

REGIONALIZACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS EN LA CUENCA DEL RÍO SINÚ
POR MEDIO DEL MÉTODO ESTADÍSTICO ÍNDICE DE CRECIENTE

CRISTINA CASTILLO MORA
NATALIA ORTIZ CAMPOS



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ
2015

REGIONALIZACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS EN LA CUENCA DEL RÍO SINÚ
POR MEDIO DEL MÉTODO ESTADÍSTICO ÍNDICE DE CRECIENTE

Presentado por:
CRISTINA CASTILLO MORA
NATALIA ORTIZ CAMPOS

Proyecto - Pregrado
Modalidad: Trabajo de grado

Dirigido por:
DARWIN MENA RENTERIA
INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO
ESPECIALISTA EN GESTIÓN AMBIENTAL
MAGISTER EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Co-director:
MIGUEL ANGEL CAÑON RAMOS
INGENIERO AMBIENTAL



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ
2015

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

La presente tesis se la dedico a mi familia ya que gracias a su apoyo pude concluir mis estudios. A mi papá por brindarme los recursos necesarios y estar a mi lado guiándome y aconsejándome. A mi mamá por hacer de mí una mejor persona a través de sus consejos, enseñanzas y amor. Y a mi hija Isabella por ser mi motivación y motor, para seguir adelante y terminar mis estudios.

También quiero agradecerle a mi compañera y amiga, Natalia, por realizar conmigo este trabajo, por sus consejos y paciencia.

Cristina Castillo Mora

Quiero agradecerle a mis padres, por haberme forjado como la persona que soy y su apoyo constante.

Papá, gracias por tu apoyo, la orientación que me has dado, por iluminar mi camino y darme la oportunidad de poder realizarme en mis estudios y en mi vida. Mamá, gracias por tu paciencia y palabras llenas de amor que siempre tienes para mí en mis momentos de enojo, tristezas y felicidad. Los amo mucho.

También quiero agradecerle a mi compañera Cristina por su paciencia, cariño, su confianza y ayuda incondicional.

Natalia Ortiz Campos

Finalmente queremos agradecerle sinceramente a nuestros tutores y amigos, los ingenieros Darwin Mena y Miguel Cañón por la orientación y ayuda durante la realización de la tesis.

Tabla de contenido

	Pág.
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	1
INTRODUCCIÓN.....	11
1. OBJETIVOS	13
1.1 Objetivo general.....	13
1.2 Objetivos específicos	13
2. MARCO DE REFERENCIA	14
2.1 MARCO CONTEXTUAL	14
Área de estudio.....	14
Climatología.....	15
2.2 MARCO TEÓRICO.....	24
Análisis regional de frecuencia mediante el método de los L-Momentos.	24
Método L-Momentos	26
Pruebas de bondad de ajuste.....	27
Prueba de Kolmogorov – Smirnov	27
Periodo de retorno.....	27
Distribuciones de probabilidad teóricas	28
Método índice de creciente.....	30
Método estaciones-año	30
Método de regresión y correlación lineal	30
Pruebas estadísticas de homogeneidad.....	31
Error absoluto medio (MAE):	32
Error absoluto medio relativo (RMAE):	32
Cuenca	32
Caudal	33
Caudal máximo	33
Regionalización.....	33
3. METODOLOGÍA.....	35
3.1. Fase 1: Selección de estaciones hidrológicas	35
3.2. Fase 2: Estimación de datos faltantes.	36

3.3. Fase 3: Desarrollo de pruebas estadísticas	37
3.4 Fase 4: Delimitación de regiones homogéneas.....	38
3.5 Fase 5: Índice de creciente	42
3.6 Fase 6: Validación de los resultados del índice de creciente.....	44
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	45
4.1 Fase 1: Selección de estaciones hidrológicas	45
4.2 Fase 2: Estimación de datos faltantes	48
4.3 Fase 3: Desarrollo de pruebas estadísticas	49
4.4 Fase 4: Delimitación de regiones homogéneas.....	51
4.5 Fase 5: Índice de creciente	56
4.6 Fase 6: Validación de los resultados del índice de creciente.....	65
5. CONCLUSIONES.....	68
6. RECOMENDACIONES.....	70
7. BIBLIOGRAFIA	71

Tabla de ilustraciones

	Pág.
Figura 1. Localización de la Cuenca del Río Sinú.....	14
Figura 2. Histogramas precipitación	16
Figura 3. Mapa de precipitación en la cuenca del Río Sinú	17
Figura 4. Histogramas brillo solar	18
Figura 5. Mapa de brillo solar en la cuenca del Río Sinú.....	19
Figura 6. Histogramas temperatura.....	20
Figura 7. Mapa de temperatura en la cuenca del Río Sinú	21
Figura 8. Histogramas humedad relativa.....	22
Figura 9. Mapa de humedad relativa en la cuenca del Río Sinú	23
Figura 10. Importación de datos a L-RAP	40
Figura 11. Ventana principal de L-RAP presentando resultados del control de calidad.....	40
Figura 12. Mapa de la distribución espacial de las estaciones hidrológicas en la cuenca del Río Sinú	47
Figura 13. Dendograma obtenido del análisis Cluster.....	52

Listado de tablas

	Pág.
Tabla 1. Valores críticos de heterogeneidad.....	41
Tabla 2. Estaciones limnimétricas y limnigráficas de la Cuenca del Río Sinú.....	45
Tabla 3. Estaciones seleccionadas para el desarrollo de la regionalización de caudales máximos.....	46
Tabla 4. Porcentaje de datos faltantes.....	48
Tabla 5. Grupos comparados en la prueba T Student	49
Tabla 6. Resultados de prueba bilateral	49
Tabla 7. Resumen procesamiento de los casos.....	51
Tabla 8. Conglomerado de pertenencia.....	51
Tabla 9. Clasificación de regiones homogéneas.....	52
Tabla 10. Resultados prueba de heterogeneidad H1 para la Región 1.	53
Tabla 11. Resultados prueba de heterogeneidad H1 para la región 1	53
Tabla 12. Resultados prueba de heterogeneidad H1 de la región 2.....	54
Tabla 13. Resultados prueba de heterogeneidad H1 de la región 3.....	54
Tabla 14. Análisis de homogeneidad regionalización por índice de creciente región 2.....	58
Tabla 15. Relación funcional entre los caudales máximos anuales y el área en la región homogénea 1	60
Tabla 16. Relación funcional de tipo logarítmico entre los caudales máximos anuales y el área en la región homogénea 2	63
Tabla 17. Caudales máximos observados y simulados para diferentes periodos de retorno en la región homogénea 1	65
Tabla 18. Caudales máximos observados y simulados para diferentes periodos de retorno en la región homogénea 2	65
Tabla 19. Validación resultados región homogénea 1.....	66
Tabla 20. Validación resultados región homogénea 2	66

Lista de gráficas

	Pág.
Gráfica 1. Relación funcional de tipo potencial entre los caudales máximos anuales y el área en la región homogénea 1	59
Gráfica 2. Curva regional de frecuencia en la región homogénea 1	61
Gráfica 3. Relación funcional de tipo potencial entre los caudales máximos anuales y el área en la región homogénea 2	62
Gráfica 4. Curva regional de frecuencia en la región homogénea 2	64

RESUMEN

En la cuenca del río Sinú se desarrollan actividades de agricultura, ganadería y navegación principalmente, por lo que es importante tener en cuenta el comportamiento de los caudales máximos, ya que pueden llegar a afectar el desarrollo de estas y otras actividades, en el caso de presentarse crecidas de los diferentes ríos de la cuenca. Al mismo tiempo, el conocimiento de los caudales máximos en esta cuenca, puede conducir al desarrollo de distintos estudios, en los cuales se verán las posibilidades de evaluar más fácilmente los caudales de diseño para el desarrollo de nuevas obras civiles e hidráulicas y estructuras viales.

A pesar de la importancia de esta cuenca, y su magnitud, no se cuenta con suficiente información acerca del comportamiento de los caudales de sus afluentes.

En el presente proyecto de grado se realizó una regionalización de caudales máximos, por medio del método índice de creciente. Para desarrollar esto se tomaron registros de caudales máximos del IDEAM de 14 estaciones ubicadas a lo largo de la cuenca del Río Sinú.

El procedimiento empleado consistió en una desarrollar una delimitación de regiones homogéneas y posteriormente determinar las distribuciones de probabilidad con mejor ajuste a las series de datos, a través de la prueba Kolmogorov-Smirnov y a partir de estos pasos se inicia el desarrollo del índice de creciente.

Mediante el desarrollo del análisis cluster y el estadístico H1, se obtuvieron dos regiones homogéneas. A partir de estas se desarrolló el índice de creciente para obtener la ecuación de la curva regional de frecuencia. Con esta ecuación, se calcularon los caudales máximos para diferentes periodos de retorno.

Por último, con los caudales máximos calculados, se realizaron unas métricas de desempeño (Error absoluto medio y error absoluto medio relativo). Se obtuvo que los resultados se encuentran en el rango de 0-25%, lo que significa que los errores no son significativos, y el método empleado se asemeja a la realidad.

Palabras clave: Cuenca del Río Sinú, regionalización de caudales máximos, validación, índice de creciente.

ABSTRACT

Agriculture, cattle raising and navigation are the main activities developed in the Sinu River basin, and taking into account the behavior of maximum flow rates is important since it influences these and other activities in case of a rise in the flow rate in any of the affluent to the basin. At the same time, knowing the maximum flow rates in the basin can help develop different studies on new civil and hydraulic works and new road structures.

Despite the magnitude and importance of the Sinu basin, there is not enough information on the flow rates.

In this Project, a regional frequency analysis of maximum flows was performed using the flood index method. To do this the data for the maximum flows in 14 station along the Sinu basin was used. This information was collected from the IDEAM's flow rates registry.

The procedure used began with the delimitation of homogeneous regions. Then, using the Kolmogorov-Smirnov test, the probability distribution that best adjusted to the data series was selected and used to start the flood index calculation.

Through the development of cluster analysis, and statistical H1, two homogeneous regions were obtained. From these results the flood index method was developed to obtain the regional frequency curve equations. From these equations the peak flows for different return periods was calculated.

Finally, with the calculated peak flows, errors were calculated (mean absolute error and mean absolute relative error). The obtained results varied between 0-25%, which are considered acceptable.

Key words: Sinu River basin, regional frequency analysis, validation, flood index.

INTRODUCCIÓN

En Colombia, el estudio de fenómenos y eventos hidrometeorológicos tiene una alta relevancia, especialmente para el dimensionamiento y la correcta adecuación de obras hidráulicas, debido a la alta probabilidad de ocurrencia de crecidas, pero una de las principales limitaciones que se presentan en la hidrología para la realización de estudios y proyectos en general, bien sea a nivel local o regional, es la carencia de datos precisos y confiables. De aquí surge la necesidad de aplicar análisis estadísticos para extrapolar datos y así tener una idea de cómo es el comportamiento de los caudales máximos para cierto periodo de retorno, primordialmente para las principales cuencas del país.

Una de las aplicaciones más importantes de la ingeniería ambiental y la ingeniería civil, es la estimación de caudales máximos para periodos de retorno determinados, ya que estos son necesarios para el desarrollo de obras civiles como puentes, represas, drenajes de aguas lluvias, entre otras. Para realizar estas mediciones de caudales se cuenta con estaciones limnigráficas y limnimétricas, las cuales permiten obtener registros hidrométricos diarios, mensuales y anuales.

La cuenca del Río Sinú corresponde a una de las cuencas más importantes del país, ya que presenta un gran potencial económico por las actividades de pesca, ganadería y agricultura que se desarrollan y además sus obras civiles como la Represa de Urrá [1].

Distintas obras civiles como acueductos, puentes y demás adecuaciones, presentaron grandes afectaciones por las graves inundaciones presentadas en 1963, 1988, 1995, 2007 y 2010. Esto conlleva a impactos negativos socioeconómicos que se pueden presentar por no tener un control sobre los caudales máximos.

A pesar de la gran importancia que presenta esta cuenca dentro de la hidrología colombiana, no se cuentan con los estudios de caudales necesarios debido a la escasez de datos.

El objeto de estudio de este trabajo será la regionalización de caudales máximos en la cuenca del Río Sinú para la estimación de estos eventos máximos y para el desarrollo de obras civiles.

Para llevar a cabo la regionalización, se utilizará el método de índice de creciente, el cual asume que los eventos extremos en varios sitios de una región pueden tener características estadísticas similares. Una característica importante dentro de este método es la selección de regiones homogéneas, para la cual se desarrollará un análisis por L-momentos, que constituye la base de una teoría matemática que facilitan los procesos de la estimación de los parámetros estadísticos en el análisis regional de frecuencias. Por otra parte esta metodología presenta menor sensibilidad a la presencia de valores atípicos, y diversos autores, como Hosking &

Wallis, proponen el empleo del método índice de creciente conjuntamente con el uso de los L-momentos por ser un método más robusto [2].

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Determinar y regionalizar los caudales máximos mediante el método índice de creciente en la cuenca del Río Sinú.

1.2 Objetivos específicos

- Identificar las estaciones del IDEAM ubicadas en la cuenca del Río Sinú que brinden los datos de caudales máximos y sean aptas para la realización de este estudio.
- Realizar la estimación de datos faltantes, y el análisis de consistencia de la información proveniente de las estaciones hidrológicas pertenecientes a la cuenca del Río Sinú.
- Ajustar las funciones de distribución de probabilidad aplicando pruebas de bondad de ajuste, prueba de Kolmogorov-Smirnov.
- Determinar regiones homogéneas según la asignación de las funciones de distribución de probabilidad a cada una de las estaciones estudiadas.
- Establecer la ecuación para cada región homogénea, encontrando la relación entre el área y el caudal máximo.

