

REGIONALIZACIÓN DE DISTRIBUCIONES HIDROLÓGICAS DE CAUDALES
MÁXIMOS INSTANTÁNEOS EN COLOMBIA

JULIO ARMANDO RAMOS URZOLA
LUIS FERNADO JULIO AMIGO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL E INGENIERÍA AMBIENTAL
CARTAGENA

2012

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR
TRABAJO DE GRADO
INGENIERÍA CIVIL

REGIONALIZACIÓN DE DISTRIBUCIONES HIDROLÓGICAS DE CAUDALES
MÁXIMOS INSTANTÁNEOS EN COLOMBIA.

JULIO ARMANDO RAMOS URZOLA
LUIS FERNADO JULIO AMIGO

DIRECTOR
OSCAR E. CORONADO HERNANDEZ
Ingeniero Civil.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL E INGENIERÍA AMBIENTAL
CARTAGENA

2012

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR
TRABAJO DE GRADO
INGENIERÍA CIVIL

Cartagena de Indias D.T. y C. 2012

Señores

**COMITÉ DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS
FACULTAD DE CIENCIAS INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

Cartagena.

Cordial saludo.

Por medio de la presente estamos haciéndoles entrega del Informe Final del proyecto de grado titulado: **“REGIONALIZACIÓN DE DISTRIBUCIONES HIDROLÓGICAS DE CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS EN COLOMBIA.”**, como requisito reglamentario para optar al título de ingeniería civil.

Atentamente,

JULIO ARMANDO RAMOS URZOLA

Código: T00017614

CC. 1.069.463.994 Sahagún.

LUIS FERNANDO JULIO AMIGO

Código: T00017607

CC.1.047.377.553 Purísima.

Cartagena de Indias D.T. y C. 2012

Señores

**COMITÉ DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS
FACULTAD DE CIENCIAS INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

Cartagena.

Apreciados señores:

Reciban un cordial saludo. Por medio de la presente tiene fin informarles que la tesis de grado titulada **“REGIONALIZACIÓN DE DISTRIBUCIONES HIDROLÓGICAS DE CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS EN COLOMBIA.”**, a carga de los estudiantes Julio Armando Ramos Urzola y Luis Fernando Julio Amigo, ha sido revisada por mi persona.

Atentamente,

OSCAR E. CORONADO HERNADEZ

Directos del proyecto

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR
TRABAJO DE GRADO
INGENIERÍA CIVIL**

Modelo carta cesión de derechos patrimoniales

Cartagena de Indias, D.T.y C., 2012

Yo, JULIO ARMANDO RAMOS URZOLA, manifiesto en este documento mi voluntad de ceder a la Universidad Tecnológica de Bolívar los derechos patrimoniales, consagrados en el artículo 72 de la Ley 23 de 1982 sobre Derechos de Autor, del trabajo final denominado **“REGIONALIZACIÓN DE DISTRIBUCIONES HIDROLÓGICAS DE CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS EN COLOMBIA.”**, producto de mi actividad académica para optar el título de INGENIERÍA CIVIL de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

La Universidad Tecnológica de Bolívar, entidad académica sin ánimo de lucro, queda por lo tanto facultada para ejercer plenamente los derechos anteriormente cedidos en su actividad ordinaria de investigación, docencia y extensión. La cesión otorgada se ajusta a lo que establece la Ley 23 de 1982. Con todo, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la ley 23 de 1982. En consecuencia suscribo este documento que hace parte integral del trabajo antes mencionado y entrego al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

JULIO ARMANDO RAMOS URZOLA

Código: T00017614

CC. 1.069.463.994 Sahagún.

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR
TRABAJO DE GRADO
INGENIERÍA CIVIL**

Modelo carta cesión de derechos patrimoniales

Cartagena de Indias, D.T.y C., 2012

Yo, LUIS FERNANDO JULIO AMIGO, manifiesto en este documento mi voluntad de ceder a la Universidad Tecnológica de Bolívar los derechos patrimoniales, consagrados en el artículo 72 de la Ley 23 de 1982 sobre Derechos de Autor, del trabajo final denominado **“REGIONALIZACIÓN DE DISTRIBUCIONES HIDROLÓGICAS DE CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS EN COLOMBIA.”**, producto de mi actividad académica para optar el título de INGENIERÍA CIVIL de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

La Universidad Tecnológica de Bolívar, entidad académica sin ánimo de lucro, queda por lo tanto facultada para ejercer plenamente los derechos anteriormente cedidos en su actividad ordinaria de investigación, docencia y extensión. La cesión otorgada se ajusta a lo que establece la Ley 23 de 1982. Con todo, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la ley 23 de 1982. En consecuencia suscribo este documento que hace parte integral del trabajo antes mencionado y entrego al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

LUIS FERNANDO JULIO AMIGO

Código: T00017607

CC.1.047.377.553 Purísima.

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR
TRABAJO DE GRADO
INGENIERÍA CIVIL**

Nota de aceptación

Firma de presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Cartagena de Indias D.T. y C. 2012

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR
TRABAJO DE GRADO
INGENIERÍA CIVIL

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR
TRABAJO DE GRADO
INGENIERÍA CIVIL**

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darnos la fortaleza en los momentos difíciles.

A nuestras Familias, por el apoyo incondicional que nos dieron a lo largo de la Carrera.

Al Ingeniero Oscar Coronado por su asesoría y dirección en el trabajo de nuestra Investigación.

A los amigos que nos acompañaron y compartieron con nosotros en nuestra formación académica.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
1. PROBLEMÁTICA	17
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA	21
2. OBJETIVOS	22
2.1. OBJETIVO GENERAL	22
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	22
3. JUSTIFICACIÓN	23
4. MARCO REFERENCIAL	25
4.1. MARCO DE ANTECEDENTES	25
4.2. MARCO TEÓRICO.....	32
4.2.1. Distribuciones de probabilidad	32
4.2.1.1. La distribución GUMBEL	32
4.2.1.2. Distribución normal	34
4.2.1.3. Distribución Log Pearson	35
4.2.1.4. Distribución GEV	37
4.2.2. Métodos de bondad de ajuste	37
4.2.2.1. Bondad de ajuste por medio de la Chi Cuadrado.....	38
4.2.2.2. Bondad de ajuste según el método de máxima verosimilitud	39
4.3. HYDROLOGICAL FREQUENCY ANALYSIS (HYFRAN)	39
5. MARCO METODOLÓGICO	41
5.1. TIPO DE ESTUDIO	41
5.2. PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS RESULTADOS	41
5.2.1. Fase 1 - Obtención de la información.....	41
5.2.2. Fase 2 - Tratamiento de la información.....	44

5.2.1. Fase 3 - Estimación del ajuste global de las distribuciones de probabilidad.....	45
5.3 TIPO DE FUENTE.....	45
6. REGIONALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES.....	46
6.1. ESTACIONES DE CAUDALES MÁXIMOS UTILIZADAS	51
6.2. CONFIABILIDAD DEL NÚMERO DE ESTACIONES SELECCIONADAS....	52
6.3. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD.	53
6.4. SELECCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD	54
6.4.1. TEST CHI-CUADRADO	54
6.5. RENDIMIENTO HÍDRICO.....	56
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59
BIBLIOGRAFÍA	61

LISTA DE FORMULAS

Ecuación 1. Función de distribución de probabilidad general de valores extremos para máximos de Jenkinson y Nerc.	27
Ecuación 2. Función de Distribución de Probabilidad de Gumbel	33
Ecuación 3. Función de Distribución de Probabilidad Normal Estándar.....	35
Ecuación 4. Función de Distribución de Probabilidad Log Pearson	36
Ecuación 5. Función de Distribución de Probabilidad Log Pearson en forma logarítmica.....	36
Ecuación 6. Función de Distribución de Probabilidad GEV	37
Ecuación 7. Prueba de Bondad de Ajuste Chi Cuadrado	38
Ecuación 8. Porcentaje de confiabilidad.....	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de estaciones utilizadas	47
Figura 2. Estaciones utilizadas en Región Andina	48
Figura 3. Estaciones utilizadas en Región Orinoquia	49
Figura 4. Estaciones utilizadas en Región Amazonia.....	49
Figura 5. Estaciones utilizadas en Región Pacífica	50
Figura 6. Estaciones utilizadas en Región Caribe	50
Figura 7. Porcentaje de estaciones por región	51

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones analizadas.....	42
Tabla 2. Número de estaciones por región.....	51
Tabla 3. Aplicación de la Prueba Chi Cuadrado (X ²)	54
Tabla 4. Coeficiente de Correlación (R ²) todas las estaciones.....	56
Tabla 5. Coeficiente de Correlación (R ²) Región Andina.....	57
Tabla 6. Coeficiente de Correlación (R ²) Región Caribe	58

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Valores Máximos Mensuales de Caudales de las Estaciones Analizadas

Anexo B. Caudales Máximos y Parámetros de las Distribuciones de Probabilidad

Anexo C. Prueba De Bondad De Ajuste Chi Cuadrado (χ^2)

Anexo D. Rendimientos Hídricos asociados a diferentes Periodos de Retorno

Anexo E. Rendimientos Hídricos vs Áreas asociados a diferentes Periodos de Retorno

Anexo F. Rendimientos Hídricos Vs Áreas asociados a diferentes Periodos de Retorno (Región Andina)

Anexo G. Rendimientos Hídricos Vs Áreas asociados a diferentes Periodos de Retorno (Región Caribe)

INTRODUCCIÓN

El estudio hidrológico es el mecanismo a través del cual se realiza, de la mejor manera posible, una estimación confiable de los caudales máximos que circulan por un cauce natural. El objetivo básico de este estudio es lograr un entendimiento adecuado del comportamiento de la variable hidrológica de interés.

La regionalización de distribuciones hidrológicas de caudales máximos instantáneos en Colombia es la variable de interés de esta investigación y su análisis permite identificar la frecuencia periódica de caudales desatadores de crecidas extraordinarias en el país, útiles como base para elaborar curvas regionalizadas, envolventes y demás productos hidrológicos que contribuyan a resolver aspectos de la planificación, la prevención, la gestión de emergencias y la regulación de crecidas, con el fin de aminorar la vulnerabilidad de las regiones comúnmente devastadas por desastres de inundaciones.

Para lo anterior se determinarán los caudales máximos asociadas a diferentes períodos de retorno en estaciones hidrométricas localizadas en Colombia., además de regionalizar rendimientos de caudales máximos instantáneos asociados a diferentes períodos de retorno; se analizarán también las diferentes funciones de distribución de probabilidad utilizadas habitualmente en hidrología (Normal, Log-Pearson Tipo III, Pearson Tipo III, Gumbel, GEV u otras que en el estudio de los datos sean necesarias) y se identificarán la distribución que mejor represente la tendencia de los datos por cada región de Colombia.

1. PROBLEMÁTICA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia cuenta con la distinción de ser uno de los países del mundo con mayor riqueza hídrica. Seis tipos de aguas alojan su territorio; aguas lluvias, aguas superficiales, aguas subterráneas, aguas termominerales, aguas marinas, oceánicas y aguas de alimentación glacial, además de la valiosa riqueza que le otorga su ubicación geográfica bañada por dos océanos (Pacífico y Atlántico)¹.

De igual manera, por su ubicación geográfica y el estado natural de su terreno, cuenta anualmente con una precipitación cercana a 3000 mm en promedio, lo que representa un significativo y abundante balance hídrico, que al compararse con el nivel promedio de lluvias mundiales de 900 mm al año y con el de Sur América que solo llega a los 1600 mm al año, se constituye en uno de los países más lluviosos del mundo².

La abundancia de los recursos hídricos del país se evidencia en la extensa red superficial de aguas que le cubre, además por las muy favorables condiciones de almacenamiento de aguas subterráneas y la presencia de un gran número de cuerpos de agua lénticos (aguas estancadas como lagos y pantanos) y enormes extensiones de humedales.

