

**REGIONALIZACIÓN DE SEQUÍA HIDROLÓGICA EN LA CUENCA DEL RÍO  
BOGOTÁ A PARTIR DEL MÉTODO DE L-MOMENTOS**

**WENDY TATIANA HERNÁNDEZ GUARÍN  
PAULA XIMENA MORENO VIVAS**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
BOGOTÁ D.C.  
2017**

**REGIONALIZACIÓN DE SEQUÍA HIDROLÓGICA EN LA CUENCA DEL RÍO  
BOGOTÁ A PARTIR DEL MÉTODO DE L-MOMENTOS**

**Presentado por:**

**WENDY TATIANA HERNÁNDEZ GUARÍN  
PAULA XIMENA MORENO VIVAS**

**Proyecto - Pregrado Modalidad:  
Trabajo de grado**

**Dirigido por:**

**DARWIN MENA RENTERÍA  
INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO  
ESPECIALISTA EN GESTIÓN AMBIENTAL  
MAGÍSTER EVALUACIÓN DE RECURSO HÍDRICO**

**Co-Director:**

**MIGUEL ÁNGEL CAÑÓN  
INGENIERO AMBIENTAL**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
Bogotá D.C.  
2017**

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	6
1 INTRODUCCIÓN .....	8
2 OBJETIVOS .....	9
2.1 Objetivo General.....	9
2.2 Objetivos Específicos.....	9
3 MARCO TEÓRICO.....	10
3.1 Cuenca hidrográfica del Río Bogotá .....	10
3.2 Sequía .....	13
3.2.1 Causas .....	13
3.2.2 Tipos de sequía.....	14
3.2.2.1 Sequía meteorológica.....	14
3.2.2.2 Sequía agrícola.....	14
3.2.2.3 Sequía hidrológica .....	15
3.2.3 Caracterización de la sequía .....	15
3.3 Análisis de frecuencia .....	16
3.3.1 Selección del modelo probabilístico .....	17
3.3.2 Cuantiles y período de retorno .....	18
3.4 Análisis regional de frecuencias .....	18
3.4.1 Método L-momentos .....	19
3.4.2 Etapas del Análisis Regional de Frecuencia basado en los L-Momentos.....	21
3.4.2.1 Filtrado de datos usando medidas de discordancia.....	21
3.4.2.2 Identificación de regiones homogéneas .....	23
3.4.2.3 Selección de la distribución de probabilidad.....	25
3.4.2.4 Estimación de probabilidades y cuantiles .....	27
3.4.3 Método del índice de avenida .....	28
3.4.3.1 Generación de mapas .....	28
4 METODOLOGIA.....	30
4.1 Etapa 1: Revisión y control de calidad de los datos:.....	31
4.2 Etapa 2: Identificación de regiones homogéneas .....	34

4.3	Etapa 3: Selección de la distribución de probabilidad y estimación de cuantiles .....	34
4.4	Etapa 4: Caracterización de la sequía hidrológica .....	35
4.5	Etapa 5: Mapeo .....	37
5	DESARROLLO CENTRAL .....	38
5.1	Etapa 1: Revisión y control de calidad de los datos:.....	39
5.1.1	Análisis de homogeneidad y estacionariedad .....	41
5.2	Etapa 2: Identificación de regiones homogéneas .....	46
5.3	Etapa 3: Selección de distribución de probabilidad y estimación de cuantiles .....	49
5.4	Etapa 4: Caracterización de la sequía hidrológica .....	57
5.5	Etapa 5: Mapeo .....	58
5.5.1	Aporte ingenieril .....	64
6	CONCLUSIONES.....	66
7	RECOMENDACIONES .....	68
8	BIBLIOGRAFIA .....	69

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Características generales de la Cuenca Alta, Media y Baja.....	12
Tabla 2.	Valores críticos del indicador de discordancia $D_i$ .....	22
Tabla 3.	Clasificación de la sequía hidrológica .....	36
Tabla 4.	Estaciones seleccionadas.....	38
Tabla 5.	Estadísticos descriptivos.....	40
Tabla 6.	Estadísticos descriptivos.....	40
Tabla 7.	Estadísticos descriptivos.....	41
Tabla 8.	Resultados p-value Prueba de Homogeneidad.....	42
Tabla 9.	Interpretación resultados Prueba de homogeneidad .....	43
Tabla 10.	Resumen resultados de estacionariedad .....	44
Tabla 11.	Detección de Outliers.....	45
Tabla 12.	Regiones homogéneas .....	47
Tabla 13.	Resultados del indicador $D_i$ .....	47
Tabla 14.	Municipios que abarca cada región homogénea.....	49
Tabla 15.	Resultados del $Z^{DIST}$ por región homogénea.....	51
Tabla 16.	Resultados de L-momentos y parámetros por región homogénea .....	51
Tabla 17.	Cálculo de los cuantiles con parámetros de la estación.....	52
Tabla 18.	Cálculo de los cuantiles con parámetros regionales .....	52

Tabla 19. % de déficit hídrico por periodo de retorno (Tr).....	57
Tabla 20. Categorización de la sequía hidrológica _ Región vs Periodo de Retorno .....	58

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá.....	10
Figura 2. Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá .....	11
Figura 3. Causas principales de un evento de sequía .....	14
Figura 4. Diagrama representativo del indicador de discordancia basado en los L-momentos: L-CV y L-SK .....	23
Figura 5. Distribución espacial de las estaciones seleccionadas.....	39
Figura 6. Mapas delimitación Regiones Homogéneas.....	48
Figura 7. Diagrama L-Moment Ratio de cada Región Homogénea .....	50
Figura 8. Función Cuantil con parámetros del sitio vs. Función Cuantil con parámetros regionales - Región 1.....	53
Figura 9. Función Cuantil con parámetros del sitio vs. Función Cuantil con parámetros regionales - Región 2.....	54
Figura 10. Función Cuantil con parámetros del sitio vs. Función Cuantil con parámetros regionales - Región 3.....	55
Figura 11. Función Cuantil con parámetros del sitio vs. Función Cuantil con parámetros regionales - Región 4.....	56
Figura 12. Regionalización de la sequía hidrológica a un Tr = 5 años.....	59
Figura 13. Regionalización de la sequía hidrológica a un Tr = 10 años.....	60
Figura 14. Regionalización de la sequía hidrológica a un Tr = 20 años.....	61
Figura 15. Regionalización de la sequía hidrológica a un Tr = 50 años.....	62
Figura 16. Regionalización de la sequía hidrológica a un Tr = 100 años.....	63
Figura 17. Evolución de la distribución espacio-temporal de la sequía hidrológica.....	65

## RESUMEN

El presente trabajo está encaminado a la regionalización de la magnitud de la sequía hidrológica en la Cuenca del Río Bogotá mediante la aplicación del Método de L-Momentos. La unidad de análisis está compuesta por 32 series de tiempo hidrológicas de caudales mínimos mensuales con una longitud de registro de 24 años (1991-2014), derivadas de estaciones hidrometeorológicas proporcionadas por el IDEAM, la CAR y la EAAB. La metodología acorde al Análisis Regional de frecuencias (ARF) basado en los L-momentos y los objetivos específicos de este trabajo se compone de 5 etapas: Revisión y control de calidad de los datos; Identificación de regiones homogéneas; Selección de distribuciones de probabilidad y estimación de cuantiles; Caracterización de la sequía hidrológica y Mapeo.

Como resultado, se obtuvieron 4 regiones homogéneas, definidas por las estaciones que comparten la misma distribución de frecuencias. La función de distribución de probabilidad (FDP) de mejor ajuste para las 4 regiones es la Generalizada del Valor Extremo (GEV). A partir de los L-momentos regionales se calcularon los parámetros de cada FDP, para luego proceder a la estimación de los cuantiles regionales y cuantiles a nivel de sitio. Los cuantiles regionales indican la magnitud de la sequía hidrológica en términos del déficit hídrico (%), al ser comparados por un umbral o nivel de truncamiento dado por la media de la función cuantil regional ( $\tilde{X} = 1$ ). Según el % de déficit se clasificó la sequía como: Normal (0% a 25%), Moderada (25% a 50%), Severa (50% a 75%) y Extrema (75% a 100%). Por último, los cuantiles o valores de escurrentía (mm) obtenidos por estación se utilizaron para la aplicación del método de interpolación IDW (Inverse Distance Weighting o Distancia Inversa Ponderada) para la generación de mapas de cuantiles a diferentes periodos de retorno (5, 10, 20, 50 y 100 años).

Con relación a los 5 mapas: la Región 3 y gran parte de la Región 1 y 4 presentan los caudales más bajos en comparación al área restante de la cuenca. Por otro lado, los déficits de todas las regiones se encuentran por encima del 38%, siendo la Región 3 la más vulnerable. Además, la escurrentía va disminuyendo paulatinamente en el transcurso del tiempo hasta llegar a escenarios más críticos y sequías extremas.

Finalmente, los resultados del presente trabajo constituyen aportes significativos a la planificación y la gestión de manera integral de los recursos hídricos determinando las zonas con mayor magnitud de eventos de sequía, lo que, asociados a mapas de vulnerabilidad a la sequía, permite obtener mapas de riesgo de sequía, útiles en la toma de decisiones en planes de gestión del riesgo.

**PALABRAS CLAVE:** SEQUÍA HIDROLÓGICA, CAUDALES MÍNIMOS, DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD, CUANTILES, PERIODOS DE RETORNO.

## ABSTRACT

The present work is aimed at estimating the magnitude of hydrological droughts in the Bogotá River Basin through the application of the L-Moments Method. The unit of analysis is composed of 32 hydrological time series based on the datasets of minimum monthly flows with a record length of 24 years (1991-2014), obtained from IDEAM, CAR and EAAB's hydrometeorological stations. The methodology according to the Regional Frequency Analysis (ARF) based on L-moments and the specific objectives of this work are divided into 5 stages: review and quality control of the data; identification of homogeneous regions; selection of probability distributions and quantiles estimation; characterization of hydrological drought and Mapping.

As a result, 4 homogeneous regions were obtained, defined by the stations sharing the same frequency distribution. The best fit probability distribution function (FDP) for Region 1, 2 and 4 is the Generalized Logistics, while for Region 3, it is the Generalized Pareto. From the regional L-moments the parameters of each PDF were calculated, and then proceed to the estimation of the regional and quantile at the site level. Regional quantile indicate the magnitude of hydrological drought in terms of water deficit (%), when compared by a threshold or level of truncation given by the average of the regional quantile () function. According to the % of deficit, drought was classified as: Light (<60%), Moderate (60% to 70%), Severe (70% to 80%) and Extreme (> 80%). Finally, the quantiles or runoff values (mm) obtained per station were used for the application of the IDW interpolation method for the generation of quantile maps to different return periods (5, 10, 20, 50 and 100 years).

In relation to the 5 maps: the upper basin, the western sector and the municipalities of San Antonio del Tequendama, Tena, Soacha and Sibaté present the lowest flows compared to the remaining area of the basin. On the other hand, the deficits of all regions are above 50%, with Region 3 being the most vulnerable. In addition, the runoff gradually decreases over time to more critical scenarios and extreme droughts.

Finally, the results of this study are significant for planning contributions and management holistically water resources by determining the areas with greatest magnitude of drought events. The association of maps of vulnerability to drought allows obtaining maps of drought risk, which are useful in decision making in risk management plans.

**KEYWORDS:** HYDROLOGICAL DROUGHT, MINIMUM FLOW, PROBABILITY DISTRIBUTION, QUANTILE, RETURN PERIODS.

# 1 INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se ha venido presentando una intensificación de la sequía, afectando a las poblaciones humanas hasta tal punto que hoy día se ha convertido en uno de los fenómenos naturales de mayor preocupación en el mundo [1]. Por lo tanto, se ha presentado la necesidad de realizar estudios para determinar cuáles son los factores que contribuyen a la sequía y establecer bases que permitan mitigar sus impactos sobre el componente económico, social y ambiental.

La sequía es uno de los fenómenos más complicados de analizar por el sin número de variables que influyen en su origen y comportamiento. La sequía hidrológica indica la falta de humedad en los suelos y capas freáticas, como consecuencia de la disminución del agua embalsada y estiajes de los ríos, ocasionando alteraciones sobre los recursos hídricos e influyendo de manera significativa en los procesos productivos. Por ende, en áreas como hidrología, se constituyó como objeto de estudio el desarrollo e implementación de técnicas que permitan determinar caudales mínimos en los diferentes cuerpos de agua.

Por lo anterior, el presente proyecto tiene como fin regionalizar la magnitud de las sequías hidrológicas en la Cuenca del Río Bogotá, mediante la aplicación del Método de L-Momentos, que proporciona una respuesta a dicho fenómeno a partir de la probabilidad de ocurrencia y frecuencia del mismo, teniendo en cuenta registros históricos de caudales mínimos mensuales provenientes de estaciones limnimétricas/limnigráficas, supliendo la carencia de datos en el tiempo con su abundancia en el espacio y brindando así la posibilidad de agregar información proveniente de varias muestras, en una sola, asumiéndola como una región homogénea. Es decir, como una región que presenta una distribución de frecuencias idéntica excepto por un factor de escala específico para la zona de estudio; es así como se mejora la precisión en las estimaciones de las relaciones probabilísticas de los L-momentos, que describe las formas de las distribuciones de probabilidad.

De tal forma, que la metodología especificada en el documento, permite estimar las probabilidades asociadas a eventos de sequías [4] contribuyendo a los tomadores de decisión a tener mejores herramientas de apoyo para generar planes o estrategias de prevención y mitigación de manera más eficiente.

Es importante resaltar que, para obtener mayor precisión en los resultados se elaboraron mapas por periodo de retorno (5, 10, 20, 50 y 100 años) de la cuenca en mención, con la herramienta ArcGis.



## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

Regionalizar la magnitud de las sequías hidrológicas en la Cuenca del Río Bogotá mediante la aplicación del Método de L-Momentos.

### 2.2 Objetivos Específicos

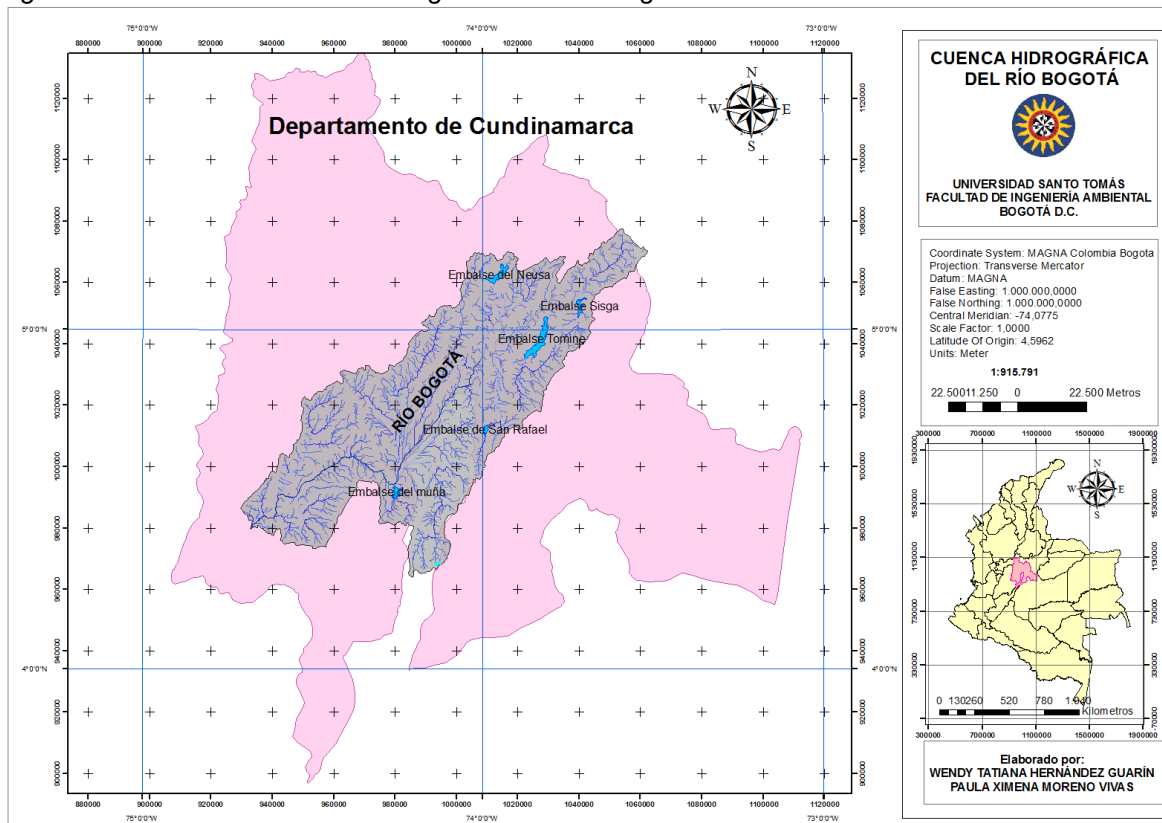
- Identificar y delimitar las regiones hidrológicamente homogéneas en la cuenca del Río Bogotá.
- Determinar la distribución de probabilidad que se ajusta mejor a las series de datos hidrológicos de las estaciones que conforman cada región homogénea.
- Calcular los cuantiles regionales asociados a diferentes periodos de retorno, teniendo en cuenta la distribución de probabilidad de mejor ajuste.
- Determinar la función cuantil para cada estación mediante la relación del índice de avenida (caudal medio anual) y los cuantiles regionales (expresados por la curva de crecimiento regional).
- Caracterizar la sequía hidrológica a partir de los cuantiles regionales que indican la magnitud o intensidad del evento en términos del déficit hídrico.
- Generar mapas que representen la magnitud de la sequía hidrológica para periodos de retorno de: 5, 10, 20, 50, 100 años.

### 3 MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Cuenca hidrográfica del Río Bogotá

La cuenca hidrográfica del río Bogotá está ubicada en el departamento de Cundinamarca y tiene una superficie total de 589.143 hectáreas que corresponden aproximadamente al 32% del total de la superficie departamental. Está compuesta por 45 municipios y el Distrito Capital. Limita al norte con el departamento de Boyacá, al sur con el departamento del Tolima, al occidente con las cuencas de los ríos Sumapaz, Magdalena, Negro, Minero, Suárez, Blanco, Gacheta y Macheta. Presenta una población total cerca de 7.800.000 habitantes que corresponde al 19% de la población del país, en donde la mayor concentración se ubica en la ciudad de Bogotá D.C. [2]

Figura 1. Localización Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá

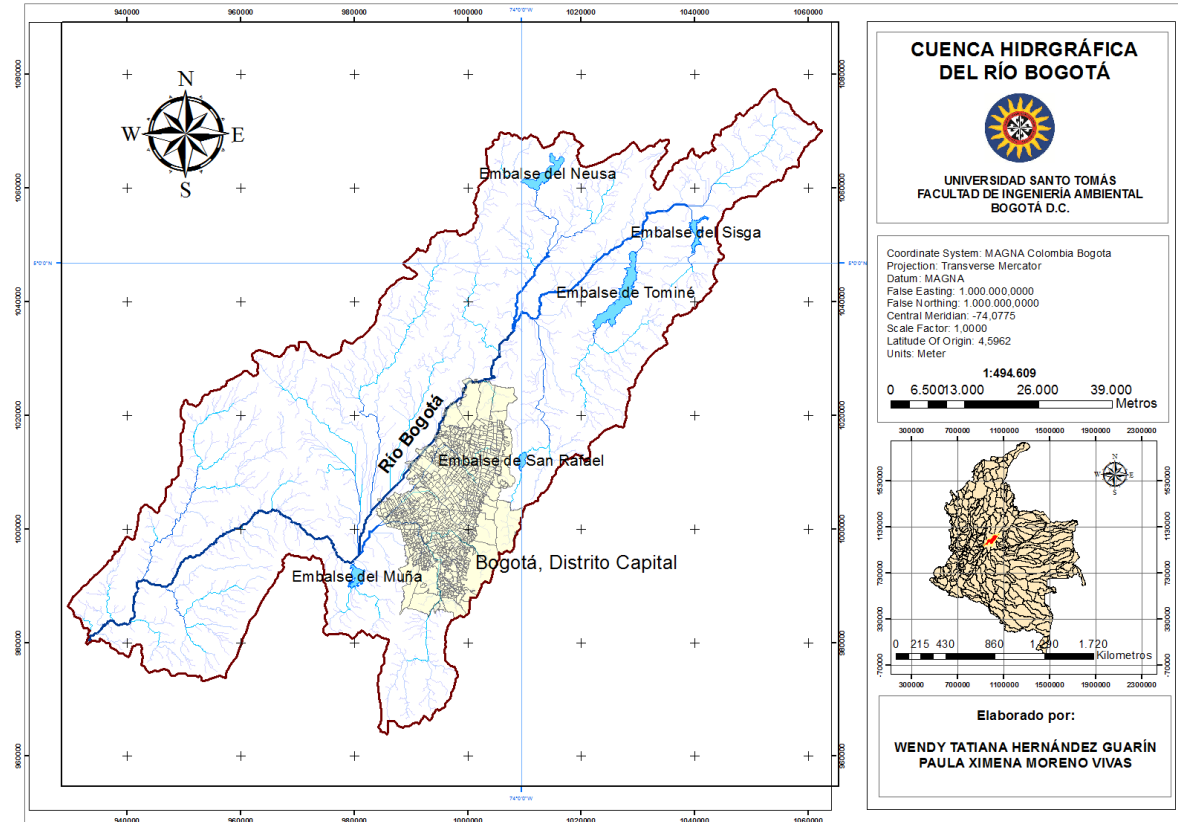


Fuente: Autores.

El río Bogotá nace en el páramo de Guacheneque en el municipio de Villapinzón al norte de Cundinamarca a una altura de 3.300 msnm. Desde allí, recorre 380 km hasta la ciudad de Girardot donde desemboca en el río Magdalena a 280 msnm.

Es la principal fuente de contaminación del río Magdalena, puesto que vierte en ella tóxicos como cadmio, cromo, mercurio, zinc, arsénico y plomo.

Figura 2. Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá



Fuente: Autores.

La zona comprendida por el páramo de Guacheneque, fue declarada como Área de Conservación por parte de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR. Esta zona ha sido objeto de compra de predios, con el propósito de garantizar la preservación del recurso hídrico.

La cuenca es alimentada por los ríos Sisga, Neusa, Tibitoc, Tejar, Negro, Teusacá, Frío, Chicú, Salitre, Fucha, Tunjuelito, Siecha, Balsillas, Calandaima y Apulo; quienes contribuyen con la contaminación del recurso por las cargas orgánicas descargadas a esta fuente. Adicionalmente, el sistema de regulación de la cuenca está compuesto por nueve embalses (capacidad total de 1275.6 Mm<sup>3</sup>) y un distrito de riego principal de nombre La Ramada [2].

En cuanto a los aspectos climáticos, existe un régimen de lluvias bimodal a excepción de la parte alta de la cuenca, lo que permite definir dos momentos en el año de mayor precipitación que requiere de proceso y construcción de infraestructuras para regulación hídrica, de forma tal, que se logre captar el agua

que genera el superávit en tiempos de pluviosidad y redistribuir y garantizar el recurso para época seca [3]. El área de la cuenca hidrográfica registra una precipitación promedio entre 400 y 2200 mm anuales, con un rango de temperatura que varía entre los 6 y 30 °C. La mayor parte de la cuenca presenta erosión ligera a moderada.

La cuenca hidrográfica del río Bogotá se divide en tres sectores delimitados por sus características morfológicas y fisiográficas: la Cuenca Alta, la Cuenca Media y la Cuenca Baja. En síntesis, sus características son:

*Tabla 1. Características generales de la Cuenca Alta, Media y Baja*

<b>Tramo</b>	Desde el nacimiento del Río Bogotá, en Villapinzón hasta el puente La Virgen en Cota.	Desde el puente La Virgen (Cota), hasta las compuertas Alicachín, en inmediaciones del embalse del Muña.	Desde el embalse del Muña hasta la desembocadura en el Río Magdalena.
<b>Longitud</b>	170 km	90 km	120 km
<b>Estructura hídrica</b>	El caudal del río es regulado por la presencia de dos embalses: El Embalse de Tominé y el Embalse de Sisga.	Recibe las aguas residuales del sistema de drenaje urbano de Bogotá y sus áreas periféricas.	Sobre la estación La Guaca (km 247), el Río Bogotá recibe la descarga de la cadena de generación hidroeléctrica Paraíso-Guaca que anteriormente había embalsado las aguas en el Muña.
<b>Caudal Medio</b>	El caudal medio en la estación de La Virgen es de 13.5 m <sup>3</sup> /s.	El aporte de esta cuenca (principalmente de aguas domésticas) es el más relevante con caudales medios de 37 m <sup>3</sup> /s.	En la desembocadura del río Bogotá se presentan caudales del orden de los 50 m <sup>3</sup> /s.
<b>Actividades económicas</b>	Agroindustria (sector floricultor), agropecuario (predomina el cultivo de papa), industria (cerveza, fertilizantes, cuero, lácteos, papel, etc.), urbanización, explotación minera.	Agroindustria (sector floricultor), agropecuario (cultivo de especies vegetales), industria (cerveza, fertilizantes, lácteos, papel, etc.), urbanización, explotación minera.	Urbanización, producción de energía.
<b>Uso principal del agua</b>	Potabilización y abastecimiento de la Ciudad de Bogotá mediante la Planta de Tratamiento Tibitoc.	Demanda de agua para el Distrito de Riego de la Ramada.	En las compuertas de Alicachín el agua del Río Bogotá se entuba para ser utilizada en la generación eléctrica en dos cadenas paralelas de generación.

*Fuente: Instituto de Estudios Urbanos [4].*

La **Cuenca Alta** está conformada por 18 municipios: Villapinzón, Chocontá, Suesca, Sesquilé, Gachancipá, Tocancipá, Zipaquirá, Cajicá, Sopo, Chía, Cota, Nemocón, La Calera, Cogua, Guatavita, Guasca, Tabio y Tenjo. La **Cuenca Media** la integran la ciudad de Bogotá, y 9 municipios: Funza, Mosquera, Soacha, Sibaté, Subachoque, El Rosal, Madrid, Facatativá y Bojacá. Finalmente, la **Cuenca Baja** está compuesta por 14 municipios: San Antonio del Tequendama, Tena, La Mesa, El Colegio, Anapoima, Apulo, Tocaima, Agua de Dios, Ricaurte, Girardot, Zipacón, Anolaima, Cachipay y Viotá.