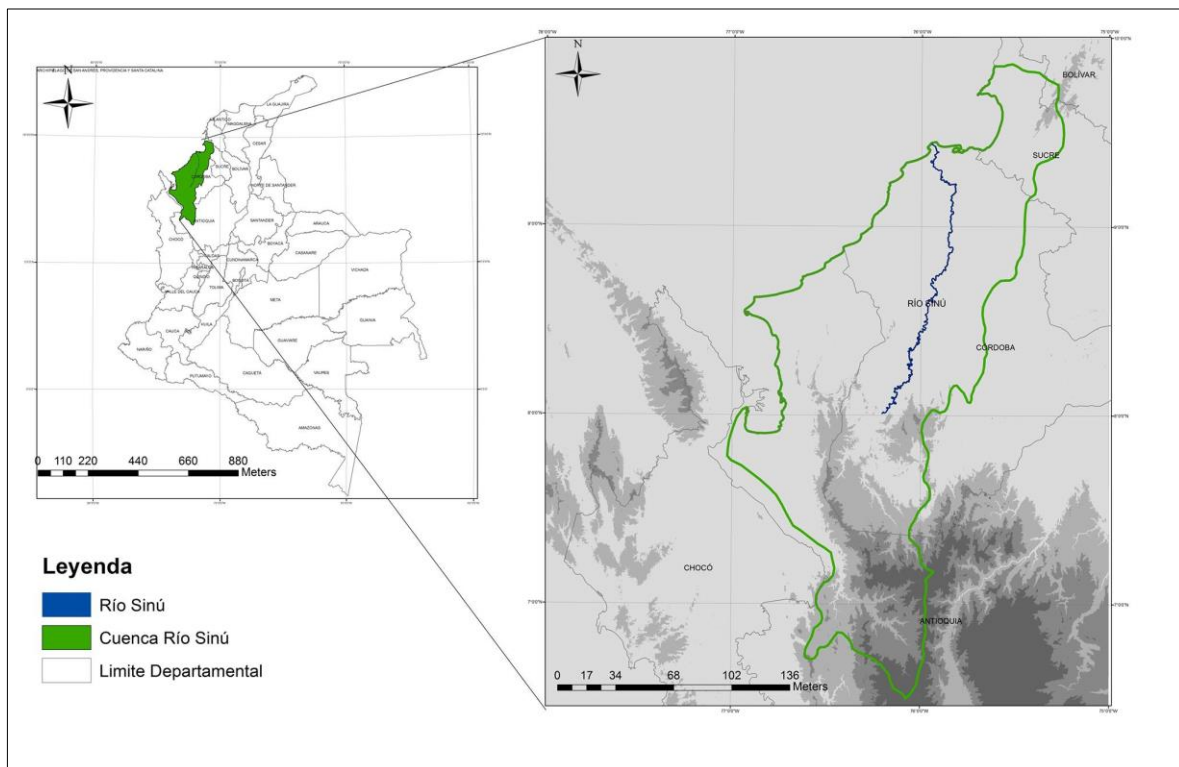
2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 MARCO CONTEXTUAL

Área de estudio

Cuenca del Río Sinú

Figura 1. Localización de la Cuenca del Río Sinú



Fuente: Autores

La cuenca del río Sinú está localizada al nordeste de Colombia, en la región del Caribe, con una extensión de 13952 km², de la cual el 93% pertenece al departamento de Córdoba, el 6% a Antioquia y el 1% a Sucre. El río Sinú nace en el nudo del Paramillo, en la cordillera Occidental a 3700 msnm, atraviesa la cuenca de sur a norte en un longitud de 437.9 km, su caudal promedio es del orden de los 400m³/s y desemboca en el mar Caribe, en el Delta Tinajones, a la altura de San Bernardo del Viento [3].

Los municipios que integran los territorios de la cuenca hidrográfica del Río Sinú en el Departamento de Córdoba son de sur a norte: Tierralta, Montelíbano, Valencia, Planeta Rica, Montería, Canalete, Cereté, San Carlos, Ciénaga de Oro, San Pelayo, Cotorra, Sahagún, Chinú, San Andrés de Sotavento, Chimá, Momil, Purísima,

Lorica, San Bernardo del Viento y San Antero; en el Departamento de Sucre, Sampués y Sincelejo en el departamento de Sinú y en el Departamento de Antioquia el municipio de Ituango [4].

Las actividades económicas más importantes son: la pesca, la ganadería, agricultura de subsistencia y la agricultura comercial. La pesca representó por muchos años el medio de subsistencia de alto porcentaje de población, actualmente dicho recurso está prácticamente agotado lo que lleva a una mayor presión de los pescadores sobre el mismo, utilizando técnicas inapropiadas de pesca que contribuyen a hacer aún más crítica la situación [5].

La ganadería extensiva y la agricultura comercial son las actividades de mayor impacto ambiental, no solo por las técnicas inapropiadas de producción que conllevan a un agotamiento del recurso suelo y contaminación de las aguas, sino también por el acelerado avance de la frontera agrícola [5].

Climatología

La caracterización climatológica de una zona, es indispensable para el manejo de los recursos hídricos, así como también para el estudio y planeación de obras civiles.

A partir de la información de precipitación, brillo solar, temperatura y humedad relativa de las estaciones del IDEAM ubicadas en la Cuenca del Río Sinú, se realizó el análisis climatológico en el tiempo, mediante histogramas y el análisis en el espacio por medio de una interpolación.

Existen varios métodos para realizar interpolaciones, como Kriging, IDW, vecino natural, Spline, de Topo a Raster y tendencia; pero se optó por utilizar el método IDW (de distancia inversa) que se apoya en el concepto de continuidad espacial, con valores más parecidos para posiciones cercanas que se van diferenciando conforme se incrementa la distancia.

A continuación se presentan los histogramas de las estaciones utilizadas para esta caracterización climatológica en el tiempo y el resultado del análisis en el espacio.

Precipitación

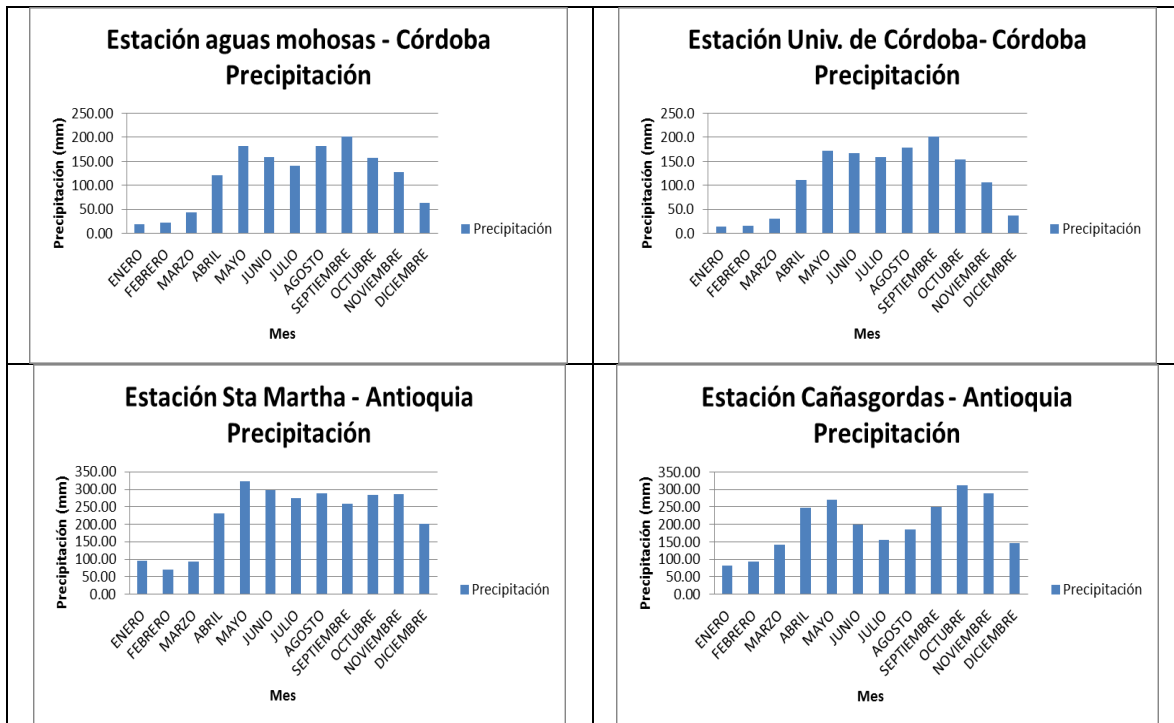
En la Figura 2 se presentan histogramas de precipitación donde se puede observar que el comportamiento de esta variable es bimodal, presentando los picos más altos de precipitación en los meses de mayo y septiembre principalmente, debido a la ubicación de la cuenca en la zona de convergencia intertropical.

Las estaciones Aguas Mohosas y Universidad de Córdoba se encuentran ubicadas en la parte baja de la cuenca, su valor máximo de precipitación anual está alrededor de 200 mm en meses húmedos, mientras que en los meses secos, se presentan precipitaciones de menos de 50 mm.

La estación Sta Martha ubicada en la parte media de la cuenca, registra valores de precipitación cercanos a los registrados en la estación Cañasgordas ubicada en la parte alta de la cuenca con valores máximos de precipitación cercanos a los 300 mm en meses húmedos y menos de 100 mm en los meses secos

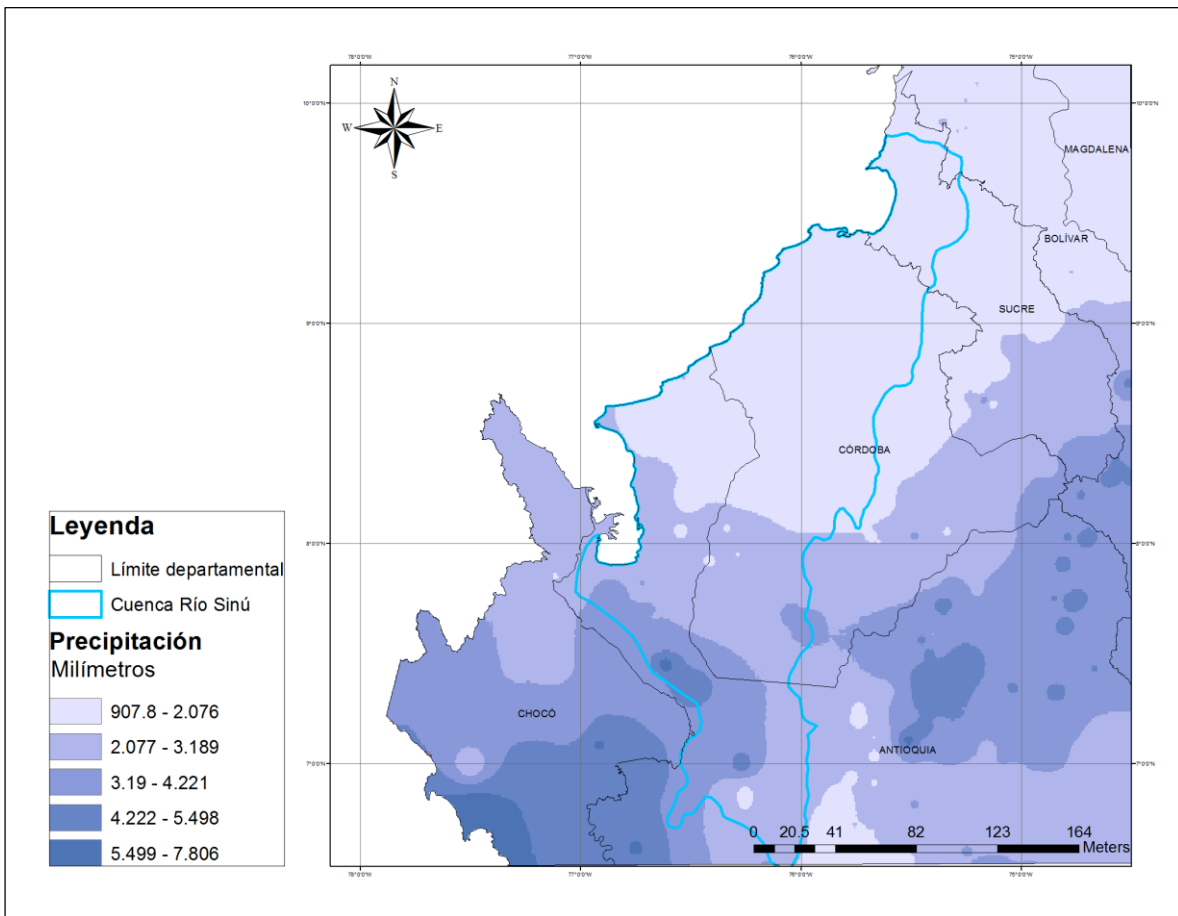
Lo anterior muestra que hacia la zona de mayor altitud, los valores de precipitación son mayores que en la parte baja de la cuenca, donde se presentan altas temperaturas

Figura 2. Histogramas precipitación



Fuente: Autores

Figura 3. Mapa de precipitación en la cuenca del Río Sinú



Fuente: Autores

Por la ubicación de Colombia en la zona ecuatorial y punto de confluencia intertropical, donde se cruzan los vientos del norte del Caribe y los del sur, la distribución de la precipitación obedece a patrones de tipo bimodal, unimodal y una combinación de estos dos.

En la parte alta de la cuenca, se presentan los fenómenos combinados de los chorros del Chocó y San Andrés, determinados por causas locales; los cuales hacen que se presente un régimen de precipitación bimodal y con valores más altos que en la parte media y baja de la cuenca de Río Sinú [6].

Antioquia, al tener esa cercanía a la costa pacífica, y por sus terrenos en alturas, quebrados, con crestas de montañas sobresalientes, le permite concentrar los vapores y humedades provenientes de los dos océanos, de los valles y bosques del río Atrato, del Cañón del río Cauca, del cañón del Nare - Valle del Nechí, y del valle del Magdalena, formando masas nubosas que precipitan y mantienen promedios de lluvia anuales del orden de los 2.500 mm, hasta los 6000 mm [7].

En la parte media y baja de la cuenca, la precipitación disminuye y el ciclo anual presenta un régimen unimodal, con una temporada seca entre noviembre y abril y una época húmeda entre mayo y octubre, como se puede observar en los histogramas ubicados en la figura 2. En los departamentos de Sucre y Córdoba, la precipitación media anual oscila entre 1500-2500 mm y tiende a disminuir a medida que disminuye la altura.

Brillo solar

Como se observa en la figura 4, los histogramas de brillo solar, demuestran que los valores más altos se presentan en enero, julio y diciembre. Se puede observar también una relación inversa entre esta variable y la precipitación, debido a que cuando hay mayor nubosidad, se presenta menor cantidad de horas de sol, como es el caso del mes de mayo, en donde hay un nivel alto de precipitación, y generalmente se presentan bajos niveles de brillo solar.

En la parte baja de la cuenca (estación Univ. De Córdoba) se observa que el brillo solar del mes de diciembre es más bajo en comparación con el resto de la cuenca que presenta un registro alto de brillo solar para este mes.