Colombia es un país con condiciones montañosas en casi todas sus regiones, con presencia de extensas sabanas y selvas húmedas que históricamente han identificado su territorio, además cuenta con grandes reguladores y reservorios

¹ BARN, Álder. *Breviario de Colombia: Historia, Geografía, Cívica; Departamentos*. Panamericana editorial Ltda. Colombia, 1997.

² BANCO DE LA REPUBLICA. *Colombia a su alcance*. Editorial Planeta, Bogotá, Colombia, 1997.

hídricos, como lo son sus páramos, y a todo esto se le agrega su ubicación estratégica en la zona tropical que hacen de Colombia un país por condiciones naturales rodeada de aguas de todo tipo en casi toda su extensión territorial³.

Pero esta condición de abundantes recursos hídricos, presentes en todas sus regiones y la particularidad de sus cuantiosas zonas montañosas, territorios planos cercanos a las riveras y poblaciones asentadas con cercanía a los ríos, en asocio con la intensidad y frecuencia de las lluvias vividas en invierno, han venido representando para el país y su población en los últimos años, caóticas inundaciones en todo los departamentos.

Las zonas con más alto riesgo de inundaciones en Colombia resultan ser las regiones de los Llanos Orientales, por tratarse de un territorio mayoritariamente plano, y de igual forma, la región Caribe. También son zonas de alto riesgo, las regiones ubicadas en las riberas de los ríos como: La Dorada Caldas, Honda en el Tolima y Barranquilla en el Atlántico. La explicación más expresa al riesgo presentado en estos lugares se encuentra en la cobertura del río Magdalena el cual atraviesa, todo el territorio colombiano⁴.

Otro aspecto importante en relación con las condiciones climáticas e hidrológicas, posibles causas de las situaciones de riesgo en inundaciones, se encuentran en la costa pacífica, la cual presentan continuas lluvias torrenciales. El departamento del Chocó, por su parte, resulta ser el más afectado en el país por la problemática de los caudales que generan inundaciones, por su cercanía a la Costa del Pacífico y a la cordillera de los Andes, la cual forma una barrera que impide a las

³ *Ibíd.*, p. 106.

⁴ DIVISIÓN DE EDUCACIÓN DE ADULTOS EN CALDAS y Oficina para la Prevención y Atención de Desastres. *Zonas de Colombia con más riesgos de inundaciones* (folleto), [En línea] tomado de: www.crid.or.cr

nubes que se forman en el oceano Pacífico trasladarse hacia el interioro del país. Por eso, la zona del Pacífico es considerada la mas lluviosa de Colombia⁵.

Recientemente se han presentado inundaciones por el alto nivel de precipitaciones causadas por el fenómeno de la Niña, afectando a 412 municipios de 27 departamentos del país, causando inundaciones y deslizamientos con consecuencias lamentables sobre la población. Según reporte del Ministerio del Interior y Justicia en el norte y centro del país más 766.775 personas han sido afectadas por las lluvias⁶, perdiendo sus viviendas, cultivos, ganado y en muchos casos sus vidas.

Los departamentos de mayor afectación a causa de la temporada invernal son Bolívar, con cerca de 195 mil dignificados, Magdalena con 99 mil, Sucre con 98 mil, Córdoba con 76 mil, Antioquia con 38 mil, Cesar con 37 mil y Atlántico 27 mil. Las probabilidades de crecientes súbitas en ríos y quebradas del centro y norte de la región Andina así como anegamientos o inundaciones en áreas urbanas y deslizamientos de tierra en áreas inestables, han aumentado en los últimos años. De manera que en todo el territorio Colombiano, según diagnósticos se encuentra en un latente y constante riesgo de inundaciones que ya hace parte de las prioridades en la agenda de políticas nacionales⁷.

Las circunstancias de continuo riesgo de inundaciones provocadas por lluvias, desbordamiento de ríos y las consecuencias ya vividas al respecto, han sido la principal motivación para la realización de estudios de hidrología en el país, estudios para el conocimiento de la climatología en las regiones y estudios de

⁵ *Ibíd.*, p. 3

⁶ OCHA, Colombia. Colombia. *Temporada de Lluvias 2010 Fenómeno de La Niña, Informe de Situación #3*, 2010. [En línea] tomado de:
http://colombiassh.org/unete/IMG/pdf_Sitrep_No.3_temporada_de_lluvias.pdf

⁷ *Ibíd.*, p. 2

desarrollo de redes hidrometeorológicas. A diferencia de otros periodos en los que los estudios de este tipo regularmente se realizaban en proyectos para el desarrollo del sector hidroeléctrico y posteriormente en el sector de riego y drenaje⁸, no con propósitos generales para la mitigación y prevención de desastres naturales provocados por las inundaciones, sino con propósitos privados y empresariales.

Estudios que permitan conocer los registros históricos de caudales máximos y la distribución estadística que se ajuste a cada región permitirá identificar la frecuencia periódica de caudales desatadores de crecidas extraordinarias⁹. Por tanto pueden ser útiles como base para elaborar curvas regionalizadas, envolventes y demás productos hidrológicos que contribuyan a resolver aspectos de la planificación, la prevención, la gestión de emergencias y la regulación de crecidas, con el fin de aminorar la vulnerabilidad de las regiones comúnmente devastadas por desastres de inundaciones.

En Colombia los estudios hidrológicos de caudales máximos comúnmente se han realizado de manera local o puntual, y por lo tanto caen en la incertidumbre de cuál es la distribución hidrológica que aplica para una zona. Esto se da por falta de tiempo y/o presupuesto para su entrega. Por esta razón la realización de un proyecto que estudio los caudales máximos desde la perspectiva de su distribución regionalizada apunta hacia una estimación de la función de

⁸ CORREDOR, Rivera, Jorge L. *Análisis preliminar de precipitación máxima en Colombia*. Revista: Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 17 – 1, pp. 79 – 93, ISSN 0124 – 8170, Bogotá, Colombia, 2007.

⁹ OBANDO, Oscar F., ORDOÑEZ, Gálvez, Juan J. Análisis hidrológico de la crecida extraordinaria del Río Tumbes del 27 de febrero del 2006. Jornadas Internacionales sobre Gestión del Riesgo de Inundaciones y Deslizamientos de Laderas. Brasil. Mayo 2007.

probabilidad hidrológica que mejor se adapte a las condiciones climáticas de cada una de las regiones del país¹⁰.

De acuerdo con lo descrito en esta investigación se determinará, sobre las estaciones hidrométricas con registros de caudales máximos instantáneos distribuidas en Colombia, la distribución de probabilidad que mejor se adapte a las condiciones hidrológicas de las regiones del país siguiendo las siguientes distribuciones: Normal, Log-Pearson Tipo III, Pearson Tipo III, Gumbel, GEV u otras que en el estudio de los datos sean necesarias.

1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA

¿Cuál es la distribución hidrológica regionalizada de los caudales máximos instantáneos en Colombia?

¹⁰ Ibíd., p. 3 y 4.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar la regionalización de distribuciones hidrológicas de caudales máximos instantáneos en Colombia.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar los caudales máximos asociadas a diferentes períodos de retorno en estaciones hidrométricas localizadas en Colombia.
- Regionalizar rendimientos de caudales máximos instantáneos asociados a diferentes períodos de retorno.
- Aplicar técnicas estadísticas para asegurar la función de probabilidad que mejor se ajuste a la tendencia

3. JUSTIFICACIÓN

La ubicación geográfica, la variada topografía y el régimen climático que caracteriza al territorio colombiano le hacen poseer una de las mayores riquezas hídricas del mundo. Pese a esto, dicha oferta hídrica no está distribuida homogéneamente entre las diferentes regiones del país, además que está sometida a fuertes variaciones que determinan la disponibilidad del recurso hídrico; razones por la cual en el territorio continental colombiano se presentan desde zonas deficitarias de agua hasta aquellas con grandes excedentes que someten a importantes zonas del país a inundaciones periódicas y de duración considerable¹¹.

En los últimos años la problemática de inundaciones en Colombia se ha manifestado por todas sus regiones, especialmente en los municipios cercanos al río Magdalena, causando desastres y emergencias que inclusive aún no se alcanzan a superar. Por la magnitud de afectación a la población residente en estos municipios y por lo periódico de las inundaciones, tal situación se ha convertido en tema de interés primordial del Gobierno Nacional y de la comunidad de opinión pública, política y académica, despertándose iniciativas de investigación hidrológicas a fin de contribuir administrativa, técnica, política y científica mente a la solución de la problemática.

Por lo anterior, nace la iniciativa para realizar la presente investigación, que se propone realizar la regionalización de las distribuciones hidrológicas de caudales máximos en Colombia, utilizando información suministrada por el IDEAM y empleando las técnicas estadísticas aplicadas a la hidrología y la ingeniería civil.

¹¹ GARCIA, Marta, SANCHEZ, Félix, et al. El medio ambiente en Colombia. El agua, Cap. 4, p. 118. IDEAM, 2006

De esta manera, el estudio se considera pertinente, en tanto que estudia una problemática de la actualidad social, política y científica del país y porque contribuirá de manera significativa con diagnósticos válidos y aplicables y útiles para una planificación de control de riesgos de inundación.

Desde el punto de vista teórico se resalta el desarrollo del mismo por los aportes que genera, dadas las escasas referencias bibliográficas que existentes en la temática a nivel local. Así mismo, contribuye al área académica en tanto a que presenta conceptos teóricos y metodológicos que pueden servir de base empírica y analítica para la aplicación de proyectos e investigaciones posteriores, además de que puede ser utilizado para la formulación de políticas públicas.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. MARCO DE ANTECEDENTES

Con la finalidad de conocer las investigaciones realizadas en materia de regionalización de distribuciones hidrológicas y cálculo de caudales máximos, tanto a nivel internacional como nacional, de tal manera que sea posible recoger la suficiente información metodológica, conceptual, teórica y empírica de una problemática que si bien en el presente estudio se pretende abordar bajo una relación específica ha sido estudiado de distintas forma, en distintas zonas y bajo diferentes métodos, arrojando contribuciones que resultan valiosas para los investigadores.

Los artículos e investigaciones aquí referenciadas fueron consultados en las bases de datos para artículos indexados como; Redalyc, Dianlent y Scielo, artículos procedentes y publicados por revistas, Escuelas y Facultades de ingeniería de Universidades de Latinoamérica, Centro América. A continuación se esbozan a manera de síntesis los aportes más importantes y relacionados con la investigación en curso.

Carías, Juárez Boris E., Chacón, Novoa Egly T. y Martínez, Márquez Miguel A, realizan un estudio denominado: **Validación de metodologías para el cálculo de caudales máximos en el Salvador**¹², cuyo objetivo principal fue validar metodologías de estimación de caudales máximos en las regiones hidrográficas siguientes: Paz, Cara Sucia-San Pedro, Grande-Sonsonate, Mandinga -

¹² CARÍAS, Juárez Boris E., CHACÓN, Novoa Egly T. y MARTÍNEZ, Márquez Miguel A. *Validación de metodologías para el cálculo de caudales máximos en el Salvador*. Trabajo de graduación preparado para la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, para optar al grado de ingeniero civil, Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”, San Salvador, El Salvador, 2004.

Comalapa, Jiboa, Bahía de Jiquilisco, Río Grande de San Miguel, Sirama y Goascorán. Con esa intención se aplicaron las siguientes metodologías hidrometeorológicas y estadísticas para cada una de las cuencas:

La Metodología para el cálculo de caudales máximos de esta investigación sigue el orden de: Un cálculo de caudales máximos por el método de la fórmula racional, un cálculo de caudales máximos por el método del hidrograma sintético de Snyder, un cálculo de caudales máximos por el método del hidrograma sintético triangular, SCS e hidrograma unitario complejo, la aplicación de la metodología estadística regional y metodologías de la estadística puntual.

Luego de la aplicación de las anteriores metodologías se obtuvieron resultados que condujeron a las siguientes conclusiones: los resultados de tiempos de concentración obtenidos con cada una de las metodologías estuvieron entre el rango de 1 – 3 m/s, el cual está dentro de los rangos previamente establecidos para las regiones estudiadas, la fórmula de Kirpich se consideró la más precisa ya que siempre se mantuvo dentro de los rangos previamente establecidos de velocidad de concentración, más o menos desviación estándar..