### **3.2 Sequía**

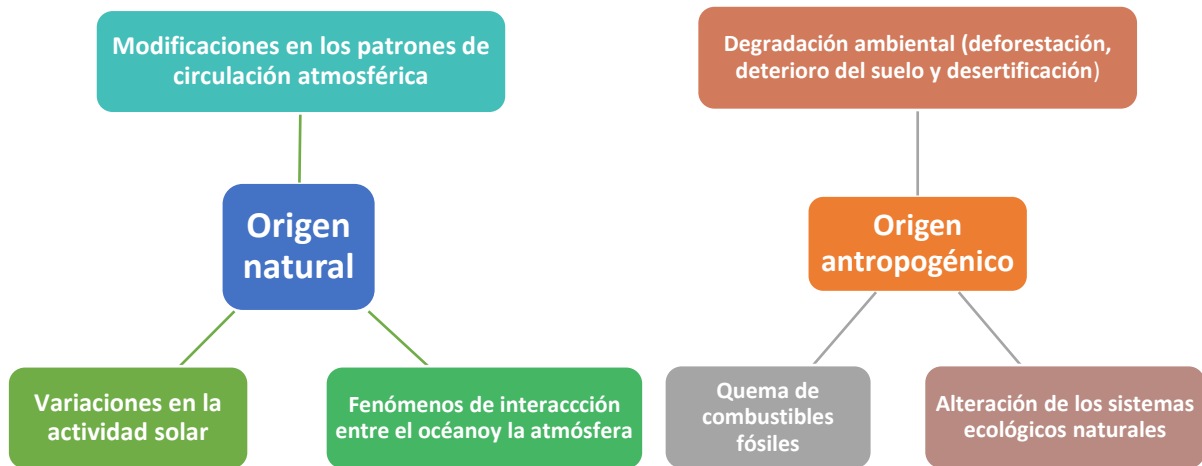
Existen numerosas definiciones de sequía obteniendo como común denominador la “escasez de precipitación”, con respecto a un comportamiento “normal” de la misma, considerando “comportamiento normal” a valores promedio de una serie de tiempo histórica de 30 años como mínimo. La sequía ocurre cuando se presenta un déficit significativo de agua, que se prolonga en el tiempo y extiende en el espacio.

La Organización Meteorológica Mundial, en su Vocabulario Meteorológico Internacional [5], define a la sequía como un período de tiempo con condiciones meteorológicas anormalmente secas, suficientemente prolongado como para que la falta de precipitación cause un grave desequilibrio hidrológico.

#### **3.2.1 Causas**

Comúnmente se diferencian dos orígenes principales para la ocurrencia de una sequía: causas de origen natural y causas de origen antropogénico. En el esquema a continuación se sintetizan ambos grupos:

Figura 3. Causas principales de un evento de sequía



Fuente: Autores

### 3.2.2 Tipos de sequía

Se distinguen cuatro tipos de sequía, de acuerdo a su origen y sus efectos: Meteorológica, Agrícola, Hidrológica (objeto de este estudio) y por último, Socioeconómica la cual se plantea en términos de suministro de agua y demanda por grupos humanos.

#### 3.2.2.1 Sequía meteorológica

La sequía meteorológica es definida usualmente comparando la precipitación del momento (días, meses e incluso años) de una zona específica con el registro histórico de la precipitación media para esa zona o región. Algunas definiciones de sequía meteorológica identifican periodos de sequía con base al número de días con una precipitación por debajo del umbral establecido [6].

#### 3.2.2.2 Sequía agrícola

La Sequía agrícola se presenta cuando la escasez de las precipitaciones afecta la agricultura, es decir que no hay suficiente humedad en el suelo para permitir el desarrollo de un determinado cultivo en cualquiera de sus fases de crecimiento; este tipo de sequías no sólo depende de las precipitaciones sino también de las características biológicas del cultivo y las propiedades del suelo [7]. Existen casos donde se manifiesta una sequía meteorológica en un lugar dado, pero si se

cuentan con suficientes niveles de humedad en el subsuelo para mantener los cultivos, no se llega a producir una sequía agrícola.

Asimismo, tiene lugar cuando hay periodos de baja precipitación, evapotranspiración actual y potencial altas, déficit de agua en el suelo, reducción del nivel de agua en los ríos y acuíferos, entre otros.

### 3.2.2.3 Sequía hidrológica

La sequía hidrológica se define como el período durante el cual los caudales son insuficientes para satisfacer los usos establecidos bajo un determinado sistema de gestión de agua y se diferencia de la agrícola, en que no se manifiesta inmediatamente desde el inicio de la escasez de la precipitación, es decir que tiene lugar meses después de que se presente la sequía meteorológica y la podemos observar en los volúmenes de aguas de los ríos, embalses, lagos y demás [7] . Entre sus impactos más relevantes se encuentra:

- Reducción o eliminación del suministro de agua.
- Deterioro de la calidad del agua.
- Restricción del agua para riego, lo cual perjudica los cultivos.
- Disminuye la generación de energía.
- Alteración de hábitats ribereños.
- Limitar las actividades recreativas.
- Afecta variedad de actividades económicas y sociales.

Aunque el clima es el principal contribuyente a la sequía hidrológica, otros factores como cambios en el uso del suelo, degradación del suelo y construcción de presas entre otros afectan las características hidrológicas de una zona.

### 3.2.3 Caracterización de la sequía

La caracterización de los eventos secos se basa en 3 componentes de los cuales derivan 7 parámetros: uno independiente (magnitud), cuatro del componente temporal (duración, frecuencia, velocidad de implantación y espaciado temporal), y dos del componente espacial (extensión y dispersión). Aquellos se definen como [7]:

1. **Magnitud:** Es el déficit medio de precipitación o caudal durante el periodo de duración del evento seco. Puede medirse como la anomalía (en porcentaje) o la diferencia (en valor absoluto) de precipitación o caudal para el periodo seleccionado.

2. **Duración:** Es el tiempo (número total de días, meses o años consecutivos) durante el cual la precipitación o el caudal total registrado son inferiores a la precipitación o el caudal medio de ese mismo periodo.
3. **Frecuencia:** Es el número de casos que se producen durante un periodo determinado. Puede medirse a través de la probabilidad empírica de que la precipitación o el caudal sean inferiores a la media, o del periodo de retorno del evento seco (intervalo medio de tiempo dentro del que puede esperarse que ocurra una sequía de determinada magnitud).
4. **Velocidad de implantación:** Es el tiempo transcurrido entre el momento de inicio del déficit de precipitación o caudal, y el momento en que ese déficit alcanza su valor máximo.
5. **Espaciamiento temporal:** Es el tiempo transcurrido entre diversos periodos secos, lo que nos proporciona una medida de la regularidad o aleatoriedad del fenómeno. Mediante este parámetro se obtiene una primera aproximación a la previsibilidad de la sequía.
6. **Extensión:** Es la superficie total en la que se registra déficit hídrico.
7. **Dispersión espacial:** Es la medida del grado de difusión o concentración de la anomalía de caudal o de precipitaciones.

Cada parámetro puede medirse de forma individual, por consiguiente, dado el alcance y la metodología del presente trabajo (ver apartado 4), se hallaron únicamente los parámetros: Magnitud, frecuencia, extensión y dispersión espacial.

### 3.3 Análisis de frecuencia

El análisis de frecuencias es un procedimiento que define la frecuencia o probabilidad de ocurrencia de eventos extremos a diferentes periodos de retorno a partir de la aplicación de funciones en distribución de probabilidad [8].

La relación resultante entre las magnitudes de los eventos extremos y sus correspondientes periodos de retorno, se le conoce como curva de frecuencia y es de gran utilidad en el diseño en ingeniería [9].

Chow [10] citado por [9] afirma que el análisis de frecuencia de datos hidrológicos inicia con el tratamiento de datos brutos, para finalmente determinar la frecuencia o probabilidad de un valor del diseño en ingeniería.

El análisis de frecuencia local o regional, considera tres supuestos esenciales según Naranjo [9]:

1. Todas las observaciones provienen de una misma población de acuerdo a un análisis de homogeneidad.
2. Los procesos naturales son estacionarios con respecto al tiempo.



3. Los parámetros de la población son estimados a partir de la muestra.

En este estudio a fin de verificar la estacionaridad de la serie se realiza la aplicación del test de Dickey Fuller, así mismo se demuestra que todos los valores de la muestra provienen estadísticamente de una población a través de una prueba de homogeneidad a partir de los test Normal Estándar (SNHT), test Pettitt y el test de Buishand.

El análisis de frecuencia a partir de datos ambientales (caudales, precipitación, temperatura, uso de suelo, sustancias tóxicas, material particulado, etc.) tiene origen en distintos sitios o estaciones que deben representar fidedignamente los valores de la variable medida, pero donde usualmente se encuentran dos tipos de error particularmente importantes:

El primer error se asocia a que alguno(s) valor(es) de las muestras de datos sean incorrectos a partir del registro o traspaso incorrecto de valores en las bases de datos, generando dudas sobre cualquier análisis de frecuencia [11].

El segundo error se asocia a que las condiciones en que los datos son obtenidos cambien a través del tiempo. Los instrumentos de medición pueden ser trasladados a diferentes locaciones. También estos pueden descalabrarse o sufrir algún tipo de falla, afectando directamente las mediciones [11].

### **3.3.1 Selección del modelo probabilístico**

Es importante destacar que no existe una base teórica sólida para evidenciar la elección de una función específica de distribución de probabilidades, ni un procedimiento teórico para definir un modelo probabilístico como el mejor en un análisis de frecuencia en contraste con diferentes modelos probabilísticos. Por lo anterior habitualmente se examina la coherencia entre diferentes distribuciones para seleccionar entre estas a una, teniendo como referencia el ajuste de datos existentes, disponibilidad de cómputo o cálculo y la consistencia con distintos tamaños de muestra [12] citado por [9].

La competencia de un modelo probabilístico de adaptabilidad en datos hidrológicos se relaciona directamente con la flexibilidad y forma de la función de distribución de probabilidades. Así mismo, mientras más parámetros contenga un modelo, en mayor medida será versátil su función de distribución de probabilidades, adaptándose a los datos. Los criterios de alta relevancia en la determinación de un modelo de distribución de probabilidades según el análisis de frecuencia tiene origen en la solides con la que se detalla el fenómeno y como este aporta la máxima información de los datos [13] citado por [9].

### 3.3.2 Cuantiles y período de retorno

Los cuantiles se conocen como los valores de la variables asociados a una probabilidad de excedencia  $P(X \geq x)$  o no excedencia  $P(X \leq x)$ , por lo que convergen diferentes valores de la variable a diferentes probabilidades de que se exceda o no un determinado valor de la variable [14] citado por [9].

El periodo de retorno es una forma de expresar las probabilidades en relación al periodo para el cual en promedio la variable se igualada o excedida. El período de retorno procede a concluir que existe una cantidad determinada de años en medio de los eventos de tales magnitudes, teniendo en cuenta que la probabilidad de cualquier período sigue siendo la misma [14] citado por [9]

La expresión para calcular el periodo de retorno es la siguiente [14]:

$$T = \frac{1}{P} \quad (1)$$

$T$ = Periodo de retorno en años.

$P$ = Probabilidad de excedencia.

### 3.4 Análisis regional de frecuencias

El análisis probabilístico asociado a eventos extremos de carácter regional facilita la estimación de estos eventos en cualquier sitio dentro de una zona de estudio, considerada como una región homogénea, desde el punto de vista de la función de distribución de probabilidad de una variable aleatoria  $X$  a analizar, todos los sitios o puntos, dentro de dicha región, presentan la misma distribución de probabilidad y la única diferencia entre los sitios en su función de cuantiles está dada por un factor de escala [9].

Es decir sea  $x$  la magnitud del evento sucedido en un momento y lugar dado, considerando a  $x$  como una cantidad aleatoria (variable aleatoria), con capacidad para adoptar cualquier valor entre cero y el infinito. La cantidad base del análisis de frecuencia estadística es la distribución de frecuencias, la cual explica la frecuencia de los valores de  $Q$ . Denotemos por  $F(x)$  la probabilidad de que el valor actual de  $Q$  sea menor o igual a un determinado valor de  $x$  [9]:

$$F(x) = P(Q \leq x) \quad (2)$$

$F(x)$  es la función de distribución acumulada de la distribución de frecuencia. Su función inversa  $x(F)$  es la función cuantil de la distribución de frecuencia, declara la magnitud de un evento en términos de su probabilidad de excedencia  $F$ . El

cuantil  $Q_T$  del período de retorno  $T$ , es un evento de extrema magnitud teniendo una probabilidad  $\frac{1}{T}$  de ser excedido por cualquier evento único [9].

Para eventos extremos de baja magnitud que se ubican en la parte baja de la curva de la distribución de frecuencia, las expresiones de  $Q_T$  son las siguientes:

$$Q_T = x\left(\frac{1}{T}\right) \quad (3)$$

$$F(Q_T) = \frac{1}{T} \quad (4)$$

El fin del análisis de frecuencia es adquirir estimaciones de cuantiles  $Q_T$  y probabilidades relacionadas con diferentes periodos de retorno, por lo que para ser útil una estimación debe estar próxima del verdadero cuantil y tener origen en una evaluación de precisión [9].

Los datos de cada sitio de interés, aportan una muestra de las actuaciones de  $Q$ . El tamaño de la muestra es limitadamente suficiente para permitir la fiabilidad de la estimación de los cuantiles. Con frecuencia se considera que el cuantil de período de retorno  $T$  puede ser estimado con veracidad de un registro de datos de longitud  $n$  sólo si  $T \leq n$ ; sin embargo, en abundantes aplicaciones de ingeniería con origen en datos anuales esta condición pocas veces se satisface, donde típicamente  $n < 50$  y  $T$  entre 50 a 1000 años. A fin de resolver el problema en diversos enfoques se han ideado el uso de fuentes de datos alternativos o adicionales [9].

Un propósito clave del análisis regional de frecuencia es integrar el aumento de los datos para el sitio de interés a través del uso de datos de otros sitios, considerando distribuciones de frecuencia similares a la del sitio de interés; excepto por un factor de escala que para el caso de este trabajo se tomara la media de la variable en estudio que particulariza a cada sitio de medición [9].

### 3.4.1 Método L-momentos

Los L-momentos o momentos lineales, son un sistema alternativo a los métodos tradicionales de los momentos convencionales que caracterizan las formas de las distribuciones de probabilidad y determinan los parámetros de distribución [9]. Según Hosking y Wallis citado por [9] los L-momentos se consideran combinaciones lineales de los momentos ponderados probabilísticos (MPP).

Hosking y Wallis citado por [9] define el estimador de *MPP* a partir de una muestra con variable aleatoria  $X$  de tamaño  $n$ , con elementos en orden ascendente:  $X_{1:n} < X_{2:n} < \dots < X_{n:n}$  es:

$$\beta_{r=n-1} \left( \frac{n-1}{r} \right)^{-1} \sum_{j=r+1}^n \left( \frac{j-1}{r} \right) x_{j:n} \quad (5)$$

Donde  $X_{j:n}$  es el  $j$ -ésimo elemento en orden ascendente. Desarrollando los primeros  $MPP$  se tiene:

$$\beta_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X(j:n) \quad (6)$$

$$\beta_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N-1} \left[ \frac{N-j}{N(N-1)} \right] X(j:n) \quad (7)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N-2} \left[ \frac{(N-j)(N-j-1)}{N(N-1)(N-2)} \right] X(j:n) \quad (8)$$

$$\beta_3 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N-3} \left[ \frac{(N-j)(N-j-1)(N-j-2)}{N(N-1)(N-2)(N-3)} \right] X(j:n) \quad (9)$$

A partir de los  $MPP$ ; los primeros cuatro  $L$  - momentos  $l_r$ , están dados por:

$$l_1 = \beta_0 \quad (10)$$

$$l_2 = 2\beta_1 - \beta_0 \quad (11)$$

$$l_3 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0 \quad (12)$$

$$l_4 = 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0 \quad (13)$$

El momento lineal de primer orden  $l_1$  es el parámetro de localización o media de la muestra; el de segundo orden  $l_2$  mide la escala o la variación, determinan el grado de dispersión de los datos; el momento de tercer orden  $l_3$  hace referencia a su asimetría; y el de cuarto orden  $l_4$  indica la kurtosis de la muestra [9].

Los  $L$ -momentos de la muestra que son independientes de las unidades de medición, llamados  $L$ -momentos ratios o cocientes Hosking y Wallis citado por [9] se definen dividiendo aquellos de mayor orden por la medida de escala  $l_2$ :

$$t = \frac{l_2}{l_1} = L - C_v \text{ donde } 0 \leq t \leq 1 \quad (14)$$

$$t_3 = \frac{l_3}{l_2} = L - C_s \text{ donde } -1 \leq t_3 \leq 1 \quad (15)$$

$$t_4 = \frac{l_4}{l_2} = L - C_k \text{ donde } -1 \leq t_4 \leq 1 \quad (16)$$

Donde  $t$  es L-coeficiente de variación ( $L-C_v$ ),  $t_3$  es L-coeficiente de asimetría ( $L-C_s$ ), y  $t_4$  es L-coeficiente de kurtosis ( $L-C_k$ ).

Los momentos lineales de la muestra ( $l_1, l_2, t, t_3$  y  $t_4$ ) vinculados con los momentos lineales de la función de distribución ( $\lambda_1, \lambda_2, \tau, \tau_3, \tau_4$ ) determinan los parámetros de las distribuciones (véase Anexo 1).

Los L-momentos se caracterizan por sus capacidades a la hora de lograr una segregación entre diferentes distribuciones, asegurando una mayor robustez en presencia de valores atípicos y menor sensibilidad a la asimetría u observaciones extremas que los momentos convencionales [15].

### 3.4.2 Etapas del Análisis Regional de Frecuencia basado en los L-Momentos

El procedimiento para el uso del análisis regional de frecuencias con referencia en los *L-Momentos* considera cuatro pasos [16] citado por [9], pero en el presente estudio se consideran 5 etapas a fin de generar mapas representando la magnitud de la sequía hidrológica para periodos de retorno: 5, 10, 20, 50 y 100 años.

Los pasos son los siguientes:

1. Filtrado de datos aplicando medidas de discordancia.
2. Identificación de regiones homogéneas.
3. Determinación de la distribución de frecuencia.
4. Estimación de los cuantiles de frecuencia.
5. Generación de mapas de los eventos extremos.

#### 3.4.2.1 Filtrado de datos usando medidas de discordancia

La medida de discordancia  $D_i$ , define la existencia de posibles estaciones “discordantes” dentro de un grupo de estaciones que conforman una región. Los cambios de tendencias, así como los valores anómalos (outliers) y demás errores muestrales de las series de observaciones se reflejan en sus respectivos L-momentos [17].

$D_i$  es un estadístico que coteja los ratios de los L-momentos muestrales de cada una de las estaciones que conforman la región, con los correspondientes valores medios de dicha región. Una estación  $i$  limitada dentro de la región se considera

discordante si su valor  $D_i$  supera un determinado valor crítico establecido en función del número de estaciones de la región [17].

Hosking y Wallis [16] citado por [9], definen la medida de discordancia para el sitio  $i$  como:

$$D_i = \frac{1}{3} N(u_i - \bar{u})^T A^{-1} (u_i - \bar{u}) \quad (17)$$

Donde

$$u_i = [t^{(i)} \ t_3^{(i)} \ t_4^{(i)}]^T \quad (18)$$

Vector que contiene los valores de los ratios  $L$  – momentos  $t, t_3$  y  $t_4$  para la estación  $i$ : el superíndice  $T$  indica la transposición de un vector. La media del grupo (sin ponderar) es:

$$\bar{u} = N^{-1} \sum_{i=1}^N u_i \quad (19)$$

Y la matriz de sumas de cuadrados y productos cruzados se define como:

$$A = \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})(u_i - \bar{u})^T \quad (20)$$

Hosking y Wallis [17] citado por [9] determinan que una estación es considerada discordante si su valor  $D_i$  supera el valor crítico determinado en función del número de estaciones en la región, como se muestra en la Tabla 2:

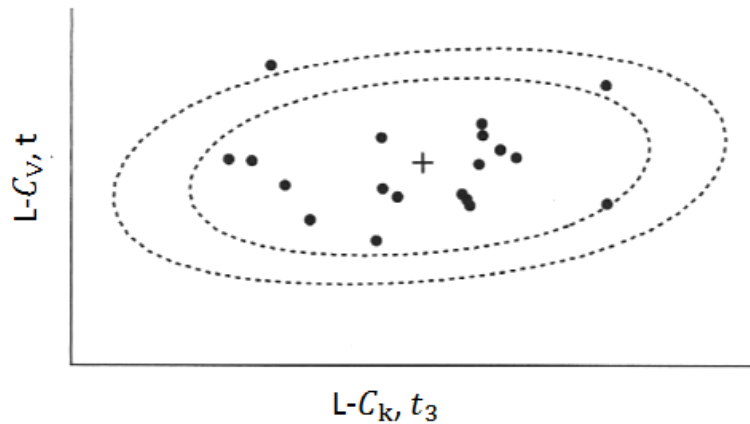
Tabla 2. Valores críticos del indicador de discordancia  $D_i$

Número de estaciones en la región	Valor crítico
5	1,333
6	1,648
7	1,917
8	2,140
9	2,329
10	2,491
11	2,632
12	2,757
13	2,869
14	2,971
≥ 15	3,000

Fuente: [17]

Teniendo en cuenta las razones muestrales de los L-momentos ( $L-C_V$ ,  $L-C_S$  o  $L-C_K$ ) de una estación como un punto en el espacio, un grupo de estaciones se inclina a formar una nube de puntos. Se estima punto (estación) discordante si se encuentra altamente distante del centro de la nube de puntos [16] citado por [9].

Figura 4. Diagrama representativo del indicador de discordancia basado en los L-momentos:  $L-C_V$  y  $L-C_K$



Fuente: [16]

En la Figura 5 se observa un diagrama con referencia en  $L-C_V$  y  $L-C_K$ . El centro de la nube de puntos identificados con el signo +, está formado por las coordenadas de los promedios de  $L-C_V$  y  $L-C_K$ . En adición se representan dos elipses concéntricas, como regiones críticas de discordancia dadas por la matriz de covarianza muestral de los ratios muestrales en los L-momentos de las estaciones. Los puntos (estaciones) discordantes se encuentran ubicados fuera de la elipse externa. [9].

### 3.4.2.2 Identificación de regiones homogéneas

Hosking y Wallis [17] citado por [9] presenta la medida de heterogeneidad para estimar el grado de heterogeneidad en un grupo de estaciones y examinar cuando pueden ser consideradas en su conjunto como una región homogénea.

Hosking y Wallis citado por [11] dice que la medida de la heterogeneidad compara la dispersión observada y simulada de L-momentos para  $N$  estaciones considerados. Para este propósito la utiliza la simulación de Monte Carlo, de la cual se realiza mediante la distribución Kappa de cuatro parámetros definidos por:

$$f(x) = \alpha^{-1} [1 - k(x - \xi)/\alpha]^{1/k-1} [F(x)]^{1-h} \quad (21)$$

$\xi$  = Parámetro de localización.

$\alpha$  = Parámetro de escala.

$k$  y  $h$  = Parámetros de forma.

La finalidad para aplicar la distribución de Kappa, considerada distribución generalizada que genera otras distribuciones como casos especiales se tiene la logística generalizada, general de valores extremos, y general de Pareto, por lo que tiene la capacidad de integrar la mayor parte de las distribuciones empleadas en estudios medioambientales [9].

Los cuatro parámetros de la distribución Kappa son adaptados a los ratios medios regionales  $1, t^R, t_3^R$  y  $t_4^R$  para simular un número  $N_{sim}$  de realizaciones de una región con  $N$  estaciones como la original. A fin de contrastar los valores de dispersión observados con los simulados, se considera el estadístico apropiado como la medida de heterogeneidad,  $H_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ), definido como [18]:

$$H_j = \frac{(V_j - \mu_{V_j})}{\sigma_{V_j}} \quad (22)$$

Donde por simulación se calcula  $V_j$ , determinando la media  $\mu_{V_j}$ , y la desviación estándar  $\sigma_{V_j}$ , de los  $N_{sim}$  valores de  $V_j$  Siendo:

$V_1$ , como la desviación estándar ponderada observada de los  $t$  valores:

$$V_1 = \left[ \sum_{i=1}^N n_i \frac{(t^i - t^R)^2}{\sum_{i=1}^N n_i} \right]^{1/2} \quad (23)$$

$V_2$ , como la distancia media observada de  $\frac{t}{t_3}$ :

$$V_2 = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \left[ (t^{(i)} - t^R)^2 + (t_3^{(i)} - t_3^R)^2 \right]^{1/2}}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (24)$$

$V_3$ , como la distancia media observada de  $\frac{t_3}{t_4}$ :

$$V_3 = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \left[ (t_3^{(i)} - t_3^R)^2 + (t_4^{(i)} - t_4^R)^2 \right]^{1/2}}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (25)$$

Donde la región propuesta tiene  $N$  estaciones, cada estación  $i$  tiene la longitud de registro  $n_i$  y los ratios de L-momento  $t^{(i)}, t_3^{(i)}$  y  $t_4^{(i)}, t^R, t_3^R$  y  $t_4^R$  son los ratios



medios regionales de  $L-C_v$ ,  $L-C_s$  y  $L-C_k$ , ponderados proporcionalmente en función de la longitud de registro [9]:

$$t^R = \frac{\sum_{i=1}^N n_i t^{(i)}}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (26)$$

La región determinada heterogénea atendiendo a si el valor de  $H_j$  es suficientemente elevado. Hosking y Wallis [17] citado por [9] sugieren considerarla como “aceptablemente homogénea” si  $H_j < 1$ , “posiblemente heterogénea” si  $1 \leq H_j < 2$ , y “definitivamente heterogénea” si  $H_j \geq 2$ .

La aplicación del estadístico  $H$  con un número mayor de repeticiones establece una alternativa de mayor fiabilidad y menor subjetividad. Se declara oportuno un valor  $M$  de 500 simulaciones, para el que se requiere de valores mayores en caso de que  $H_j$  sea cercano a los límites 1 y 2. [9].