Figura 4. Histogramas brillo solar

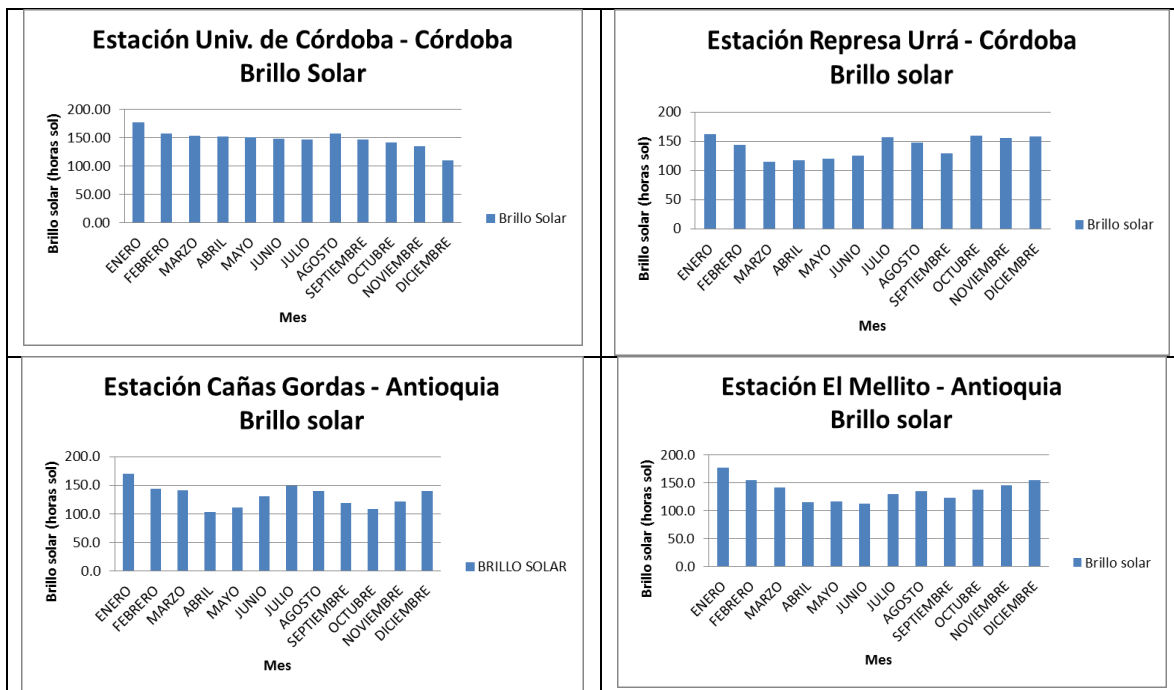
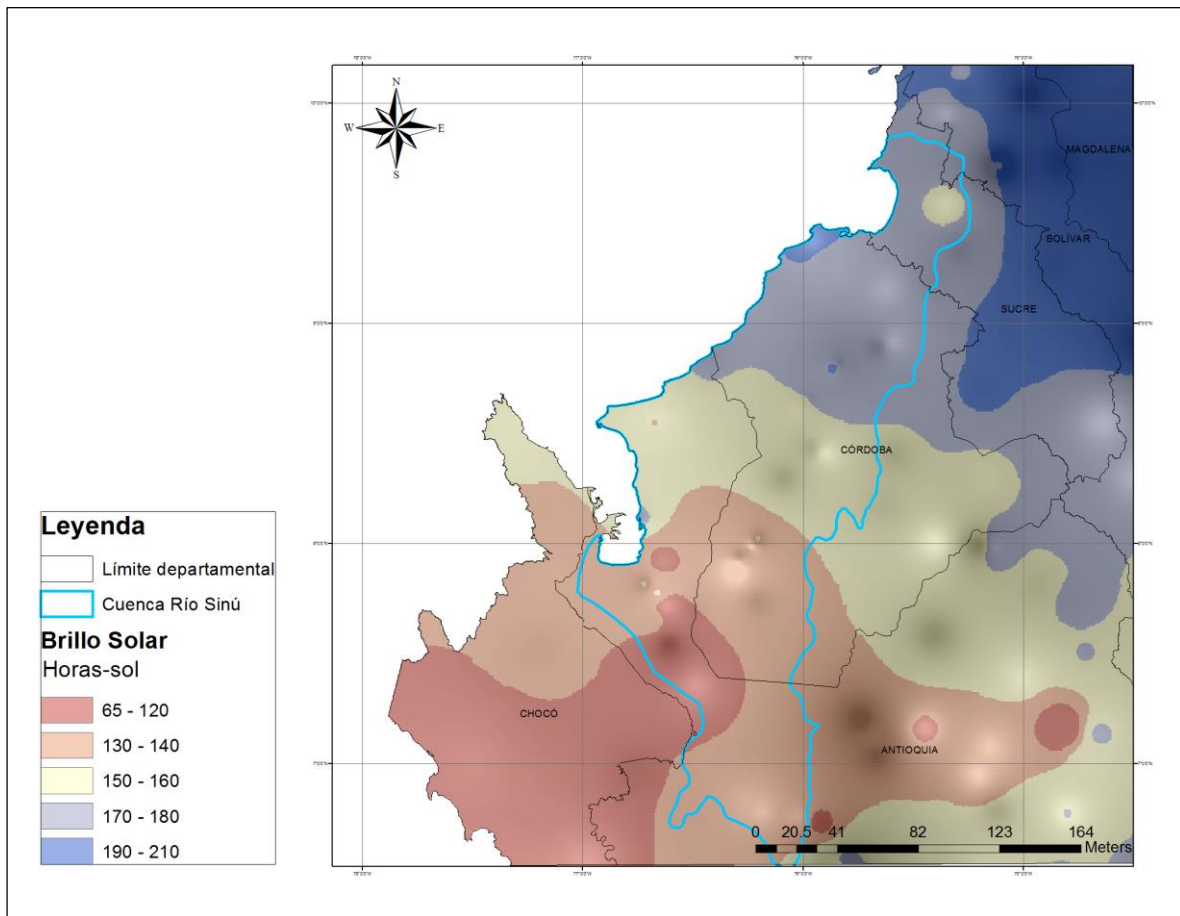


Figura 5. Mapa de brillo solar en la cuenca del Río Sinú



Fuente: Autores

Como se mencionó anteriormente los departamentos que componen esta cuenca son Sucre, Córdoba y Antioquia. Se registra una media mensual de 170, 166 y 127 horas de brillo solar respectivamente. A medida que disminuye a altura, es decir hacia la parte alta de la cuenca, el número de horas de sol es más alto.

Temperatura

En la figura 6, se puede observar que la variable de temperatura tiene un comportamiento bimodal, presentando un periodo de altas y otro de bajas temperaturas en el año. El periodo de altas temperaturas ocurre entre los meses de febrero y abril, presentándose el pico más alto en el mes de abril. Y el periodo de bajas temperaturas se presenta a finales de año entre los meses de septiembre y diciembre.

En la parte alta de la cuenca (Estación Cañas gordas) los valores de temperatura mensual máximos que se presentan están en un rango de 21 a 22°C, ya que se encuentra a una altura de 1200 msnm, mientras que en la parte baja de la cuenca con una altitud aproximada de 30 msnm se presentan temperaturas mayores a los 27°C a lo largo de todo el año, esto debido al gradiente adiabático, que es la variación que presenta la temperatura en movimiento vertical, que varía en promedio 0.6°C por cada 100 m de altitud, concordando con lo que se presenta en la cuenca del Río Sinú

Figura 6. Histogramas temperatura

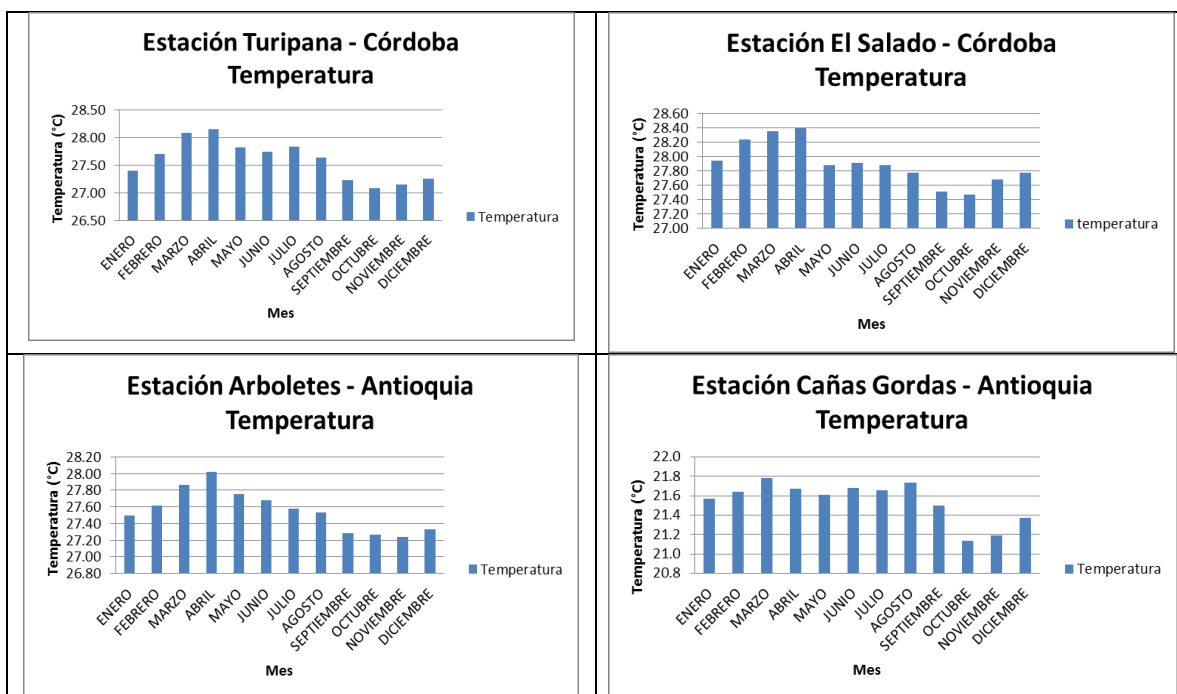
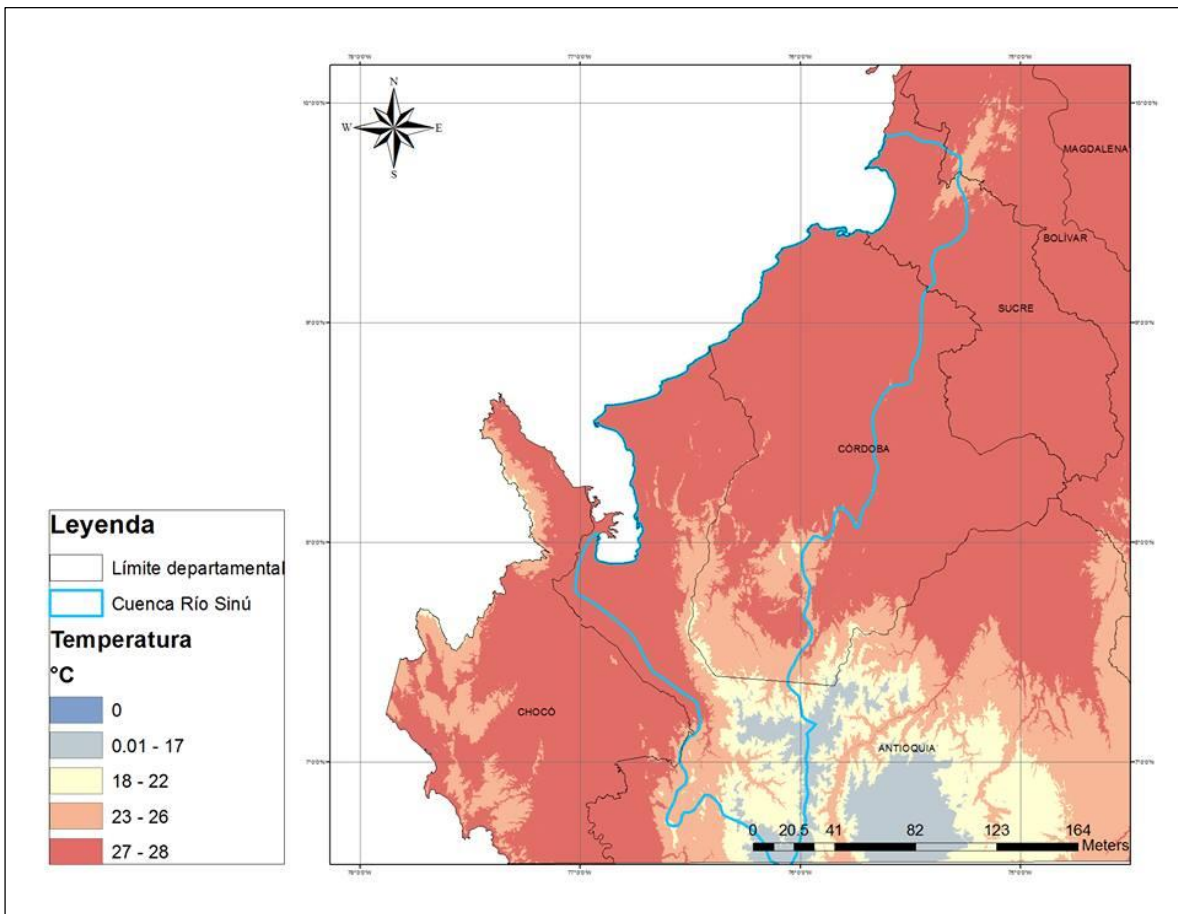


Figura 7. Mapa de temperatura en la cuenca del Río Sinú



Fuente: Autores

En la mayor parte de la cuenca del Río Sinú se presenta un régimen térmico cálido, con temperaturas medias mensuales superiores a 26°C.

Se observa una relación directa entre el brillo solar y la temperatura, pues el departamento que menos horas de brillo solar presentó (Antioquia) es el departamento que presenta las temperaturas más bajas de la cuenca, con una temperatura mensual entre 17-22°C.

Humedad relativa

En la figura 8, se puede observar que la humedad relativa presenta un régimen bimodal, presentándose en marzo el valor más bajo en todo el año, mientras que en los últimos meses del año se presenta el valor más alto de humedad.

La humedad relativa presenta una ligera variación entre meses, el rango de porcentaje de humedad en la cuenca varía entre el 74 y el 88%, los mayores valores se presentan en la parte alta de la cuenca (estaciones Musinga y Uniban), con valores superiores al 84%, mientras que en la parte baja de la cuenca la humedad relativa presenta valores más bajos, debido a que esta desciende cuando aumenta la temperatura, y en la parte baja de la cuenca, la temperatura más alta.