Reyes, Rodríguez Toribio M., desarrollan un artículo titulado: **Regionalización de los caudales máximos instantáneos anuales de la cuenca del río Santa**¹³, en él se proponen generar las ecuaciones regionalizadas para los caudales máximos instantáneos de la cuenca del río usando la información de las estaciones hidrométricas de: Recreta, Pachacoto, Querococha, Olleros, Quillcay, Chancos, Llanganuco, Parón, Colcas, La Balsa, Cedros, Quitaracsa, Chuquicara y Condorcerro. La metodología empleada consistió en la recopilación de los

¹³ REYES, Rodríguez, Toribio M. *Regionalización de los caudales máximos instantáneos anuales de la cuenca del río Santa*. Rev. Aporte Santiaguino 2009; 2(2): 223-231. ISSN 2070-836X, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz – Perú.

registros hidrométricos de las estaciones, su complementación en el caso de estar incompletas empleando técnicas de regresión lineal o múltiple y finalmente la realización del análisis probabilístico con el software SMADA6.0 y EVIEW6.0.

Entre los resultados más destacados se encontró que los caudales máximos instantáneos anuales de las cuencas del río Santa son consistentes homogéneas, independientes del tiempo, sin tendencia y de ciclicidades anuales y múltiplos de 4 - 5 años. A demás se obtuvieron ecuaciones regionalizadas de tipos exponenciales y logarítmicos.

Raynal, J. A., y García, L. G. en un artículo denominado **Análisis de caudales máximos anuales usando la distribución GEV para tres poblaciones**¹⁴ del departamento de Ingeniería civil de la Universidad de Américas, Puebla – México, se trazan como objetivo diseñan un procedimiento para estimar la función de distribución de probabilidad de valores extremos presentada para su aplicación en el análisis de frecuencias de caudales máximos anuales. Para esto toman como metodología de cálculo el método de máxima verosimilitud y la función de distribución de probabilidad general de valores extremos para máximos de Jenkinson, 1969 y Nerc, 1975, dada por:

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[1 - \frac{(x - x_0)}{\alpha} \right]^{\beta} \right\}$$

Ecuación 1. Función de distribución de probabilidad general de valores extremos para máximos de Jenkinson y Nerc.

¹⁴ RAYNAL, J. A., y GARCÍA, L. G. *Análisis de caudales máximos anuales usando la distribución GVE para tres poblaciones*. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de las Américas, Puebla – México, Revista: Información Tecnológica-Vol. 16 N°4-2005, págs.: 69-75

De los resultados obtenidos en la estimación, el documento concluye que utilizando estimadores de parámetros de distribución general de valores máximos para tres poblaciones con el método de máxima verosimilitud se obtiene mejores resultados que considerando que la muestra viene de una sola población, teniendo en cuenta esto los autores consideran que dicha metodología es una buena opción para el cálculo de caudales máximos anuales en sitios donde puede considerarse la existencia de tres tipos diferentes de mecanismos productores de lluvia.

Corredor, Rivera, Jorge L., en un documento titulado **Análisis preliminar de precipitación máxima en Colombia**¹⁵, refleja un análisis para lluvias máximas en 24 horas con información suministrada por el IDEAM. La metodología utilizada para la investigación consistió en la aplicación de la teoría de los valores extremos Gumbel tipo III, a través del empleo de los factores de frecuencia para 518 estaciones con registros de tipo pluvial.

Los resultados obtenidos en este estudio, permitieron concluir a los autores, entre otros aspectos que: la mayor frecuencia e información sobre precipitaciones en 24 horas en Colombia se encuentra concentrada en sitios con particularidades especiales como: los desarrollos hidroeléctricos, proyectos de riego, aeropuertos y proyectos de drenaje. Otro importante aspecto identificado tiene que ver con la escasa densidad de estaciones en La Orinoquia y El Amazonas, debido a su baja población y a su cobertura vegetal.

Arbeláez, A, Ana C., Vélez, O., María V. **Diseño hidrológico con información escasa un caso de estudio: Río San Carlos**¹⁶. Este trabajo se propone estimar

¹⁵ CORREDOR, Op. cit., pp. 86 - 88

¹⁶ ARBELÁEZ, A, Ana C., VÉLEZ, O., María V. *Diseño hidrológico con información escasa un caso de estudio: Río San Carlos*. Avances en recursos hidráulicos, Numero 4 septiembre de 1997. ISSN

los caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno, que sean necesarios para estudios de control de inundaciones, diseños de estructuras hidráulicas, entre otros aspectos. Con tal fin los autores se basaron en el análisis de frecuencia y los modelos de lluvia escurrentía, aplicando Hidrógrafas unitarias calibradas para la cuenca (Mínimos cuadrados, Nash, Zoch) e Hidrógrafas unitarias sintéticas (Snyder, Soil Conservation Service y William y Hanns). De igual forma se les hizo necesario el uso de Metodologías con información escasa como Regionalización, el Grádex y el Índice de crecientes.

Entre los resultados obtenidos en la investigación se tiene que: Los valores más altos del caudal pico se logran con los hidrogramas unitarios sintéticos de Snyder, William - Hanns y SCS. Teniendo en cuenta que los resultado obtenidos son comparables, al coincidir también con mayores valores en el hidrograma unitario de Snyder. Por su parte, la regionalización genera los menores valores de caudal y los datos más dispersos en relación con los obtenidos con los otros métodos.

Mesa, Sánchez, Oscar J., Vélez, Upegui Jaime I., Giraldo Osorio, Juan D y Quevedo, Tejada, Diana I. en el artículo: **Regionalización de características medias de la cuenca con aplicación en la estimación de caudales máximos**¹⁷ plantean la regionalización de las características medias de la cuenca infiriendo la respuesta hidrológica de la cuenca partiendo de sus características geomorfológicas. Entre los aspectos metodológicos de este trabajo, fueron utilizadas las distribuciones de probabilidad Log – Normal y Gumbel para la estimación de los caudales máximos instantáneos asociados a diferentes periodos

0121 – 5701. Programa de posgrado en aprovechamiento de recursos hidráulicos Facultad de minas Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín.

¹⁷ MESA, Sánchez, Oscar J, VÉLEZ, Upegui, Jaime I., et al. *Regionalización de Características Medias de la Cuenca con Aplicación en la Estimación de Caudales Máximos*. Memorias XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica IAHR, La Habana, Memorias XV Seminario Nacional de Hidráulica E Hidrología, Medellín, 2002.

de retorno, previa definición de las regiones que pueden tener comportamiento hidrológico similar, definición que se logra relacionado las características geomorfológicas y climáticas medias de los caudales máximos instantáneos.

Entre los resultados más destacados de esta investigación, se pudo constatar que el área de drenaje no es suficiente para describir las características de las cuencas existentes en Colombia, por la amplia diversidad de climas y los cambios registrados normalmente en las cuencas grandes, como las del río Magdalena, lo que hace poco útil el uso de parámetros climáticos para identificar las características medias de los caudales máximos en Colombia. Sin embargo una división en subregiones permitió mayor detalle en la información requerida para la aplicación de la metodología, por lo que se logró una mejor estimación dado a que se cumplieron los supuestos de de homogeneidad hidrológica dentro de las subregiones.

Erazo, Chica, Adriana M. **Estudio de regionalización de caudales máximos Valle del Cauca - Colombia**¹⁸, propone como objetivo la regionalización de caudales máximos en el Valle del Cauca a partir del método de índice de avenida con la hipótesis de estación – año y en ese orden de ideas fue recogida, completada y analizada la información de los registros de caudales máximos mensuales y anuales y su ubicación, así como la información de suelos, geología, vegetación, precipitación y características fisiográficas de las cuencas hidrográficas del Departamento del Valle del Cauca.

El análisis de los datos permitió establecer que la distribución Gumbel presenta el mejor ajuste a los datos de la población hidrológica estudiada a diferencia de la

¹⁸ ERAZO, Chica, Adriana M. *Estudio de regionalización de caudales máximos Valle del Cauca – Colombia*. Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia, 1999.

distribución Log - Normal III y Log – Pearson III. De igual forma se pudo establecer una curva de frecuencia adimensional de caudales máximos para cada región y diferentes períodos de retorno.

Vélez, O., María V., Quintero, G., Wilson y Delgado, J., Juan P. **Implementación del modelo MG para Antioquia y el Eje Cafetero**¹⁹, bajo la aplicación del modelo paramétrico MG, para cálculo de caudales máximos asociados a periodos de retornos altos, a partir de la media de los datos históricos y el coeficiente de variación de los caudales máximos instantáneos se estima una ecuación que relaciona estas dos variables, y luego de una aproximación a la distribución de probabilidades de Yen, se llega a la ecuación analítica del modelo MG que permite el cálculo de los caudales máximos. Para la calibración del modelo en la zona de estudio fueron utilizadas 110 estaciones localizadas entre los departamentos de Antioquia, Risaralda y Caldas.

Los resultados obtenidos por los autores en esta investigación arrojan valores para los parámetros ajustados en el modelo MG calibrado para Antioquia y Risaralda, superiores a los obtenidos en el ajuste realizado en la aplicación original del modelo en Italia.

Los caudales calculados por el método MG son comparables con los logrados en la distribución Gumbel, Log – Normal y Método racional, pero los estimados con los métodos de hidrógrafas unitarias sintéticas siempre están por encima de los obtenidos con los métodos antes mencionados (MG, Gumbel, Log – Normal y método racional).

¹⁹ VÉLEZ, O., María V., QUINTERO, G., Wilson, DELGADO, J., Juan P. *Implementación del modelo MG para Antioquia y el Eje Cafetero*. Avances en recursos hidráulicos, Numero 14, Octubre de 2006 – Medellín - ISSN 0121 - 5701

4.2. MARCO TEÓRICO

El presente apartado tiene la finalidad de referenciar sintéticamente algunas teorías concernientes a distribuciones estadísticas de valores máximos, con la finalidad de conocer la forma científica en que pueden regionalizarse los caudales máximos, a partir de la aplicación metodológica de dichas teorías que serán estudiadas a continuación. La primera de ellas hace alusión a la distribución de Gumbel, o distribución extrema tipo I, desde una concepción conceptual y analítica, considerando los aspectos de relevancia que tiene consigo su utilización. Así mismo se referencia la teoría de Pearson y de las curvas de intensidad, todas con la finalidad de poder orientar al lector sobre los aspectos claves de la investigación ya mencionados.

4.2.1. Distribuciones de probabilidad

4.2.1.1. La distribución GUMBEL

La distribución Gumbel o extrema tipo I se usa generalmente en aplicaciones de las ciencias hidrológicas para determinar la probabilidad del comportamiento de crecientes, sequías y caudales en sus valores extremos o máximos considerando diferentes momentos en el tiempo²⁰. Esta distribución es mayormente usada en estudios de ingeniería marítima y en todas aquellas ciencias cuyas aplicaciones puedan estar sometidas a condiciones climatológicas extremas. Con ella se busca evaluar la probabilidad de que una determinada serie de valores arroje nuevos máximos considerando condiciones iniciales que son la base de aplicación metodológica de este tipo de distribuciones probabilísticas.

²⁰ FRANQUET, J. *El caudal mínimo medioambiental del tramo inferior del río Ebro*. España: UNED-Tortosa. C/ Cervantes, 2009.