La heterogeneidad en una región se considera con frecuencia causa de la presencia de un pequeño número de estaciones con valores atípicos de la variable medida. Por lo anterior se deben evaluar las características propias en las zonas de ubicación de las estaciones con valores atípicos, teniendo la capacidad de reasignar las estaciones con valores atípicos a una región donde los mismos sean normales. Sin embargo, con frecuencia no existen explicaciones físicas del por qué algunas estaciones con valores atípicos debieran ser diferentes al resto de las estaciones de la región, pero se considera la ocurrencia de eventos climáticos específicos en algunas zonas, por lo que se recomienda el uso del argumento físico sobre el estadístico y mantener la(s) estación(es) en la región según las características físicas Hosking y Wallis [17] citado por [11].

### 3.4.2.3 Selección de la distribución de probabilidad

Teniendo definidas las regiones, se continúa con la determinación de la función de distribución acorde a cada una de ellas.

Para el presente estudio se valoran siete distribuciones caracterizadas por tres o cuatro parámetros en un análisis regional, permitiendo el ajuste en la observación de varias estaciones, incluyendo en sus casos particulares las distribuciones de mayor aplicación en el estudio de variables hidroclimáticas a saber:

Logística generalizada (GLO), caso especial de la distribución de Kappa con el parámetro de forma  $h = -1$ , Generalized Extreme Value (GEV), caso especial de la distribución de Kappa con el parámetro de forma  $h = 0$ , Normal Generalizado (GNO), Gaucho, caso especial de distribución de Kappa con parámetro de forma  $h$

= +0,5, Pareto generalizado (GPA), caso especial de la distribución de Kappa con el parámetro de forma  $h = +1$ , Pearson 3 (P3), Distribución Kappa (KAP) [19].

En la evaluación de la mejor distribución de probabilidad se encuentran diferentes métodos a fin de examinar la bondad de ajuste de una distribución en relación a los datos de una muestra, para el caso de los *L-Momentos* existe un estadígrafo con referencia en la dispersión de ( $L-C_s$  y  $L-C_k$ ), el cual se relaciona directamente con diferentes distribuciones denominadas  $Z^{DIST}$  [9].

La bondad del ajuste con referencia en el  $Z^{DIST}$  establece si la medida de  $L-C_s$  y  $L-C_k$  simulados de una determinada región homogénea se adapta oportunamente a  $L-C_s$  y  $L-C_k$  de los datos analizados. Es así como según lo propuesto por [16] citado por [9], la expresión del estadígrafo  $Z$  es la siguiente:

$$Z^{DIST} = \frac{(T4^{DIST} - t4 + B4)}{\sigma4} \quad (27)$$

$$\sigma4 = \left[ (Nsim - 1)^{-1} \left\{ \sum_{n=1}^{Nsim} (t4^n - t4^R)^2 - Nsim B4^2 \right\} \right]^{1/2} \quad (28)$$

$$B4 = Nsim^{-1} \sum_{m=1}^{Nsim} (t4^m - t4^R) \quad (29)$$

En donde:

$\sigma4$  Desviación estándar de L-curtosis regional

$B4$  L-Curtosis regional

$T4^{DIST}$  L-Curtosis de la distribución

$t4$  L-Curtosis regional

Las expresiones afines a las distribuciones tienen origen en la simulación para cada una de las siete distribuciones que se van a ser aplicadas, motivo por lo que el ajuste de una determinada distribución es adecuado si  $Z^{DIST}$  es suficientemente cercano a cero, siendo un valor razonable para este criterio  $|Z^{DIST}| \leq 1.64$  lo cual corresponde a la aceptación de la distribución, planteado la

### 3.4.2.4 Estimación de probabilidades y cuantiles

El algoritmo regional de L-momentos descrito por Hosking y Wallis [17] citado por [6] es aplicado para estimar la distribución de frecuencias regionales, que se define:

Dada la región de  $N$  estaciones, cada estación  $i$  con longitud muestral  $n_i$ , media muestral  $l_1^{(i)}$ , y ratios de L-momentos  $t^{(i)}, t_3^{(i)}, t_4^{(i)}$  ..., donde  $t^{(R)}, t_3^{(R)}, t_4^{(R)}$  ..., son los ratios medios regionales de L-momentos, ponderados proporcionalmente en función de la longitud de la muestra:

$$t_r^R = \frac{\sum_{i=1}^N n_i t^{(i)}}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (30)$$

El valor de la media regional  $l_1^R$  es 1, es decir  $l_1^R = 1$

El método regional de L-momentos consiste en ajustar la distribución mediante sus ecuaciones de L-momentos ratios  $\lambda_1, t^{(i)}, t_3^{(i)}, t_4^{(i)}$  a las medias ponderadas de los ratios regionales de L-momentos muestrales  $l_1^R, t^{(R)}, t_3^{(R)}, t_4^{(R)}$  ..., calculados con la ecuación  $t_r^R$ .

Las estimaciones de los cuantiles de una variable aleatoria  $X$ , para un sitio en específico que se encuentra en función de la curva de crecimiento regional y de un factor de escala es:

$$\hat{Q}_i(F) = \hat{\mu}_i \hat{q}(F) \quad (31)$$

Es decir, la función de cuantiles del sitio de interés ( $Q_i(F)$ ), se determina a partir de la función de cuantiles regional adimensional (curva de crecimiento regional) estimada mediante el análisis regional de frecuencias y multiplicada por un factor de escala, en relación con el supuesto fundamental del ARF [9].

Cabe resaltar que la precisión de los cantiles estimados se encuentra condicionadas por el número de repeticiones  $M$  de la simulación. Valores de  $M=100$  pueden resultar suficientes, aunque Hosking y Wallis (1997) recomiendan  $M=500$  o incluso  $M=10000$  para un mayor rigor en la evaluación de la elección de la distribución que efectúa estimaciones más robustas para periodos de retorno extremos [20].

### 3.4.3 Método del índice de avenida

Hosking y Wallis citado por [11] A partir de datos disponibles en una región con  $N$  estaciones, cada estación  $i$  con un tamaño muestral  $n_i$  y los datos en cada estación  $i$  es  $Q_{ij}$ ,  $j = 1, \dots, n_i$  si  $Q_i(F)$ ,  $0 < F < 1$ , es la función cuantil de la distribución de frecuencia en la estación  $i$ . La clave del procedimiento del índice de avenida consiste en la formación de la región homogénea, es decir que la distribuciones de frecuencia de las  $N$  estaciones son idénticas excepto por un factor de escala específico de cada estación denominado índice de avenida. Entonces se define:

$$Q_i(F) = \mu_i q(F), \quad i = 1, \dots, N. \quad (32)$$

Donde  $\mu_i$  es el índice de avenida, que toma el valor de la media de la distribución de frecuencia en la estación  $i$  considerada; y  $q(F)$ , es la curva de crecimiento regional o la función cuantil adimensional común para todas las estaciones. La función cuantil de la distribución de frecuencia regional es la distribución común para  $Q_{ij}/\mu_i$ . El índice de avenida se estima naturalmente por  $\mu_i = \bar{Q}_i$ , que es la media muestral de las observaciones en la estación  $i$ .

Los datos adimensionales se reajustan a  $q_{ij} = Q_{ij}/\hat{\mu}_i$ ,  $j = 1, \dots, n_i$ ;  $i = 1, \dots, N$ , que son la base para estimar la curva de crecimiento regional  $q(F)$ ,  $0 < F < 1$ .

#### 3.4.3.1 Generación de mapas

El método de ARF basado en L-momentos, presenta como ventaja la facilidad en la implementación del mapeo espacial de los cuantiles, probabilidades o periodos de retorno, declarando los sitios medidos y no medidos; a través de varios ejemplos de aplicación y extendiéndose significativamente en las capacidades vinculadas al procedimiento, lo que resulta en un análisis probabilístico robusto y productos de gran valor para la toma de decisiones [18].

De acuerdo al tipo de información obtenida de un análisis regional de frecuencias con referencia en L-momentos, existen tres tipos de productos [18] :

1. Un *mapa de probabilidades*, como representación de un medio cartográfico oportuno de la probabilidad de ocurrencia de un evento especificado.
2. Un *mapa de cuantiles*, como representación de la magnitud de un evento asociado en una determinada probabilidad de ocurrencia.
3. Un *mapa de períodos de retorno*, como representación del periodo de frecuencia medio para un evento con determinada magnitud.

La técnica de interpolación aplicada a la elaboración de los mapas de sequía hidrológica del presente estudio involucra la ponderación de la distancia inversa (IDW), empleada cuando los puntos de datos se presentan de forma dispersa, pero con suficiente densidad para representar variaciones locales. Sin embargo, fundamentalmente una media ponderada es objeto y, por tanto, el resultado se encuentra involucrado en el rango de variación de los datos [21].

$$\hat{z}_j = \sum_{i=1}^n K_{ij} * z_i \quad (33)$$

Donde  $\hat{z}_j$  se conoce como el valor estimado para el punto  $j$ ;  $n$  es el número de puntos usados en la interpolación;  $z_i$  el valor en el punto  $i$ -ésimo y  $k_{ij}$  el peso vinculado al dato  $i$  en el cálculo del nodo  $j$ . Los pesos  $k$  varían entre 0 y 1 para cada dato y la suma total de ellos representa la unidad [21].

En la determinación de una función de proporcionalidad entre el peso y la distancia, la fórmula general es:

$$\hat{z}_j = \sum_i \frac{z_i}{d_{ij}^b} / \sum_i \frac{1}{d_{ij}^b} \quad (34)$$

Donde  $K_{ij} = \frac{1}{d_{ij}^b}$  y  $b$  son exponentes de ponderación, definiendo la forma en la que el peso disminuye con la distancia [21].

## 4 METODOLOGIA

En primer lugar, cabe aclarar que en el trabajo actual se excluyó el hecho de que la Cuenca del río Bogotá es regulada por 9 embalses, dado que no fue posible obtener dentro del tiempo considerado, la información referente a los volúmenes de operación de dichos embalses.

Los registros históricos de caudales mínimos mensuales se solicitaron al IDEAM, la CAR (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca) y la EAAB (Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá). En total se obtuvieron 228 estaciones (limnigráficas / limnimétricas): 150 proporcionadas por el IDEAM, 61 por la CAR y 17 por la EAAB.

Para la realización de este trabajo se utilizaron paquetes y herramientas informáticas para facilitar el procesamiento y análisis de los datos, entre ellas se encuentra: Python para completar datos faltantes; EViews para el análisis estadístico; L-RAP para el Análisis Regional de Frecuencia; y ArcGIS para el mapeo de la regionalización de la sequía hidrológica.

Cabe añadir que, para la obtención de los mapas como producto final del proyecto fue necesario convertir los caudales ( $m^3/s$ ) a lámina de agua/escorrentía (mm) para que al momento de calcular los cuantiles y aplicar el método de interpolación IDW, el resultado no pierda confiabilidad y no haya sido distorsionado por como opera el método de interpolación. La ecuación utilizada para la transformación de los caudales ( $m^3/s$ ) a lámina de agua (mm) es:

$$Q (mm) = \frac{Q_{min} \left( \frac{m^3}{s} \right) * \frac{1000 L}{1 m^3} * \frac{2'592.000 s}{1 mes}}{\text{Área} (m^2)} \quad (35)$$

$$\left[ \frac{L}{m^2} \right] = [mm]$$

Donde

$Q_{mín} (m^3/s)$  = Caudal mínimo en determinado mes y año.

$\text{Área} (m^2)$  = Área de drenaje o Área aferente a la ubicación de la estación.

A continuación se detallan las etapas implementadas para el desarrollo del proyecto:

#### **4.1 Etapa 1: Revisión y control de calidad de los datos:**

Para llevar a cabo un estudio hidrológico es de vital importancia disponer de información confiable, puesto que el error, la presencia o ausencia de un dato en particular puede repercutir considerablemente en las estimaciones basadas en funciones de distribución de probabilidad. Por tal motivo, Arbeláez y Castro [22] sugieren que para un estudio de probabilidades, se debe contar con una muestra mayor a 30 datos (es decir, 30 años de registro mínimo) para representar convenientemente la población. De esto depende la representatividad, calidad, extensión y consistencia de los datos que permitan la predicción de eventos futuros.

Dicho lo anterior, se consideraron los siguientes criterios para determinar las estaciones a utilizar en el Análisis Regional de Frecuencias:

- Las series de tiempo hidrológicas no deben superar el 30% de datos faltantes en su registro.
- Dado que varias estaciones presentaban registros de caudal mínimo menores de 30 años, se decidió limitar el total de las estaciones con un registro mínimo de 24 años (1991-2014), con el fin de trabajar con el mayor número de estaciones posibles para obtener una confiabilidad mayor frente al análisis probabilístico posterior y del mismo modo, garantizar la estabilidad en la media y la varianza de las series de tiempo.

Una vez definidas las estaciones aptas para el estudio se procedió a tratar las series de tiempo que poseían datos faltantes, utilizando la interpolación lineal, método conveniente para crear una función basada en los puntos de datos fijos que pueden ser evaluados en cualquier lugar dentro del dominio definido por los datos dados.

Posteriormente, se hallaron los estadísticos descriptivos más relevantes para definir el comportamiento de la variable en estudio y se aplicaron las pruebas de homogeneidad y estacionariedad para identificar si las series de tiempo presentan tendencias o cambios en la media.

Existen numerosas pruebas estadísticas para verificar que las series de datos sean homogéneas y no posean tendencias o inconsistencias a causa de factores externos que podrían arrojar algún tipo de sesgo a los análisis. En el presente estudio se han utilizado las siguientes pruebas: Prueba de Homogeneidad Normal Estándar (SNHT por sus siglas en inglés) desarrollada por Alexandersson (1986), prueba desarrollada por Pettitt (1979) para detectar un único punto de cambio y prueba de Buishand (1982) para detectar cambios en la media; el primero es uno de los métodos utilizados con mayor frecuencia a la vez que tiene una aceptación considerable por climatólogos y los dos últimos son pruebas recomendadas por la

Organización Meteorológica Mundial (OMM). Por ende, para decidir si las series temporales son homogéneas, deben cumplir el test en dos o más de las pruebas mencionadas.

La **Prueba de Homogeneidad Normal Estándar (SNHT)** es capaz de ubicar el periodo donde el cambio en la media es más probable. Un valor  $T(d)$  compara el promedio de los primeros  $d$  años registrados con los últimos  $(n - d)$ , este valor se obtiene con la expresión [23]:

$$T_d = d^{-2}z_1 + (n - d)^{-2}z_2 \quad (36)$$

Para  $d = 1, 2, \dots, n$ .

Donde:

$$\bar{z}_1 = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^d \frac{(y_i - \bar{y})}{s} \quad (37)$$

$$\bar{z}_2 = \frac{1}{n} - d \sum_{i=1}^d \frac{(y_i - \bar{y})}{s} \quad (38)$$

Un valor alto de  $T$  en un año  $d$  indica una variación “brusca”. El estadístico  $T$  se define como:

$$T_0 = \max_{1 \leq d \leq n} T(d) \quad (39)$$

**Pettitt** es una prueba no paramétrica que se basa en el orden de rangos de los valores  $y_i$ . El estadístico se define como [23]:

$$X_d = 2 \sum_{i=1}^d r_i - d(n + 1) \quad (40)$$

Para  $d = 1, 2, \dots, n$ , donde la variación es detectada cuando el valor del año  $m$  cumple:

$$X_m = \max_{1 \leq d \leq n} |X_d| \quad (41)$$

**Buishand** es una prueba paramétrica que asume que los datos se distribuyen normalmente (no obstante puede ser empleada en variables con cualquier tipo de distribución) [23]. El estadístico está dado por:



$$S_0^* = 0 \text{ y } S_d^* = \sum_{i=1}^d (y_i - \bar{y}) \quad (42)$$

Para todo  $d = 1, 2, \dots, n$ .

La prueba se define como:

$$Q = \max_{0 \leq d \leq n} \left| \frac{S_d^*}{S} \right| \quad (43)$$

Y el valor crítico propuesto por Buishand es  $Q/\sqrt{n}$ .

Las hipótesis planteadas en las tres pruebas son:

$H_0$ : Los datos son homogéneos.

$H_a$ : Hay una fecha en la que se presenta un cambio en los datos.

El nivel de significancia planteado es  $\alpha = 0,1$ , es decir, la probabilidad de rechazar la  $H_0$  cuando esta es verdadera es del 10%. En las pruebas realizadas a las series de caudales mínimos mensuales se registraron los valores *p-value* correspondientes, quienes indican si la hipótesis nula  $H_0$  es aceptada o rechazada.

Como último paso en esta etapa, se detectaron los valores atípicos y anomalías que pudiese presentar cada serie de tiempo, con el fin de determinar qué tan alejados se encuentran los registros de la media y desviación estándar de la población real.

Diversas pruebas estadísticas confirman la sospecha de valores discrepantes ("outliers") basados en el ordenamiento de los datos y en la verificación de los valores extremos. Para este trabajo se aplicó el **Test de Grubbs**, recomendado por la Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos (EPA).

La prueba de Grubbs utiliza una estadística de prueba  $G$ , que es la diferencia absoluta entre el valor atípico  $X_0$ , y el promedio de la muestra  $\bar{X}$  dividida por la desviación estándar de la muestra  $S$  [24]. El estadístico de Grubbs se define como:

$$G = \frac{\max |X_i - \bar{X}|}{S} \quad (44)$$

Donde  $\bar{X}$  es la media muestral y  $S$  es la desviación estándar.

Este valor se compara con un valor crítico de una tabla, y el valor se declara valor atípico si supera ese valor crítico. Es decir, si  $G_{calculado} > G_{tabulado} = Valor\ atípico$ . El valor crítico depende del tamaño de la

muestra  $n$ , y de un nivel de representatividad elegido, que es el riesgo de rechazar una observación válida.

## 4.2 Etapa 2: Identificación de regiones homogéneas

Algunos de los métodos más utilizados para formular a priori regiones homogéneas son el análisis clúster, métodos multivariados, método de las k-medias, región de influencia, lógica difusa, mapas auto-organizados, índice de estacionalidad y métodos basados en atributos geográficos y climáticos del área de estudio, entre otros.

Con relación a las metodologías citadas, se había implementado por separado el análisis clúster y el método que asocia el índice de estacionaridad con el día juliano, sin embargo, las regiones obtenidas no comprendían la totalidad de las estaciones y en algunos casos no cumplían con el test de heterogeneidad. Por ende, como las regiones se pueden hallar a través de las características físicas y/o climatológicas del área de influencia, en este trabajo se tuvo en cuenta la ubicación geográfica (latitud, longitud y altitud). Es decir, que a cada región homogénea la integran estaciones que se encuentran relativamente cerca.

Para verificar la homogeneidad de la región se tuvo en cuenta el estadístico  $H_1$ , el cual debe ser menor a 2 y la medida de discordancia  $D_i$ , que no debe superar el valor crítico que le corresponde a la región según el número de estaciones que la compone.

## 4.3 Etapa 3: Selección de la distribución de probabilidad y estimación de cuantiles

La determinación de la función de distribución de probabilidad de mejor ajuste se fundamentó en el *diagrama de L-moment-ratio* (razones de L-Momentos) y la medida de bondad de ajuste  $Z^{DIST}$ , para verificar que los L-momentos regionales se aproximen a los L-momentos del sitio o estación. Por tanto, si  $Z^{DIST} < |1,64|$  se acepta la hipótesis de buen ajuste de la distribución, caso contrario, se rechaza.

Una vez escogida la distribución de probabilidad que mejor se ajusta a las características y series hidrológicas temporales de la región, se calcularon los L-momentos por cada estación y los L-momentos regionales, dado que, son la base para estimar los parámetros que describen la FDP que se ajusta a cada región.

Se determinó la curva de crecimiento regional (función cuantil regional), la cual representa los cuantiles de magnitud adimensional asociados a un periodo de retorno/probabilidad específico.

Los valores de los cuantiles a nivel de estación se hallaron multiplicando el factor de escala por los valores adimensionales obtenidos de las curvas de crecimiento regional. Este factor corresponde al valor del caudal medio anual de la estación.

#### 4.4 Etapa 4: Caracterización de la sequía hidrológica

El término *sequía* describe una amplia gama de situaciones cuyo factor común es la presencia de agua en cantidades menores a lo "normal". Una de las consecuencias más evidentes y potencialmente desastrosas de la sequía es el *déficit de agua* que se puede ver reflejado en los niveles de los ríos, embalses, reservorios subterráneos y demás.

Dicho esto, para la regionalización de los cuantiles locales (caudales en lámina de agua/escorrentía) es importante precisar el método elegido para definir la magnitud o intensidad de la sequía. Por lo tanto, se ha optado por considerar su definición conceptual, en términos de déficit con respecto a lo esperado en un año normal. Para ello, se estableció un umbral o *nivel de truncamiento* de referencia, a partir del cual los valores menores representan un determinado grado de sequía. En este estudio ese nivel de referencia está dado por la media de la curva de crecimiento regional ( $\bar{X} = 1$ ), es decir, que se utilizaron los cuantiles regionales que se encuentran por debajo de 1 como indicadores de la magnitud de la sequía hidrológica. Cabe aclarar, que se tienen en cuenta los cuantiles regionales asociados a los periodos de retorno objeto de estudio que son: 5, 10, 20, 50 y 100 años (probabilidades del 20%, 10%, 5%, 2% y 1% respectivamente).

Teniendo en cuenta que la media de la curva de crecimiento regional igual a 1, corresponde al 100% de disponibilidad de agua habitual; para conocer el % de déficit que indican los cuantiles regionales simplemente se realiza la siguiente operación:

$$\% \text{ déficit} = (1 - q) * 100\% \quad (45)$$

Donde  $q$  es el valor del cuantil adimensional asociado a una probabilidad de excedencia o periodo de retorno.

Los cuantiles se interpretan en términos del déficit hídrico (%), de ahí que, un cuantil de 0,4 (aplicando la ecuación 39), indica un déficit de agua del 60% con respecto a la media. De este modo, se determina la magnitud de la sequía hidrológica.

Luego de llevar a cabo una revisión bibliográfica sobre indicadores de sequía (véase Anexo 2) se tomó como referencia el indicador conocido como *Porcentaje de Precipitación Normal (PPN)* para la clasificación de la sequía hidrológica. El

*PPN* es una de las medidas más directas del desvío de la precipitación respecto a su promedio de largo plazo. Además, es sencillo de calcular y su interpretación es muy intuitiva.

Se calcula como el cociente entre la precipitación observada (para un mes/año y una escala temporal determinada) y la precipitación normal<sup>1</sup> correspondiente al período analizado, resultado que se multiplica por 100. Los valores porcentuales menores a 100% indican déficit, los mayores a 100% indican excesos y los valores próximos al 100% sugieren valores cercanos al promedio histórico. Así como para el *PPN* el nivel de referencia de donde parten los déficits o excedentes de agua es el 100%, sucede igual con el cuantil regional igual a 1.

La clasificación establecida por el *PPN* es definida a partir del % de disponibilidad de agua, sin embargo, en el presente estudio resulta oportuno expresar en términos del déficit hídrico (%) la caracterización de la sequía hidrológica. Entiéndase, por déficit de agua a la cantidad de agua que hace falta para llegar al promedio (que corresponde al 100%). Para mayor comprensión:

$$\% \text{ Déficit de agua} = 100\% - \% \text{ Disponibilidad de agua} \quad (46)$$

Por ejemplo, un déficit del 80% es análogo al 20% de disponibilidad de agua y de igual modo, un 20% de déficit equivale a un 80% de disponibilidad de agua. Por lo tanto, si uno de ellos aumenta el otro disminuye en igual medida y viceversa. A continuación, se muestra la adaptación de las categorías del *PPN* al presente estudio:

Tabla 3. Clasificación de la sequía hidrológica

<b>PPN (% disponibilidad)</b>	<b>Estudio actual (% de déficit)</b>	<b>Categoría</b>
0% - 25%	75% - 100%	Sequía Extrema
25% - 50%	50% - 75%	Sequía Severa
50% - 75%	25% - 50%	Sequía Moderada
75% - 100%	0% - 25%	Normal

Fuente: Adaptado del Reporte Técnico "Descripción de índices para el monitoreo de sequía meteorológica implementados por el Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur (CRC - SAS) [25].

En este sentido, como indica Steinemann [26] citado por [27], la definición de sequía utilizada en este estudio no considera el impacto diferencial que tiene el mismo nivel de déficit hídrico en distintas regiones, pero tiene la ventaja de obtener cuantiles para un periodo de retorno dado y es el usuario quien puede convertir ese cuantil en el indicador de sequía de elección. Además, el porcentaje

<sup>1</sup> La *precipitación media anual* se le conoce como **precipitación normal** y se obtiene a partir del valor promedio de las precipitaciones anuales ocurridas en un periodo no menor de 30 años.

con respecto a lo normal (nivel de referencia) es un indicador de sequía ampliamente adoptado que puede estar relacionado con cuantos y percentiles, y se considera uno de los mejores indicadores de sequía disponibles.

#### **4.5 Etapa 5: Mapeo**

Se obtendrán mapas de regionalización espacial de la sequía hidrológica para distintos periodos de retorno en la cuenca hidrográfica del Río Bogotá empleando las técnicas de interpolación IDW (distancia inversa ponderada).

Con ayuda del paquete ArcGis empleado para el mapeo, se estructuran los datos en este caso, en filas dadas por las estaciones, las columnas poseen las coordenadas XY; y en la última columna se encontrara el cuantil en términos de esorrentía (mm) asociado a la probabilidad de excedencia P y su periodo de retorno de interés asociado. Para este estudio se crearon los mapas de cuantiles para los periodos de retorno de 5 años (P=20%), 10 años (P=10%), 20 años (P=5%), 50 años (P=2%) y 100 años (P=1%).