Figura 8. Histogramas humedad relativa

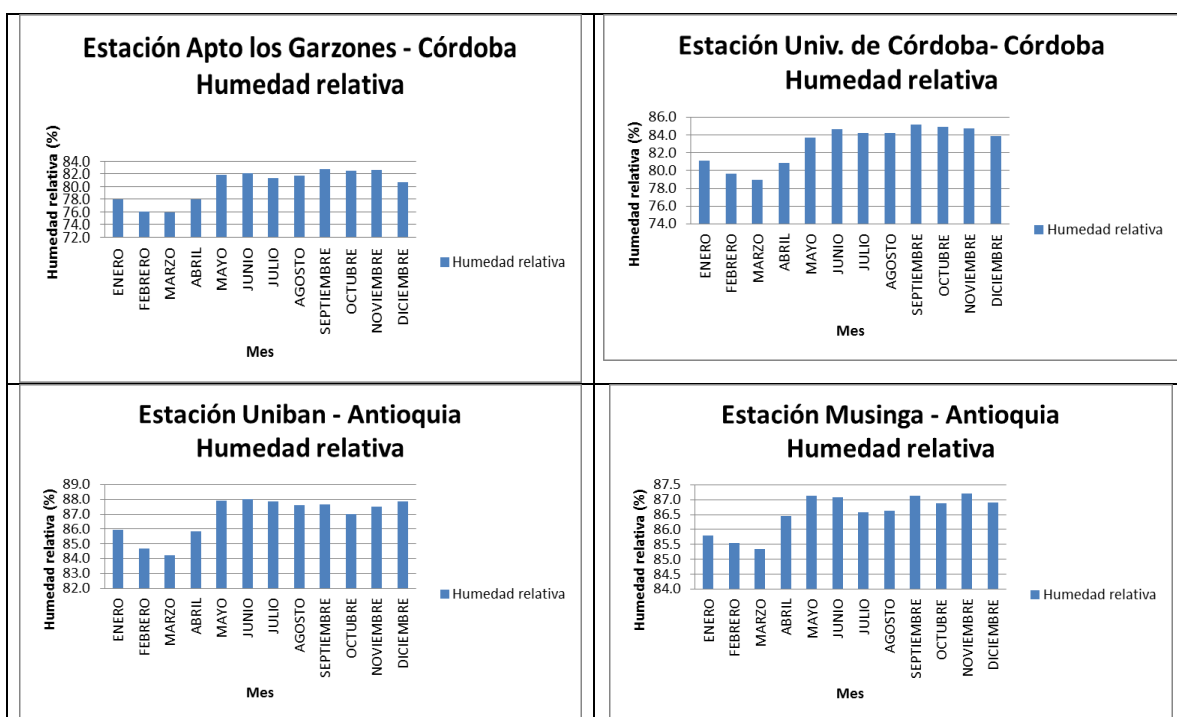
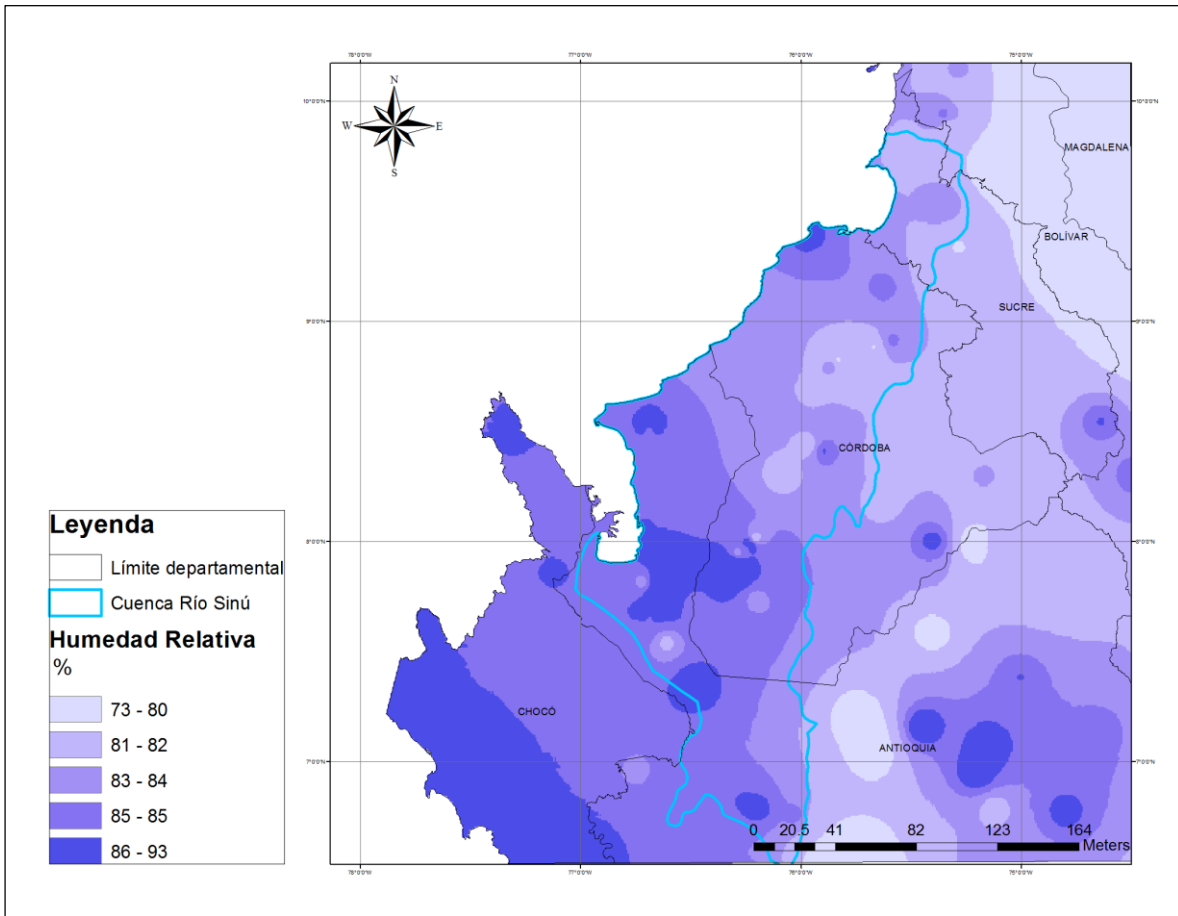


Figura 9. Mapa de humedad relativa en la cuenca del Río Sinú



Fuente: Autores

La humedad relativa de la cuenca presenta valores superiores a 80%, considerándose alta, especialmente en San Bernardo del Viento, lugar donde desemboca el Río Sinú, y en cercanías al Nudo del Paramillo, lugar del nacimiento del Río. En estos lugares se presentan valores cercanos a 86 – 87 % de humedad relativa. A partir de la condensación de la humedad atmosférica se origina la precipitación, lo que demuestra que en los lugares donde se presentan mayores valores de precipitación, son lugares más húmedos.

2.2 MARCO TEÓRICO

Análisis regional de frecuencia mediante el método de los L-Momentos.

En la mayoría de las estaciones hidroclimatológicas ubicadas en las zonas rurales del país como las que se presentan en la cuenca del Río Sinú, la recolección de datos es realizada por personal que no cuenta con la capacitación adecuada para desarrollar este proceso, adicional a esto, el nivel de mantenimiento de las mismas es muy bajo, por esto se pueden presentar errores en la medición y errores sistemáticos, por lo que las series de datos obtenidos no son muy confiables; al mismo tiempo en la cuenca del Río Sinú las series de datos son muy cortas lo cual se convierte en una limitación para desarrollar un análisis de frecuencia in-situ; por este motivo se utiliza la regionalización de caudales máximos como el método más viable para mejorar la estimación de crecidas.

El análisis de frecuencias es un procedimiento para estimar la probabilidad de ocurrencia de eventos pasados o futuros. Usualmente la estimación de frecuencias de eventos extremos es de gran importancia, debido a que existen diferentes fuentes de incertidumbre de los procesos físicos que dan origen a los datos observados. Los métodos estadísticos reconocen la existencia de la incertidumbre y de sus efectos, con el fin de cuantificarlos [2].

El objetivo del análisis de frecuencia de información hidrológica es relacionar la magnitud de los eventos con su frecuencia de ocurrencia, mediante el uso de distribuciones de probabilidad [8].

Para desarrollar un análisis de frecuencia suelen existir varias muestras de datos disponibles para un análisis, estas observaciones pueden ser, por ejemplo, de orígenes meteorológicos o ambientales, de la misma variable y obtenidos en diferentes sitios de medición bajo diferentes condiciones. Si las distribuciones presentan similitud en las diferentes observaciones (datos), es posible obtener resultados más precisos utilizando todas las muestras en un análisis. En análisis hidrológicos este procedimiento es conocido como análisis regional de frecuencia, debido a que los datos utilizados corresponden a observaciones de la misma variable en una serie de lugares de medición dentro de una región o zona determinada. Así, los principios y procedimientos del análisis regional de frecuencia son aplicables cuando existan muestras, de la misma variable, provenientes de diferentes lugares dentro de una misma región [2].

Suponiendo que las observaciones se realizan en intervalos regulares de tiempo en una región determinada, se denomina a Q como la magnitud del evento que ocurre en un momento dado en un lugar específico. Así se considera a Q como una variable aleatoria que teóricamente puede tomar cualquier valor entre cero y el infinito. El fundamento del análisis estadístico de frecuencia se basa en la distribución de

probabilidad de los posibles valores de Q [2]. Se denomina $F(x)$ a la probabilidad de que el valor de Q no sea mayor que x , y se expresa como:

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

$F(x)$ es la función de probabilidad de la distribución de frecuencia. La función inversa (F), es la función de densidad. Esta función inversa expresa la magnitud de un evento particular en términos de la probabilidad de no excedencia F . El valor asociado al periodo de retorno T , denominado Q_T , es la magnitud de un evento tan extremo que tiene probabilidad $1/T$ de ser excedido por otro evento [2]. Para eventos extremos de alta magnitud que se ubican en lo alto de la curva de la distribución de frecuencia, Q_T se expresa como:

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

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

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:

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

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

El análisis regional de frecuencias se caracteriza por aumentar la cantidad de datos para el análisis en una determinada región de estudio utilizando datos de diferentes estaciones, siendo los datos de estos sitios de medición similares en las distribuciones de frecuencia. Sin embargo, esto representa ciertos inconvenientes, ya que las distribuciones de frecuencia de los datos de diferentes estaciones no son exactamente iguales y además la magnitud de los eventos en las distintas

estaciones puede no ser estadísticamente independiente. En este contexto existen diferentes investigaciones relacionadas con las propiedades de los algoritmos regionales de los momentos de probabilidad ponderados, que es un procedimiento de análisis regional de frecuencia basado en el método estadístico denominado momentos de probabilidad ponderados [9]. El método de los algoritmos regionales de momentos ponderados por probabilidad entrega resultados precisos [10]. Los L-Momentos derivan de los momentos ponderados por probabilidad e incrementan la precisión de los cálculos [2].

Método L-Momentos

El método L-Momentos es una gran herramienta para la regionalización de datos hidrológicos, permitiendo de esta manera obtener caudales de diseños en una zona de proyecto. Es un método fundamentado en la estadística y es considerado en la actualidad como el método más preciso, porque involucra no solo la supervisión de los datos, sino también la identificación de zonas homogéneas, comprende además la selección de la distribución de frecuencia regional y la estimación de los caudales de diseños [11].

Los L - momentos constituyen un sistema alternativo a los momentos convencionales, y surgen de las combinaciones lineales de los momentos ponderados probabilísticamente. A continuación se muestran las estimaciones de los primeros cuatro momentos de probabilidad ponderada propuestos por Hosking & Wallis.

$$\beta_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X(j)$$

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

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

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

Donde, (j) representa la serie máxima anual, con (1) siendo el valor más bajo y (N) el valor más alto, respectivamente.

La expresión general de los L-momento desarrollados para los primeros cuatro términos son:

$$l_1 = \beta_0$$

$$l_2 = 2\beta_1 - \beta_0$$

$$l_3 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0$$

$$l_4 = 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0$$

Pruebas de bondad de ajuste

Los contrastes o pruebas de bondad de ajuste tienen como objeto decidir si se puede aceptar la hipótesis de que una muestra dada procede de una población con una distribución de probabilidad totalmente especificada en la hipótesis nula. Estos contrastes se basan en la comparación de las frecuencias observadas en la muestra con aquellas que cabría esperar si la hipótesis nula fuera cierta. La hipótesis nula se rechaza si existe una diferencia significativa entre las frecuencias observadas y esperadas [12].

Prueba de Kolmogorov – Smirnov

La prueba Kolmogorov - Smirnov consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia entre la función de distribución observada $F_0(x_i)$ la estimada $F_n(x_i)$, con un valor crítico " D_α " que depende del número de datos y el nivel de significancia seleccionado. La expresión de comparación para la prueba de Kolmogorov – Smirnov está dada por la siguiente ecuación [13]:

$$D = \max |F_0(X_i) - F_n(X_i)|$$

Donde:

x_i : Valor i -ésimo observado en la muestra (ordenada de mayor a menor)

$F_n(x_i)$: Función de probabilidad estimada

$F_0(x_i)$: Función de probabilidad observada

Si los valores observados son similares a los esperados, el valor de D será pequeño. Cuanto mayor sea la discrepancia entre la distribución empírica y la distribución teórica, mayor será el valor de D.

Por tanto, el criterio para la toma de la decisión entre las dos hipótesis será de la forma:

Si $D < D_\alpha$: Aceptar que los datos observados siguen la distribución probada

Si $D > D_\alpha$: Rechazar que los datos observados siguen la distribución probada

Siendo α el nivel de significancia seleccionado para la prueba de bondad de ajuste. Esta prueba tiene la ventaja sobre la X^2 que compara los datos con el modelo estadístico sin necesidad de agruparlos [13].

Periodo de retorno

Una de las maneras de definir el periodo de retorno es el intervalo de recurrencia (T), al lapso promedio en años entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada. Este periodo se considera como el inverso de la probabilidad, del m -ésimo evento de los n registros [14].

El valor del periodo de retorno se determina en función de la posición de la variable aleatoria ($P_{\text{máx}}$ o $Q_{\text{máx}}$ en su caso) en una tabla de valores, ordenados de mayor a menor.

$$T = \frac{n + 1}{m}$$

$$F = \frac{m}{n + 1}$$

Donde:

T = Período de retorno (años).

n = Número de años de registro.

m = Número de orden.

F = Frecuencia

En hidrología, normalmente se prefiere trabajar con periodos de retorno en lugar de probabilidades, pues es un concepto que resulta más claro ya que tiene las mismas unidades (tiempo) que la vida útil de las obras de ingeniería construidas para fines hidrológicos, lo que permite hacer una mejor comparación [15].