Esta distribución de probabilidad fue desarrollada por Emil Julius Gumbel en 1891 y se encuentra representada por la siguiente fórmula:

$$p = e^{-e^{-y}}$$

Ecuación 2. Función de Distribución de Probabilidad de Gumbel

Donde se observa claramente que se trata de una distribución en la que **p** denota la probabilidad de obtener un valor máximo a los registrados previamente y considerar esta probabilidad como una forma de proporcionar estándares de medición para los posibles valores futuros de una serie de valores cualquiera²¹. Se puede observar que **y** hace referencia a una variable intermedia y que **e** representa el valor de Euler ($e = 2.71828284$). Las principales características de la distribución de Gumbel son:

- Su forma de distribución es sesgada a la izquierda, lo que indica por tanto que el valor de su moda es inferior al valor de su mediana, el cual a su vez es inferior al valor de media. Desde otra perspectiva, la forma de sesgadura a la izquierda representa que los valores se concentran mayormente a la izquierda y la cola es más larga a la derecha.
- Ya que se encuentra basada en un número de observaciones ya establecidas, el cálculo de la probabilidad de Gumbel muestra la probabilidad acumulada de un suceso considerando todo el modo de la distribución.

²¹ Mansen, A. (2010). *Diseño de Bocatomas*. Universidad Nacional de Ingeniería. Departamento Académico de Hidráulica e Hidrología.

- El valor que se calcule de p , puede ser sustraído de la unidad y determinar su inversa, osea la probabilidad de ocurrencia del suceso contrario o la probabilidad de obtención de un valor no extremo.

Una vez obtenida la función Gumbel y determinada la variable intermedia, se puede graficar en un plano para observar la forma en que se distribuye la variable a medida que transcurre el ciclo de observaciones. La distribución Gumbel considera además una medida de ajuste global, la cual permitirá observar su significancia y su validez. Las medidas de ajuste global serán analizadas posteriormente.

4.2.1.2. Distribución normal

Esta distribución de probabilidad estadística fue por primera vez reconocida por Abraham de Moivre en 1667 y determinada básicamente por la forma de la campana de Gauss²². Esta distribución, a diferencia de muchas otras, está completamente determinada por dos parámetros, los cuales son la moda y la desviación estándar de una serie determinada de datos. Es considerada como una de las más importantes distribuciones de probabilidad dada su aplicabilidad en infinidad de áreas del saber.

Muy a pesar de ello, la práctica ha mostrado que en la realidad no existe una sola distribución normal sino que por el contrario existen toda una familia de distribuciones normales que están siempre siendo determinadas por su valor medio y su desviación estándar en cada caso. Para ese problema se especificó y se dio a conocer la Distribución Normal Estándar “de forma que todas las

²² Pértegas, S. (2001). *La distribución normal*. La Coruña: Unidad de Epidemiología Clínica y Bioestadística. Complejo Hospitalario Juan Canalejo.

distribuciones normales pueden convertirse a la estándar, restando la media de cada observación y dividiendo por la desviación estándar²³. Para ello, se determinó el cálculo de un valor estadístico conocido como Z, el cual es el que realiza el ajuste de la distribución normal real a una distribución normal estándar considerando:

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

Ecuación 3. Función de Distribución de Probabilidad Normal Estándar.

Donde se puede observar que el valor de Z determina la distancia entre los valores observados de la variable menos su valor medio dividido por la desviación estándar existente entre estos. Así mismo, la distribución normal debe ser probada para determinar su bondad de ajuste y así poder comprobar la veracidad y validez de la distribución. Entre las más conocidas y aplicables a la distribución normal, se encuentran la prueba de Kolmogorov Smirnov y la de Chi cuadrado de Pearson.

4.2.1.3. Distribución Log Pearson

La distribución de Log Pearson o distribución Gamma también hace parte de la familia de distribuciones de probabilidad para valores continuos y es utilizada mayormente en aplicaciones de tipo hidrológicas propiamente en el contexto de la regionalización de funciones con valores máximos²⁴.

Es una distribución que sirve básicamente para determinar modelos que pretendan evaluar el comportamiento de variables con características continuas y

²³ ÁNGEL, J., SEDANO, M., & Vila, A. (s.f.). *La distribución normal*. Cataluña: Universitat Oberta de Catalunya.

²⁴ Sáez, A. (2009). *Modelización estocástica de precipitaciones máximas para el cálculo de eventos extremos a partir de los periodos de retorno mediante R*. Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Universidad de Jaén.

que tengan una asimetría de tipo positiva, es decir, que muestren una mayor consistencia de sucesos a la izquierda de la media que a la derecha²⁵. Es considerada una modificación más general del modelo Exponencial debido a que, en algunos casos, se usa para considerar modelos de comportamiento de variables que oscilan en el tiempo hasta que se evidencia un número n veces de un determinado evento.

Es una distribución que se aplica al logaritmo de los datos y obtiene la siguiente expresión funcional:

$$p(x) = p_0 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^c e^{-cx/2} dx$$

Ecuación 4. Función de Distribución de Probabilidad Log Pearson

Aunque debido a la complejidad para determinación de los parámetros P_0 , a y c , existe una forma alternativa de poder estimarla, la cual parte de la fórmula de Chow empleada en forma logarítmica, así²⁶:

$$\log x = \bar{x}_{\log} + k \sigma_{\log}$$

Ecuación 5. Función de Distribución de Probabilidad Log Pearson en forma logarítmica

Está claro en la función anterior que los coeficientes representan por un lado el valor medio y por el otro la desviación estándar de los datos una vez convertidos a series logarítmicas. Por su parte k representa una función que identifica el tiempo de retorno así como el coeficiente de asimetría de los datos, los cuales pueden obtenerse a través de las tablas.

²⁵ DEVORE, J. *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. 6ª Ed. Thomson, 2005.

²⁶ Maggio, G. (s.f.). *Análisis estadístico de valores extremos. Aplicaciones en hidrología*. Buenos Aires: Noldor. S.R.L.

4.2.1.4. Distribución GEV

La distribución de probabilidad GEV o distribución generalizada de valores extremos nace con la intención de poder aproximarse a los valores máximos de una variable determinada dado su periodo o tiempo de retorno y considerando variabilidad en la serie de datos disponibles. Para ello engloba tres diferentes tipos de distribuciones: la Gumbel, la Fretchet y la Weibull ²⁷.

Esta distribución se obtiene por medio de la siguiente expresión:

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[j \frac{k \cdot (x - u)}{\alpha} \right]^{1/k} \right\}, k \neq 0$$

Ecuación 6. Función de Distribución de Probabilidad GEV

Donde μ , α y k son los parámetros de la distribución. El unir las tres distribuciones de valores extremos en una sola, genera una implicancia de simplificación en las implementaciones estadísticas; además de ello, esta unificación permite que los datos usados determinen cuál de todos es el “modelo más apropiado para el comportamiento de la cola de la distribución y así no hay necesidad de introducir en la inferencia incertidumbre debido a la escogencia del modelo más adecuado”²⁸.

4.2.2. Métodos de bondad de ajuste

Los métodos de bondad de ajuste son desarrollados específicamente para poder probar la validez y consistencia de las distribuciones de probabilidad. Son utilizados en forma comparativa para poder determinar cuál de todas las

²⁷ ABAURREA, J. *Fenómenos extremos: análisis y caracterización*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza. Departamento de Métodos estadísticos, 2007

²⁸ HERNÁNDEZ, A. (2005). *Distribución límite de los extremos del modelo t-student truncado para datos de lluvia diaria*. Universidad Simon Bolívar. Decanato de estudios de postgrado

distribuciones de probabilidad utilizadas para evaluar un fenómeno en específico se ajusta mejor a lo que se desea explicar.

4.2.2.1. Bondad de ajuste por medio de la Chi Cuadrado

Esta prueba se basa en comparar los valores o frecuencias observadas con el valor esperado de las frecuencias que habría en un determinado fenómeno. En este sentido, Las diferencias entre lo observado y lo esperado dan las discrepancias entre la teoría y la realidad. En caso de no existir diferencias, ello sin duda indicará que la realidad coincide perfectamente con lo que habría de esperarse del fenómeno que se analiza²⁹. Este estadístico de bondad de ajuste se calcula de la siguiente manera:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

Ecuación 7. Prueba de Bondad de Ajuste Chi Cuadrado

Dónde:

O = valor o frecuencia observada en la muestra

E = Valor esperado considerando según la distribución teórica

Hay que hacer notar al lector que el valor de χ^2 que se obtenga tiene que ser comparado con el valor de chi cuadrado que se encuentra en las tablas de distribución de frecuencia para comprobar si se acepta o no la hipótesis de que la variable o serie en cuestión, tiene una distribución con los parámetros requeridos.

²⁹ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. (2008). *Prueba Chi cuadrado o Bondad de Ajuste. Dirección Nacional de Servicios Académicos Virtuales.*

4.2.2.2. Bondad de ajuste según el método de máxima verosimilitud

Este método consiste en la estimación de un parámetro del que se supone debe converger en el tiempo al valor real que explicaría un fenómeno en específico bajo el supuesto de que entre más se aproxime es porque es más consistente³⁰. La estimación por éste método permite calcular coeficientes que tienen máxima verosimilitud de reproducir la matriz de correlaciones observada, considerando que los valores a obtener sean más probables de obtener que los considerados en la muestra aleatoria considerada como punto de partida.

Este método es utilizado en los modelos probit y logit (modelos probabilísticos) y considera propiedades en los que las que los estimadores obtenidos resultan ser en últimas eficientes, consistentes e insesgados.

Este método es considerado uno de los más utilizados para lograr el ajuste de un modelo específico dada las condiciones mínimas que garantizan los estimadores que de él se obtienen.

4.3. HYDROLOGICAL FREQUENCY ANALYSIS (HYFRAN)

Es un software que nos permite ajustar datos a través de métodos estadísticos incluyendo un juego de instrumentos matemáticos, poderosos, accesibles y flexibles que permiten en particular el análisis estadístico de eventos extremos y de manera más general el análisis estadístico de serie de datos.

HYFRAN ha sido desarrollado al Instituto Nacional de Investigación Científica –

³⁰ GÓMEZ, J. *Método de máxima verosimilitud*. TAE. Curso de estadística, 2005

Agua, Tierra y Medioambiente (INRS-ETE) de la Universidad de Québec con el patrocinio de Hydro-Québec (el principal productor de energía hidroeléctrica del mundo) y del Consejo de investigación en las ciencias naturales y en ingeniería de Canadá (CRSNG).

Inicialmente, concebido para el análisis de frecuencia de eventos extremos, HYFRAN puede ser usado para todo estudio que requiere el ajuste de una distribución estadística de una serie de datos independientes e idénticamente distribuidas, y esto, en áreas profesionales tan variadas como ingeniería, medioambiente, meteorología, medicina, etc.³¹ Las funciones que se pueden manejar con este programa se mencionan a continuación:

- Comprobación de hipótesis estadísticas.
- Independencia de datos de series.
- La homogeneidad de las series de datos (paso de series de tiempo, las hipótesis estadísticas, efecto estacional).
- La detección de las tendencias.
- La detección de valores atípicos.

³¹ CASTILLO, I. Hydrological Frequency Analysis (HYFRAN). Recuperado el 30 de enero de 2008. Disponible en internet: <<http://aguaingenieria.blogspot.com/2008/01/hydrological-frequency-analysis.html>>.

5. MARCO METODOLÓGICO

5.1. TIPO DE ESTUDIO

El desarrollo analítico de la presente investigación está enmarcada en un tipo de estudio de corte descriptivo – experimental. En una primera parte, se considera descriptivo puesto a que se extraerán aspectos básicos y característicos de la determinación de los caudales máximos, a partir de la identificación y análisis de variables consignadas en las fuentes de información que se utilizarán³². Además de ello, dado a lo que se pretende es no solo realizar un estudio de observación sino también intervenir de manera racional a partir de la determinación de caudales y la forma en que éstos se regionalizan, con la intención de poder realizar análisis prospectivos que promuevan el mejoramiento de las condiciones hidrológicas del país.

5.2. PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS RESULTADOS

Para obtener los resultados propuestos en la investigación, se seguirá el siguiente procedimiento metódico, el cual estará comprendido por las siguientes fases.

5.2.1. Fase 1 - Obtención de la información

Como información primaria se tendrá en cuenta la información suministrada por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia) y la CAR. En la Tabla 1 se muestran las estaciones utilizadas en la investigación.