## 5 DESARROLLO CENTRAL

En la cuenca del río Bogotá se encuentran en total 228 estaciones, que a partir de un muestreo no probabilístico por conveniencia, se escogieron 32 estaciones que cumplieron a cabalidad con los criterios planteados: primero, presentar una longitud de registro de caudales mínimos no menor a 24 años y segundo, no superar el 30% de datos faltantes. Las estaciones fueron las siguientes:

Tabla 4. Estaciones seleccionadas

No.	Código	Nombre	Coordenadas		Altitud (msnm)
			X (°)	Y (°)	
1	2120733	Acequia La Quinta	-73,933	5,083	2582
2	2120734	Puente Vargas	-74	4,917	2542
3	2120735	Puente La Virginia	-74067	4,917	2566
4	2120742	Balsa La Chía	-74,067	4,817	2542
5	2120751	La Vega	-73,85	4,867	2660
6	2120755	San Jorge Granja	-74,183	4,5	2952
7	2120757	Acequia San Patricio	-74,183	4,85	2585
8	2120758	La Muralla	-74,183	4,867	2585
9	2120766	La Pradera	-74,133	5	2704
10	2120768	Las Lajas	-73,967	5	2548
11	2120793	El Espino	-73,967	4,983	2548
12	2120795	Altamira	-74,35	4,833	2636
13	2120796	Puente Portillo	-74,6	4,45	361
14	2120798	San Isidro	-73,9	4,85	2680
15	2120799	Santo Domingo	-73,883	4,85	2652
16	2120815	Villapinzón	-73,6	5,217	2705
17	2120816	Santa Rosita	-73,75	5,1	2575
18	2120845	El Bosque	-74,217	4,817	2569
19	2120867	Guanquica	-73,94	5,185	3015
20	2120868	Santa Marta	-73,717	5,05	2700
21	2120877	Cordialidad	-73,95	5	2680
22	2120879	Las Mercedes	-74,167	4,9	2570
23	2120882	El Portillo	-74,583	4,433	390
24	2120891	El Silencio	-74,683	4,417	380
25	2120893	Puerto Brasil La Mona	-74,483	4,4	2548
26	2120894	La Neptuna	-74,5	4,483	600
27	2120895	La Pola	-74,633	4,467	1120

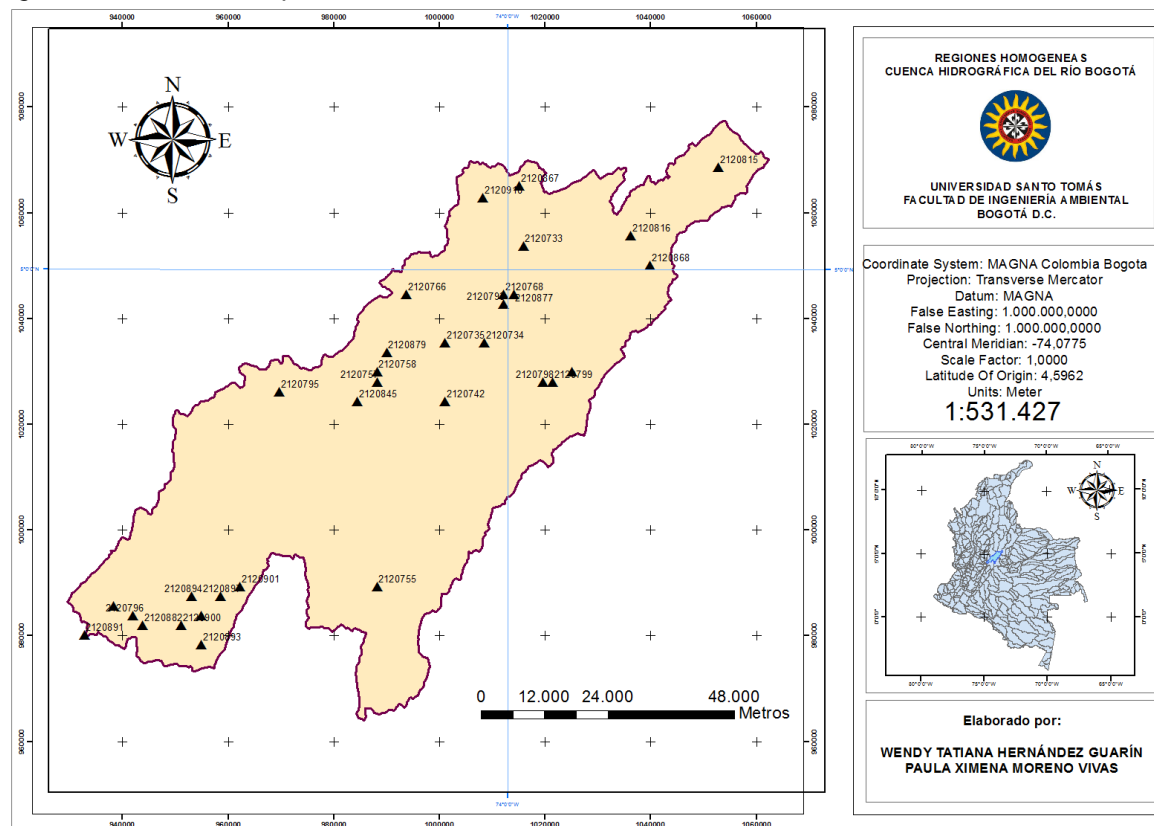
Tabla 4. (Continuación)

No.	Código	Nombre	Coordenadas		Altitud (msnm)
			X (°)	Y (°)	
28	2120897	La Cascada	-74,45	4,483	1300
29	2120900	Puente Sáenz	-74,517	4,433	600
30	2120901	San Pabluna	-74,417	4,5	1550
31	2120903	Entreríos	-74,483	4,45	950
32	2120918	El Volador	-74,003	5,166	3095

Fuente: Autores.

Para una mejor visualización de la distribución espacial de las mismas:

Figura 5. Distribución espacial de las estaciones seleccionadas



Fuente: Autores.

### 5.1 Etapa 1: Revisión y control de calidad de los datos:

Para el análisis exploratorio de los datos se calcularon los estadísticos descriptivos más relevantes para determinar el comportamiento general de las series de

tiempo. A continuación se presenta el resumen numérico de las 32 estaciones que conforman la unidad de estudio:

Tabla 5. Estadísticos descriptivos

Estación	Media (m <sup>3</sup> /s)	Desviación Estándar	Mínimo (m <sup>3</sup> /s)	Máximo (m <sup>3</sup> /s)	Coefficiente de Variación
2120891	2,781	1,211	0,00	5,68	43,54%
2120816	3,415	1,805	0,04	10,19	52,85%
2120751	0,528	0,378	0,00	2,23	71,52%
2120742	6,529	4,770	1,29	47,01	73,06%
2120734	5,698	4,217	0,21	35,77	74,01%
2120867	0,053	0,040	0,00	0,18	75,5%
2120815	0,269	0,208	0,00	1,13	77,15%
2120785	1,081	0,877	0,01	8,26	81,17%
2120733	0,144	0,118	0,00	0,81	82,31%
2120882	23,548	19,718	0,00	83,47	83,74%
2120793	2,628	2,438	0,00	16,15	92,74%

Fuente: Autores.

En la Tabla 5 se observa que la estación 2120882 ( $\bar{X}$ =23,548 DS=19,718) sobresale por presentar un promedio de caudal considerablemente alto. En contraste, las demás estaciones tienen el promedio por debajo de 6 m<sup>3</sup>/s. Además, se evidencia que las estaciones 2120782 y 2120793 presentan mayor variabilidad en el caudal, mientras que la estación 2120891 presenta menor variabilidad.

Tabla 6. Estadísticos descriptivos

Estación	Media (m <sup>3</sup> /s)	Desviación Estándar	Mínimo (m <sup>3</sup> /s)	Máximo (m <sup>3</sup> /s)	Coefficiente de Variación
2120918	0,363	0,382	0,04	5,62	105,2%
2120766	0,224	0,250	0,01	2,22	111,50%
2120768	0,907	1,027	0,00	11,66	113,26%
2120798	0,463	0,530	0,00	3,82	114,40%
2120868	0,087	0,104	0,00	0,55	119,03%
2120879	0,015	0,018	0,00	0,16	122,66%
2120735	0,459	0,577	0,00	3,99	125,68%
2120877	0,312	0,401	0,00	2,43	128,51%
2120757	0,042	0,054	0,00	0,26	129,7%
2120894	0,250	0,325	0,00	2,08	130,19%

Fuente: Autores.

En la Tabla 6 se observa que la estación 2120879 ( $\bar{X}$ =0,015 DS=0.018) y 2120757 ( $\bar{X}$ =0.042 DS=0.054) presentan los promedios más bajos de caudal, a diferencia



de la estación 2120768 ( $\bar{X}=0.442$   $DS=1.509$ ) que presenta el mayor promedio. Además, las estaciones 2120757 y 2120894 presentan mayor variabilidad en el caudal y la estación 2120918 presenta menor variabilidad.

Tabla 7. Estadísticos descriptivos

Estación	Media (m <sup>3</sup> /s)	Desviación Estándar	Mínimo (m <sup>3</sup> /s)	Máximo (m <sup>3</sup> /s)	Coefficiente de Variación
2120758	0,309	0,408	0,00	2,70	132,08%
2120897	0,141	0,188	0,00	1,68	134,04%
2120893	0,023	0,030	0,00	0,16	134,38%
2120755	0,041	0,060	0,00	0,52	147,20%
2120845	0,373	0,602	0,00	4,69	161,56%
2120895	0,253	0,421	0,00	3,18	166,55%
2120799	0,254	0,431	0,00	4,36	169,91%
2120795	0,123	0,214	0,01	3,04	173,12%
2120900	0,080	0,139	0,00	1,02	174,71%
2120901	0,442	1,509	0,00	11,04	341,39%
2120903	0,260	0,951	0,00	11,53	365,66%

Fuente: Autores.

En la Tabla 7 el promedio de caudal es similar en todas las estaciones, fluctuando entre 0,023 m<sup>3</sup>/s y 0,442 m<sup>3</sup>/s. Al mismo tiempo, se observa que las estaciones 2120901 y 2120903 presentan mayor variabilidad en el caudal, mientras que la estación 2120758 presenta menor variabilidad. No obstante, el coeficiente de variación en general se encuentra por encima del 100%, indicando que todas las estaciones se consideran heterogéneas respecto al caudal.

Las estaciones 2120757, 2120768, 2120782, 2120793, 2120882, 2120734 y 2120742 presentan una mayor variabilidad en los caudales producto de la influencia de los caudales regulados que son aportados por el embalse del Sisga, embalse del Neusa, embalse del Muña, embalse de san Rafael y el embalse del Tominé.

### 5.1.1 Análisis de homogeneidad y estacionariedad

Una vez realizado el análisis descriptivo, se procedió para un adecuado modelamiento de series de tiempo hidrológicas verificar la homogeneidad y estacionariedad.

En primera instancia para determinar la homogeneidad de la varianza se utilizaron la Prueba de Homogeneidad Normal Estándar (SNHT), Prueba de Pettitt y Prueba

de Buishand. A continuación, se presenta los resultados para cada una de las pruebas por estación:

Tabla 8. Resultados p-value Prueba de Homogeneidad

Estación	Normal Estándar	Pettit	Buishand
2120733	0,301	0,214	< 0,0001
2120734	0,125	0,403	< 0,0001
2120735	0,234	< 0,0001	0,176
2120742	0,021	< 0,0001	0,101
2120751	< 0,0001	0,139	0,254
2120755	0,503	0,307	0,007
2120758	0,476	0,732	< 0,0001
2120766	0,242	0,531	< 0,0001
2120768	0,104	0,014	0,305
2120793	0,013	0,225	0,148
2120795	0,150	0,602	< 0,0001
2120796	< 0,0001	0,014	< 0,0001
2120798	0,124	0,300	0,016
2120799	0,273	0,187	0,009
2120815	< 0,0001	0,432	0,263
2120816	< 0,0001	0,204	< 0,0001
2120845	0,315	0,006	0,401
2120868	0,105	0,194	0,094
2120877	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
2120879	0,249	0,056	0,323
2120882	0,072	0,315	0,404
2120891	< 0,0001	< 0,0001	0,001
2120893	0,045	0,551	0,214
2120894	0,182	0,169	< 0,0001
2120895	0,126	0,403	0,061
2120897	0,012	0,354	0,275
2120900	< 0,0001	0,212	0,154
2120901	0,158	0,244	0,038
2120903	0,527	< 0,0001	0,289
2120918	0,234	0,370	0,006

Fuente: Autores.

Puesto que los valores-p calculados para cada serie de tiempo son mayores que el nivel de significancia  $\alpha=0,1$  (10%), la serie de tiempo se considera homogénea. Como se puede observar alrededor de 27 estaciones, que

corresponden al 84,38% del total poseen homogeneidad en la varianza en la serie de caudal mínimo mensual.

Tabla 9. Interpretación resultados Prueba de homogeneidad

2120733	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120734	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120735	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120742	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	<b>No Homogénea</b>
2120751	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120755	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120758	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120766	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120768	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120793	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120795	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120796	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	<b>No Homogénea</b>
2120798	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120799	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120815	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120816	No Homogénea	Homogénea	No Homogénea	<b>No Homogénea</b>
2120845	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120868	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120877	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	<b>No Homogénea</b>
2120879	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120882	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120891	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	<b>No Homogénea</b>
2120893	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120894	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120895	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120897	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120900	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120901	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120903	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	<b>Homogénea</b>
2120918	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	<b>Homogénea</b>

Fuente: Autores.

La presencia de heterogeneidad de la serie del caudal puede deberse a cambios físicos en la propia estación o por modificaciones en el medio ambiente. En general, se conocen las siguientes causas: el cambio de ubicación de la estación, instalación inadecuada del instrumento, modificación en el procedimiento de medición, sustitución del operador, factores hidroclimáticos (fenómeno ENOS<sup>2</sup>),

<sup>2</sup> El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) según los países miembro de la Región IV de la OMM optaron por la siguiente definición: es un fenómeno en el océano Pacífico ecuatorial caracterizado por una desviación positiva de la temperatura superficial del mar (TSM) de magnitud igual o superior a 0,5 grados Celsius, promediada en el curso de tres meses consecutivos (para el período

localización cercana de embalses, deforestación o reforestación en la zona, industrialización en áreas circundantes, entre otras [28].

Por otro lado, respecto a la estacionariedad se utilizó la Prueba estadística *Dickey Fuller*. En la Tabla 10, a partir de los resultados y a un nivel de significancia del 10%, se encontraron 29 estaciones que presentan estacionariedad en la serie y 3 que no cumplen este criterio (2120867, 2120877 y 2120894).

Tabla 10. Resumen resultados de estacionariedad

<b>Estación</b>	<b>Estacionariedad</b>	<b>Estación</b>	<b>Estacionariedad</b>
<b>2120733</b>	Cumple	<b>2120816</b>	Cumple
<b>2120734</b>	Cumple	<b>2120845</b>	Cumple
<b>2120735</b>	Cumple	<b>2120867</b>	No Cumple
<b>2120742</b>	Cumple	<b>2120868</b>	Cumple
<b>2120751</b>	Cumple	<b>2120877</b>	No Cumple
<b>2120755</b>	Cumple	<b>2120879</b>	Cumple
<b>2120757</b>	Cumple	<b>2120882</b>	Cumple
<b>2120758</b>	Cumple	<b>2120891</b>	Cumple
<b>2120766</b>	Cumple	<b>2120893</b>	Cumple
<b>2120768</b>	Cumple	<b>2120894</b>	No Cumple
<b>2120793</b>	Cumple	<b>2120895</b>	Cumple
<b>2120795</b>	Cumple	<b>2120897</b>	Cumple
<b>2120796</b>	Cumple	<b>2120900</b>	Cumple
<b>2120798</b>	Cumple	<b>2120901</b>	Cumple
<b>2120799</b>	Cumple	<b>2120903</b>	Cumple
<b>2120815</b>	Cumple	<b>2120918</b>	Cumple

Fuente: Autores.

Por último, en esta etapa preliminar se detectaron los Outliers o valores atípicos que presentan en general las 32 estaciones a partir del test de Grubbs. Se determinaron 332 Outliers que equivalen al 4,12% de la totalidad de datos (9.216), donde se evidenció que en el mes de junio se reportan los niveles más bajos y con mayor recurrencia en los años 2010 y 2011.

---

base de 1971-2000) en la región Niño 3.4 (una de las 4 regiones de monitoreo de TSM y que sirve como referencia principal para saber si se presentará un evento de El Niño, La Niña o Neutral).

Tabla 11. Detección de Outliers

<b>Estación</b>	<b>Valores Atípicos</b>	<b>Valor máximo (m<sup>3</sup>/s)</b>
2120733	10	0,807
2120768	6	11,663
2120793	15	16,145
2120815	16	1,126
2120816	12	10,190
2120877	17	2,426
2120735	9	3,993
2120757	16	0,255
2120758	13	2,695
2120766	12	2,218
2120795	5	3,036
2120845	11	4,688
2120879	5	0,163
2120742	11	47,012
2120714	9	31,672
2120734	9	35,772
2120811	13	21,190
2120751	15	2,234
2120798	10	3,817
2120799	14	4,360
2120868	17	0,550
2120755	7	0,520
2120796	2	62,590
2120882	19	83,465
2120891	20	5,676
2120893	16	0,162
2120894	26	2,080
2120895	12	3,175
2120897	19	1,680
2120900	12	1,020
21209,01	12	11,040
2120903	2	11,533
<b>Total Datos atípicos</b>		<b>392</b>
<b>% Datos atípicos</b>		<b>4,12%</b>

Fuente: Autores.

Producto de la fluctuación de los registros como por ejemplo las estaciones 2120742, 2120796 y 2120882 radica en el comportamiento hidrológico del país durante el fenómeno de “La Niña” 2010-2011, con una alta incidencia del evento en la región Andina, en los meses del segundo semestre del 2010 y en el año 2011 donde se presentaron excesos notorios de precipitación registrados en mayo y junio

del 2011, atípicos para una temporada que es normalmente de pocas lluvias. Factor preponderante para que los niveles de los ríos no bajaran, como comúnmente lo hacen en julio-agosto, y por el contrario, siguieran ascendiendo, traslapándose con la segunda temporada lluviosa en la cuenca del Río Bogotá.

Finalmente, dado los resultados presentados previamente, se optó por mantener estas estaciones debido a como indican Hosking y Wallis [16], incluso ante leves desvíos de los supuestos básicos, el Análisis Regional de Frecuencias genera mejores estimaciones que las basadas en el sitio.

## **5.2 Etapa 2: Identificación de regiones homogéneas**

Sobre la base de las medidas de Discordancia y de Homogeneidad basados en la metodología de los L-momentos [16], se evaluó la homogeneidad de las regiones propuestas. Se identificaron un total de 4 regiones homogéneas. Uno de los requisitos para agrupar las estaciones dentro de una región, es que estas presenten similitud en sus distribuciones de frecuencias. Esta similitud fue visualizada en términos de los L-momentos mediante el uso del indicador de Discordancia ( $D_i$ ), el cual permitió identificar estaciones que diferían significativamente del resto en términos de las variables L-CV, L-Sesgo y L-Curtosis.

Asimismo, para la identificación de las regiones homogéneas, se utilizaron algunas de las metodologías mencionadas (análisis de clúster y método que asocia el índice de estacionaridad con el día juliano), sin embargo, no reportó una buena segmentación de las estaciones. Por tal motivo, se implementó el método establecido por Wallis [29] para la conformación de las regiones, mediante variables físicas como la localización geográfica (Latitud y Longitud).

Cabe aclarar que la conformación de las regiones homogéneas es un proceso iterativo hasta cumplir con los criterios de discordancia ( $D_i < 3$ ) y heterogeneidad ( $H1 < 2$ ). En la Tabla 12 se muestran los valores obtenidos de la prueba de heterogeneidad para el conglomerado de estaciones que se aceptaron como región homogénea:

Tabla 12. Regiones homogéneas

Región	H1	No. Estaciones	Valor crítico $D_i$	Código estaciones
1	1,81	8	2,14	2120733, 2120734, 2120735, 2120768, 2120793, 2120867, 2120877, 2120918
2	1,45	7	1,92	2120742, 2120751, 2120798, 2120799, 2120815, 2120816, 2120868
3	1,11	6	1,65	2120757, 2120758, 2120766, 2120795, 2120845, 2120879
4	1,91	11	2,63	2120755, 2120796, 2120882, 2120891, 2120893, 2120894, 2120895, 2120897, 2120900, 2120901, 2120903

Fuente: Autores.

El valor del indicador de discordancia para cada estación fue comparado con el respectivo valor crítico (Ver Tabla 12). Así fue posible reubicar diferentes estaciones en distintas regiones y comprobar la similitud entre las diferentes agrupaciones a medida que fueron formadas. Para cada una de las regiones homogéneas finales se obtuvieron agrupaciones de estaciones que no pueden ser consideradas como discordantes de acuerdo al indicador  $D_i$ . El valor del indicador en todas las estaciones se encuentra por debajo del valor crítico acorde al número de estaciones que hacen parte de la región (ver Tabla 12 y13).

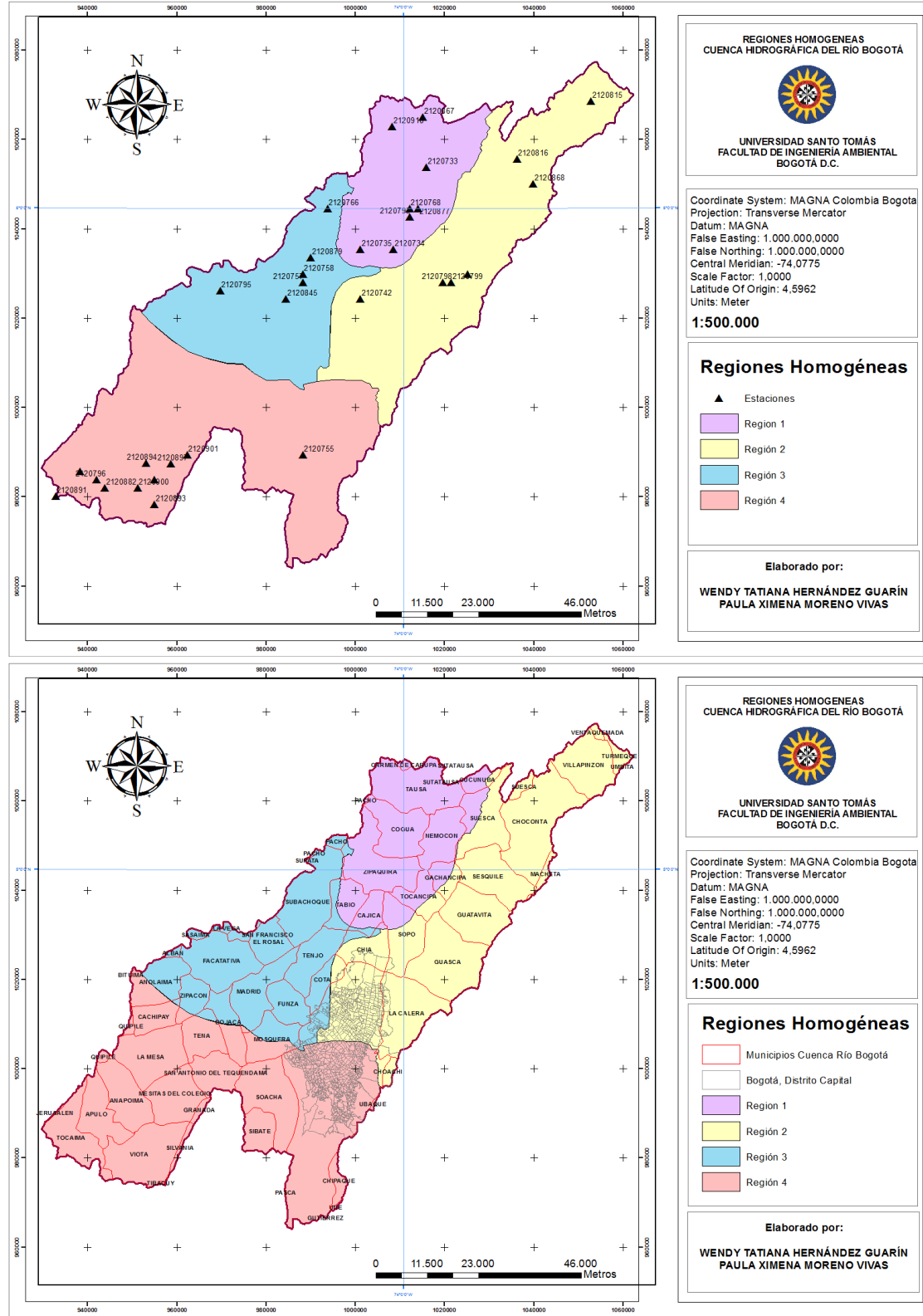
Tabla 13. Resultados del indicador  $D_i$

Región 1		Región 2		Región 3		Región 4	
Estación	$D_i$	Estación	$D_i$	Estación	$D_i$	Estación	$D_i$
2120733	0,28	2120742	0,48	2120757	0,92	2120755	0,36
2120734	0,45	2120751	1,78	2120758	0,36	2120796	1,83
2120735	1,24	2120798	1,74	2120766	1,35	2120882	0,2
2120768	1,73	2120799	0,83	2120795	1,5	2120891	2,15
2120793	0,44	2120815	0,03	2120845	0,28	2120893	0,31
2120867	1,22	2120816	1,38	2120879	1,58	2120894	0,86
2120877	1,81	2120868	0,75			2120895	0,55
2120918	0,85					2120897	0,23
						2120900	1,04
						2120901	1,16
						2120903	2,3

Fuente: Autores.

Las regiones se ubican contiguas entre ellas en el orden que indica la Tabla 13 de noreste a suroeste como se observa en la figura 7.

Figura 6. Mapas delimitación Regiones Homogéneas



Fuente: Autores.



Los municipios que comprende cada región homogénea son:

Tabla 14. Municipios que abarca cada región homogénea

Región	Municipios
1	Tausa, Cogua, Nemocón, Zipaquirá, Tabio, Cajicá, Tocancipá y Gachancipá
2	Villapinzón, Chocontá, Suesca, Sesquilé, Guatavita, Sopó, Guasca, Chía, La Calera y Distrito Capital.
3	Subachoque, El Rosal, Tenjo, Cota, Facatativá, Madrid, Funza, Anolaima, Zipacón, Bojacá y Mosquera.
4	Cachipay, Tena, La Mesa, Anapoima, Apulo, Tocaima, San Antonio del Tequendama, Mesitas del Colegio, Viota, Bojacá, Mosquera, Soacha, Sibaté y Distrito Capital.