Distribuciones de probabilidad teóricas

También conocidas como funciones de densidad de probabilidad, a través de estas se describe el comportamiento de las variables aleatorias discretas o continuas. Las distribuciones de probabilidad están relacionadas con la distribución de frecuencias. De hecho, se puede pensar en la distribución de probabilidad como una distribución de frecuencias teórica. Una distribución de frecuencias teórica es una distribución de probabilidades que describe la forma en que se espera que varíen los resultados. Debido a que estas distribuciones tratan sobre expectativas de que algo suceda, resultan ser modelos útiles para hacer inferencias y tomar decisiones de incertidumbre [16].

- **Distribución normal:** La función Normal es el modelo más utilizado y con mayor importancia en el campo de la estadística. Sin embargo, su uso es muy limitado en hidrología, dado que las variables raramente se comportan de esta forma [17].

Linsley *et al.*, (1988) señalan que el uso de esta función, en términos hidrológicos, debe reducirse a zonas húmedas donde el valor medio es alto, no siendo recomendable para valores extremos [17].

Función de distribución de probabilidad normal:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx$$

Donde:

x : Variable aleatoria

μ : Media de la población

σ : Desviación estándar de la población

- **Distribución Log Normal:** Las variables físicas de interés en Hidrología (precipitación, caudal, evaporación y otras) son generalmente positivas, por lo cual es usual que presenten distribuciones asimétricas. Así, se ha propuesto aplicar una transformación logarítmica (Varas y Bois, 1998), donde $Y = \ln X$, está normalmente distribuida; luego X está distribuida en forma Normal [17].

Su función de distribución de probabilidad es:

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{2\pi} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \alpha}{\beta}\right)^2} dx$$

Donde e es la constante de nepler.

Estudios realizados por Poblete et al., (2002), identifican a la función Log-Normal, entre otras funciones, como la que presenta mejor bondad de ajuste a series de caudales anuales, por sobre un 90% para el test de Kolmogorov-Smirnov y ji cuadrado [17].

- **Distribución Gamma:** Es una de las distribuciones más utilizadas en hidrología; como la mayoría de las variables hidrológicas son sesgadas, esta función se utiliza para ajustar la distribución de frecuencia de variables tales como crecientes máximas anuales, caudales mínimos y precipitaciones extremas. La función de distribución Gamma tiene 2 o 3 parámetros [17].

La función de distribución de probabilidad es:

$$F(x) = \int_0^x \frac{x^{\beta-1} e^{-\frac{x}{\alpha}}}{\alpha^{\beta} \Gamma(\beta)} dx$$

- **Distribución Log Pearson Tipo III:** Chow et al., (1994), señalan que esta distribución posee una gran flexibilidad y diversidad de forma, dependiendo de los valores de sus parámetros, asimilando su utilización para precipitaciones o caudales máximos anuales [17].

La función de distribución de probabilidad es:

$$F(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \int_0^x e^{-\left(\frac{x-\delta}{\delta}\right)} \left(\frac{x-\delta}{\delta}\right) dx$$

- **Distribución Gumbel:** También llamada distribución general de valores extremos, o extrema tipo I, ha sido ampliamente utilizada para representar el comportamiento de crecientes y sequías [17].

Esta distribución está representada por medio de la siguiente ecuación

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

Método índice de creciente

Este método fue propuesto por Dalrymple (1960), es una de las primeras aproximaciones a la estimación regional de frecuencias. Este método supone que los máximos anuales dentro de una región, siguen una misma función de distribución, lo que la convierte en una región homogénea.

Un supuesto clave del método del índice de creciente es que los datos de las inundaciones en diferentes sitios en una región homogénea tiene la misma distribución, con excepción de un parámetro de escala o un factor de índice. El factor de escala es nombrado como un índice de las inundaciones y se toma generalmente para ser la inundación anual media [18].

Método estaciones-año

Esta técnica consiste en la confección de un único registro de caudales, constituido por los valores estandarizados de eventos, el cual una vez que se construye se ajusta a un conjunto de distribuciones de probabilidad.

Esta técnica regional, a diferencia de otras, no requiere que las muestras tengan una longitud de registro común [10]. Con referencia al tamaño de muestra aceptable en el análisis, se recomienda que al menos sea de 10 años [13].

Método de regresión y correlación lineal

En este método las relaciones para obtener los caudales en una estación para un cierto período de retorno, en función de un análisis regional, se efectúan considerando las características fisiográficas de las cuencas de aporte y su grado de correlación con los caudales para cada tiempo de retorno.

Para el desarrollo de la misma es necesario asignar, para cada período de retorno analizado, un nivel de importancia a cada característica fisiográfica considerada. Para ello se emplea, en este caso, el orden dado por la técnica de los trazos multidimensionales de Andrews.

Una vez realizado este paso, se construyen sistemas de ecuaciones lineales simples que permiten obtener las constantes que afectarán a cada una de las características en las relaciones deseadas [13].

Pruebas estadísticas de homogeneidad.

Las pruebas estadísticas de homogeneidad son desarrolladas para verificar si los datos sufren cambios abruptos a través del tiempo. Estos cambios pueden tener distintas causas como intervenciones antrópicas, como la construcción de obras civiles, reforestación y deforestación, etc. Además de fenómenos naturales y fluctuaciones en temperatura y precipitación, a los que los sistemas hidrológicos son muy sensibles, es por esto que ocurren distintas modificaciones en las series de datos.

- **Prueba estadística de t de Student:**

Esta prueba es útil cuando se sospecha que la pérdida de la homogeneidad se debe a un cambio brusco de la media, y se define por la siguiente ecuación:

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{n_1 \cdot s_1^2 + n_2 \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} * \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}}$$

Donde

s_1^2 y s_2^2 : *Varianzas de x1 y x2 en los dos periodos de registro.*

$$n_1 \cdot s_1^2 = \sum_1^{n_1} x_i^2 - \frac{1}{n_1} (\sum_1^{n_1} x_i)^2$$

n : *Número de datos*

x_1 y x_2 : *Son las medias de las colas uno y dos del registro de la estación.*

Si el valor absoluto de t_d es mayor que aquel de la distribución de t de Student se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia, y por lo tanto la serie se considera no homogénea. En caso contrario la serie es homogénea [19].

Error absoluto medio (MAE):

El MAE es una medida directa que consiste en calcular el error medio que comete el modelo de la predicción. Las unidades del MAE también son las mismas que las de los valores observados pero no sobreeleva el peso de las diferencias grandes entre valores observados y simulados, dando una idea del error global del modelo [20].

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - S_i|$$

Donde:

O_i : Es el valor estimado

S_i : Es el valor observado

n : Número de datos

Error absoluto medio relativo (RMAE):

Fue propuesto por Mayer and Butler como una alternativa del uso del MAE. Este error no tiene unidades y nos permite comparar diferentes series de datos, ofreciendo a la vez, las ventajas del error absoluto medio. El valor óptimo para este estadístico es 0 [20].

$$RMAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|O_i - S_i|}{|O_i|}$$

Donde:

O_i : Es el valor estimado

S_i : Es el valor observado

n : Número de datos

Cuenca

Una cuenca u hoya hidrográfica se define como el área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar [21].

Caudal

El caudal de un río es el volumen de agua que pasa por una sección dada, en un tiempo determinado. Generalmente, se expresa en metros cúbicos por segundo (m^3/s) [22].

En las diferentes corrientes naturales, el comportamiento de los caudales está unido directamente con el comportamiento de las lluvias en el tiempo que cae sobre la cuenca vertiente y con las características propias de la cuenca [22].

El caudal es el dato básico para el diseño de los controles estructurales y no estructurales; estos controles son los que se proyectan dentro de los programas de manejo de los recursos hídricos de una cuenca, y comprenden presas de embalse, captaciones, conducción, estructuras de control, vertederos de excesos, tanques de almacenamiento y sistemas de distribución dentro de los controles estructurales y dentro de los controles no estructurales, planes de emergencia, planes de contingencia, información para los planes de ordenamiento territorial (POT) e información para redes de monitoreo [15].

El comportamiento de los caudales en las diferentes corrientes naturales están ligados directamente con el comportamiento de la precipitación en el tiempo que cae sobre la cuenca vertiente y con las características propias de la cuenca; entendiéndose por cuenca vertiente al área que drena hacia la corriente natural.

Para realizar un análisis de caudales es necesario definir el sitio de interés y delimitar la cuenca vertiente, que en este caso es la cuenca Magdalena-Cauca tomando como información esencial los caudales máximos instantáneos tomados por el IDEAM [15].

Caudal máximo

Los caudales máximos son flujos extremos que se presentan en las corrientes de agua los cuales son influenciados directamente como se menciona anteriormente por el comportamiento de la precipitación y las características físicas propias de la cuenca.

Los flujos extremos que se presentan en la cuenca Magdalena-Cauca en las diferentes épocas del año representan un sin número de situaciones que obligan a realizar un análisis profundo a su comportamiento en el tiempo.

El IDEAM es una de las entidades encargadas del monitoreo del comportamiento hidrológico del país, y registra los caudales máximos instantáneos obtenidos directamente de las estaciones hidrométricas que operan las cuales se encuentran distribuidas en el territorio colombiano [15].

Regionalización

La regionalización es una herramienta utilizada para predecir el comportamiento futuro de los caudales en un sitio de interés, a partir de la información histórica de

caudales. Es un método basado en procedimientos estadísticos, que permite calcular la magnitud del caudal asociado a un período de retorno. Su confiabilidad depende de la longitud y calidad de la serie histórica, además de la incertidumbre propia de la distribución de probabilidades seleccionada. Cuando se pretende realizar extrapolaciones a períodos de retorno mayores que la longitud de la serie disponible, el error relativo asociado a la distribución de probabilidades utilizada es más importante, mientras que en interpolaciones, la incertidumbre está asociada principalmente a la calidad de los datos a modelar; en ambos casos la incertidumbre es alta dependiendo de la cantidad de datos disponibles [23].

La metodología de regionalización es utilizada en hidrología para explorar al máximo la información hidrológica existente y permitir la transferencia de dicha información, de un punto a otro sin información suficiente, dentro de un área con comportamiento hidrológico semejante. Esta información puede ser de tres tipos [24]:

- **Variable:** Expresión que identifica el comportamiento de un proceso o fenómeno, como por ejemplo: el caudal instantáneo en una sección del río, el caudal medio anual, precipitación diaria, etc.
- **Función hidrológica:** La cual representa la relación entre una variable hidrológica y una o más variables explicativas o estadísticas (probabilidad), como puede ser la curva de permanencia, curva de probabilidad de caudales mínimos, etc.
- **Parámetro:** Representada como la característica de un sistema hídrico, como por ejemplo los parámetros fisiográficos de una cuenca (área, pendiente de la cuenca, pendiente del cauce, etc.), coeficiente de rugosidad, etc.

3. METODOLOGÍA

3.1. Fase 1: Selección de estaciones hidrológicas

El IDEAM ofrece una base de datos bastante amplia con la información histórica de caudales máximos, provenientes de los registros recolectados de estaciones hidrometeorológicas distribuidas por todo el país.

A lo largo y ancho de la cuenca del río Sinú se encuentran aproximadamente 241 estaciones hidrometeorológicas, y para el desarrollo del modelo de regionalización de caudales máximos en la cuenca, se seleccionarán las estaciones limnigráficas (LG) y limnimétricas (LM) presentes en los departamentos de Córdoba, Antioquia, y Sucre, el software ArcGIS facilitará la selección de las estaciones, mediante el ingreso de las capas de la cuenca y de las estaciones de medición y monitoreo presentes en la misma.

Para la selección de las estaciones hidrológicas que se utilizarán en este estudio, se realizará una recopilación, revisión y análisis de la información del IDEAM, y se tendrán en cuenta los siguientes criterios para la selección de estaciones:

- Las series son consideradas representativas si cuentan con mínimo datos de 20 años.
- Operación actual de las estaciones, ya que los resultados serán más confiables si el estudio es realizado con datos actuales.

3.2. Fase 2: Estimación de datos faltantes.

Una vez determinadas las estaciones a utilizar en la regionalización de caudales, se procederá a completar los datos faltantes por medio del método de las proporciones ya que es uno de los más utilizados en aquellos casos en que no existen datos de comparación y por tanto, la serie tiene que servir de referencia para el relleno de datos faltantes de sí misma [25].

$$\frac{X}{X_i} = \frac{Q_f}{(Q_a - X_i)}$$

Donde:

X: Caudal del mes faltante

X_i: Caudal promedio del mes faltante

Q_f: Total anual del mes faltante

Q_a: Total anual promedio

Por último se determinarán los valores de caudal máximo de cada año registrado ya que son los datos que se utilizarán a la hora de realizar la regionalización y sus respectivas pruebas estadísticas. Para esto, se organizan las series de datos en una hoja de Excel, y se calcula el valor de caudal máximo anual que se presenta en la cuenca.

3.3. Fase 3: Desarrollo de pruebas estadísticas

Un supuesto básico para el desarrollo de la regionalización, es que las series deben ser homogéneas y estacionarias. Para determinar la homogeneidad de las series de datos se realizará la prueba T de Student, un test bilateral que compara registros de dos o más series de datos diferentes.

Para el desarrollo de la prueba de homogeneidad, se compararán grupos de 4 estaciones que estén ubicadas cerca geográficamente, y se empleará la ecuación nombrada anteriormente en el numeral 2.2. Al realizar la comparación entre 4 series de datos, esta prueba arroja resultados más confiables que una prueba donde solo se tiene en cuenta una serie de datos.

3.4 Fase 4: Delimitación de regiones homogéneas

La delimitación de regiones hidrológicamente homogéneas, constituye una de las etapas más complejas, en la regionalización de caudales.

En esta etapa, para agrupar las 14 estaciones en regiones homogéneas, se llevará a cabo un análisis de conglomerados, también conocido como análisis cluster, que es el método estadístico multivariable estándar utilizado para dividir un grupo de datos en diferentes grupos. Generalmente es utilizado para formar regiones en análisis regional de frecuencia. Un vector de datos es asociado a cada estación, y las estaciones son particionadas en diferentes grupos, dependiendo de la similitud entre sus vectores de datos [26], este método será desarrollado usando el software SPSS [27].

Para desarrollar este método, es necesario que las estaciones tengan un mismo periodo de registros, por lo que se tomarán 20 años de cada una, en el periodo de 1991 al 2011.

La identificación de regiones homogéneas es usualmente un proceso complejo basado en la subjetividad y los resultados obtenidos del análisis cluster no se considerarán como finales, por lo tanto se procederá a complementar con los L-momentos, que es un método mucho menos sensible a la presencia de valores atípicos, y además arroja resultados más robustos [2].