³² HERNÁNDEZ, Roberto; FERNÁNDEZ, Carlos; BAPTISTA, Pilar. Metodología de la Investigación. México, Mc Graw Hill, 1997.

Tabla 1. Estaciones analizadas

ESTACIONES							COORDENADAS	
Nº	CODIGO	TE	ESTACION	REGION	DPTO.	MUNICIPIO	X	Y
1	3510704	LG	GUAICARAMO	ORINOQUIA	CASA	SABANALARGA	1114388	1011248
2	3509710	LG	MAMBITA PTE ROMERA	ANDINA	BOYA	AQUITANIA	1125381	1072098
3	3509709	LG	REVENTONERA LA	ORINOQUIA	CASA	SABANALARGA	1114358	1031525
4	3508702	LG	PAEZ	ANDINA	BOYA	PAEZ	1108789	1046263
5	3508701	LG	SAN AGUSTIN	ANDINA	BOYA	SANTA MARIA	1094022	1029653
6	3506714	LG	MAMBITA	ANDINA	CUND	UBALA	1084787	1020426
7	3506713	LG	MUNDO NUEVO	ANDINA	CUND	UBALA	1075534	1027789
8	3506704	LG	CHUSNEQUE	ANDINA	CUND	UBALA	1055202	1020399
9	3506703	LG	UBALA	ANDINA	CUND	UBALA	1064446	1022249
10	3506701	LG	GLORIA LA	ANDINA	CUND	UBALA	1073689	1024101
11	3503710	LG	PTE ABADIA	ORINOQUIA	META	VILLAVICENCIO	1049692	959573
12	2702706	LG	BRISAS DEL NECHI	ANDINA	ANTI	YARUMAL	861578	1258324
13	2702701	LG	DOLORES TC 6	ANDINA	ANTI	ANGOSTURA	857874	1250959
14	2623705	LG	PTE PESCADERO	ANDINA	ANTI	TOLEDO	821101	1275042
15	2623704	LG	PTO VALDIVIA	ANDINA	ANTI	VALDIVIA	854319	1297061
16	2621705	LG	CANAFISTO	ANDINA	ANTI	ANTIOQUIA	807943	1201328
17	2620708	LG	BOLOMBOLO	ANDINA	ANTI	VENECIA	804088	1151553
18	2618711	LG	PINTADA LA	ANDINA	CALD	AGUADAS	831711	1125657
19	2501702	LG	SAN PEDRO	CARIBE	CORD	PUERTO LIBERTADO	821419	1361708
20	2501701	LG	MONTELIBANO	CARIBE	CORD	MONTELIBANO	852724	1376348
21	2406703	LG	PTE LA PAZ	ANDINA	SANT	BETULIA	1075227	1276629
22	2406701	LG	TABLAZO EL	ANDINA	SANT	BETULIA	1080760	1271107
23	1602712	LG	SAN JAVIER-PTE ZUL	ANDINA	NORT	SAN CAYETANO	1161493	1363489
24	2104701	LG	PTE BALSEADERO	ANDINA	HUIL	AGRADO	823579	738495
25	2105704	LG	BOCATOMA	PACIFICO	CAUC	INZA	779115	775431
26	2105706	LG	PAICOL	ANDINA	HUIL	TESALIA	810625	762479
27	2111708	LG	GUAYABO	ANDINA	HUIL	NEIVA	873722	817712
28	2119701	LG	PROFUNDO EL	ANDINA	CUND	CABRERA	953458	933768
29	1506701	LG	LOMA LINDA	CARIBE	LA GUAJIRA	BARRANCAS	1158216	1710153
30	1506702	LG	CERCADO EL	CARIBE	LA GUAJIRA	SAN JUAN DEL CES	1127287	1698954
31	1506704	LG	GUAMITO HDA	CARIBE	LA GUAJIRA	BARRANCAS	1154537	1717512
32	1506705	LG	CUESTECITA	CARIBE	LA GUAJIRA	MAICAO	1172674	1732358
33	2119703	LG	PLAYA LA	ANDINA	CUND	PANDI	953470	955885
34	2119715	LG	LIMONAR EL	ANDINA	TOLI	MELGAR	940518	957736
35	2306702	LG	COLORADOS	ANDINA	CUND	PUERTO SALGAR	946171	1099653
36	2306705	LG	GUADUERO	ANDINA	CUND	GUADUAS	946145	1066476

ESTACIONES						COORDENADAS		
Nº	CODIGO	TE	ESTACION	REGION	DPTO.	MUNICIPIO	X	Y
37	2306706	LG	TOBIA	ANDINA	CUND	NIMAIMA	959076	1059095
38	2306708	LG	CHARCO LARGO	ANDINA	CUND	LA PALMA	970169	1071991
39	2308721	LG	CANTERAS	ANDINA	ANTI	PTO NARE	938861	1178917
40	2309703	LG	PTO BERRIO	ANDINA	ANTI	PUERTO BERRIO	966549	1210229
41	2319727	LG	PTE PANEGA	ANDINA	SANT	SURATA	1121202	1302527
42	2312702	LG	PTO ARAUJO	ANDINA	SANT	CIMITARRA	997889	1213905
43	2401716	LG	PINO EL	ANDINA	CUNO	SUTATAUSA	1031121	1118070
44	1307706	LG	COTOCA ABAJO	CARIBE	CORD	LORICA	805555	1511154
45	2801711	LG	MINA LA	CARIBE	CESAR	VALLEDUPAR	1089087	1673016
46	2616709	LG	COSTA AZUL	ANDINA	CALD	SALAMINA	842694	1085069
47	2906716	LG	PTE SEVILLA	CARIBE	MAGD	CIENAGA	1005203	1689492
48	2801708	LG	CORRAL DE PIEDRA	CARIBE	LA GUAJIRA	SAN JUAN DEL CESAR	1110917	1689676
49	3502710	LG	CARAZA	ANDINA	CUND	CAQUEZA	1007131	981675
50	4415701	LG	MERCEDES LAS	AMAZONIA	AMAZ	LETICIA	1213132	432440
51	2903736	LG	INCORA K-7	CARIBE	ATLA	SANTA LUCIA	904796	1630627
52	2502720	LG	VARA LAS	CARIBE	BOLI	ACHI	948334	1418536
53	2113701	LG	PURIFICACION AUTOMATICA	ANDINA	TOLI	PURIFICACION	903463	917218
54	2309703	LG	PTO BERRIO AUTOMATICA	ANDINA	ANTI	PUERTO BERRIO	966549	1210229
55	2123703	LG	GIRARDOT 2	ANDINA	CUND	GIRARDOT	918318	965127
56	1301702	LG	LIMON EL	CARIBE	CORD	TIERRALTA	758873	1358303
57	2502724	LG	JEGUA	CARIBE	SUCR	SAN BENITO ABAD	902571	1475765
58	4419702	LG	VILLARREAL	AMAZONIA	AMAZ	LA PEDRERA	1497357	347259
59	2502702	LG	BANCO EL	CARIBE	MAGD	EL BANCO	1012563	1486711
60	5407713	LG	MALAGUITA	CARIBE	VALL	BUENAVENTURA	651652	951034
61	2906715	LG	GANADERIA CARIBE	CARIBE	MAGD	ARACATACA	996087	1661838
62	2803706	LG	CANTACLARO	CARIBE	CESA	VALLEDUPAR	1038101	1606552
63	2804702	LG	PUEBLO BELLO	ANDINA	ANTI	TURBO	729680	1399054
64	2502764	LG	TRES CRUCES	CARIBE	BOLI	ACHI	952045	1453556
65	1603702	LG	CAMPO DOS	ANDINA	NORT	TIBU	1161251	1429869
66	3210701	LG	PTO ARTURO	ORINOQUIA	GUAV	SAN JOSE DEL GUA	1144319	777176
67	2502737	LG	STA ANA	CARIBE	MAGD	SANTA ANA	944801	1521772
68	2906707	LG	RIO FRIO	CARIBE	MAGD	CIENAGA	992447	1696866
69	2801717	LG	ARIGUANI HDA	CARIBE	CESA	VALLEDUPAR	1067215	1667435
70	1306702	LG	MONTERIA	CARIBE	CORD	MONTERIA	798734	1461360

Esta primera fase se extraerá la información necesaria para el desarrollo del cálculo que permitirá la determinación de los caudales máximos. Esta información debe ser compilada y consolidada de tal forma que se organice una base de datos consistente y acorde con los requerimientos metodológicos que exige la aplicación del cálculo. Las variables a analizar en esta base de datos se referencia en la tabla de operacionalización de las variables.

5.2.2. Fase 2 - Tratamiento de la información

Los análisis que se realizaran en la presente investigación se relacionan a continuación:

Se recopilaran los registros de distribución de caudales máximos instantáneo de estaciones colombianas.

Se determinara la confiabilidad del número de estaciones seleccionadas con respecto al total de estaciones en el país (Colombia).

Para cada estación de caudales máximos se determinara el test estadístico del Chicuadrado a las funciones de probabilidad Gumbel, Gev, Log-pearson tipo III, Pearson tipo III, Normal, utilizando métodos de ajustes tales como son: máxima verosimilitud, momentos ponderados, momentos, Sam, WRC.

Se seleccionó por región la distribución de probabilidad más representativa.

5.2.1. Fase 3 - Estimación del ajuste global de las distribuciones de probabilidad.

En esta fase se buscará establecer la mejor distribución de probabilidad con base a su bondad de ajuste en cada región del país que es analizada. Es decir, lo que se pretende es comprobar el ajuste de bondad de cada distribución y comparar para observar cuál de éstas presenta el mejor ajuste para cada una de las regiones que se analizan.

La bondad de ajuste para cada distribución se realizará mediante la utilización del método de máxima verosimilitud y mediante el método de chi cuadrado para cada región y se construirá un criterio de decisión que permitirá la escogencia de la veracidad de cada uno de los métodos en cada distribución.

5.3 TIPO DE FUENTE

Como información primaria se tendrá en cuenta la información suministrada por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia) y la CAR. En la Tabla 1 se encuentra las estaciones utilizadas en la investigación.

6. REGIONALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES

En este capítulo se presenta la metodología empleada para determinar la unión de distribución de probabilidad que debe emplearse en cada región de Colombia para estimar los caudales máximos instantáneos asociadas a diferentes periodos de retorno en Colombia.

La sectorización propuesta se realizó considerando lo empleado por Vélez (1983), la cual contempla dividir al país por regiones, Andina, Caribe, Pacífica, Orinoquia y Amazónica³³.

Teniendo en cuenta la sectorización propuesta se realizarán análisis independientes con estaciones que pertenezcan a la misma zona geográfica, las cuales presentan condiciones meteorológicas regidas por fenómenos similares.

