology , 79-101.

Waylen, P., & Poveda, G. (2002). El Niño-Southern Oscillation and aspects of western South Americam hydro-climatology. Hydrological Processes , 1247-1260.

Zeng, H., Feng, P., & Li, X. (2014). Reservoir Flood Rounting Considering the Non-Stationary of Food Series in North China. *Water Resour Manage*, 4273-4274.

Imágenes de portada

Diario vallevirtual. (13 de Mayo de 2013). La inundación en toda su magnitud. Obtenido de http://vallevirtual.wordpress.com/2010/11/26/la-inundacion-en-toda-su-agnitud/

Universidad del Valle. (13 de Mayo de 2013). Obtenido de http://www.univalle.edu.co/

Wikimedia. (20 de 05 de 2013). Valle del Cauca Topographic. Obtenido de http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Valle_del_Cauca_Topographic_2.pg

Imágenes de capítulos

ADN Cali. (Septiembre de 2012). Represa de Salvajina se seca, pero se espera llegada de lluvias. Obtenido de http://diarioadn.co/cali/mi-ciudad/represa-de-salvajina-se-seca-pero-se-espera-llegada-de-lluvias-1.24081

ATLAS, CVC. (22 de Octubre de 2014). *Preocupación para la actual temporada de lluvias en Colombia, reporte del tiempo IDEAM*. Obtenido de http://www.atlas.com.co /sia/public/index.php/seguridad-normas-y-justicia/precaucion-para-la-actual-temporada-de-lluvias-en-colombia-reporte-del-tiempo-ideam

CIAT. (03 de Abril de 2013). Decision and Policy Analysis Program – DAPA. Obtenido de Vulnerabilidad del sector agrícola frente al cambio climático en la Cuenca Alta del río Cauca: http://dapa.ciat.cgiar.org/vulnerabilidad-del-sector-agricola-frente-al-cambio-climatico-en-la-cuenca-alta-del-rio-cauca/

Confidencial Colombia. (23 de Septiembre de 2013). En Tiempo de lluvia: Alerta Naranja en el Valle del Cauca. Obtenido de http://confidencialcolombia.com/es /1/2016/9176/Alerta-Naranja-en-el-Valle-del-Cauca-Lluvias-Cali-temporada-Ideam-pa%C3%ADs-desastres-naturales.htm

CVC. (17 de Octubre de 2014). Boletín hidroclimático. Dirección Técnica Ambiental, Grupo de Sistemas de Información Ambiental, Red de Hidroclimatología. Obtenido de Estaciones Villamaría, La Primavera, El Caney: http://www.cvc.gov.co/boletin _hidroclimatico/mapa.htm

Flickr. (S. F.). Obtenido de Caña de Azúcar & Farallones de Cali: https://www.flickr.com/photos/caut/4965145585/in/photostream/

Fronterad revista digital. (12 de Diciembre de 2013). *Grandeza y miserias del río Magdalena. El desembarco de las multinacionales españolas en Colombia*. Obtenido de La embarcación de la empresa EPSA, filial de Gas Natural Fenosa, sobre la represa de la Salvajina, en el departamento del Cauca: http://www.fronterad.com/?q=grandeza-y-miserias-rio-magdalena-desembarco-multinacionales-espanolas-en-colombia&page=&pagina=2

Geoview.info. (28 de Febrero de 2010). *Río Cauca, Valle del Cauca*. Colombia. Obtenido de http://co.geoview.info/rio_cauca_valle_del_cauca_colombia,32693587p

Periodico El País. (11 de Marzo de 2011). El País.com. Obtenido de El río Cauca se encuentra con niveles cercanos a la inundación y desbordamiento:

http://www.elpais.com.co/elpais/cali/rio-cauca-encuentra-con-niveles-cercanos-inundacion-y-desbordamiento

RCN radio. (26 de Octubre de 2014). *Lluvias originan emergencias en Yumbo (Valle)*. Obtenido de http://www.rcnradio.com/noticias/lluvias-originan-emergencias-en-yumbo-valle-171149

Skyscraper City. (2 de Febrero de 2010). Obtenido de Parque natural ‘’Farallones de Cali’’, Así se ven los farallones desde la ciudad, en un dia despejado: http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?p=67008909.



11. ANEXOS

Los Anexos se encuentran en medio digital, en el CD adjunto en este documento, ordenados de la siguiente forma:

- ✓ ANEXO 1 - Información Básica
- ✓ ANEXO 2 - Base de datos
- ✓ ANEXO 3 - Análisis gráfico
- ✓ ANEXO 4 - Estadísticas Descriptivas
- ✓ ANEXO 5 - prueba de normalidad
- ✓ ANEXO 6 - Hipótesis de estacionariedad
- ✓ ANEXO 7 - Gráficas Estacionariedad
- ✓ ANEXO 8 - AF de las 55 estaciones
- ✓ ANEXO 9 - Estadísticos básicos de La Niña y No Niña de la precipitación máxima diaria
- ✓ ANEXO 10 – Distribución espacial de los períodos de retorno asociados a 5, 10, 20, 30, 50, 100 y 200 años