Fuente: Autores.

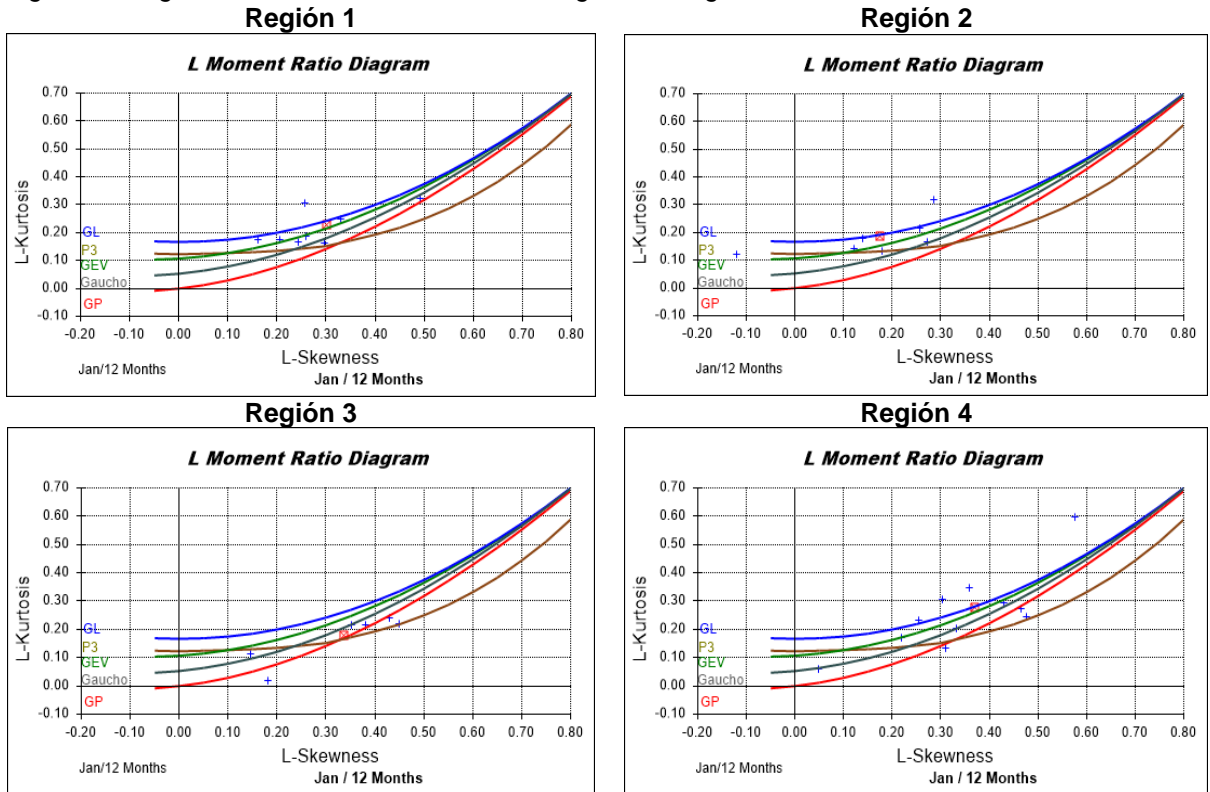
### 5.3 Etapa 3: Selección de distribución de probabilidad y estimación de cuantiles

La selección de la distribución de probabilidad regional se basó en la comparación de los ajustes obtenidos por el *diagrama de L-Momento Ratio* y el estadístico  $Z^{DIST}$  de cada región, el cual debe ser menor o igual a 1,64 [16].

Las distribuciones consideradas en el estudio expuestas por el método son: Generalizada Logística (GLO), Generalizada del Valor Extremo (GEV), Generalizada Normal (GNO), Gaucho, Pearson Tipo III (PE3) y Generalizada de Pareto (GPA).

En la figura 8 se muestra el *diagrama de L-Momento Ratio* para cada región, el cual relaciona los coeficientes de asimetría (sesgo) vs curtosis, donde se puede apreciar una nube de puntos que corresponde al número de estaciones en la región y un valor central (punto rojo), que representa la coordenada dada por el L-Sesgo (L-Skewness) y L-Curtosis (L-Kurtosis) Regional; según su ubicación se infieren las posibles distribuciones de probabilidad que podrían ajustarse a los datos observados de las estaciones que hacen parte de la región.

Figura 7. Diagrama L-Moment Ratio de cada Región Homogénea



Fuente: Autores.

Según los *diagramas de L-Momento Ratio*, los L-momentos regionales (punto rojo) se comportan de la siguiente manera: en las regiones 1, 2 y 4 se localiza cerca a las distribuciones GLO y GEV; y en cuanto a la Región 3, el valor medio se ubica entre las distribuciones GPA, P3 y Gaucho. Es decir que, el diagrama refleja un panorama inicial para encontrar las distribuciones que se ajustan aceptablemente a los datos, sin embargo, la decisión final no depende sólo del análisis del *diagrama de los L-Momentos*.

Mediante la prueba de bondad de ajuste basada en el  $Z^{DIST}$  se comprueba objetivamente cuando un conjunto de distribuciones se ajusta a los datos aceptablemente. El  $Z^{DIST}$  determina si la medida del L-Sesgo y L-Curtosis simulados de una determinada región homogénea se ajustan adecuadamente al L-Sesgo y L-Curtosis de los datos observados. Según lo planteado por Hosking y Wallis [16] se considera que el ajuste de una distribución es aceptable o adecuado si el valor del estadígrafo  $Z$  es cercano a cero.

A continuación se presentan los valores del estadístico  $Z^{DIST}$  para cada región, comparando las diferentes distribuciones de probabilidad:

Tabla 15. Resultados del  $Z^{DIST}$  por región homogénea

FDP	GLO	GEV	GNO	GAUCHO	PE3	GPA
<b>Región 1</b>	-0,11	-0,81	-1,37	-1,71	-2,34	-2,71
<b>Región 2</b>	0,03	-1,03	-1,18	-2,16	-1,56	-3,37
<b>Región 3</b>	1,75	1,23	0,65	0,51	-0,34	-0,30
<b>Región 4</b>	-0,61	-1,07	-1,77	-1,77	-2,95	-2,57

Fuente: Autores.

Dado el criterio  $Z^{DIST} < |1,64|$ , las distribuciones GPA y Gaucho se ajustan únicamente a la región 3; la distribución PE3 se ajusta a las regiones 2 y 3; la distribución GNO se ajusta a las regiones 1, 2 y 3; la distribución GLO se ajusta a las regiones 1, 2 y 4; y por último, la distribución GEV se ajusta a las regiones 1, 2, 3 y 4.

Por ende, al contrastar los ajustes del *diagrama de L-Momento Ratio* y el estadístico  $Z^{DIST}$ , para el modelamiento de los datos se eligió GEV por ser la única función de distribución de probabilidad (FDP) que comparten las 4 regiones homogéneas, lo cual facilita la posterior generación de los mapas de cuantiles. Los resultados indican que los momentos L-Curtosis y L-Sesgo del modelo teórico GEV se aproximan al L-Curtosis y L-Sesgo de la región homogénea.

Luego de identificar la FDP común a las 4 regiones, se estimaron los L-momentos y los parámetros que caracterizan a la distribución de probabilidad de cada región:

Tabla 16. Resultados de L-momentos y parámetros por región homogénea

Región	Distribución óptima	L-CV	L-Sesgo	L-Curtosis	Ubicación	Escala	Forma
<b>1</b>	GEV	0,3589	0,3019	0,2276	0,6603	0,4171	-0,1955
<b>2</b>	GEV	0,2518	0,1766	0,1853	0,7886	0,3598	-0,0104
<b>3</b>	GEV	0,4867	0,3377	0,1750	0,5278	0,5283	-0,2454
<b>4</b>	GEV	0,4120	0,3702	0,2760	0,5924	0,4187	-0,2897

Fuente: Autores.

La curva de crecimiento regional es el producto de reemplazar los parámetros de la región y la probabilidad, en la ecuación  $x(F)$  de la función de probabilidad, teniendo en cuenta que la media es igual a 1. Los cuantiles regionales calculados son valores con magnitudes adimensionales ya que se asocian a la distribución de cada región construida por las estaciones que la conforman.

Posteriormente, se estiman los cuantiles de cada estación asociados a los periodos de retorno (5, 10, 20, 50 y 100), a partir de la función cuantil, la cual es el resultado de multiplicar el factor de escala (caudal medio anual) por la curva de crecimiento regional (Ver Anexo 1). En el caso de la estación 2120815 que forma parte de la Región 2, se obtuvo:

Tabla 17. Cálculo de los cuantiles con parámetros de la estación

Estación	Ubicación	Escala	Forma	Cuantil $x(f)$	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120815	2,444	1,1993	0,0468	1,87	20%	5	1,87
				1,42	10%	10	1,42
				1,09	5%	20	1,09
				0,76	2%	50	0,76
				0,55	1%	100	0,55

Fuente: Autores.

Tabla 18. Cálculo de los cuantiles con parámetros regionales

Estación	Ubicación	Escala	Forma	Cuantil $x(f)$	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120815	2,4313	1,1092	-0,0104	0,62	3,083	20%	5	1,91
				0,49		10%	10	1,51
				0,40		5%	20	1,22
				0,30		2%	50	0,93
				0,24		1%	100	0,75

Fuente: Autores.

Los valores de la escorrentía (mm) para la estación 2120815 tanto en el sitio como a nivel regional se aproximan, no obstante, existe una diferencia que ronda entre 0,04 y 0,17 décimas.

Para constatar que a partir de la curva de crecimiento regional se puede determinar la función cuantil de un sitio en específico, se graficó en paralelo la función cuantil obtenida con los parámetros de la estación (color verde) y la función cuantil conseguida con los parámetros regionales. A continuación, se muestra el ajuste y comportamiento que presentan ambas curvas en cada región:

Figura 8. Función Cuantil con parámetros del sitio vs. Función Cuantil con parámetros regionales - Región 1

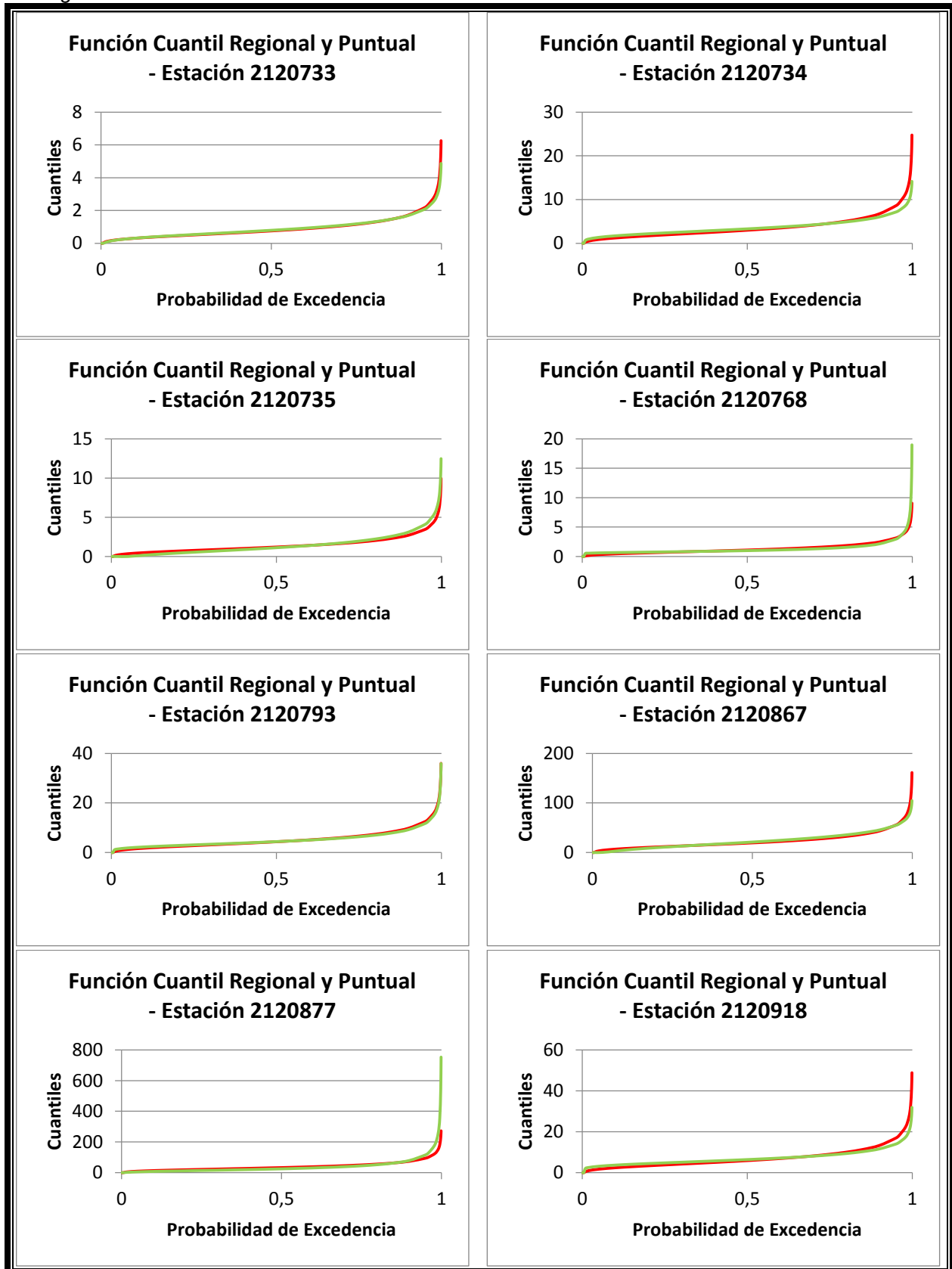


Figura 9. Función Cuantil con parámetros del sitio vs. Función Cuantil con parámetros regionales - Región 2

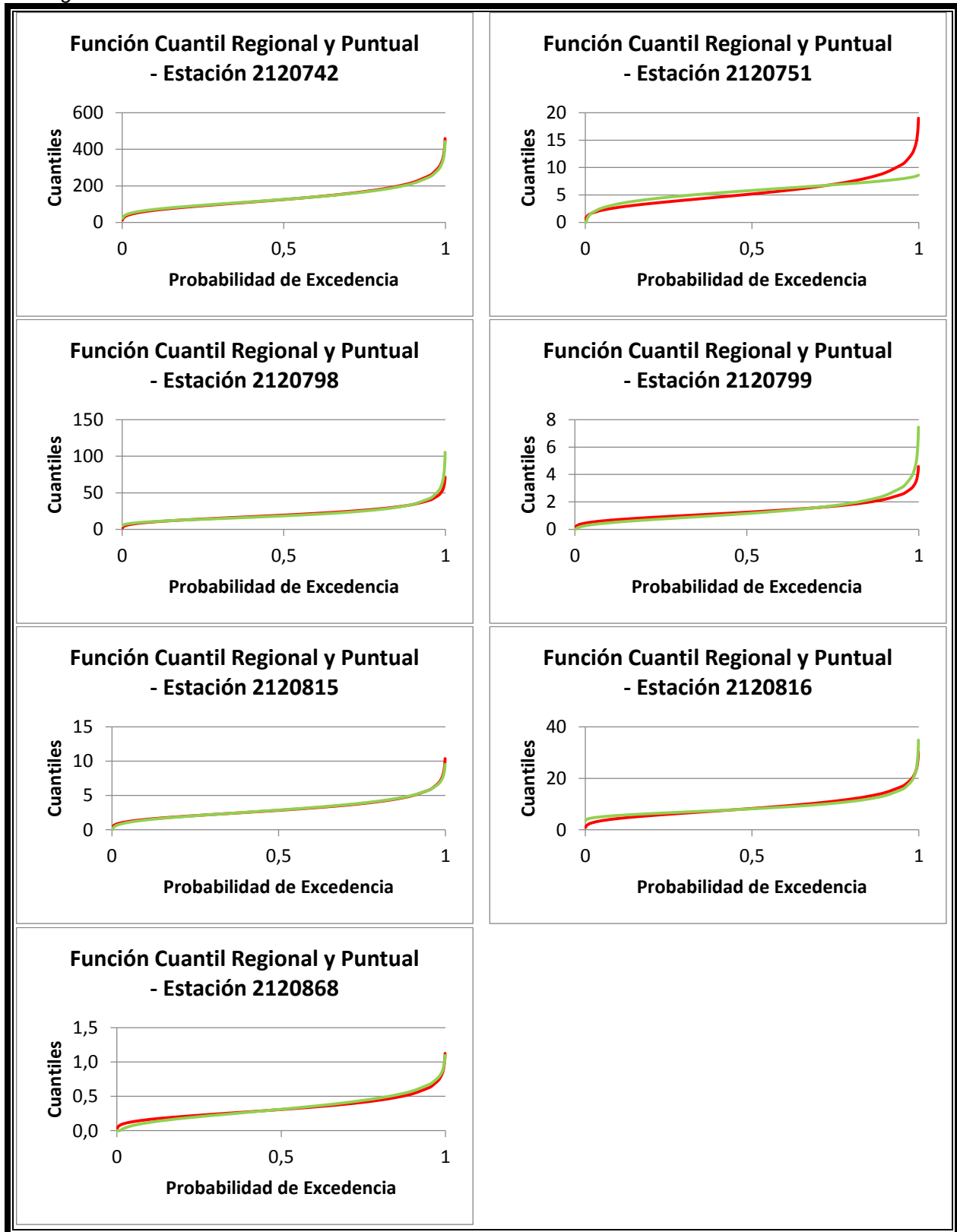
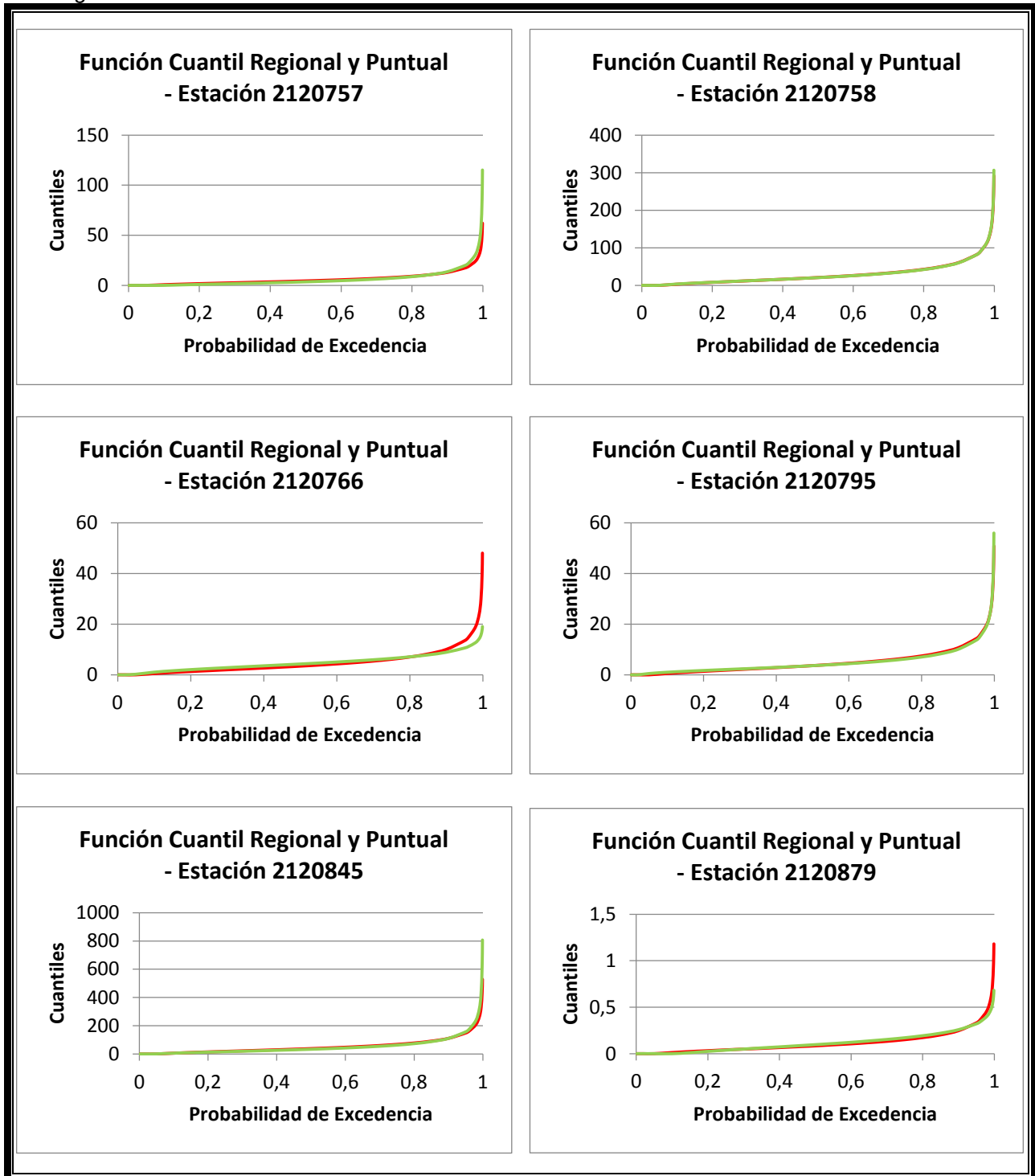
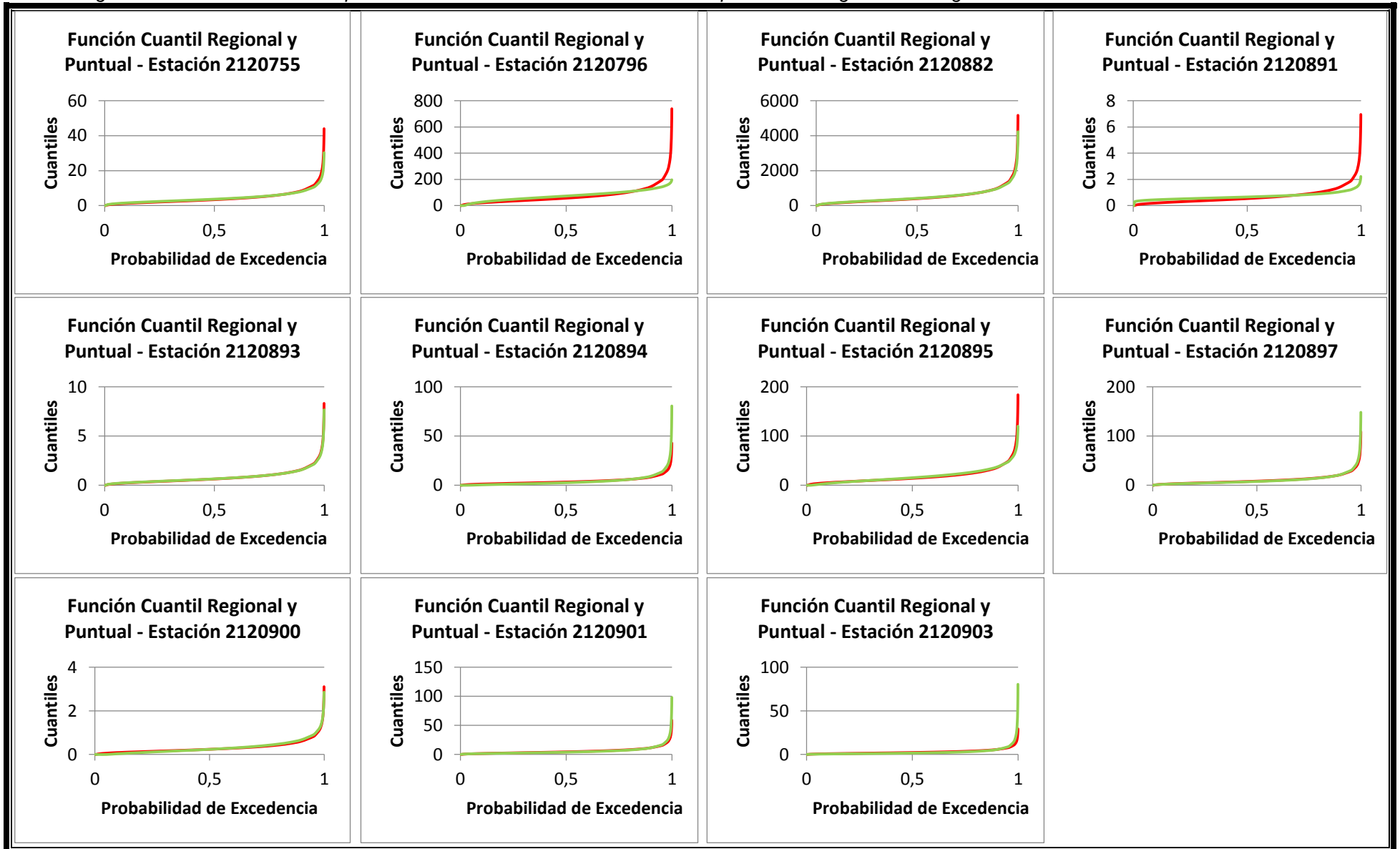


Figura 10. Función Cuantil con parámetros del sitio vs. Función Cuantil con parámetros regionales - Región 3



Fuente: Autores.

Figura 11. Función Cuantil con parámetros del sitio vs. Función Cuantil con parámetros regionales - Región 4





Esta comparación y verificación gráfica se aplicó al total de estaciones, observándose un buen ajuste entre ambas curvas de cuantiles en más del 80%, concluyendo que la FDP Generalizada del Valor Extremo (GEV) representa adecuadamente el comportamiento de cada región. La función se ha ajustado a cada estación, con los valores regionales del L-coeficiente de sesgo (L-SK) y el L-curtosis (L-K), y los valores locales de la media y el L-coeficiente de variación (L-CV).