El procedimiento que se aplicó consistió en realizar lo siguiente:

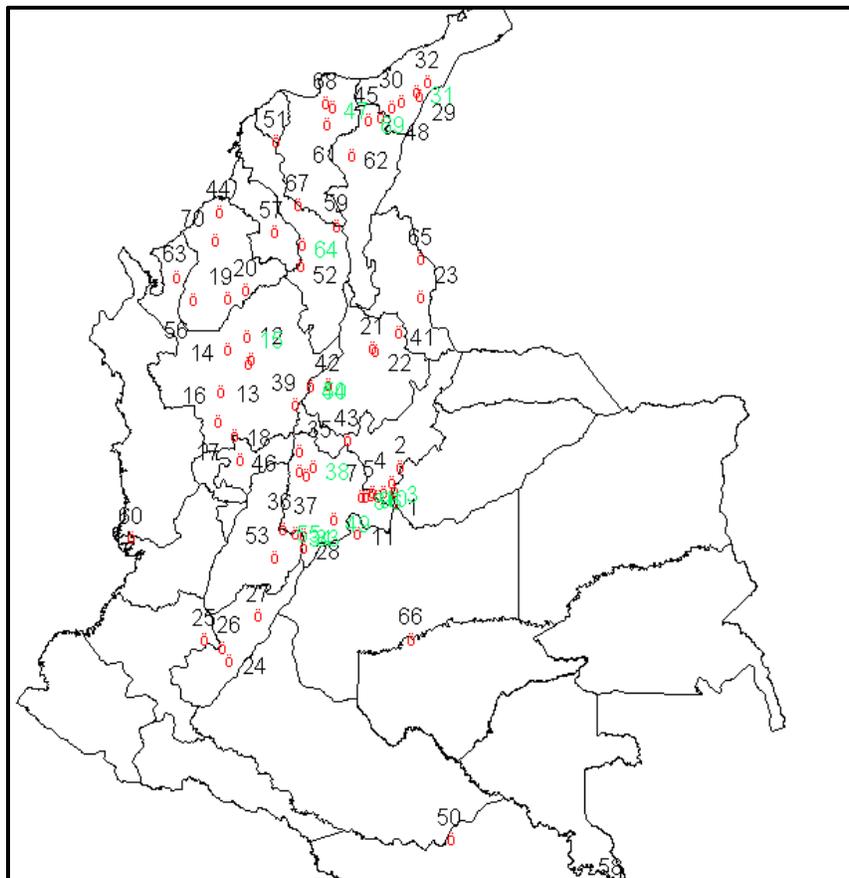
- Se seleccionaron las estaciones de caudales máximos distribuidas uniformemente a lo largo de Colombia.
- Se determinó el porcentaje de confiabilidad de las estaciones utilizadas.
- Se estimaron los parámetros de las funciones de distribución de probabilidad en cada una de las estaciones seleccionadas.
- Con base en la función de probabilidad encontrada para todas las estaciones y por cada región, se realizaron análisis estadístico para determinar los caudales máximos en los diferentes periodos de retorno en Colombia.

³³ MERLANO SABALZA, Hernesto y DIAZ VERGARA, Zaid. Regionalización de distribuciones hidrológicas de precipitaciones máximas en 24 horas en Colombia. Trabajo de graduación preparado para optar al grado de Ingeniero Civil, Universidad Tecnológica de Bolívar, 2011.

- Se seleccionó la distribución de probabilidad que mejor se ajuste a la tendencia de los datos por región. Para lo anterior se aplica la prueba estadística Chi-cuadrado.
- Se calculó el rendimiento hídrico de cada estación con base a los caudales máximos y se realizó un análisis grafico del rendimiento vs el área de las estaciones para los distintos periodos de retorno y las distribuciones de probabilidad de manera general y de las regiones Andina y Caribe.

En la figura 1 se presentan las estaciones utilizadas para el análisis.

Figura 1. Mapa de estaciones utilizadas



De la figura 2 a 6 se presentan distribuidas las estaciones utilizadas por cada región, la enmarcación de las estaciones corresponden a la presentada en la Tabla1.

Figura 2. Estaciones utilizadas en Región Andina

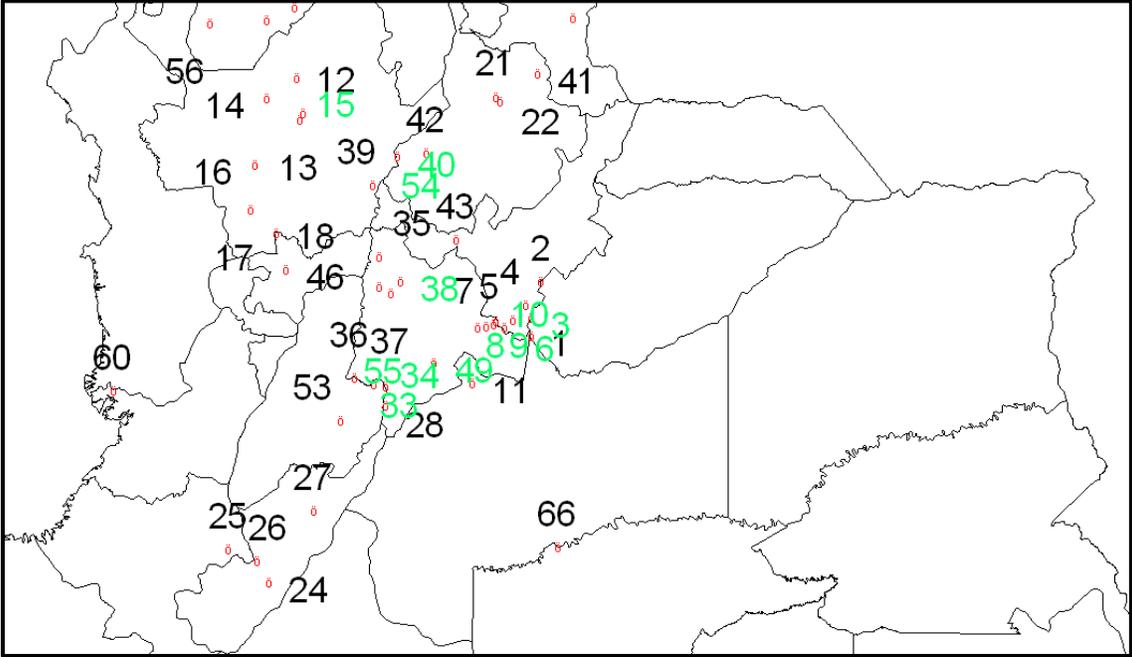


Figura 3. Estaciones utilizadas en Región Orinoquia

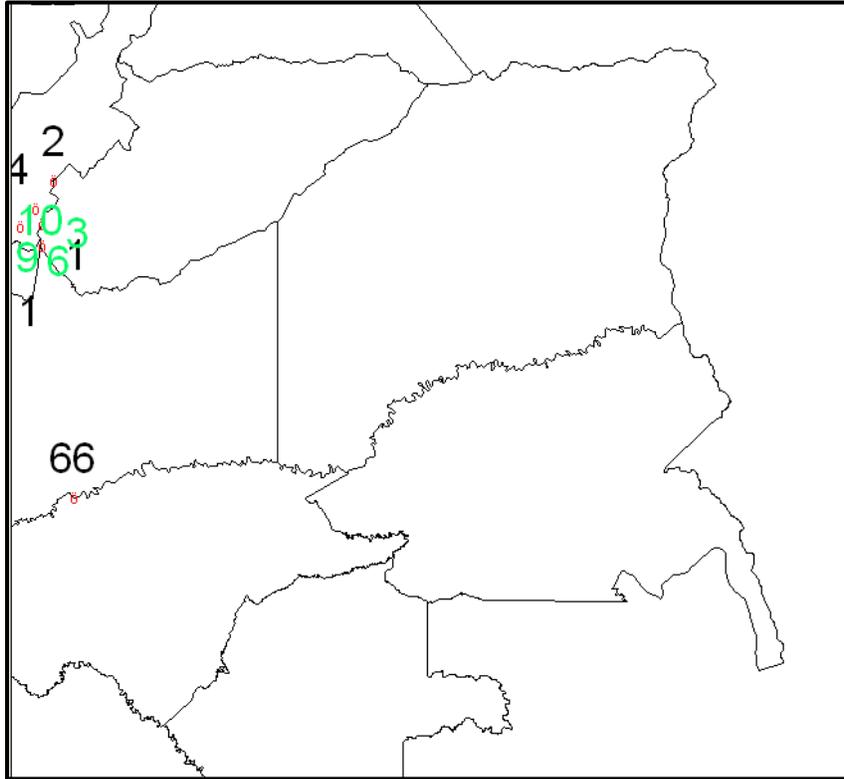


Figura 4. Estaciones utilizadas en Región Amazonia

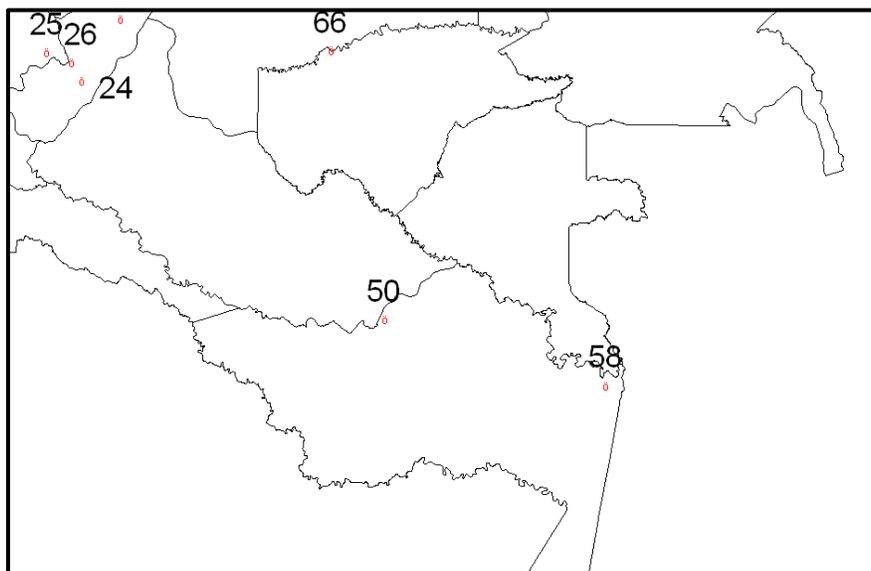


Figura 5. Estaciones utilizadas en Región Pacífica

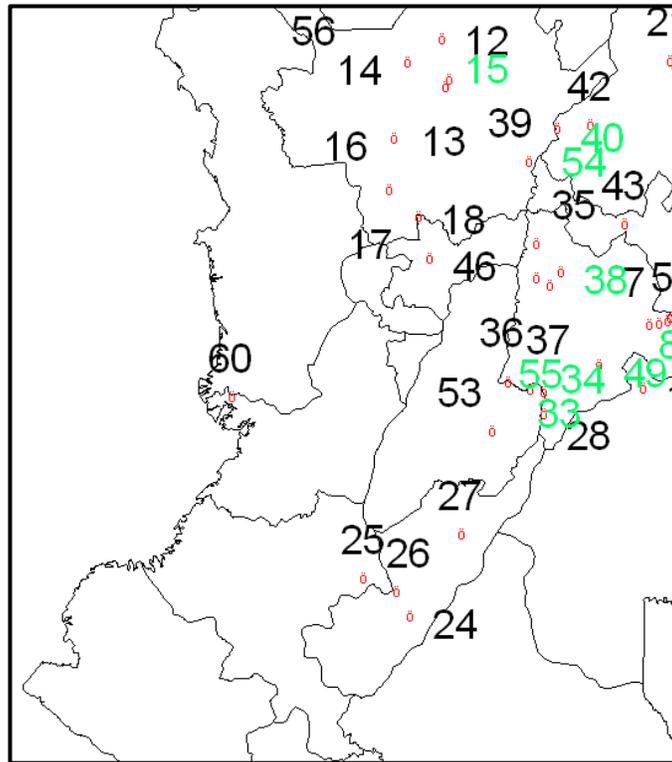
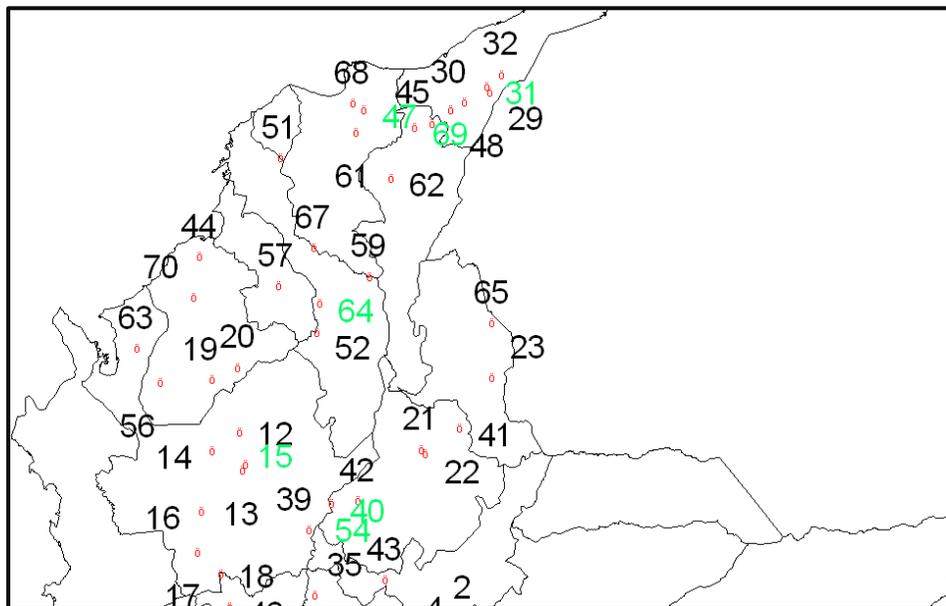