De acuerdo con los señalado por Hosking y Wallis (1997), Shaefer et al (2006) y Wallis et al (2007), este método permite compensar la carencia de información en el tiempo por su abundancia en el espacio. Esto implica, determinar, a partir de registros de incluso corta extensión, la distribución o modelo de probabilidad de mejor ajuste a las series de datos [26].

Para verificar los resultados obtenidos en el análisis cluster, se utilizará el software L-RAP, este fue desarrollado por MGS Engineering Consultants de Washington, EE.UU; se puede descargar online una licencia gratis del programa que dura un mes, pasado este tiempo, se debe pagar para su utilización. Para mayor comprensión del manejo del software, se realiza un manual para el uso y conocimiento del mismo, que se encuentra en el anexo 22.

Para formar regiones homogéneas el software permite obtener el índice de estacionalidad y el día juliano medio, que están basado en la estadística circular, que considera el día medio de ocurrencia, análogo a la media aritmética, y el índice de estacionalidad análogo a una medida estandarizada de variación [26].

La metodología de análisis regional de frecuencias por L-momentos en el software L-RAP, desarrolla dos fases basadas en los trabajos de Wallis y Schaefer:

1. Revisión y preparación de los datos
- 1.2 Importación de datos

2. Identificación de regiones homogéneas

En este trabajo de grado, no se aplicará la tercera fase a través del software L-RAP, sino a través del software HidroEsta como se menciona en el numeral 3.5.

1. Preparación de los datos

En cualquier estudio hidrológico es indispensable contar con datos confiables especialmente en lo relacionado con la determinación de probabilidad de ocurrencia de eventos extremos, en la que cualquier error, presencia o ausencia de datos, trae consecuencias en los resultados de las estimaciones de probabilidad.

Los datos que se ingresaran al software L-RAP, requieren de una preparación en unas planillas de Excel, en donde se identifican las siguientes características:

1. Identificación de la estación
2. Nombre de la estación
3. Tipo de estación
4. Ubicación
5. Latitud
6. Longitud
7. Elevación
8. Caudal medio anual
9. Número de región

En la Hoja 2 se registraran los caudales mensuales para cada año de registro. Los formatos para cada estación registrada se pueden ver en los anexos del 1 al 14.

Una vez realizado el ingreso de datos en todas las estaciones, se procederá a importar todas las planillas y a ejecutar el control de calidad, el cual permitirá verificar que todos los datos hayan sido ingresados correctamente.

1.2 Importación de datos

Una vez importadas las planillas de Excel, con las regiones propuestas a partir del análisis Cluster se procede a comprobar que el ingreso de datos haya sido satisfactorio a través de un control de calidad. La importación de los datos y los resultados del control de calidad se pueden observar en la figuras 6 y 7 respectivamente.

Figura 10. Importación de datos a L-RAP

Station ID	Sta Name	Gage Type	State	Lat	Long	Mean Ann Precip	Elevation	USER 1	USER 2	USER 3	USER 4
1	Sabana Nueva	Daily	Cordoba	9.0310	-75.8460	717.50	9	0.000	0.000	0.000	
10	Cotoca Abajo	Daily	Córdoba	9.2210	-75.8530	686.02	6	0.000	0.000	0.000	
11	Chigorodó	Daily	Antioquia	7.6720	-76.6840	197.35	50	0.000	0.000	0.000	
12	La cerrazon	Daily	Antioquia	7.7200	-76.5750	75.45	70	0.000	0.000	0.000	
13	Barranquillita	Daily	Antioquia	7.5700	-76.7100	262.50	33	0.000	0.000	0.000	
14	La doctrina	Daily	Cordoba	9.2900	-75.8290	678.78	4	0.000	0.000	0.000	
2	Riogrande	Daily	Antioquia	7.9200	-76.6200	45.63	22	0.000	0.000	0.000	
3	Pueblo Nuevo	Daily	Antioquia	8.4100	-76.6200	263.24	78	0.000	0.000	0.000	
4	Pueblo bello	Daily	Antioquia	8.2050	-76.5240	146.61	84	0.000	0.000	0.000	
5	Mutata	Daily	Antioquia	7.2200	-76.4300	1,028.22	132	0.000	0.000	0.000	
6	Villarteaga	Daily	Antioquia	7.4100	-76.5990	97.43	111	0.000	0.000	0.000	
7	El monton	Daily	Cordoba	8.8790	-75.8330	741.20	13	0.000	0.000	0.000	
8	El Anil	Daily	Antioquia	6.8780	-76.1540	341.53	650	0.000	0.000	0.000	
9	Dabeiba 2	Daily	Antioquia	7.0040	-76.6290	341.53	650	0.000	0.000	0.000	

Fuente: Autores

Figura 11. Ventana principal de L-RAP presentando resultados del control de calidad.

Run Data Quality Scan and Compute Station Circular Stats
Print Report Window

No Errors Found in Data

=====

REPORT FOR QUALITY CHECKING OF DATA

=====

***** 13 Barranquillita *****

OK - Quality Checked for Month 1

OK - Quality Checked for Month 2

OK - Quality Checked for Month 3

OK - Quality Checked for Month 4

OK - Quality Checked for Month 5

OK - Quality Checked for Month 6

OK - Quality Checked for Month 7

OK - Quality Checked for Month 8

OK - Quality Checked for Month 9

OK - Quality Checked for Month 10

OK - Quality Checked for Month 11

Month(s) Selected: Jan / 12 Months

Fuente: Autores

Una vez superado el control de calidad, se definirán restricciones para el análisis como la duración, el mes de inicio, el tipo de datos y la longitud mínima de registros a analizar. También se deberán seleccionar las regiones homogéneas que se plantearon por medio del análisis Cluster, para posteriormente comprobar si son homogéneas, o si se debe realizar un cambio.

El programa permite chequear la estacionariedad e independencia serial de los datos, si alguna estación no pasa el test, se debe buscar el origen de este error, y determinar si se relaciona con la operación errónea de la estación.

2. Identificación de regiones homogéneas

De acuerdo con Hosking and Wallis (1997), las sub-regiones homogéneas no requieren ser geográficamente continuas, de modo que no se forzará a las estaciones a pertenecer a una determinada sub-región en función de su ubicación geográfica [26].

El indicador de heterogeneidad que utiliza el software L-RAP es el estadístico H1, desarrollado por Hosking y Wallis (1997), este estadístico mide la variabilidad relativa del coeficiente de variación (L-CV) observado a partir de la muestra, y determina el grado de homogeneidad en cada una de las regiones propuestas; también calcula dos medidas adicionales, el H2 y H3, sin embargo estos no se tienen en cuenta ya que no son tan confiables estadísticamente [26].

El criterio de homogeneidad utilizado en esta tesis se basa en Wallis et al, que sugieren rangos diferentes a los originales presentados por Hosking y Wallis, ya que tiene en cuenta otras fuentes de variación además de la variabilidad estadística. Los criterios de homogeneidad se observan en la tabla 1.

Tabla 1. Valores críticos de heterogeneidad

HETEROGENEIDAD	Hosking y Wallis (1997)	Wallis et al (2007)
Homogénea	$H < 1$	$H < 2$
Posiblemente heterogénea	$1 < H < 2$	$2 < H < 3$
Heterogénea	$H > 2$	$H > 3$

3.5 Fase 5: Índice de creciente

Para desarrollar el índice de creciente se tendrán que llevar a cabo los siguientes pasos:

- 1. Ajustar distribuciones de probabilidad para los datos de cada estación instrumentada:** Para las series de valores máximos de caudales de las estaciones se revisará su ajuste de distribución mediante el test de Kolmogorov-Smirnov, a partir del software HidroEsta de descarga libre. Este test permite medir la relación existente entre la distribución de una serie de datos y una distribución teórica determinada, de esta manera, permite determinar qué tan apropiado es el ajuste de una serie de datos a una distribución.
- 2. Estimar la media de los caudales máximos ($Q_{2.33}$) para cada estación.**
- 3. Evaluar la homogeneidad de los registros:** La relación entre la creciente de 10 años de período de retorno y la media de los caudales máximos (relación que define el índice de crecientes), es el estadístico que se usa para la medición de la homogeneidad de los registros.

$$R = \frac{Q_{10}}{Q_{2.33}}$$

Una vez calculados todos los factores regionales R por estación se deberá calcular la relación promedio para todas las estaciones instrumentadas que se están utilizando. Este valor se multiplica por la media de los caudales máximos de cada una de las estaciones, se determina la probabilidad de no excedencia asociada a cada uno de los eventos obtenidos, con el fin de determinar el período de retorno asociado. Estos periodos de retorno deben ser cercanos a 10 años. Si alguna estación muestra períodos de retorno muy alejados de este valor, la estación debe ser retirada del estudio.

- 4. Establecer relaciones entre la media de los caudales máximos anuales y el área de drenaje de cada estación:** La creciente media anual de una cuenca no instrumentada puede ser determinada a partir del gráfico Log A vs. Log $Q_{2.33}$ del conjunto de cuencas instrumentadas de la región.
- 5. Determinar la relación regional de frecuencias de crecientes:** Se deberá realizar un análisis de frecuencia a las series de caudales máximos divididos por sus respectivas medias o por el área de la cuenca. En cada rango específico (m), se puede seleccionar la razón mediana y se grafica contra el intervalo de recurrencia.

La curva resultante es la Curva Regional de Frecuencia que puede ser utilizada para estimar las características de recurrencia de crecientes de una cuenca no instrumentada.

- 6. Calcular la razón media de crecientemente para cada intervalo de recurrencia, multiplicar por la crecientemente media anual estimada de cuenca no instrumentada o por el área de la misma y graficar contra el intervalo de recurrencia:** El resultado final de estos pasos secuenciales es una curva de frecuencia de crecientemente para la cuenca no instrumentada.

3.6 Fase 6: Validación de los resultados del índice de creciente

Una vez realizada la regionalización por el método de índice de creciente, será necesario realizar una validación de los resultados, para verificar que el modelo se asemeje a la realidad.

Para la validación de los resultados se hallaran dos errores diferentes (MAE y RMAE) para todas las estaciones, estos errores se calcularan comparando los resultados de los caudales máximos hallados por medio de la curva regional de frecuencia, y los caudales máximos observados, para cada periodo de retorno.

Una vez determinados los errores será posible definir si se está sobreestimando o subestimando la información de los caudales máximos a partir del índice de creciente.

Para saber si el modelo desarrollado se asemeja a la realidad, el rango de los errores debe estar entre un 0-25%, según lo establecido por la UNESCO en la Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur [28], y es afirmado por Linsley et al en su libro Hidrología para ingenieros [29].

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

4.1 Fase 1: Selección de estaciones hidrológicas

A lo largo de la cuenca hay aproximadamente 241 estaciones hidroclimatológicas. A partir del criterio de selección, para este estudio se tomó en cuenta que las estaciones deben estar activas y contar con el número de registros necesarios para llevar a cabo la regionalización.

A continuación se observa el total de estaciones limnimétricas y limnigráficas presentes en la cuenca del Río Sinú, para determinar cuáles cumplen los criterios de selección. Las estaciones que se presentan a continuación están disponibles en la base de datos del IDEAM.

Tabla 2. Estaciones limnimétricas y limnigráficas de la Cuenca del Río Sinú

ESTACIÓN	Limnimétrica (LM) / Limnigráfica (LG)	CRITERIO		CUMPLE / NO CUMPLE
		Cuenta con 20 años de registro	Está activa	
Mutata	LG	Si	Si	Cumple
La Cerrazón	LG	Si	Si	Cumple
Villarteaga	LG	Si	Si	Cumple
El Anil	LG	Si	Si	Cumple
La Candelaria	LG	No	Si	No cumple
El Carmelo	LG	No	Si	No cumple
Tierralta	LG	No	Si	No cumple
Cotoca abajo	LG	Si	Si	Cumple
Barranquillita	LM	Si	Si	Cumple
Riogrande	LM	Si	Si	Cumple
Pueblo Nuevo	LM	Si	Si	Cumple
Dabeiba 2	LM	Si	Si	Cumple
Chigorodó	LM	Si	Si	Cumple
Pueblo Bello	LM	Si	Si	Cumple
Tres piedras	LM	No	Si	No cumple
Sta Helena	LM	No	Si	No cumple
Maracayo	LM	No	Si	No cumple
Tres Palmas	LM	No	Si	No cumple
Junquillo	LM	No	Si	No cumple
Betanci	LM	No	Si	No cumple
Sabana Nueva	LM	Si	Si	Cumple
Palma central	LM	No	Si	No cumple
El Bongo	LM	No	Si	No cumple
Ciénaga de oro	LM	No	Si	No cumple
El higo	LM	No	Si	No cumple
El montón	LM	Si	Si	Cumple
Toluviejo	LM	No	Si	No cumple
El Toro	LM	No	Si	No cumple
Canalete	LM	No	Si	No cumple

Momil	LM	No	Si	No cumple
La Doctrina	LM	Si	Si	Cumple
Cereté	LM	No	Si	No cumple
Lorica	LM	No	Si	No cumple
Los Garzones	LM	No	Si	No cumple
Sucre	LM	No	Si	No cumple

Para el análisis, se tomaron series con un periodo de registro común, de 1991 a 2011, años que contaban con suficientes datos, para que resultaran significativos. Se obtuvo un total de 9 estaciones limnométricas y 5 estaciones limnográficas que cumplen con el criterio de selección; estas 14 estaciones, representan el 40% del total de estaciones que miden la variable de interés dentro de la cuenca y cumplen con el criterio de selección establecido. Las estaciones de tipo LM, permiten la medición y registro periódico del flujo de agua, mientras que las de tipo LG, permiten el registro gráfico continuo de los datos del flujo de agua.