#### 5.4 Etapa 4: Caracterización de la sequía hidrológica

De acuerdo a la metodología, los cuantiles regionales indican la magnitud de la sequía hidrológica en términos del déficit hídrico (ver Ecuación 39), sabiendo que la media de la curva de crecimiento regional representa el nivel de referencia a partir del cual se determinan los déficits de agua (valores por debajo). Media igual a 1, que corresponde al 100% de disponibilidad de agua o de igual manera, a un déficit del 0% con respecto a lo normal (caudal medio anual). Los % de déficit hídrico obtenidos por cada periodo de retorno se presentan a continuación:

Tabla 19. % de déficit hídrico por periodo de retorno (Tr)

Región	Tr=5	Tr=10	Tr=20	Tr=50	Tr=100	FDP
1	53%	67%	76%	86%	93%	GEV
2	38%	51%	60%	70%	76%	GEV
3	73%	89%	100%	100%	100%	GEV
4	60%	72%	81%	89%	95%	GEV

Fuente: Autores.

Según los resultados, se observa que la Región 3 desde un periodo de retorno de 5 a 100 años tiende a presentar un déficit hídrico mayor en comparación a las otras regiones, indica que todas las estaciones que la conforman registrarán un déficit hídrico del 73% a los 5 años; 89% a los 10 años; y a los 20, 50 y 100 años, se agotara totalmente el recurso hídrico con un déficit del 100% (ver Tabla 19).

En síntesis, la Región 3 presenta los mayores déficits en todos los periodos de retorno, lo cual hace esta zona más vulnerable frente a la sequía. En cambio, la Región 2 donde se sitúa el Distrito Capital tiene mayor capacidad de respuesta ante el evento. Por otro lado, la Región 1 y 4 tienen un comportamiento similar en sus valores de déficit. Sin embargo, cabe señalar que en cada región y todos los años evaluados se presenta sequía, pero con un grado de intensidad diferente, dependiendo del % de déficit.

Conforme a la clasificación descrita en la metodología de este estudio (ver Tabla 3), la categoría que le corresponde a cada región en los diferentes periodos de retorno son:

Tabla 20. Categorización de la sequía hidrológica \_ Región vs Periodo de Retorno

Región	Tr=5	Tr=10	Tr=20	Tr=50	Tr=100
1	Sequía Severa	Sequía Severa	Sequía Extrema	Sequía Extrema	Sequía Extrema
2	Sequía Moderada	Sequía Severa	Sequía Severa	Sequía Severa	Sequía Extrema
3	Sequía Severa	Sequía Extrema	Sequía Extrema	Sequía Extrema	Sequía Extrema
4	Sequía Severa	Sequía Severa	Sequía Extrema	Sequía Extrema	Sequía Extrema

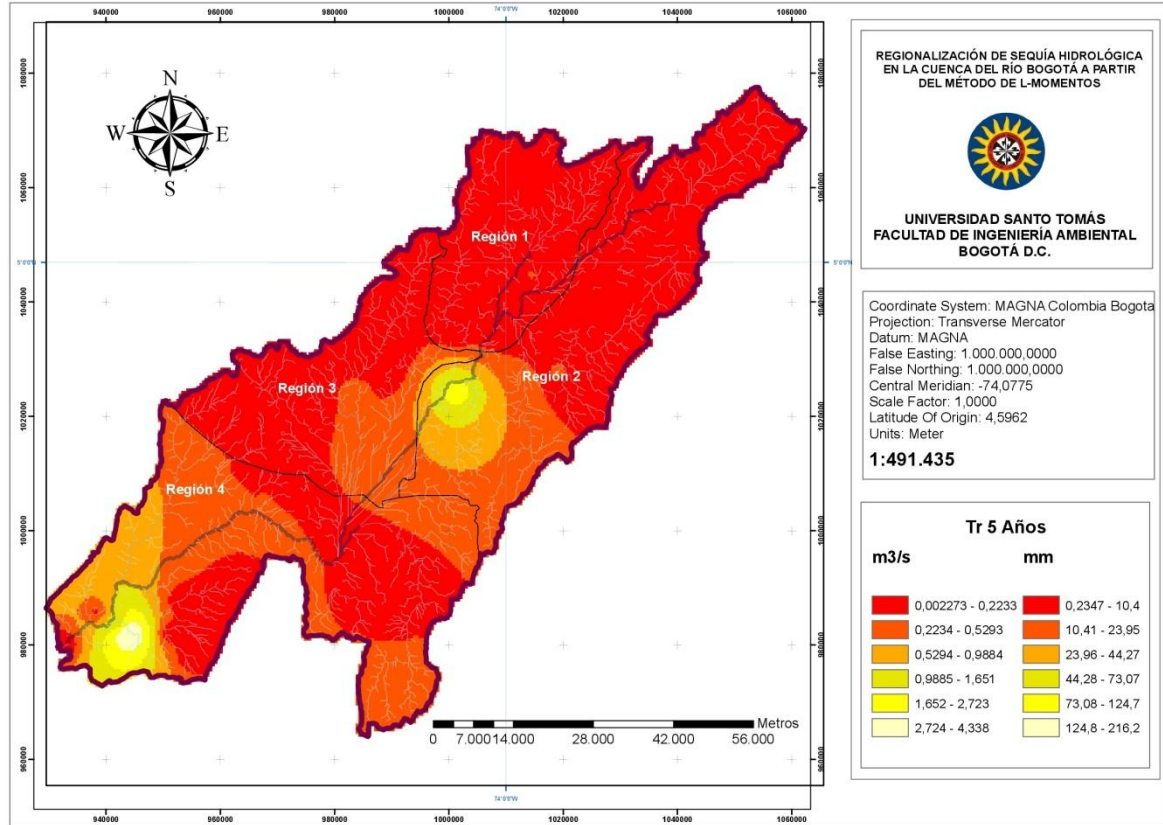
Fuente: Autores.

En orden descendente acorde a la intensidad de impacto de la sequía hidrológica, la Región 3 encabeza la lista, seguida de la Región 4, Región 1 y por último, la Región 2. Es notable, que en un periodo de retorno de 5 años, las regiones 1, 3 y 4 inician con sequía severa, en cambio, la Región 2 presentará sequía moderada. A medida que aumenta el periodo de retorno, la intensidad de la sequía incrementa, no obstante, en cada región y periodo de tiempo, la evolución y desarrollo de la sequía es diferente.

## 5.5 Etapa 5: Mapeo

Para una mejor comprensión e interpretación de la magnitud, intensidad y distribución espacio-temporal de la sequía hidrológica asociada a los periodos de retorno 5, 10, 20, 50 y 100 años, se generaron mapas de cuantiles (caudales en lámina de agua/escorrentía) por cada periodo de retorno. A continuación se da a conocer el resultado:

Figura 12. Regionalización de la sequía hidrológica a un  $Tr = 5$  años



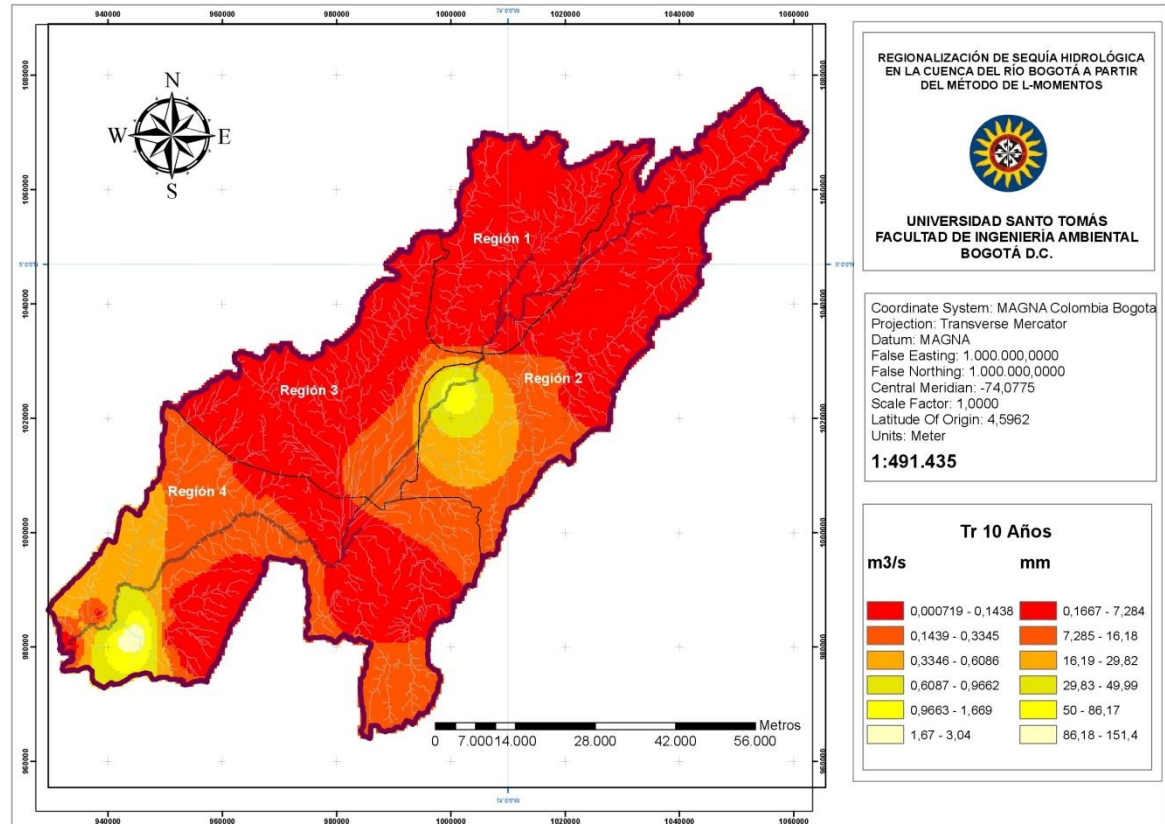
Fuente: Autores.

En la cuenca del río Bogotá se espera que a un  $Tr = 5$  Años en la Región 1 se presente un déficit del 53% catalogándose como la ocurrencia de una sequía severa con caudales entre  $0,002 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $529 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $0,2347\text{mm}$ - $23,05\text{mm}$ ). En la Región 2 se presenta un déficit del 38% clasificándose como sequia severa con caudales cercanos a los  $0,002 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $0,989 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $0,234\text{mm}$ - $44,27\text{mm}$ ). En la Región 3 se determinó un déficit del 73%, catalogada como una sequía severa con caudales de  $0,002 \text{ m}^3/\text{s}$  y a  $0,529 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $0,234\text{mm}$ - $23,05\text{mm}$ ), indicando una de las zonas más críticas y revelando una importante amenaza para la población de los municipios Subachoque, El Rosal, Tenjo, Cota, Facatativá, Madrid, Funza, Anolaima, Zipacón, Bojacá y Mosquera. Por último, en la Región 4 se presenta un déficit del 60% clasificada como sequia severa ,presentándose un mayor déficit en la parte noreste con caudales de  $0,002 \text{ m}^3/\text{s}$  y a  $0,529 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $0,23 \text{ mm}$  -  $23,05 \text{ mm}$ ), ubicadas las poblaciones de Cachipay, Tena, La Mesa, Anapoima, San Antonio del Tequendama, Mesitas del Colegio, Viota, Bojacá, Mosquera, Soacha, Sibaté.

Finalmente, en la zona suroccidental de la cuenca se observa una tendencia de la escorrentía a aumentar de noreste a sur, concentrando los valores más altos en

los municipios de Tocaima, Apulo y Viota con valores que se encuentran entre 0,989 m<sup>3</sup>/s y 4,338 m<sup>3</sup>/s (entre 44,28 mm y 216,2 mm).

Figura 13. Regionalización de la sequía hidrológica a un Tr = 10 años



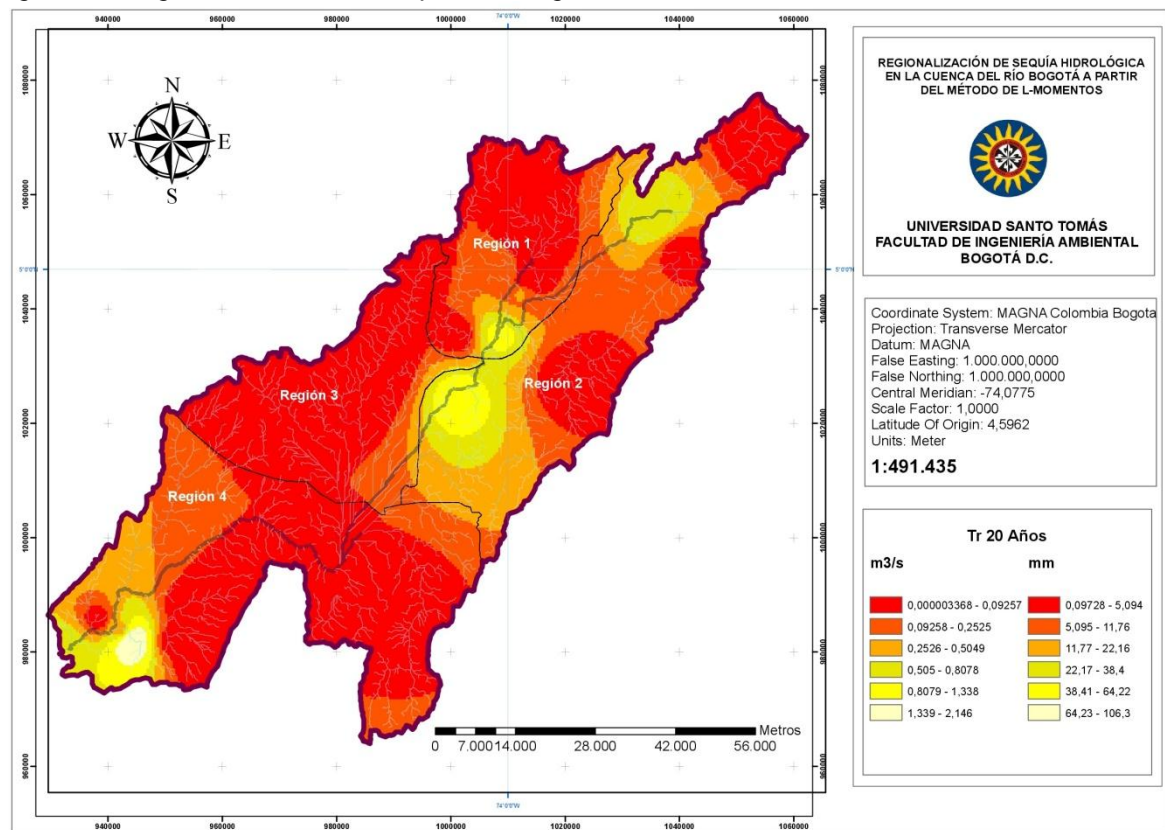
Fuente: Autores.

Para el Tr = 10 Años en la cuenca del Río Bogotá se espera que en la Región 1 se presente un déficit del 67% relacionándose como la ocurrencia de una sequía severa con caudales entre 0,0023 m<sup>3</sup>/s y 1,6514 m<sup>3</sup>/s (0,1667mm - 49,99mm). En la Región 2 se presenta un déficit del 51% específicamente como la ocurrencia de una sequía severa con caudales cercanos a los 0,0023 m<sup>3</sup>/s y 1,6514 m<sup>3</sup>/s (0,1667mm - 49,99mm). En la Región 3 se determinó un déficit del 89%, catalogada como una sequía extrema con caudales de 0,0023 m<sup>3</sup>/s y a 0,5293 m<sup>3</sup>/s (0,1667mm - 16,18mm), indicando una de las zonas más críticas y revelando una importante amenaza para la población de los municipios Subachoque, El Rosal, Tenjo, Cota, Facatativá, Madrid, Funza, Anolaima, Zipacón, Bojacá y Mosquera. En la Región 4 se presenta un déficit del 72% clasificada como sequia severa ,presentándose un mayor déficit en la parte noreste con caudales de 0,0023 m<sup>3</sup>/s y a 0,5293 m<sup>3</sup>/s (0,1667mm-16,18mm), ubicadas las poblaciones de Cachipay, Tena, La Mesa, Anapoima, San Antonio del Tequendama, Mesitas del Colegio, Viota, Bojacá, Mosquera, Soacha, Sibaté. Es de resaltar una tendencia donde la

cuenca tiende a aumentar de norte a sur, concentrando los valores más altos en los municipios de Tocaima, Apulo y Viota con valores que se encuentran entre 0,5294 m<sup>3</sup>/s y 4,337 m<sup>3</sup>/s (entre 29,83 mm y 151,4 mm).

Por otro lado, ambos escenarios comparten zonas donde convergen los valores más altos que son: el primero ubicado en Chocontá y el al norte de la ciudad de Bogotá y gran parte del municipio de Chía con valores que están entre 0,5294 m<sup>3</sup>/s y 1,6514 m<sup>3</sup>/s (entre 16,19 mm y 49,99 mm). Y el segundo, situado sobre los municipios de Tocaima (al este), Apulo (al este) y Viota (al oeste) con valores entre 0,9885 m<sup>3</sup>/s y 4,3377 m<sup>3</sup>/s (86,18 mm y 151,4 mm).

Figura 14. Regionalización de la sequía hidrológica a un Tr = 20 años



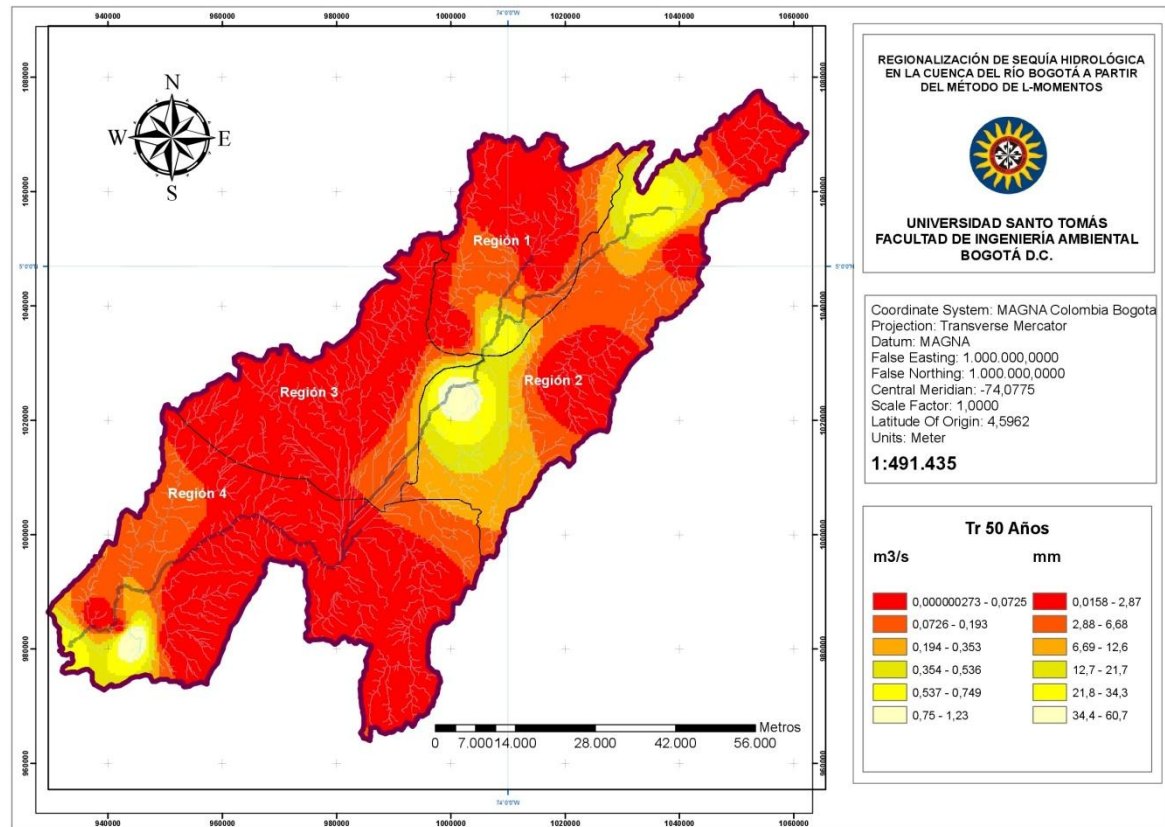
Fuente: Autores.

A un periodo de retorno de 20 años, los valores más bajos de escorrentía que varían entre 0,097 mm y 11,76 mm (entre 0 y 0,2525 m<sup>3</sup>/s) se extienden por toda la cuenca (especialmente en las regiones 1, 3 y 4), exceptuando las 3 zonas concéntricas donde se evidencia una mayor acumulación de agua. Dichas zonas se sitúan de la siguiente forma: primero, en la frontera entre Apulo, Tocaima y Viotá donde el flujo de agua oscila entre 0,505 m<sup>3</sup>/s y 2,146 m<sup>3</sup>/s (entre 22,17 mm y 106,3 mm); el segundo lugar, se encuentra en el municipio de Chía y al Norte del

municipio de Sopó con caudales entre 0,505 m<sup>3</sup>/s y 1,338 m<sup>3</sup>/s (entre 22,17 mm y 64,22 mm); y en último lugar, sobre los límites geográficos entre Suesca y Chocontá se estiman caudales entre 0,505 m<sup>3</sup>/s y 0,808 m<sup>3</sup>/s (entre 22,17 mm y 38,4 mm).

La mayor cobertura de los niveles bajos de escorrentía se debe a que en las regiones 1, 3 y 4 se considera la ocurrencia de un déficit del 76%, 100% y 81% respectivamente, que corresponden a sequía extrema.

Figura 15. Regionalización de la sequía hidrológica a un Tr = 50 años

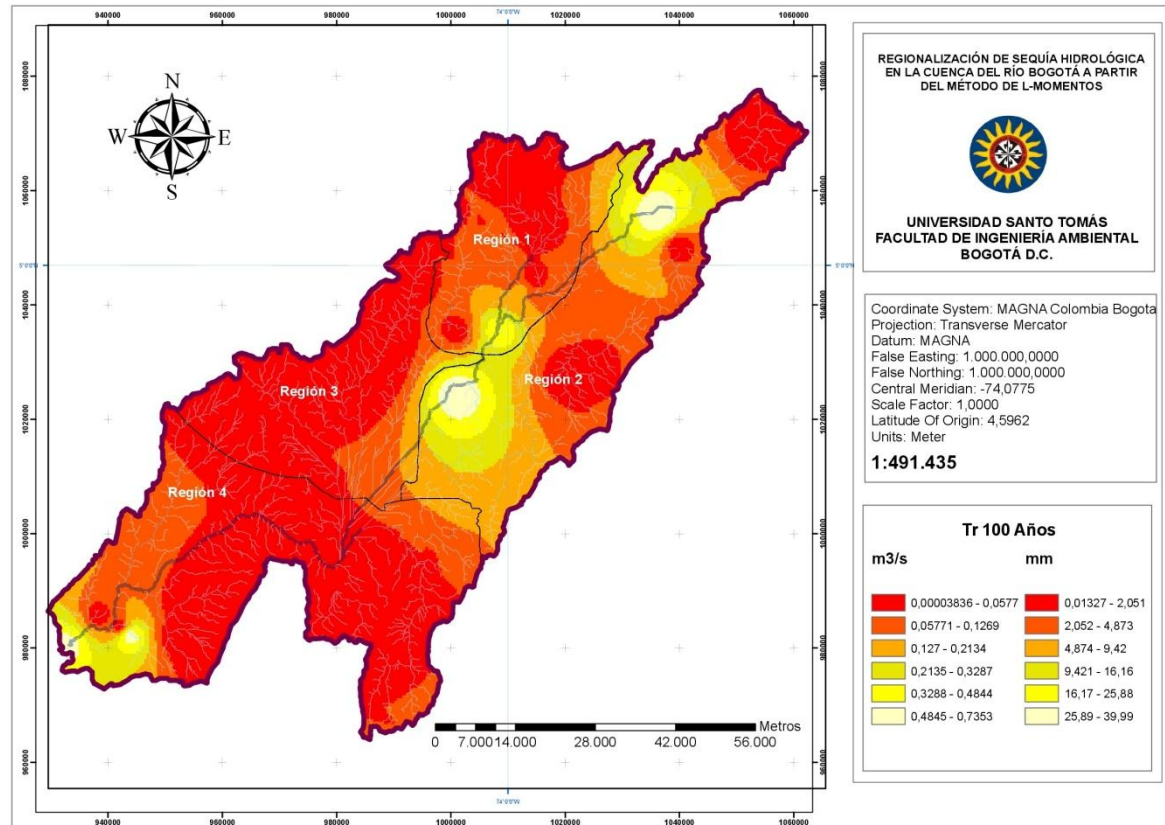


Fuente: Autores.

Al igual que el escenario anterior, predomina la sequía extrema (75% - 100%) distinguida por las regiones 1, 3 y 4 con déficits de agua del 86%, 100% y 89% respectivamente, obteniendo así, un flujo superficial promedio que oscila entre 0,016 mm y 6,678 mm (entre 0 y 0,193 m<sup>3</sup>/s) en las tres regiones mencionadas. Además, ambos escenarios comparten los lugares previamente descritos donde convergen los valores más altos, presentando para este periodo caudales entre 0,353 m<sup>3</sup>/s y 1,232 m<sup>3</sup>/s (entre 12,64 mm y 60,69 mm) en el primer y segundo punto; y adicional, en el tercer punto fluctúa entre 0,353 m<sup>3</sup>/s y 0,749 m<sup>3</sup>/s (entre 12,64 mm y 34,28 mm).

A pesar que en el mapa se observan los mismos puntos de convergencia de valores máximos según la escala, la cantidad de agua disponible no será suficiente para satisfacer la demanda que requiere la población en un futuro a mediano plazo.

Figura 16. Regionalización de la sequía hidrológica a un  $Tr = 100$  años



Fuente: Autores.

En el mapa se observa el escenario más crítico, al reflejar los valores de flujo superficial que implica una sequía extrema en la totalidad del área de la cuenca del río Bogotá, puesto que el déficit hídrico oscila entre 75% y 100%. Es decir que, todas las actividades que requieren el recurso hídrico corren peligro, al igual que todas las personas que sufrirán los daños colaterales que involucra una sequía de gran magnitud.

A un periodo de retorno de 100 años, los flujos de escorrentía en toda la extensión de la cuenca permanecen por debajo de 40 mm (0,735 m<sup>3</sup>/s) de agua, a diferencia del escenario anterior, que presenta valores de escorrentía en general por debajo de 60,69 mm (1,232 m<sup>3</sup>/s), lo que significa, que luego de transcurrir 50 años, el flujo superficial se reducirá un 35% aproximadamente.