Figura 6. Estaciones utilizadas en Región Caribe



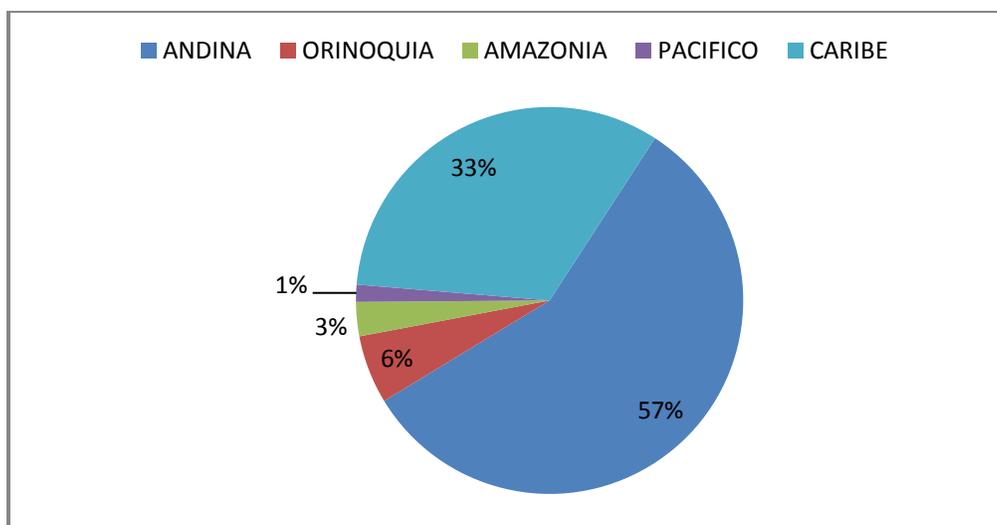
6.1. ESTACIONES DE CAUDALES MÁXIMOS UTILIZADAS

Para realizar los análisis se utilizaron los registro de caudales máximos instantáneos en Colombia; 70 estaciones operadas por el IDEAM y la CAR (véase anexo A). Teniendo en cuenta que los análisis se realizaron con base en las regiones de Colombia, se procedió a determinar el número de estaciones por región; en la Tabla 2 y en la Figura 7 se presenta el número y porcentaje de estaciones por región analizadas

Tabla 2. Número de estaciones por región

REGIONES	NUMERO DE ESTACION
ANDINA	40
ORINOQUIA	4
AMAZONIA	2
PACIFICO	1
CARIBE	23
TOTAL ESTACIONES UTILIZADAS	70

Figura 7. Porcentaje de estaciones por región



Con base en los resultados de la figura anterior, se deduce lo siguiente: en la Región Andina se tiene el 57% de las estaciones recopiladas; en la Región Caribe, se tiene el 33%; en la región Pacífica se tiene 1%; y en las regiones Orinoquia y Amazónica se tiene 6% y 3%, respectivamente.

Es importante tener en cuenta que las regiones que tienen el menor porcentaje de estaciones utilizadas en el presente estudio, son las que presentan el menor número de estaciones instaladas.

6.2. CONFIABILIDAD DEL NÚMERO DE ESTACIONES SELECCIONADAS

En este ítem se analizó si el número de estaciones de caudales máximo utilizadas son representativas del total de estaciones instaladas en Colombia.

Para lo anterior, se utilizó la ecuación propuesta por la norma NTP 283, para una población finita. La ecuación utilizada se relaciona a continuación.

Ecuación 8. Porcentaje de confiabilidad

n= número de estaciones utilizadas de Colombia, 70 estaciones.

N= número de estaciones totales en Colombia, Se utilizó el número de estaciones del IDEAM y de la CAR, 2624 estaciones.

P= Probabilidad de ocurrencia

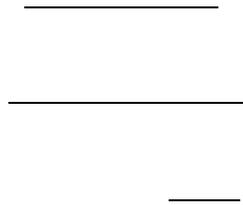
q= probabilidad de no ocurrencia, para este análisis se asumió $p=q=0,5$ por ser la condición más crítica.

Z= Intervalo de confianza del 1,96

= Nivel de confiabilidad del 5%

e= Error en la estimación

Al aplicar la ecuación anterior, se obtuvo un porcentaje de error de 11,95%, el cual representa el porcentaje de error que tiene las estaciones seleccionadas por el total de las estaciones en Colombia.



6.3. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD.

Con el fin de estimar los parámetros de las distribuciones de probabilidad de Gumbel, Log Pearson III, Normal, Pearson III y GEV se utilizó el programa Hyfran, el cual permite la estimación de dichos parámetros empleado los métodos de ajuste de máxima verosimilitud, momento, momentos ponderados SAM y WRC.

En el anexo B se presentan los resultados obtenidos para cada una de las estaciones de caudales máximos analizadas.

6.4. SELECCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD

Para seleccionar la distribución de probabilidad en cada región de Colombia se realizó el siguiente análisis (véase anexo C):

6.4.1. TEST CHI-CUADRADO

La prueba estadística Chi-Cuadrado se utilizó para seleccionar en cada estación la función de distribución de probabilidad hidrológica que mejor se ajustaba a la tendencia de los datos.

Con base en los resultados se obtuvieron los promedios por regiones de las pruebas estadísticas Chi-Cuadrado. En la Tabla 3 se presentan los valores obtenidos

Tabla 3. Aplicación de la Prueba Chi Cuadrado (X²)

PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE - PRUEBA X ²												
Region	Gev - MV	Gev - MM	Gev - MP	Gumbel -MV	Gumbel -MM	Gumbel -MP	Normal	Pearson tipo III - MV	Pearson tipo III - MM	Log - Pearson - SAM	Log - Pearson - MM	Log - Pearson - WRC
Andina	4,75	6,21	4,66	6,66	8,07	46,23	9,09	19,73	6,37	5,16	7,11	5,57
Amazonia	4,09	2,675	1,04	8,13	3,285	2,675	4,65	138	1,765	1,615	2,375	71,91
Caribe	6,92	10,46	7,41	88,73	12,51	11,76	12,57	111,29	9,37	9,97	21,97	20,44
Orinoquia	2,81	5,01	4,43	6,96	5,68	6,41	9,60	44,81	4,15	4,74	4,64	4,46
Pacifico	5,00	5,00	5	5	5	5	19,47	5	5	5	5	5
Promedio	4,71	5,87	4,51	23,10	6,91	14,42	11,08	63,77	5,33	5,30	8,22	21,48

Con base en los resultados de la tabla de aplicaciones de la prueba Chi cuadrado se deduce lo siguiente.

- En todas las regiones de Colombia se obtuvieron los mejores ajustes de la prueba Chi-cuadrado con la función de distribución Gev; el método que ajusta mejor los

parámetros para dicha función es el de momento ponderado con un valor promedio de 4.51. No obstante existen otras distribuciones de probabilidades que ajustaron muy cerca a la tendencia de los datos de Gumbel y Pearson.

- En Colombia se obtuvieron los ajustes más desfavorables con la prueba Chi-Cuadrado se presentaron al emplear la distribuciones Pearson III máxima verosimilitud con un valor promedio de (63.77), seguida de la Gumbel método máxima verosimilitud con (23.10), respectivamente.
- Las funciones de distribución en las cuales se presentan valores promedio con la prueba Chi-Cuadrado son Gev Max. Verosimilitud (4.71), Gev método de Momentos (5.87), log – pearson método de SAM (5.30), y Pearson tipo III método momentos (5.33), respectivamente.
- En la región Amazónica se obtuvo el mejor ajuste de Chi-Cuadrado con la función Gev momentos ponderados (1.04). Posiblemente este valor obtenido se debe a que se utilizaron pocas estaciones en los análisis.
- En las regiones Andina y Caribe se obtuvieron ajustes adecuados de la prueba Chi-Cuadrado con la función de distribución Gev Momentos Ponderados con valores de 4.66 y con la función de distribución Gev máxima verosimilitud 6.92 respectivamente. Es importante mencionar que en estas regiones se contó con el mayor número de estaciones, lo cual garantizan los resultados obtenidos.
- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la prueba Chi-Cuadrado se recomienda utilizar la función de distribución de probabilidad Gev con el método de ajuste Momentos Ponderados.

6.5. RENDIMIENTO HÍDRICO.

Con base a los caudales máximos de las cuencas de cada una de las estaciones analizadas y sus área, se calcularon los rendimientos hídricos asociados a diferentes periodos de retorno (véase anexo D) y se realizó un análisis grafico de estos rendimientos vs el área (véase anexo E), calculándose el coeficiente de correlación (R^2).

Con los resultados obtenidos se identificaron las distribuciones que más se ajustan a los diferentes periodos de retorno. En la Tabla 4 se presentan los valores obtenidos teniendo en cuenta la totalidad de las estaciones.

Tabla 4. Coeficiente de Correlación (R^2) todas las estaciones

TR	GEV MV	GEV MM	GEV MP	GUMBEL MV	GUMBEL MM	GUMBEL MP
2,33	0,5233	0,5427	0,5245	0,5437	0,5535	0,484
5	0,5872	0,5556	0,5903	0,5852	0,6055	0,6022
10	0,6176	0,6293	0,6075	0,6044	0,6302	0,6266
25	0,6652	0,6581	0,6623	0,6201	0,6514	0,6363
50	0,6851	0,6272	0,6837	0,6281	0,6598	0,5999
100	0,6983	0,6879	0,6954	0,6342	0,6298	0,6632
500	0,6839	0,6979	0,7191	0,644	0,6861	0,677
TR	NORMAL	PEARSON TIPO III MV	PEARSON TIPO III MM	LOG PEARSON TIPO III SAM	LOG PEARSON TIPO III MM	LOG PEARSON TIPO III WRC
2,33	0,484	0,484	0,484	0,484	0,484	0,484
5	0,6124	0,6112	0,5789	0,5372	0,4548	0,5882
10	0,6283	0,6363	0,6148	0,6625	0,6189	0,6207
25	0,6428	0,6513	0,6449	0,6365	0,6422	0,6467
50	0,6485	0,5791	0,6604	0,6203	0,0474	0,6594
100	0,6546	0,6736	0,672	0,6596	0,6637	0,6672
500	0,6702	0,6843	0,6909	0,6728	0,6637	0,6744

Referente a los resultados de la tabla de coeficiente de correlación (R^2) de cada distribución se deduce que para los periodos de retorno 2.33, 5 y 10, las

distribuciones que más se ajustan son Gumbel con el método de ajuste de momentos, Normal y Log Pearson III con el método de ajuste SAM respectivamente; para los periodos de retorno 25, 50 y 100, la distribución que más se ajusta es GEV con el método de ajuste de máxima verosimilitud; para el periodo de retorno 100, la distribución que más se ajusta es GEV con el método de ajuste de momentos ponderados. En general en todas las distribuciones la correlación es directa, y la distribución que más se ajusta es la GEV (método de momentos ponderados) con un valor de 0.7191 y un periodo de retorno de 500.

El anterior análisis se realizó también para las regiones Andina y Caribe específicamente (véase anexo F y anexo G), por contar con la suficiente información para dicho análisis. En la Tabla 5 y en la Tabla 6 se presentan los valores obtenidos para estas regiones.