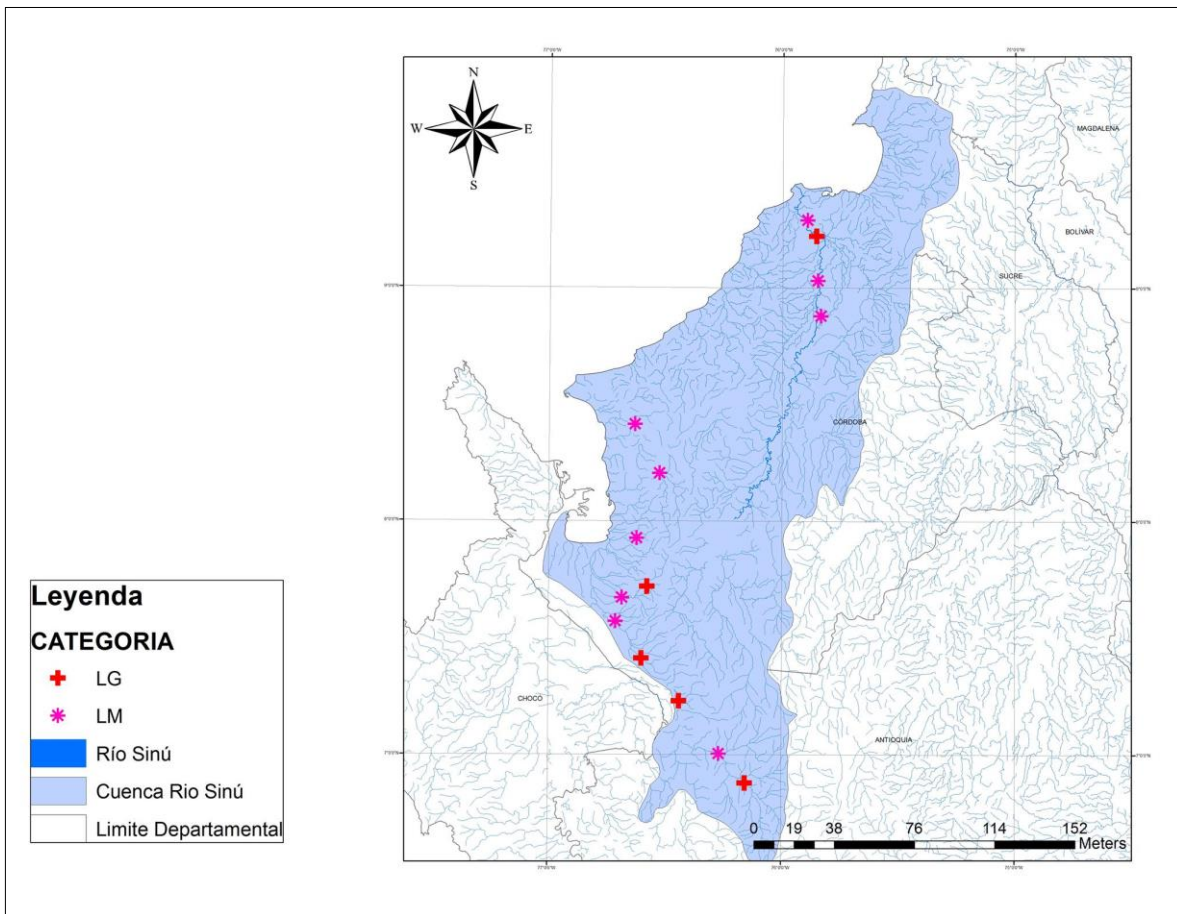
En la tabla 3, se muestra un resumen con el código, tipo de estación y localización de las estaciones seleccionadas para el estudio.

Tabla 3. Estaciones seleccionadas para el desarrollo de la regionalización de caudales máximos.

Estación	Código	Tipo	Departamento	Localización	
				Latitud (N)	Longitud (W)
Mutata	11117040	LG	Antioquia	7.23	-76.44
Barranquillita	12017020	LM	Antioquia	7.57	-76.71
Riogrande	12017040	LM	Antioquia	7.93	-76.62
La cerrazón	12017070	LG	Antioquia	7.72	-76.58
Villarteaga	12017100	LG	Antioquia	7.41	-76.60
Pueblo nuevo	12027050	LM	Antioquia	8.41	-76.63
El anil	11117010	LG	Antioquia	6.88	-76.15
Dabeiba 2	11117050	LM	Antioquia	7.00	-76.27
Chigorodó	12017010	LM	Antioquia	7.67	-76.84
Pueblo bello	12027010	LM	Antioquia	8.20	-76.52
Sabana nueva	13077010	LM	Córdoba	9.03	-75.85
La doctrina	13077040	LM	Córdoba	9.29	-75.89
El montón	13077300	LM	Córdoba	8.88	-75.83
Cotoca abajo	13077060	LG	Córdoba	9.22	-75.85

En la figura 12 se presenta la ubicación espacial de las estaciones seleccionadas.

Figura 12. Mapa de la distribución espacial de las estaciones hidrológicas en la cuenca del Río Sinú



Fuente: Autores

Como se puede observar en la figura 8, de las 14 estaciones seleccionadas para el estudio, 10 de estas se encuentran en la zona alta de la cuenca, y las 4 restantes se ubican en la parte baja.

La parte alta de la cuenca se caracteriza por ser una zona montañosa con pendientes entre 10 a 25% y la parte baja de la cuenca se caracteriza por su topografía plana a ondulada y pantanosa con pendientes de hasta de un 3%, caracterizado por el complejo cenagoso de la Ciénaga Grande de aproximadamente 42000 Ha [30].

4.2 Fase 2: Estimación de datos faltantes

La cantidad de datos faltantes en cada una de las estaciones se observa en la tabla 4.

Tabla 4. Porcentaje de datos faltantes

Estación	% de datos faltantes.
El Montón	20 %
La Doctrina	3%
Cotoca Abajo	2%
Sabana Nueva	3%
Mutata	10%
Barranquillita	2%
Riogrande	4%
La Cerrazón	25%
Villarteaga	11%
Pueblo Nuevo	2%
El Anil	0%
Dabeiba 2	3%
Chigorodó	4%
Pueblo Bello	4%

Como se observa en la tabla 4, ninguna de las estaciones tiene más de 30% de datos faltantes, con lo cual resultan válidos para no ser retiradas del estudio, como se afirma en la guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur [28].

La estimación de estos datos se realizó a través del método de las proporciones. Los resultados se pueden observar en los anexos 15 y 16.

A continuación se presenta un ejemplo de cómo se realizó el proceso de estimación de datos faltantes.

Dato faltante estación Villarteaga (marzo-2011)

$$\frac{X}{X_i} = \frac{Q_f}{(Q_a - X_i)}$$

$$X = \frac{992.6}{(725.2 - 26.6)} * 26.6 = 37.8 \frac{m^3}{s}$$

4.3 Fase 3: Desarrollo de pruebas estadísticas

La prueba de homogeneidad desarrollada fue la T de Student, para esta se tuvo en cuenta que las estaciones pertenecientes a cada grupo fueran geográficamente cercanas, por lo que se establecieron las siguientes muestras.

Tabla 5. Grupos comparados en la prueba T Student

Córdoba	Antioquia		
Sabana Nueva La Doctrina El Montón Cotoca Abajo	Mutata El Anil Dabeiba 2 Villarteaga	Riogrande La Cerrazón Chigorodó Barranquillita	Pueblo Nuevo Pueblo Bello Riogrande La Cerrazón

El desarrollo de la prueba de t de Student para los grupos de estaciones se puede encontrar en los anexos 17,18, 19 y 20. Una vez determinados los grupos de cuatro estaciones que se van a comparar, se procedió a desarrollar la prueba T de Student, arrojando los siguientes resultados:

Tabla 6. Resultados de prueba bilateral

Estaciones	Prueba de homogeneidad T de Student
Mutata	Homogénea
Barranquillita	Homogénea
Rio grande	Homogénea
La cerrazón	Homogénea
Villarteaga	Homogénea
Pueblo nuevo	Homogénea
El anil	Homogénea
Dabeiba 2	Homogénea
Chigorodó	Homogénea
Pueblo bello	Homogénea
Sabana nueva	Homogénea
La doctrina	Homogénea
El montón	Homogénea
Cotoca abajo	Homogénea

Los resultados de los análisis de los registros de caudales máximos de las estaciones limnimétricas y limnigráficas, se presentan en la tabla 6. En ella se observa que todas las muestras de las estaciones resultaron homogéneas entre sí.

En cuanto a la estacionariedad, se debe recordar, que las series que cumplen este criterio son aquellas que provienen de regímenes hidrológicos que no han sufrido alteraciones naturales o artificiales, pero para efectos prácticos se considerarán

series estacionarias, ya que la información hidrológica utilizada proviene de sectores donde el nivel de intervención humana es muy bajo [31].

La intervención más significativa de la cuenca del Río Sinú ha sido la construcción de la represa de Urrá que tiene como una de sus funciones principales garantizar un caudal regulado de descargas. Las estaciones que han sido consideradas para el estudio no se ubican cerca de la represa, por lo que esto nos sugiere que en este caso, la homogeneidad indica independencia, asegurando la consistencia de las series utilizadas en el estudio.

4.4 Fase 4: Delimitación de regiones homogéneas

La delimitación de regiones homogéneas no es producto de una selección aleatoria de estaciones reunidas en un mismo grupo; esta debe ser analizada mediante distintos cálculos, por este motivo se desarrolló un análisis cluster que es uno de los métodos más utilizados para formar regiones con estaciones que presentan características similares, como lo indica Lisandro Núñez [32].

Tabla 7. Resumen procesamiento de los casos

Casos					
Válidos		Perdidos		Total	
N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
14	100,0	0	,0	14	100,0

a. Vinculación promedio (Inter-grupos)

La tabla 7 muestra que el análisis cluster tuvo en cuenta el 100% de los datos, es decir incluyó las catorce estaciones. Este análisis se realizó por el método inter-grupos, en donde la distancia entre los grupos se obtiene calculando la distancia media entre todos los pares de observaciones independientemente de que estén próximos o alejados [33].

Los resultados de la agrupación fueron los siguientes:

Tabla 8. Conglomerado de pertenencia

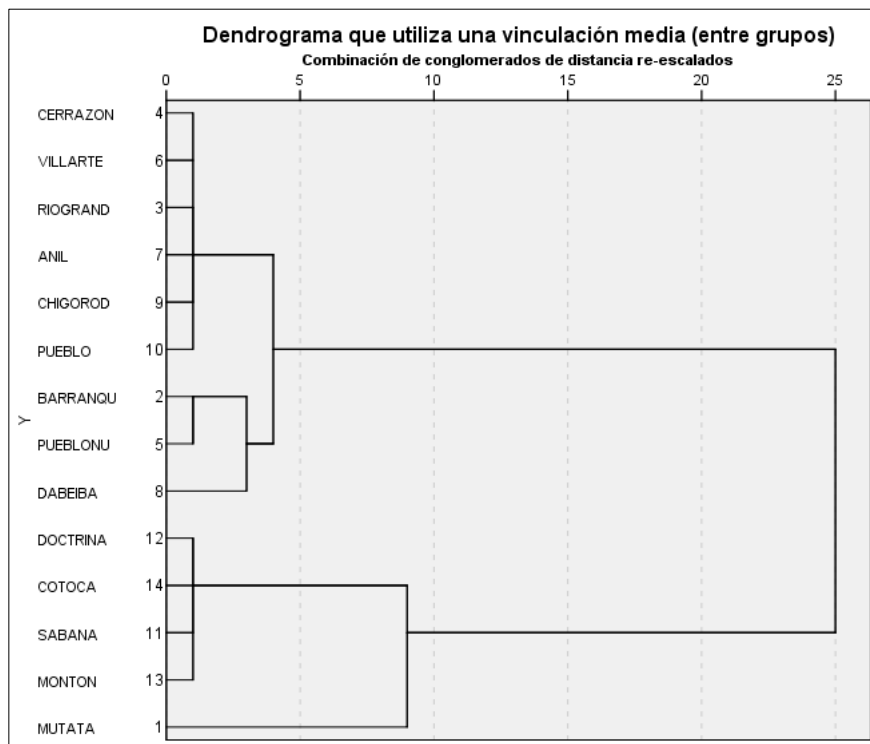
Caso	4 conglomerados
1 Mutata	1
2 Barranquillita	2
3 Rio grande	3
4 La cerrazón	3
5 Pueblo nuevo	2
6 Villarteaga	3
7 El anil	3
8 Dabeiba 2	2
9 Chigorodó	3
10 Pueblo bello	3
11 Sabana nueva	4
12 La doctrina	4
13 El montón	4
14 Cotoca abajo	4

En la tabla 8 se observa la clasificación de las 14 estaciones en cuatro conglomerados. En este caso un conglomerado es un grupo de estaciones con características similares.

De los cuatro conglomerados obtenidos uno quedó solamente con una estación (Mutata), causado por la gran diferencia entre la media de los datos de esta estación comparada con las demás estaciones. Por lo tanto, Mutata no se tendrá en cuenta en este estudio. Generalmente estos resultados no se consideran como finales, normalmente se realizan modificaciones.

En la figura 13 se puede observar la representación gráfica de los conglomerados.

Figura 13. Dendrograma obtenido del análisis Cluster.



En este caso, las regiones homogéneas que se proponen a partir del análisis cluster son las siguientes:

Tabla 9. Clasificación de regiones homogéneas.

Región 1	Región 2	Región 3
Cerrazón Pueblo Bello Villarteaga El Anil Riogrande Chigorodó	La doctrina El montón Sabana nueva Cotoca Abajo	Barranquillita Dabeiba Pueblo Nuevo

Para verificar que las tres regiones propuestas sean homogéneas, se procedió a realizar la prueba del estadístico H1 usando el Software L-RAP, teniendo en cuenta el criterio de clasificación de Wallis et al, que se observa en la tabla 1, ya que este no es netamente estadístico sino que tiene en cuenta otro criterio geográfico.

Tabla 10. Resultados prueba de heterogeneidad H1 para la Región 1.

REGIÓN 1	Cerrazón Pueblo Bello	H1	3.14	Se rechaza la homogeneidad de la región
	Villarteaga El Anil	H2	5.58	Se rechaza la homogeneidad de la región
	Riogrande Chigorodó	H3	5.90	Se rechaza la homogeneidad de la región

Al desarrollar la prueba de homogeneidad H1 de Hosking y Wallis se puede observar que la región 1 no fue aceptada como homogénea, ya que presenta un valor que sale de los rangos de aceptación, este valor indica, que no todas las estaciones agrupadas en esta región presentan características estadísticas diferentes, razón por la cual se tuvo que realizar un cambio en el agrupamiento, el cual consistió en agregar a esta región la estación de Pueblo Nuevo, y remover la estación de Río grande.

Solo se tiene en cuenta el H1, ya que Hosking y Wallis afirmaron que presentaba mayor potencia estadística que el H2 el H3 [2], y esto fue comprobado por Viglione, que comparó la potencia asociada a estos 3 estadísticos mediante una simulación de Monte Carlo [34].