Los rangos más altos se localizan en los mismos 3 sitios descritos al suroeste, centro y noreste de la Cuenca con un caudal que varía entre 0,214 m<sup>3</sup>/s y 0,735 m<sup>3</sup>/s (entre 9,421 mm y 39,99 mm). En contraste, el área restante presenta valores por debajo de 0,213 m<sup>3</sup>/s (9,421 mm) de agua.

En conclusión, teniendo en cuenta la caracterización de la sequía hidrológica en cada periodo de retorno y visto desde un ámbito global, el primer sector en recibir las consecuencias de la sequía es la totalidad de la Región 3, seguida de la Región 4 (omitiendo el lugar de acumulación de agua) y finalmente, la Región 1. En general, la escorrentía va disminuyendo paulatinamente en el transcurso del tiempo hasta llegar a escenarios más críticos y sequías extremas que perjudicarían a la totalidad del área que circunscribe la cuenca del río Bogotá.

Cabe destacar, que al noreste de la cuenca, sobre el nacimiento del río Bogotá en Villapinzón, se observó que se presentaban también los caudales más bajos en todos los escenarios, a pesar de estar localizada en la Región 2, quien percibe el menor % de déficit con respecto a las demás regiones homogéneas.

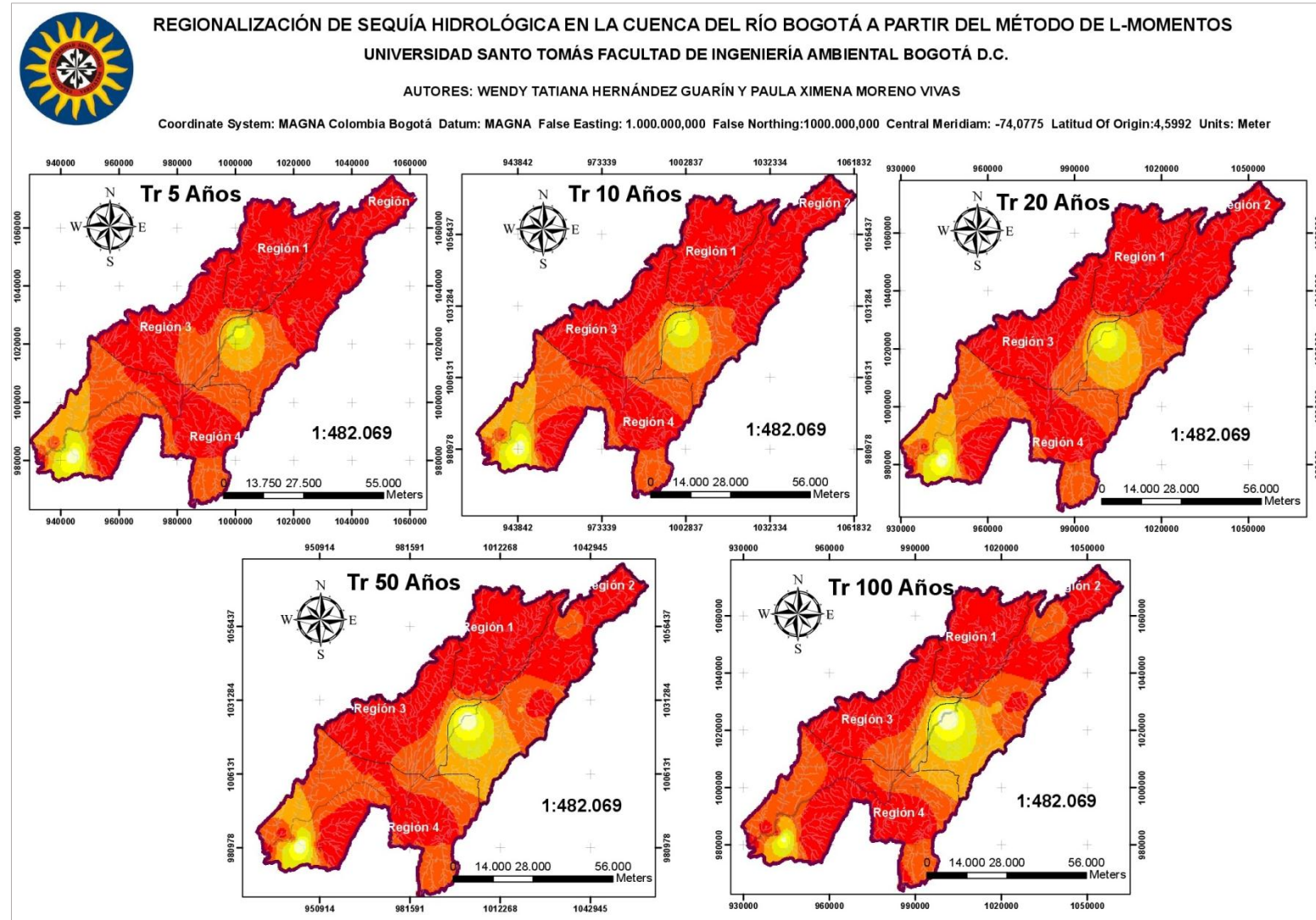
### **5.5.1 Aporte ingenieril**

Finalmente, los resultados del presente trabajo constituyen aportes significativos para la planificación y la gestión de manera integral de los recursos hídricos, determinando las zonas con mayor magnitud de eventos de sequía, lo que, asociados a mapas de vulnerabilidad a la sequía, permite obtener mapas de riesgo de sequía, útiles en la toma de decisiones en planes de gestión del riesgo. Así mismo, sirve de insumo para el establecimiento de un sistema de indicadores capaz de anticipar la sequía y realizar su previsión, seguimiento y control, los cuales además permitan activar los pertinentes protocolos de alerta temprana.

Los resultados de este estudio permiten avanzar en el conocimiento de las amenazas, la vulnerabilidad y el riesgo de eventos de sequía, e igualmente, apoya la toma de decisiones en materia de planificación y ordenamiento ambiental del territorio, cooperando a la mejora de las herramientas y las soluciones técnicas disponibles para evaluar las consecuencias económicas, ambientales y sociales de las limitaciones hídricas en los planes de expansión de la producción agrícola, ganadera, energética, urbana e industrial de una región.



Figura 17. Evolución de la distribución espacio-temporal de la sequía hidrológica



Fuente: Autores.

## 6 CONCLUSIONES

En el presente documento se aplicó la metodología de los L-Moments para regionalizar eventos mínimos, utilizando las estaciones hidrometeorológicas que proporcionó el IDEAM (150), la CAR (61) y la EAAB (17). Para este análisis se utilizaron las estaciones con un mínimo de 24 años de registro y un porcentaje de datos faltantes no mayor al 30%, por lo tanto, se obtuvo una muestra de 32 estaciones con registros de caudales mínimos mensuales, correspondiente al 14,04% del total disponible (228 estaciones).

De la revisión y control de calidad de los datos se obtuvo: 27 estaciones que cumplieron con el test de homogeneidad y 29 estaciones que cumplieron con la prueba de estacionaridad, equivalentes al 84,4% y 90,6% del total de estaciones respectivamente.

Por otro lado, se detectaron 332 datos atípicos mediante el Test de Grubbs, que corresponden al 4,12% de la totalidad de los datos (9.216), de los cuales sobresalen las estaciones 2120742, 2120796 y 2120882 con valores máximos de caudal mínimo de 47,012 m<sup>3</sup>/s, 62,590 m<sup>3</sup>/s y 83,465 m<sup>3</sup>/s respectivamente; producto del comportamiento hidroclicmático del país durante el fenómeno de “La Niña” 2010-2011, con una alta incidencia del evento en la región Andina. Por ende, la muestra compuesta por las 32 estaciones es representativa y fiable para la estimación de cuantiles.

A partir de un proceso iterativo se definieron 4 grupos de estaciones basadas en los atributos geográficos y climáticos de la Cuenca del Río Bogotá (latitud, longitud y altitud), los cuales se definieron como regiones hidrológicamente homogéneas al cumplir con los criterios de discordancia  $D_i$  y Homogeneidad  $H_1$ .

La distribución de probabilidad que mejor representó el comportamiento de los eventos mínimos referentes a las 4 regiones fue la Generalizada del Valor Extremo (GEV), determinado a partir del diagrama convencional de ratios de L-momentos y el test de bondad de ajuste denominado  $Z^{DIST}$ .

La estimación de los cuantiles regionales permitió caracterizar la sequía hidrológica, a partir de la media de la curva de crecimiento regional, la cual se estableció como el nivel de truncamiento o umbral para definir la magnitud de la sequía hidrológica en términos del déficit hídrico.

La sequía de la región 3 presenta una mayor magnitud en comparación con las demás regiones en los periodos de retorno (5, 10, 20,50 y 100), lo cual etiqueta esta zona como una de la más vulnerable frente a la sequía hidrológica. Sin embargo la zona de estudio refleja la ocurrencia de sequía severa y extrema para

los diferentes periodos de retorno evaluados, siendo más intensa en los periodos de retorno de 50 y 100 años.

La caracterización de la sequía hidrológica en la cuenca del río Bogotá para diferentes periodos de retorno (5, 10, 20, 50 y 100 años), revelo que para aguas arriba de los Embalse del Neusa localizado en la región 1 presenta ocurrencia de sequías severas con un déficit del 53% a un periodo de retorno de 5 años, sequia severa con un déficit del 67% a un periodo de retorno de 10 años, sequía extrema con déficit del 76% a un periodo de retorno de 20 años, sequía extrema a periodos de retorno de 50 a 100 años con déficits del 86% y 93% respectivamente.

Para aguas arriba de los Embalses del Sisga y Tominé ubicados en la región 2 se esperarán sequías moderadas con déficits del 38% a un periodo de retorno de 5 años, sequia severa con un déficit del 51% a un periodo de retorno de 10 años, sequia severa con déficit del 60% a un periodo de retorno de 20 años, sequia severa con déficit del 70% a un periodo de retorno de 50 años, sequía extrema con déficit del 76% a un periodo de retorno de 100 años.

Para aguas arriba del Embalse del Muña situado en la región 4, se estima la ocurrencia de sequías severas con déficits del 60% a un periodo de retorno de 5 años, sequia severa con un déficit del 72% a un periodo de retorno de 10 años, sequia extremas a periodos de retorno 20, 50 y 100 años con déficit del 81%, 89%, 95% respectivamente. Conocer dichos déficits resulta de gran interés debido a que afectan directamente sus operaciones, debido a la disminución de los volúmenes de aportes por parte de la cuenca.

## 7 RECOMENDACIONES

La metodología permitió identificar las zonas que presentan una mayor probabilidad de eventos de sequía hidrológica. Esta información, en conjunto con mapas temáticos de vulnerabilidad asociados a eventos de sequía, permitirá desarrollar análisis cartográficos de riesgos de sequías, utilizados en toma de decisiones de planes de gestión del riesgo. Es necesario tener en cuenta la capacidad de adaptación de la sociedad frente a escenarios de déficit hídrico, incorporando aspectos relacionados con diferentes tipos de sequía, y no solo con la sequía hidrológica.

Se sugiere para estudios futuros de sequía en la cuenca hidrográfica del río Bogotá, otros tipos de sequía (meteorológica, agrícola y socioeconómica), para constatar la información y obtener escenarios representativos de la realidad, con los cuales se puedan tomar decisiones a futuro para la mitigación de los impactos que se originan en cada etapa de desarrollo de este fenómeno. Esto fortalece la interpretación de los resultados y la confiabilidad de las predicciones inferidas a partir de estos.

En el presente trabajo se consideró la magnitud, frecuencia y distribución espacial de la sequía hidrológica, por consiguiente, es fundamental llevar a cabo un estudio que evalúe la duración y persistencia de este fenómeno, dado que permiten definir el tiempo y regularidad de la sequía.

Para estudios posteriores se propone el uso de índices específicos para la caracterización de la sequía hidrológica en los embalses que conforman el sistema de regulación hídrica de la Cuenca del Río Bogotá, con la finalidad de confrontar los hallazgos a nivel regional con los resultados a nivel local debido a que los déficits del recurso aguas arriba modifican los volúmenes y los tiempos de regulación de los embalses que tienden a amortiguar el efecto de las sequías, afectando la generación hidroeléctrica y el suministro de agua doméstica, agrícola e industrial.

Se debe considerar evaluar la demanda de agua que tiene la cuenca, considerando factores importantes como el sector doméstico e industrial. Así como analizar la variabilidad climática y su relación con la respuesta hidrológica de la cuenca del Río Bogotá.

Se invita a profundizar en el impacto social y económico que conllevaría la sequía hidrológica, ya sea, sobre las actividades económicas predominantes en la cuenca como la agricultura, floricultura y ganadería, al igual, de examinar su incidencia en la salud y calidad de vida.

## 8 BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Mayorga Márquez y G. Hurtado, «LA SEQUÍA EN COLOMBIA,» Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, Bogotá D.C., 2006.
- [2] Ecoforest Ltda, «Soporte Plan de manejo y ordenamiento de una cuenca, POMCA Rio Bogotá. Elaboración del diagnostico, prospectiva y formulación de la cuenca,» Bogotá, 2005.
- [3] Gobernación de Cundinamarca, Secretaria de Planeación, «1. Apartes especiales 1.2 Río Bogotá,» Gobernación de Cundinamarca, Secretaria de Planeación, Sede Administrativa, Bogotá D.C., 2014.
- [4] Instituto de Estudios Urbanos, «Instituto de Estudios Urbanos,» [En línea]. Available: <http://www.institutodeestudiosurbanos.info/endatos/index.php>. [Último acceso: 12 Abril 2017].
- [5] Organización Meteorológica Mundial - OMM, Vocabulario Meteorológico Internacional, Ginebra: Organización Meteorológica Mundial - OMM, 1992.
- [6] R. Márquez y G. Hurtado, «LA SEQUÍA EN COLOMBIA DOCUMENTO TÉCNICO DE RESPALDO A LA INFORMACIÓN EN LA PÁGINA WEB DEL IDEAM,» Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Bogotá, 2006.
- [7] Ó. M. Valiente, «SEQUÍA: DEFINICIONES, TIPOLOGÍAS Y MÉTODOS DE CUANTIFICACIÓN,» Instituto Universitario de Geografía, Barcelona, España, 2001.
- [8] G. Monsalve Sáenz, Hidrología en la ingeniería, Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1999.
- [9] R. C. Naranjo Toledo, «Análisis regional de frecuencia mediante el método de los L-Momentos en las regiones de Valparaíso y metropolitana para la generación de cartografía probabilística de sequía metereológica,» Santiago de Chile, 2011.
- [10] V. Chow, Statistical and probability analysis of hydrologic data; part I: frequency analysis. In: Handbook of applied hydrology; a compendium of water resources technology., 1964.
- [11] Organización Meterológica Mundial-OMM, «Guía de Prácticas;Adquisición y proceso de datos, analisis,predicción y otas aplicaciones.,» 1994.

- [12] M. D. M. N. V. y. K. A. Zalina, «Selecting a probability distribution for extreme rainfall series in Malaysia,» *Water Science and Technology*, vol. 45, nº 2, pp. 63-68, 2002.
- [13] J. y. C. C. Benjamin, Probabilidad y estadística en ingeniería civil, Bogotá: McGraw-Hill, 1981.
- [14] J. V. R. y. F.-G. E. Stedinger, Frequency analysis of extreme events, New York: McGraw-Hill, 1993.
- [15] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, «Análisis Regional de precipitaciones máximas en las cuencas Chillón, Rimac, Lurín y parte alta del mantaro,» Perú, 2014.
- [16] J. y. W. J. Hosking, Regional Flood Frequency Analysis: an Approach based on Lmoments, New York: Cambridge University Press, 1997.
- [17] J. R. & W. J. Hosking, Regional frequency analysis, Cambridge University Press, 1997.
- [18] J. V. K. Nuñez Cobo, «Guía metodológica para la aplicación del Análisis Regional de Frecuencia de Sequías basado en L-momentos y resultados de aplicación en América Latina,» Uruguay, 2010.
- [19] MGS Software, LLC, *L-Rap L-Moments Regional Analysis Program Users Manual*, Boston : Olympia, 2015.
- [20] M. Alvarez , J. Puestas y E. Peña, «Regional frequency analysis of extremes precipitations in Northern of Mozambique,» *Ingeniería del Agua* , pp. 29-42 Vol.20.1, 2016.
- [21] M. Villatoro, C. Henríquez y F. Sancho, «Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo,» *Agronomía Costarricense*, vol. 32, nº 1, 2008.
- [22] A. Arbeláez y L. Castro, «Racionalización de caudales mínimos en una región del departamento del Cauca Colombia, utilizando la distribución de Wakeby,» *Avances en Recursos Hidráulicos*. ISSN 01215701, Medellín, 2004.
- [23] P. Guajardo, R. Granados y C. Sánchez, «Pruebas de homogeneidad de varianza a series de precipitación y temperatura de estaciones del estado de Veracruz y áreas aledañas,» Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, 2014.

- [24] T. Mutphy, «Manejo de valores atípicos,» Sociedad Estadounidense de Calidad (ASQ), Estados Unidos, 2008.
- [25] G. Podestá, «Descripción de índices para el monitoreo de sequía meteorológica implementados por el Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur,» Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur (CRS-SAS), Buenos Aires, 2016.
- [26] A. Steinemann, M. Hayes y L. Cavalcanti, «Drought indicators and triggers,» Drought and Water Crises Science, Technology, and Management Issues. Taylor and Francis group., Boca Raton, 2005.
- [27] J. Núñez, K. Verbist, J. Wallis y M. Schaefer, «Regional frequency analysis for mapping drought events in north-central Chile,» de *Journal of Hydrology*, Chile, K.P. Sudheer, Associate Editor, 2011, pp. 352-366.
- [28] D. F. Campos Aranda, Procesos del Ciclo Hidrológico, México: Universitaria Potosina, 1998.
- [29] J. M. S. B. B. & G. T. Wallis, *Regional precipitation-frequency analysis and spatial mapping for 24-hour and 2-hour durations for Washington States*, 2007.
- [30] M. P. J. y S. B. Alvarez, *Análisis regional de las precipitaciones máximas en Galicia mediante el método del índice de avenida.*, 1999.
- [31] L. y F. P. Ayala, *Análisis de frecuencia de datos hidrológicos mediante computación.*, Santiago de Chile, 1973.
- [32] J. J. J. y S. L. Arumí, *Curso de formulación de proyectos de aspersión para la ley N° 18.450*, Temuco, 2000.
- [33] A. y Z. H. Bradley, *Climatic variations in extreme precipitation in the Midwest*, Iowa, 1997.
- [34] J. Jara, «Análisis de frecuencias bayesiano de series de datos hidrológicos,» Santiago, 1986.
- [35] G. N. S. P. y T. T. Jaiswal R., *L moments based flood frequency modelling*, 2003.
- [36] G. Kite, *Frequency and risk analyses in hydrology*, Fort Collins, Colorado: Water Resources Publications, 1977.
- [37] D. Labbé, «Análisis de datos de lluvia,» Chillán, 1979.

- [38] A. y. S. U. Okur, *Application of at site regional regional frequency analyses by using the L-moments technique*, 2000.
- [39] E. Varas, «Fundamentos de probabilidad y estadística para hidrología,» Lima, 1982.
- [40] A. L. F. & C. P. Viglione, *A comparison of homogeneity tests for regional frequency análisis*, 2007.
- [41] V. Yevjevich, *Probability and statistics in hydrology*, Fort Collins, Colorado, 1978.
- [42] P. L. Correa V., J. I. Velez U., R. A. Smith Q., A. J. Vélez, A. E. Barrientos y J. D. Gómez, «Metodología de balance hídrico y de sedimentos como herramienta de apoyo para la gestión integral del complejo lagunar del bajo Sinú,» *Avances en recursos hidráulicos*, nº 14, pp. 71-86, 2006.
- [43] J. y. W. E. Wallis, «Estimation of the generalized extreme-value distribution by the method of probability-weighted moments,» *Technometrics*, vol. 2, pp. 251-61, 1985.
- [44] C. Cunnane, «Methods and merits of regional flood frequency analysis,» *Journal of Hydrology*, vol. 100, pp. 269-290, 1988.
- [45] N. y. W. E. Greis, «Regional flood frequency estimation and network design,» *Water Resources research*, vol. 19, pp. 589-678, 1981.
- [46] J. Hosking, «L-moments Analysis and Estimation of Distributions using LinearCombination of Order Statistics,» *Journal of Stat Society, B*, vol. 52, pp. 105-124, 1990.
- [47] J. N. M. y. J. W. Landwehr, «Probability weighted moments compared with some traditional techniques in estimating Gumbel parameters and quantiles,» *Water Resources Research*, vol. 15, pp. 1055-1064, 1979.
- [48] A. S. A. H. a. O. Anli, «Regional Flood Frequency Estimation for the Göksu River Basin through L-moments,» *General Directorate of Turkish State Hydraulic Works*, vol. 1, pp. 424-438, 2007.
- [49] S. L. Y. V. J. y. S. J. Cong, «Identification of the underlying distribution form of the precipitation by using regional data.,» *Water Resources Research*, vol. 29, pp. 1103-11, 1993.
- [50] CAR, «Evaluación Ambiental y Plan de Gestión Ambiental,» Bogotá, 2008.



- [51] I. N. Galeano, «ADAPTACIÓN DEL METODO L-MOMENTS PARA LA REGIONALIZACIÓN DE EVENTOS MÁXIMOS PARA LAS CUENCAS DE COLOMBIA,» Bogotá D.C., Mayo 2015.
- [52] Programa Hidrológico internacional de la UNESCO para America Latina y el Caribe, «Guía Metodológica para la Aplicación del Análisis Regional de Frecuencia de sequías Basado en L-momentos y Resultados de aplicación en América Latina,» UNESCO, Montevideo, Uruguay, 2010.
- [53] D. y. G. M. Wilhite, «Understanding the drought phenomenon: the role definitions,» *Water international*, vol. 10, nº 1, pp. 111-120, 2004.
- [54] L. M. & V. L. H. A. Tallaksen, « Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater,» *ELSEVIER*, vol. 48, nº 1, 2004.
- [55] S. Vicente-Serrano, J. I. López Moreno, S. Beguería, J. L. Lacruz, C. Azorin Molina y E. Morán Tejeda, «Accurate Computation of a Streamflow Drought Index,» *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 17, nº 2, pp. 318-332, 2011.
- [56] X. C. S. Q. Z. Z. J. M. P Shi, «Regional frequency analysis of low flow based on L moments: Case study in Karst area, Southwest China,» *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 15, nº 5, pp. 370-377, 2009.
- [57] J. L. D. Y. W. Wallis, «A daily hidro-climatologicdata set for the continental US.,» *Water Resources*, Vols. %1 de %21657-1663, p. Vol 27, 1991.
- [58] CAR; FIAB, «Río Bogotá Adecuación Hidráulica y Recuperación Ambiental,» Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR, Bogotá D.C., 2009.
- [59] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), «Censo de Fincas Productoras de Flores En 28 municipios de la Sabana de Bogotá y Cundinamarca 2009,» Dirección de Regulación, Planeación, Estandarización y Normalización (DIRPEN), Bogotá D.C., 2010.
- [60] Gobernación de Cundinamarca, «Estadísticas de Cundinamarca 2011-2013,» Panamericana Formas e impresos S.A., Bogotá D.C., 2014.
- [61] N. L. Rodríguez, «El estudio a la sequia hidrológica en el mediterráneo español.propuesta de aplicación del indice estanderizado de sequia pluviometrica a las aportaciones hidricas.,» Universidad de Sevilla, España, 2013.

- [62] C. Bayés Bruñol, A. Ribas Palom y S. P. Saurí Pujol, «Sequías Y Prensa Regional En La Cuenca Del Río Muga (Girona),» GEOGRAPHICALIA, Girona, 2003.