Tabla 5. Coeficiente de Correlación (R^2) Región Andina

TR	GEV MV	GEV MM	GEV MP	GUMBEL MV	GUMBEL MM	GUMBEL MP
2,33	0,6197	0,6574	0,6225	0,647	0,6561	0,4818
5	0,6893	0,6036	0,6915	0,6946	0,7118	<i>0,7089</i>
10	0,6893	0,7346	0,7015	0,7164	0,737	0,7338
25	0,7708	0,755	0,7625	0,7336	0,7592	0,7406
50	0,7913	0,6626	0,7825	0,7425	0,7635	0,6454
100	0,8043	0,7724	0,7877	0,7495	0,6653	0,7718
500	0,7526	0,7662	0,8057	0,7606	0,7816	0,7851
TR	NORMAL	PEARSON TIPO III MV	PEARSON TIPO III MM	LOG PEARSON TIPO III SAM	LOG PEARSON TIPO III MM	LOG PEARSON TIPO III WRC
2,33	0,486	0,6321	0,6168	0,566	0,6136	0,618
5	0,719	0,6943	0,6827	0,5484	0,6912	0,6907
10	0,733	0,7214	0,7116	0,6576	0,7223	0,7271
25	0,7478	0,7326	0,7327	0,6857	0,741	0,7534
50	0,7514	0,5854	0,7423	0,6283	0,7466	0,7653
100	0,7579	0,7541	0,7489	0,71	0,7492	0,7715
500	0,7754	0,7601	0,7599	0,7245	0,6136	0,775

Teniendo en cuenta los resultados de la Región Andina se deduce que para los periodos de retorno 2.33, 5 y 10, las distribuciones que más se ajustan son GEV con el método de ajuste de momentos, Normal y Gumbel con el método de ajuste de momentos respectivamente; para los periodos de retorno 25, 50 y 100, la distribución que más se ajusta es GEV con el método de ajuste de máxima verosimilitud; para el periodo de retorno 100, la distribución que más se ajusta es GEV el método de ajuste de momentos ponderados.

Tabla 6. Coeficiente de Correlación (R²) Región Caribe

TR	GEV MV	GEV MM	GEV MP	GUMBEL MV	GUMBEL MM	GUMBEL MP
2,33	0,5966	0,6038	0,5963	0,6115	0,6195	0,6194
5	0,6663	0,6724	0,6658	0,6593	0,6829	0,6792
10	0,7084	0,7124	0,7088	0,6818	0,7129	0,7081
25	0,746	0,7501	0,7505	0,7012	0,7386	0,7326
50	0,7631	0,7719	0,7734	0,7115	0,7516	0,7448
100	0,772	0,7899	0,7907	0,7189	0,7614	0,7548
500	0,7691	0,8183	0,8117	0,7318	0,8343	0,7711
TR	NORMAL	PEARSON TIPO III MV	PEARSON TIPO III MM	LOG PEARSON TIPO III SAM	LOG PEARSON TIPO III MM	LOG PEARSON TIPO III WRC
2,33	0,6397	0,6725	0,5892	0,6036	0,6163	0,6086
5	0,6906	0,729	0,6671	0,6725	0,3706	0,6742
10	0,7124	0,7603	0,7139	0,7091	0,758	0,7078
25	0,7296	0,7876	0,7548	0,7406	0,782	0,7345
50	0,7385	0,8027	0,776	0,7556	0,7919	0,7467
100	0,7458	0,8143	0,7915	0,7662	0,7945	0,754
500	0,7571	0,8337	0,816	0,7772	0,7937	0,6086

Para la Región Caribe todos los periodos de retorno se ajustan más a la distribución Pearson Tipo III con el método de ajuste de máxima verosimilitud.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La metodología utilizada para la regionalizar la función en Colombia consistió en realizar el siguiente procedimiento:

- a) Se recopilaron estaciones con registros de caudales máximos instantáneos, distribuidas uniformemente en Colombia.
 - b) Se evaluó la confiabilidad en el número de estaciones seleccionadas, utilizando la norma NTP 283.
 - c) Se aplica la prueba estadística Chi-Cuadrado por estación para analizar la confiabilidad de distintas distribuciones de probabilidad (GEV, GUMBEL, NORMAL, PEARSON TIPO III y LOG-PEARSON,) con métodos de ajustes como (MAX. VEROSIMILITUD, MOMENTOS PONDERADOS, MOMENTOS, SAM y WRC) y se graficaron los valores de Chi-Cuadrado con el motivo de buscar la homogeneidad de los resultados en el país.
 - d) Se seleccionó la distribución predominante en el país.
 - e) Para la distribución seleccionada en el país se regionalizaron los caudales máximos asociados a periodos de retornos y los parámetros de dicha función.
- De todos los análisis realizados con las estaciones recopiladas se encontró un nivel de confiabilidad alto de tal manera que se pudiera respaldar los análisis efectuados.

- Con base en el análisis regional de frecuencia de los caudales máximos en Colombia se recomienda utilizar la distribución de probabilidad hidrológica GEV (método de momentos ponderados) debido a que en todas las regiones se obtuvieron los mejores resultados del test estadístico Chi- Cuadrado, con un valor promedio por región de 4.71 sin embargo se pueden utilizar las distribuciones de probabilidad de Gumbel y Log - Pearson Tipo III dado que se obtuvieron buenos ajustes.
- Se logró establecer para la función Gev de momentos ponderados los parámetros (k , u , α) y los caudales máximos por región con diferentes periodos de retorno, con los cuales se regionalizo dicha función en el país.
- Lo anterior se realizó con el programa HYFRAN.
- Para próximos trabajos se recomienda utilizar funciones mixtas de probabilidad para analizar su influencia en Colombia y recopilar mucha más información en las regiones Amazona y Orinoquia para así mejorar la certeza de éstas regiones.

BIBLIOGRAFÍA

ABAURREA, J. *Fenómenos extremos: análisis y caracterización*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza. Departamento de Métodos estadísticos, 2007.

ÁNGEL, J., SEDANO, M., & Vila, A. (s.f.). *La distribución normal*. Cataluña: Universitat Oberta de Catalunya.

ARBELÁEZ, A, Ana C., VÉLEZ, O., María V. Diseño hidrológico con información escasa un caso de estudio: Río San Carlos. Avances en recursos hidráulicos, Numero 4 septiembre de 1997. ISSN 0121 – 5701. Programa de posgrado en aprovechamiento de recursos hidráulicos Facultad de minas Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín.

BANCO DE LA REPUBLICA. Colombia a su alcance. Editorial Planeta, Bogotá, Colombia, 1997.

BARN, Álder. Breviario de Colombia: Historia, Geografía, Cívica; Departamentos. Panamericana editorial Ltda. Colombia, 1997.

CARÍAS, Juárez Boris E., CHACÓN, Novoa Egly T. y MARTÍNEZ, Márquez Miguel A. Validación de metodologías para el cálculo de caudales máximos en el Salvador. Trabajo de graduación preparado para la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, para optar al grado de ingeniero civil, Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”, San Salvador, El Salvador, 2004.

CASTILLO, I. Hydrological Frequency Analysis (HYFRAN). Recuperado el 30 de enero de 2008. Disponible en internet:

<<http://aguaingenieria.blogspot.com/2008/01/hydrological-frequency-analysis.html>>.

CORREDOR, Rivera, Jorge L. Análisis preliminar de precipitación máxima en Colombia. Revista: Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 17 – 1, pp. 79 – 93, ISSN 0124 – 8170, Bogotá, Colombia, 2007.

DEVORE, J. *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. 6ª Ed. Thomson, 2005.

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN DE ADULTOS EN CALDAS y Oficina para la Prevención y Atención de Desastres. *Zonas de Colombia con más riesgos de inundaciones* (folleto), [En línea] tomado de: www.crid.or.cr

ERAZO, Chica, Adriana M. Estudio de regionalización de caudales máximos Valle del Cauca – Colombia. Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia, 1999.

FRANQUET, J. *El caudal mínimo medioambiental del tramo inferior del río Ebro*. España: UNED-Tortosa. C/ Cervantes, 2009.

GARCIA, Marta, SANCHEZ, Félix, et al. El medio ambiente en Colombia. El agua, Cap. 4, p. 118. IDEAM, 2006.

GÓMEZ, J. *Método de máxima verosimilitud*. TAE. Curso de estadística, 2005.

HERNÁNDEZ, A.. *Distribución límite de los extremos del modelo t-student truncado para datos de lluvia diaria*. Universidad Simon Bolivar. Decanato de estudios de postgrado, 2005.

MAGGIO, G. (s.f.). *Análisis estadístico de valores extremos. Aplicaciones en hidrología*. Buenos Aires: Noldor. S.R.L.

MANSEN, A. *Diseño de Bocatomas*. Universidad Nacional de Ingeniería. Departamento Académico de Hidráulica e Hidrología, 2010.

MERLANO SABALZA, Hernesto y DIAZ VERGARA, Zaid. Regionalización de distribuciones hidrológicas de precipitaciones máximas en 24 horas en Colombia. Trabajo de graduación preparado para optar al grado de Ingeniero Civil, Universidad Tecnológica de Bolívar, 2011.

MESA, Sánchez, Oscar J, VÉLEZ, Upegui, Jaime I., et al. *Regionalización de Características Medias de la Cuenca con Aplicación en la Estimación de Caudales Máximos*. Memorias XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica IAHR, La Habana, Memorias XV Seminario Nacional de Hidráulica E Hidrología, Medellín, 2002.

OBANDO, Oscar F., ORDOÑEZ, Gálvez, Juan J. Análisis hidrológico de la crecida extraordinaria del Río Tumbes del 27 de febrero del 2006. Jornadas Internacionales sobre Gestión del Riesgo de Inundaciones y Deslizamientos de Laderas. Brasil. Mayo 2007.

OCHA, Colombia. Colombia. Temporada de lluvias 2010 Fenómeno de La Niña, Informe de Situación #3, 2010. [En línea] tomado de: http://colombiassh.org/unete/IMG/pdf_Sitrep_No.3_temporada_de_lluvias.pdf

PÉRTEGAS, S.. *La distribución normal*. La Coruña: Unidad de Epidemiología Clínica y Bioestadística. Complejo Hospitalario Juan Canalejo, 2001.

RAYNAL, J. A., y GARCÍA, L. G. Análisis de caudales máximos anuales usando la distribución GVE para tres poblaciones. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de las Américas, Puebla – México, Revista: Información Tecnológica-Vol. 16 N°4-2005, págs.: 69-75.

REYES, Rodríguez, Toribio M. Regionalización de los caudales máximos instantáneos anuales de la cuenca del río Santa. Rev. Aporte Santiaguino 2009; 2(2): 223-231. ISSN 2070-836X, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz – Perú.

SÁEZ, A. *Modelización estocástica de precipitaciones máximas para el cálculo de eventos extremos a partir de los periodos de retorno mediante R*. Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Universidad de Jaén, 2009.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.. *Prueba Chi cuadrado o Bondad de Ajuste*. Dirección Nacional de Servicios Académicos Virtuales, 2008.

VÉLEZ, O., María V., QUINTERO, G., Wilson, DELGADO, J., Juan P. *Implementación del modelo MG para Antioquia y el Eje Cafetero*. Avances en recursos hidráulicos, Numero 14, Octubre de 2006 – Medellín - ISSN 0121 – 5701

ANEXO A.
VALORES MÁXIMOS MENSUALES DE CAUDALES DE LAS
ESTACIONES ANALIZADAS

ANEXO B.
CAUDALES MÁXIMOS Y PARÁMETROS DE LAS
DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD

ANEXO C.
PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE CHI CUADRADO (X²)

ANEXO D.
RENDIMIENTOS HÍDRICOS ASOCIADOS A DIFERENTES
PERIODOS DE RETORNO

ANEXO E.
**RENDIMIENTOS HÍDRICOS VS ÁREAS ASOCIADOS A
DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO**

ANEXO F.
**RENDIMIENTOS HÍDRICOS VS ÁREAS ASOCIADOS A
DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO (REGIÓN ANDINA)**

ANEXO G.

**RENDIMIENTOS HÍDRICOS VS ÁREAS ASOCIADOS A
DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO (REGIÓN CARIBE)**