## **ANEXOS**

Distribución	Función de distribución $F(x)$ y Función cuantil $x(F)$	L-momentos y ratios de L- momentos	Estimación de parámetros.
<b>Pareto Generalizado (GPA)</b>	$x(F) = \varepsilon + \alpha \frac{1 - [1 - F(x)]^K}{K}$	$\lambda_1 = \xi + \frac{\alpha}{1+k}$ $\lambda_2 = \frac{\alpha}{(1+K)(2+K)}$ $\tau_3 = \frac{1-k}{3+k}, \tau_4 = \frac{(1-k)(2-k)}{(3+k)(4+k)}$	$K = \frac{(1-3\tau_3)}{1+\tau_3}$ $\alpha = (1+k)(2+k)\lambda_2$ $\xi = \lambda_1 - (2+k)\lambda_2$
<b>Valor extremo Generalizado (GEV)</b>	$x(F) = \varepsilon + \alpha \frac{1 - [-\ln F(x)]^k}{k}$	$\lambda_1 = \xi + \alpha \frac{1 - \Gamma(1+k)}{k}$ $\lambda_2 = \alpha \frac{(1-2^{-k})\Gamma(1+k)}{k}$ $\tau_3 = \frac{2(1-3^{-k})}{1-2^{-k}} - 3$ $\tau_4 = \frac{1 - 6 \cdot 2^{-k} + 10 \cdot 3^{-k} - 5 \cdot 4^{-k}}{1-2^{-k}}$	$c = \frac{2}{3+\tau_3} - \frac{\ln 2}{\ln 3}$ $K = 7.8590c + 2.9554c^2$ $\alpha = \frac{\lambda_2 k}{(1-2^{-k})\Gamma(1+k)}$ $\xi = \lambda_1 - \frac{\alpha[1 - \Gamma(1+k)]}{k}$
<b>Logístico Generalizado (GLO)</b>	$x(F) = \varepsilon + \alpha \frac{1 - \left[\frac{1-F(x)}{F(x)}\right]^k}{k}$	$\lambda_1 = \xi + \alpha \frac{1 - \Gamma(1+k)\Gamma(1-k)}{k}$ $\lambda_2 = \alpha \Gamma(1+k)\Gamma(1-k)$ $\tau_3 = -k$ $\tau_4 = \frac{1+5k^2}{6}$	$k = -\tau_3$ $\alpha = \frac{\lambda_2 \text{Sink}\pi}{k\pi}$ $\xi = \lambda_1 - \alpha \left( \frac{1}{k} - \frac{\pi}{\text{Sink}\pi} \right)$

Distribución	Función de distribución $F(x)$ y Función cuantil $x(F)$	L-momentos y ratios de L-momentos	Estimación de parámetros.
<b>Normal Generalizado (GNO)</b>	$F(x) = \frac{e^{k \cdot y - y^2/2}}{\alpha \sqrt{2\pi}}$ $y = \begin{cases} -k^{-1} \ln \left[ 1 - \frac{k(x - \xi)}{\alpha} \right], & k \neq 0 \\ \frac{x - \xi}{\alpha}, & k = 0 \end{cases}$ <p><math>F(x) = \Phi(y)</math>  <math>x(F)</math> No tiene forma analítica explícita.  <math>\Phi</math>, es la función de distribución acumulada de la distribución normal estándar.</p>	$\lambda_1 = \xi + \alpha \frac{1 - \exp\left(\frac{k^2}{2}\right)}{k}$ $\lambda_2 = \frac{\alpha e^{\frac{k^2}{2}}}{k} \left[ 1 - 2\Phi\left(-\frac{k}{\sqrt{2}}\right) \right]$ $\tau_3 = -k \frac{A_0 + A_1 K^2 + A_2 K^4 + A_3 K^6}{1 + B_1 K^2 + B_2 K^4 + B_3 K^6}$ $\tau_4 \approx \tau_4^0 - K \frac{C_0 + C_1 K^2 + C_2 K^4 + C_3 K^6}{1 + D_1 K^2 + D_2 K^4 + D_3 K^6}$ <p><math>\tau_4, \tau_4^0</math>: Sus expresiones son complejas, por lo que se utilizan expresiones con precisión de <math>2 \times 10^{-7}</math> y <math>5 \times 10^{-7}</math> respectivamente.</p>	$k \approx -\tau_3 \frac{E_0 + E_1 \tau_3^2 + E_2 \tau_3^4 + E_3 \tau_3^6}{1 + F_1 \tau_3^2 + F_2 \tau_3^4 + F_3 \tau_3^6}$ $\alpha = \frac{\lambda_2 k e^{-k^2/2}}{1 - 2\Phi(-k/\sqrt{2})}$ $\xi = \lambda_1 - \frac{\alpha}{k} (1 - e^{k^2/2})$

Distribución	Función de distribución $F(x)$ y Función cuantil $x(F)$	L-momentos y ratios de L-momentos	Estimación de parámetros.
<b>Pearson Tipo III (PE3)</b>	Si $\gamma \neq 0, \alpha = \frac{4}{\gamma^2}, \beta = \frac{1}{2}\sigma \gamma $	$\lambda_1 = \xi + \alpha\beta$	si; $0 <  \tau_3  < z = 3\pi\tau_3^2$
	$\gamma\varepsilon = \mu - 2\frac{\sigma}{\gamma}$	$\lambda_2 = \pi^{\frac{-1}{2}}\beta\Gamma\left(\alpha + \frac{1}{2}\right)/\Gamma(\alpha)$	$\alpha = \frac{1 + 0.2906z}{z + 0.1882z^2 + 0.04z^3}$
	Si: $\gamma > 0, \rightarrow \xi \leq x < \infty, y:$	$\tau_3 = -k \frac{A_0 + A_1K^2 + A_2K^4 + A_3K^6}{1 + B_1K^2 + B_2K^4 + B_3K^6}$	si; $\frac{1}{3} <  \tau_3  < 1 -  \tau_3 $
	$F(x) = \frac{G\left(\alpha, \frac{x-\xi}{\beta}\right)}{\Gamma\alpha}$	$\tau_4 \approx \tau_4^0 - K \frac{C_0 + C_1K^2 + C_2K^4 + C_3K^6}{1 + D_1K^2 + D_2K^4 + D_3K^6}$	$\alpha = \frac{0.36067z - 0.59567z^2 + 0.25361z^3}{1 - 2.78861z + 2.56096z^2 + 0.77045z^3}$
$\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1}e^{-t} dt, G(\alpha, x) = \int_0^x t^{\alpha-1}e^{-t} dt$	Las expresiones de $\tau_3$ y $\tau_4$ tienen expresiones de $10^{-6}$	$\gamma = 2\alpha^{-\frac{1}{2}} \text{Sign}(\tau_3)$	$\sigma = \lambda_2\pi^{\frac{1}{2}}\alpha^{\frac{1}{2}}\Gamma\left(\alpha + \frac{1}{2}\right)$
			$\mu = \lambda_1$

## ANEXO 2

### REGIÓN 1

**2120733**

• ***Cuantiles con parámetros de la estación:***

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120733	0,6423	0,4057	-0,1122	0,449	20%	5	0,449
				0,312	10%	10	0,312
				0,212	5%	20	0,212
				0,105	2%	50	0,105
				0,026	1%	100	0,026

• ***Cuantiles con parámetros regionales:***

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120733	0,612	0,3866	-0,1955	0,466	0,927	20%	5	0,432
				0,332		10%	10	0,308
				0,237		5%	20	0,22
				0,139		2%	50	0,129
				0,067		1%	100	0,062

**2120734**

• ***Cuantiles con parámetros de la estación:***

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120734	2,8149	1,3359	-0,0581	2,172	20%	5	2,172
				1,702	10%	10	1,702
				1,354	5%	20	1,354
				0,977	2%	50	0,977
				0,693	1%	100	0,693

• ***Cuantiles con parámetros regionales:***

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120734	2,4215	1,5295	-0,1955	0,466	3,667	20%	5	1,709
				0,332		10%	10	1,219
				0,237		5%	20	0,871
				0,139		2%	50	0,509
				0,067		1%	100	0,246

2120735

• *Cuantiles con parámetros de la estación:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120735	0,8143	0,8183	-0,1896	0,433	20%	5	0,433
				0,169	10%	10	0,169
				0	5%	20	0
				0	2%	50	0
				0	1%	100	0

• *Cuantiles con parámetros regionales:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120735	0,9730	0,6146	-0,1955	0,466	1,474	20%	5	0,687
				0,332		10%	10	0,49
				0,237		5%	20	0,35
				0,139		2%	50	0,205
				0,067		1%	100	0,099

2120768

• *Cuantiles con parámetros de la estación:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120768	0,8746	0,3088	-0,492	0,741	20%	5	0,741
				0,659	10%	10	0,659
				0,607	5%	20	0,607
				0,557	2%	50	0,557
				0,523	1%	100	0,523

• *Cuantiles con parámetros regionales:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120768	0,8863	0,5598	-0,1955	0,466	1,342	20%	5	0,626
				0,332		10%	10	0,446
				0,237		5%	20	0,319
				0,139		2%	50	0,186
				0,067		1%	100	0,09

2120793

• *Cuantiles con parámetros de la estación:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120793	3,6978	1,8630	-0,2351	2,838	20%	5	2,838
				2,256	10%	10	2,256
				1,849	5%	20	1,849
				1,430	2%	50	1,430
				1,129	1%	100	1,129

• *Cuantiles con parámetros regionales:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120793	3,5201	2,2234	-0,196	0,466	5,331	20%	5	2,484
				0,332		10%	10	1,771
				0,237		5%	20	1,266
				0,139		2%	50	0,740
				0,067		1%	100	0,358

2120867

• *Cuantiles con parámetros de la estación:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120867	16,3669	13,3082	0,0111	9,849	20%	5	9,849
				4,948	10%	10	4,948
				1,232	5%	20	1,232
				0	2%	50	0
				0	1%	100	0

• *Cuantiles con parámetros regionales:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120867	15,7844	9,9700	-0,1955	0,466	23,904	20%	5	11,140
				0,332		10%	10	7,943
				0,237		5%	20	5,675
				0,139		2%	50	3,318
				0,067		1%	100	1,605



2120877

• *Cuantiles con parámetros de la estación:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120877	19,1550	15,4979	-0,4497	12,359	20%	5	12,359
				8,166	10%	10	8,166
				5,424	5%	20	5,424
				2,778	2%	50	2,778
				0,982	1%	100	0,982

• *Cuantiles con parámetros regionales:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120877	26,6518	16,8342	-0,1955	0,466	40,361	20%	5	18,810
				0,332		10%	10	13,412
				0,237		5%	20	9,582
				0,139		2%	50	5,602
				0,067		1%	100	2,710

2120918

• *Cuantiles con parámetros de la estación:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120918	5,5460	2,3080	-0,1356	4,455	20%	5	4,455
				3,685	10%	10	3,685
				3,128	5%	20	3,128
				2,539	2%	50	2,539
				2,103	1%	100	2,103

• *Cuantiles con parámetros regionales:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120918	4,7760	3,0167	-0,1955	0,466	7,233	20%	5	3,371
				0,332		10%	10	2,404
				0,237		5%	20	1,717
				0,139		2%	50	1,004
				0,067		1%	100	0,486

## REGIÓN 2

2120742

- Cuantiles con parámetros de la estación:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120742	109,3927	45,6069	-0,0155	87,769	20%	5	87,769
				71,599	10%	10	71,599
				59,775	5%	20	59,775
				47,834	2%	50	47,834
				40,559	1%	100	40,559

- Cuantiles con parámetros regionales:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120742	107,5861	49,0828	-0,0104	0,618	136,43	20%	5	84,286
				0,49		10%	10	66,826
				0,396		5%	20	54,038
				0,301		2%	50	41,105
				0,243		1%	100	33,218

2120751

- Cuantiles con parámetros de la estación:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120751	5,2494	1,7798	0,5103	4,291	20%	5	4,291
				3,399	10%	10	3,399
				2,632	5%	20	2,632
				1,741	2%	50	1,741
				1,134	1%	100	1,134

- Cuantiles con parámetros regionales:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120751	4,4516	2,0309	-0,0104	0,618	5,645	20%	5	3,488
				0,49		10%	10	2,765
				0,396		5%	20	2,236
				0,301		2%	50	1,701
				0,243		1%	100	1,374

2120798

• *Cuantiles con parámetros de la estación:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120798	16,0102	6,6848	-0,1741	12,957	20%	5	13,141
				10,821	10%	10	10,774
				9,334	5%	20	9,030
				7,893	2%	50	7,294
				7,046	1%	100	6,278

• *Cuantiles con parámetros regionales:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120798	16,7543	7,6436	-0,0104	0,618	21,245	20%	5	13,126
				0,49		10%	10	10,407
				0,396		5%	20	8,415
				0,301		2%	50	6,401
				0,243		1%	100	5,173

2120799

• *Cuantiles con parámetros de la estación:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120799	0,9426	0,5777	-0,1318	0,676	20%	5	0,676
				0,486	10%	10	0,486
				0,353	5%	20	0,353
				0,221	2%	50	0,221
				0,144	1%	100	0,144

• *Cuantiles con parámetros regionales:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120799	1,0741	0,49	-0,0104	0,618	1,362	20%	5	0,841
				0,49		10%	10	0,667
				0,396		5%	20	0,539
				0,301		2%	50	0,41
				0,243		1%	100	0,332

2120815

• *Cuantiles con parámetros de la estación:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120815	2,4440	1,1993	0,0468	1,867	20%	5	1,867
				1,424	10%	10	1,424
				1,094	5%	20	1,094
				0,755	2%	50	0,755
				0,545	1%	100	0,545

• *Cuantiles con parámetros regionales:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120815	2,4313	1,1092	-0,0104	0,618	3,083	20%	5	1,905
				0,49		10%	10	1,510
				0,396		5%	20	1,221
				0,301		2%	50	0,929
				0,243		1%	100	0,751

2120816

• *Cuantiles con parámetros de la estación:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120816	7,3225	2,2201	-0,1554	6,304	20%	5	6,304
				5,586	10%	10	5,586
				5,083	5%	20	5,083
				4,594	2%	50	4,594
				4,304	1%	100	4,304

• *Cuantiles con parámetros regionales:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120816	7,1003	3,2393	-0,0104	0,618	9,004	20%	5	5,563
				0,49		10%	10	4,410
				0,396		5%	20	3,566
				0,301		2%	50	2,713
				0,243		1%	100	2,192

2120868

- *Cuantiles con parámetros de la estación:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120868	0,2551	0,1559	0,0742	0,18	20%	5	0,18
				0,121	10%	10	0,121
				0,077	5%	20	0,077
				0,031	2%	50	0,031
				0,003	1%	100	0,003

- *Cuantiles con parámetros regionales:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120868	0,2636	0,1202	-0,0104	0,618	0,334	20%	5	0,206
				0,49		10%	10	0,164
				0,396		5%	20	0,132
				0,301		2%	50	0,101
				0,243		1%	100	0,081

### REGIÓN 3

2120757

- *Cuantiles con parámetros de la estación:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120757	2,3871	3,1212	-0,3957	0,942	20%	5	0,942
				0,042	10%	10	0,042
				0	5%	20	0
				0	2%	50	0
				0	1%	100	0

- *Cuantiles con parámetros regionales:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120757	3,2561	3,2587	-0,2454	0,274	6,169	20%	5	1,689
				0,105		10%	10	0,646
				0		5%	20	0
				0		2%	50	0
				0		1%	100	0

2120758

- *Cuantiles con parámetros de la estación:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120758	15,2826	14,7795	-0,2654	8,213	20%	5	8,213
				3,547	10%	10	3,547
				0,127	5%	20	0,127
				0	2%	50	0
				0	1%	100	0

- *Cuantiles con parámetros regionales:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120758	15,3111	15,324	-0,2454	0,274	29,008	20%	5	7,944
				0,105		10%	10	3,039
				0		5%	20	0
				0		2%	50	0
				0		1%	100	0

2120766

- **Cuantiles con parámetros de la estación:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120766	3,3787	2,5741	0,0373	2,049	20%	5	2,049
				1,045	10%	10	1,045
				0,228	5%	20	0,228
				0	2%	50	0
				0	1%	100	0

- **Cuantiles con parámetros regionales:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120766	2,5192	2,5212	-0,2454	0,274	4,773	20%	5	1,307
				0,105		10%	10	0,5
				0		5%	20	0
				0		2%	50	0
				0		1%	100	0

2120795

- **Cuantiles con parámetros de la estación:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120795	2,7846	2,2635	-0,3043	1,712	20%	5	1,712
				1,017	10%	10	1,017
				0,514	5%	20	0,514
				0	2%	50	0
				0	1%	100	0

- **Cuantiles con parámetros regionales:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120795	2,6669	2,6691	-0,2454	0,274	5,053	20%	5	1,384
				0,105		10%	10	0,529
				0		5%	20	0
				0		2%	50	0
				0		1%	100	0

2120845

- **Cuantiles con parámetros de la estación:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120845	24,3492	24,6888	-0,3684	12,838	20%	5	12,838
				5,585	10%	10	5,585
				0,452	5%	20	0,452
				0	2%	50	0
				0	1%	100	0

- **Cuantiles con parámetros regionales:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120845	27,7428	27,765	-0,2454	0,274	52,561	20%	5	14,394
				0,105		10%	10	5,506
				0		5%	20	0
				0		2%	50	0
				0		1%	100	0

2120879

- **Cuantiles con parámetros de la estación:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120879	0,0677	0,0833	-0,0192	0,025	20%	5	0,025
				0	10%	10	0
				0	5%	20	0
				0	2%	50	0
				0	1%	100	0

- **Cuantiles con parámetros regionales:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120879	0,062	0,062	-0,2454	0,274	0,117	20%	5	0,032
				0,105		10%	10	0,012
				0		5%	20	0
				0		2%	50	0
				0		1%	100	0



## REGIÓN 4

**2120755**

- **Cuantiles con parámetros de la estación:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120755	2,9683	1,8460	-0,1986	2,113	20%	5	2,113
				1,525	10%	10	1,525
				1,110	5%	20	1,110
				0,686	2%	50	0,686
				0,396	1%	100	0,396

- **Cuantiles con parámetros regionales:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120755	2,6543	1,8757	-0,2897	0,403	4,48	20%	5	1,804
				0,277		10%	10	1,241
				0,191		5%	20	0,856
				0,105		2%	50	0,472
				0,048		1%	100	0,216

**2120796**

- **Cuantiles con parámetros de la estación:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120796	60,3388	36,3645	0,1989	41,787	20%	5	41,787
				26,667	10%	10	26,667
				14,566	5%	20	14,566
				0,741	2%	50	0,741
				0	1%	100	0

- **Cuantiles con parámetros regionales:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120796	44,5792	31,502	-0,2897	0,403	75,247	20%	5	30,301
				0,277		10%	10	20,847
				0,191		5%	20	14,372
				0,105		2%	50	7,935
				0,048		1%	100	3,620

2120882

- **Cuantiles con parámetros de la estación:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120882	330,5968	220,9666	-0,2396	229,244	20%	5	229,244
				160,686	10%	10	160,686
				112,977	5%	20	112,977
				64,860	2%	50	64,860
				32,193	1%	100	32,193

- **Cuantiles con parámetros regionales:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120882	311,595	220,19	-0,2897	0,403	525,95	20%	5	211,793
				0,277		10%	10	145,713
				0,191		5%	20	100,459
				0,105		2%	50	55,462
				0,048		1%	100	25,301

2120891

- **Cuantiles con parámetros de la estación:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120891	0,5900	0,1788	-0,0775	0,505	20%	5	0,505
				0,443	10%	10	0,443
				0,398	5%	20	0,398
				0,35	2%	50	0,35
				0,316	1%	100	0,316

- **Cuantiles con parámetros regionales:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120891	0,4194	0,2964	-0,2897	0,403	0,708	20%	5	0,285
				0,277		10%	10	0,196
				0,191		5%	20	0,135
				0,105		2%	50	0,075
				0,048		1%	100	0,034

2120893

- **Cuantiles con parámetros de la estación:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120893	0,5186	0,3477	-0,2744	0,36	20%	5	0,36
				0,255	10%	10	0,255
				0,182	5%	20	0,182
				0,11	2%	50	0,11
				0,061	1%	100	0,061

- **Cuantiles con parámetros regionales:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120893	0,5019	0,3547	-0,2897	0,403	0,847	20%	5	0,341
				0,277		10%	10	0,235
				0,191		5%	20	0,162
				0,105		2%	50	0,089
				0,048		1%	100	0,041

2120894

- **Cuantiles con parámetros de la estación:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120894	1,8625	1,9804	-0,4144	0,991	20%	5	0,991
				0,444	10%	10	0,444
				0,084	5%	20	0,084
				0	2%	50	0
				0	1%	100	0

- **Cuantiles con parámetros regionales:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120894	2,5848	1,8266	-0,2897	0,403	4,363	20%	5	1,757
				0,277		10%	10	1,209
				0,191		5%	20	0,833
				0,105		2%	50	0,46
				0,048		1%	100	0,21

2120895

- **Cuantiles con parámetros de la estación:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120895	11,6748	9,7768	-0,1280	7,069	20%	5	7,069
				3,802	10%	10	3,802
				1,445	5%	20	1,445
				0	2%	50	0
				0	1%	100	0

- **Cuantiles con parámetros regionales:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120895	11,0933	7,8392	-0,2897	0,403	18,725	20%	5	7,540
				0,277		10%	10	5,188
				0,191		5%	20	3,577
				0,105		2%	50	1,975
				0,048		1%	100	0,901

2120897

- **Cuantiles con parámetros de la estación:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120897	6,0166	4,4159	-0,3710	4,053	20%	5	4,053
				2,798	10%	10	2,798
				1,960	5%	20	1,960
				1,146	2%	50	1,146
				0,612	1%	100	0,612

- **Cuantiles con parámetros regionales:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120897	6,5704	4,6430	-0,2897	0,403	11,09	20%	5	4,466
				0,277		10%	10	3,073
				0,191		5%	20	2,118
				0,105		2%	50	1,169
				0,048		1%	100	0,533

2120900

- *Cuantiles con parámetros de la estación:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120900	0,1705	0,1754	-0,2070	0,089	20%	5	0,089
				0,034	10%	10	0,034
				0	5%	20	0
				0	2%	50	0
				0	1%	100	0

- *Cuantiles con parámetros regionales:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120900	0,1874	0,1325	-0,2897	0,403	0,316	20%	5	0,127
				0,277		10%	10	0,088
				0,191		5%	20	0,06
				0,105		2%	50	0,033
				0,048		1%	100	0,015

2120901

- *Cuantiles con parámetros de la estación:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120901	3,1094	2,2115	-0,4302	2,140	20%	5	2,140
				1,535	10%	10	1,535
				1,139	5%	20	1,139
				0,761	2%	50	0,761
				0,517	1%	100	0,517

- *Cuantiles con parámetros regionales:*

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil x(f)	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120901	3,5562	2,5130	-0,2897	0,403	6,003	20%	5	2,417
				0,277		10%	10	1,663
				0,191		5%	20	1,147
				0,105		2%	50	0,633
				0,048		1%	100	0,289

2120903

- **Cuantiles con parámetros de la estación:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120903	1,2367	0,9930	-0,5514	0,813	20%	5	0,813
				0,563	10%	10	0,563
				0,405	5%	20	0,405
				0,26	2%	50	0,26
				0,168	1%	100	0,168

- **Cuantiles con parámetros regionales:**

Estación	Location	Scale	Shape	Cuantil $x(f)$	Media Q mín	Probabilidad Excedencia	Tr (años)	Lámina de agua (mm)
2120903	1,7720	1,2524	-0,2897	0,403	2,991	20%	5	1,205
				0,277		10%	10	0,829
				0,191		5%	20	0,571
				0,105		2%	50	0,315
				0,048		1%	100	0,144

### ANEXO 3

Índice	Descripción	Parámetros de Entrada	Categorías	Interpretación
<b>Porcentaje de Precipitación Normal (PPN)</b>	Cálculo sencillo al que se puede recurrir para comparar cualquier período de tiempo de un lugar determinado. Se calcula dividiendo la precipitación observada entre la precipitación "normal" correspondiente al período analizado, y multiplicando ese resultado por 100.	Valores de precipitación acorde a la escala temporal objeto de estudio. Lo ideal es disponer de datos de 30 años, mínimo, para realizar el cálculo del valor "normal".	$0\% \leq \text{PPN} < 25\%$ ; S. Extrema $25\% \leq \text{PPN} < 50\%$ ; S. Severa $50\% \leq \text{PPN} < 75\%$ ; S. Moderada $75\% \leq \text{PPN} < 125\%$ ; Normal $125\% \leq \text{PPN} < 150\%$ ; Moderadamente Húmedo $150\% \leq \text{PPN} < 250\%$ ; Severamente Húmedo $\text{PPN} \geq 250\%$ ; Extremadamente Húmedo	Los valores porcentuales menores a 100 % indican déficit, los mayores a 100 % indican excesos y los valores próximos al 100 % sugieren valores cercanos al promedio histórico ("valor normal").
<b>Deciles</b>	Divide la distribución de precipitaciones acumuladas para una determinada escala temporal en 10 categorías con una probabilidad de ocurrencia aproximadamente igual. Para el cálculo de los Deciles primero se calculan los totales de precipitación para cada mes/año y escala temporal dentro del período de referencia y se ordenan de menor a mayor. Luego, se estiman los percentiles 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 (denominados p10, p20,..., p90) para la distribución de lluvias de cada mes.	Solo la precipitación; la escala temporal es analizada es flexible.	$\text{PP} \leq p10$ ; Sequía Extrema $p10 < \text{PP} \leq p20$ ; Sequía Severa $p20 < \text{PP} \leq p30$ ; Sequía Moderada $p30 < \text{PP} \leq p70$ ; Normal $p70 < \text{PP} \leq p80$ ; Moderadamente Húmedo $p80 < \text{PP} \leq p90$ ; Severamente Húmedo $\text{PP} > p90$ ; Extremadamente Húmedo	El primer decil es aquella lluvia que no es excedida por el 10% de los totales más bajos; el quinto decil corresponde a la mediana, es decir, el decil que no excede el 50% de las ocurrencias durante el período de registro y así sucesivamente, hasta el décimo decil que es la máxima cantidad de precipitación dentro de los registros.

Índice	Descripción	Parámetros de Entrada	Categorías	Interpretación
<b>Índice Normalizado de Precipitación (SPI)</b>	Cuantifica las condiciones de déficit o exceso de precipitación en diferentes escalas de tiempo y diversas zonas. Series de precipitación se ajustan a una distribución de probabilidad, la cual es transformada a una distribución normal de tal forma que el valor medio para el período sea cero. De esta manera, los valores positivos indican lluvias mayores que la mediana, mientras que valores negativos serán valores menores a la mediana.	Precipitación. La mayoría de los usuarios utilizan conjuntos de datos mensuales para el SPI, pero los programas informáticos ofrecen la posibilidad de generar resultados a partir de valores diarios o semanales.	SPI $\leq$ -1.5; S. Extrema -1.5 < SPI $\leq$ -1.0; S. Severa -1.0 < SPI $\leq$ -0.5; S. Moderada -0.5 < SPI < 0.5; Normal 0.5 $\leq$ SPI < 1.0; Moderadamente Húmedo 1.0 $\leq$ SPI < 1.5; Severamente Húmedo SPI $\geq$ 1.5; Extremadamente Húmedo	Por definición, un evento de sequía ocurre cada vez que el SPI toma valores negativos. El evento finaliza cuando el índice toma valores positivos.
<b>Índice Normalizado de los Caudales Fluviales (SSFI)</b>	Desarrollado mediante valores mensuales de los caudales fluviales y los métodos de normalización asociados al SPI. Se puede calcular con datos de observaciones y de predicciones, y proporciona una perspectiva de los períodos de niveles altos y bajos de caudal asociados a las crecidas y la sequía.	Datos diarios o mensuales de los caudales fluviales.	Igual que el SPI.	Los valores positivos indican niveles mayores que la mediana, mientras que valores negativos serán valores menores a la mediana.
<b>Índice de Sequía Hidrológica de Palmer (PHDI)</b>	Basado en el PDSI original y modificado para tener en cuenta la sequía de larga duración que influirá en el almacenamiento de agua, los caudales fluviales y las aguas subterráneas. El PHDI ofrece la posibilidad de calcular el momento en que una sequía terminará sobre la base de la precipitación necesaria, mediante una relación de la humedad recibida con la humedad necesaria para que finalice una sequía.	Temperatura y precipitación mensuales (registro de datos en serie completos).	Del 28% al 50% del tiempo; Casi normal  Del 11% al 27% del tiempo; Suave a moderada  Del 5% al 10% del tiempo; Grave  4% del tiempo; Extrema	Conforme la duración de la sequía se deduce la intensidad como se observa en las categorías planteadas.