Tabla 11. Resultados prueba de heterogeneidad H1 para la región 1

REGIÓN 1	Cerrazón Pueblo Bello	H1	2.81	Se aprueba la homogeneidad de la región
	Villarteaga El Anil	H2	5.58	Se rechaza la homogeneidad de la región
	Pueblo Nuevo Chigorodó	H3	5.90	Se rechaza la homogeneidad de la región

El criterio de clasificación de Wallis et al tiene en cuenta criterios geográficos como la altitud, longitud y latitud, al obtener un valor entre 2.0 y 3.0 en el estadístico H1 que se basa en el coeficiente de variación, queda a criterio de los autores definir si esas variables geográficas son admisibles para concretar si la región es homogénea o no. Por lo tanto, esta región es tomada como homogénea.

Como se mencionó anteriormente, los estadísticos H2 y H3 no tienen mucha potencia estadística por lo que se puede omitir que el valor de estos dos indicadores haya sido rechazado.

Tabla 12. Resultados prueba de heterogeneidad H1 de la región 2

REGIÓN 2	La doctrina El montón Sabana nueva Cotoca Abajo	H1	-0.63	Se aprueba la homogeneidad de la región
		H2	0.27	Se aprueba La homogeneidad de la región
		H3	-0.32	Se aprueba la homogeneidad de la región

Se puede observar que el resultado de la prueba del estadístico H1 para la región dos da un valor negativo, el cual indica que la homogeneidad es mayor a la esperada, porque hay una menor dispersión entre los valores de I-coeficiente de variación que se esperarían en una región homogénea, esto se puede relacionar a la cercanía geográfica que presentan estas estaciones.

En esta región los estadísticos H2 y H3, basados en la I-asimetría y la I-curtosis, también arrojan un valor que es aceptable para tomar la región como homogénea.

Tabla 13. Resultados prueba de heterogeneidad H1 de la región 3

REGIÓN 3	Barranquillita Dabeiba Pueblo Nuevo	H1	7.35	Se rechaza la homogeneidad de la región
		H2	1.31	Se aprueba la homogeneidad de la región
		H3	-0.25	Se aprueba la homogeneidad de la región

En la región 3 se puede observar que el resultado de la prueba da muy alto (7.35) por lo cual rechaza la homogeneidad de esta región. Solo se acepta los estadísticos H2 y H3, pero estos, como se mencionó anteriormente, no cuentan con suficiente potencia estadística para que sea una región homogénea.

Por este motivo las estaciones de Barranquillita, Río Grande y Dabeiba 2 también fueron eliminadas del estudio.

Las dos regiones resultantes no presentan necesariamente estaciones cercanas geográficamente, pero esto no es un problema para determinar la homogeneidad, ya que una región es homogénea cuando las series de datos de todas las estaciones están representadas por una misma función de distribución de probabilidad o “curva regional”. Cabe destacar que la proximidad geográfica no es garantía de la homogeneidad de una región, la homogeneidad se compone de estaciones con similar comportamiento estadístico (habitualmente cuantificado por su Coeficiente de variación) [26].

Aunque se hubiera podido hacer un análisis de índice de creciente para toda la cuenca, este no habría sido una región homogénea, por sus grandes dimensiones. Por lo tanto se prefirió dividirla en las dos regiones homogéneas halladas anteriormente.

A continuación, se desarrollará el índice de creciente para estas dos regiones.

4.5 Fase 5: Índice de creciente

Para el desarrollo del índice de creciente se realizó la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov utilizando el software HidroEsta, con el fin de determinar las funciones de distribución de probabilidad con mejor ajuste para la estimación de caudales.

Con un nivel de confianza del 95%, los resultados del delta tabular y delta teórico que se obtuvieron con respecto a cada función de distribución, se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Resultados delta teórico de las distribuciones de probabilidad de ajuste

ESTACIÓN	Delta tabular	Gamma 2 parámetros	Gamma 3 parámetros	Normal	Log-Normal 2 parámetros	Log-normal 3 parámetros	Log Pearson tipo III	Gumbel
Barranquillita	0.23	0.08	0.09	0.14	0.11	0.08	0.08	0.12
Chigorodó	0.22	0.07	0.05	0.15	0.11	0.05	N/A	0.12
Cotoca abajo	0.20	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	N/A	0.13
Dabeiba 2	0.22	0.05	0.05	0.12	0.08	0.05	N/A	0.15
El anil	0.21	N/A	N/A	N/A	0.20	0.16	0.13	0.20
El Montón	0.30	0.08	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.14
La cerrazón	0.33	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	N/A	0.18
La Doctrina	0.29	0.15	N/A	0.14	0.16	N/A	N/A	0.23
Mutata	0.23	0.13	0.12	0.15	0.11	0.11	N/A	0.15
Pueblo Bello	0.23	0.11	0.12	0.12	0.13	0.11	N/A	0.15
Pueblo Nuevo	0.23	0.11	0.10	0.10	0.12	0.11	N/A	0.19
Riogrande	0.23	0.14	0.09	0.09	0.10	0.08	N/A	0.20
Sabana Nueva	0.20	0.13	0.07	N/A	0.11	0.05	0.06	0.14
Villarteaga	0.29	0.28	0.25	0.28	0.27	0.18	0.25	0.26

A pesar de que todas las distribuciones (a excepción de Pearson tipo III) tienen un buen ajuste, la distribución Gumbel fue seleccionada para realizar el cálculo de caudales máximos ya que presenta una diferencia menor entre el delta teórico y el delta tabular, además según Valleumbroso [35] es una de las distribuciones de valores extremos, y ha sido ampliamente utilizada para representar el comportamiento de crecientes.

Adicionalmente el método índice de creciente, asume que todas las crecidas de la región son del tipo I (distribución exponencial doble o de Gumbel), pero no se puede dejar de lado el hecho de que en distintos estudios se han utilizado distintas

distribuciones y se han obtenido resultados satisfactorios, como en el estudio realizado por Joel Nobert et al en la cuenca del lago Victoria en Kenya [36].

A partir de la distribución seleccionada y su relación con las series de datos de las estaciones, se calculan los caudales máximos de cada región, para cada periodo de retorno (2.33, 5, 10, 25, 50 ,100). Los resultados se presentan en las tablas 15 y 16.

Tabla 15. Caudales (m³/s) para diferentes periodos de retorno Regionalización Índice de creciente Región 1

T	Nombre estación					
	La Cerrazón	Pueblo Bello	Pueblo Nuevo	Villarteaga	Río Grande	El Anil
2.33	75.5	144.64	263.37	97.46	45.66	140.17
5	108.94	206.25	349.98	118.75	63.79	183.43
10	136.17	256.43	420.53	136.09	78.55	218.67
25	170.59	319.84	509.66	158	97.2	263.19
50	196.11	366.88	575.78	174.26	111.04	296.21
100	221.45	413.57	641.41	190.39	124.77	329

Tabla 16. Caudales (m³/s) para diferentes periodos de retorno Regionalización Índice de creciente Región 2

T	Nombre estación			
	Doctrina	El Montón	Sabana Nueva	Cotoca Abajo
2.33	678.85	741.27	717.58	686.1
5	725.3	788.78	772.24	736.19
10	763.13	827.47	816.75	776.99
25	810.94	876.36	873	828.54
50	846.4	912.63	914.73	866.78
100	881.6	948.63	956.14	904.74

El caudal máximo para el periodo de retorno 2.33 es el más importante, ya que representa la media de los caudales máximos. Este y los resultados del periodo de retorno de 10 años, son los que definen el índice de creciente.

En las tablas 15 y 16, se puede observar que a medida que aumenta el periodo de retorno, aumenta la magnitud de los caudales. Esto es importante tenerlo en cuenta a la hora de realizar obras o estructuras civiles cuyo impacto se espere a largo plazo.

Test de Langbein

Anteriormente se comprobó la homogeneidad regional por medio de la diferencia entre los coeficientes de variación. En el índice de creciente se aplica el test de Langbein, que permite comprobar la similitud entre las estaciones de la región, mediante la relación entre la creciente de 10 años de período de retorno y la media de los caudales máximos, esto con el fin de integrar los valores en una curva regional de frecuencias.

Tabla 17. Análisis de homogeneidad regionalización por índice de creciente región

1

Estaciones	Área Drenaje (km ²)	Q2.33	Q10	Q10/Q2.33	Q10 ESTIMADO	Tr estimado	AREA
La Cerrazón	45.32	75.5	136.17	1.80	123.94	7.3	45.32
Pueblo Bello	390	144.64	256.43	1.77	237.45	7.7	389.58
Pueblo Nuevo	852	263.37	420.53	1.60	432.36	11.3	851.86
Villarteaga	111	97.46	136.09	1.40	160.00	27.2	110.87
Río Grande	32.31	45.66	78.55	1.72	74.96	8.4	32.31
El Anil	705.03	140.17	218.67	1.56	230.11	12.6	705.03
				1.64			

Tabla 14. Análisis de homogeneidad regionalización por índice de creciente región

2

Estaciones	Área Drenaje (km ²)	Q2.33	Q10	Q10/Q2.33	Q10 Estimado	Tr estimado	Área
Doctrina	7535.00	678.85	763.13	1.12	766.02	10.5	7671.19
Cotoca Abajo	7484.00	686.1	816.75	1.19	774.20	17.7	7530.62
El Montón	2895.21	741.27	827.47	1.12	836.46	11.7	2895.21
Sabana Nueva	4061.03	717.58	776.99	1.08	809.73	5.1	4061.03
				1.13			

Esta homogeneidad, establece la consistencia entre los caudales estimados a 10 años de retorno en cuanto al coeficiente determinado del índice de creciente Q10/Q2.33.

Langbein, estableció unos límites de confianza en función de la longitud de la serie de datos. Con los registros utilizados en este proyecto de grado (20 años), se estableció un límite inferior de 2.8 años y un límite superior de 40 años para que su homogeneidad pueda ser aceptada [18]. Como se observa en las tablas 17 y 18, todos los datos de período de retorno estimado se ubican en estos límites, por lo

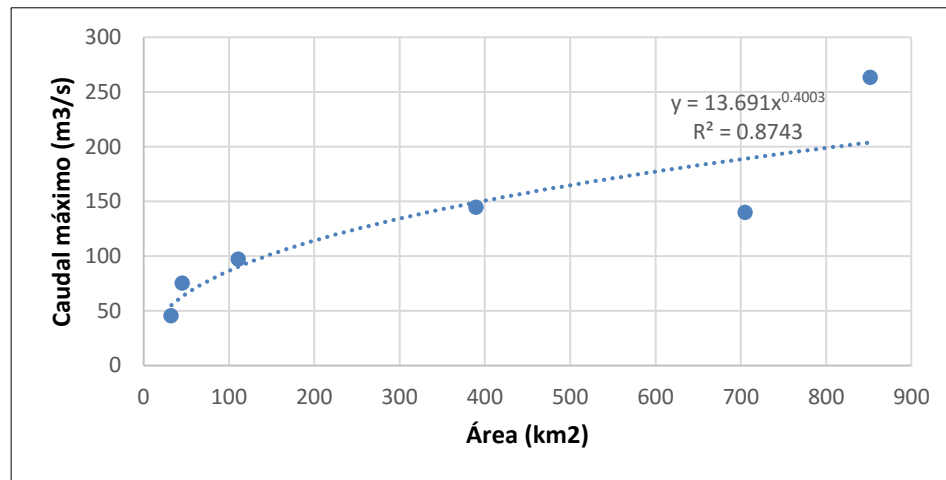
tanto la prueba de Langbein es positiva para las estaciones de las dos regiones homogéneas.

Relación del caudal medio con el área aferente.

A continuación se presenta la relación existente entre el caudal medio máximo 2.33 y el área de drenaje correspondiente a cada una de las estaciones empleadas por cada región homogénea.

Relación del caudal medio con el área aferente en la región homogénea 1

Gráfica 1. Relación funcional de tipo potencial entre los caudales máximos anuales y el área en la región homogénea 1



Fuente: Autores

A partir de los datos hallados en la tabla 17 se obtiene una regresión mediante la hoja de cálculo Excel, y se obtiene una relación de tipo potencial, representada por la siguiente ecuación:

$$Q_{2.33} = 13.691A^{0.4003}$$

Donde:

$Q_{2.33}$: Caudal medio de los caudales máximos anuales

A: Área aferente

En la Gráfica 3 se muestra la relación funcional de tipo potencial encontrada entre la media de los caudales máximos y el área de la cuenca hidrográfica hasta el sitio de cada estación, evidenciando que a medida de que aumenta el área aferente aumenta el caudal.

A medida que las áreas son mayores, aumenta el número de afluentes haciendo que la magnitud de los caudales sea mayor. Esto es consecuente con el resultado obtenido en la gráfica 1.

Esta ecuación potencial presenta un coeficiente de determinación muy alto de 0.874, este afirma la calidad del modelo de regionalización y sugiere un coeficiente de correlación de 0.935, mayor a 0.7 que es el valor adecuado para estudios hidrológicos como se evidencia en la Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur de la UNESCO [28].

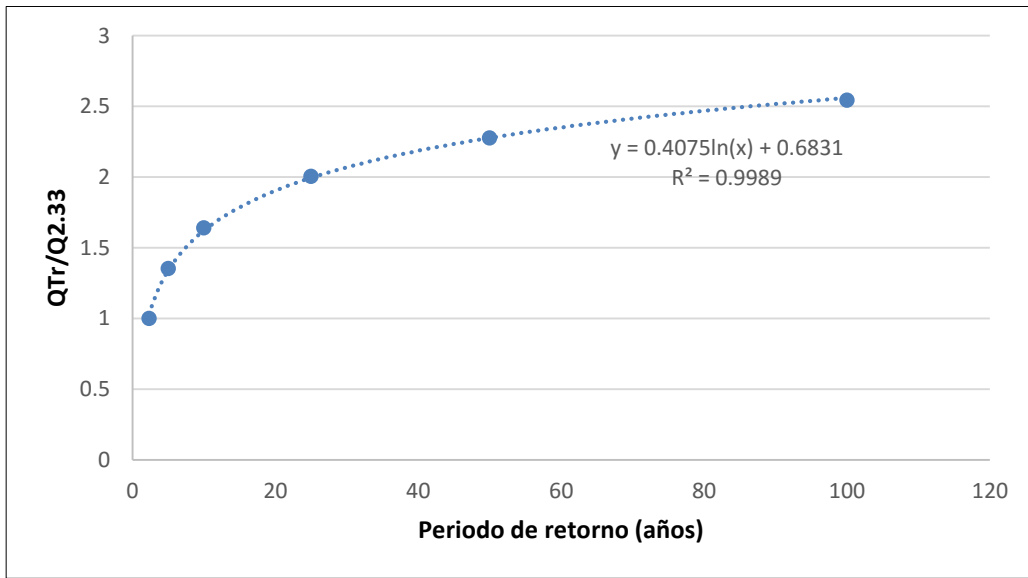
Dado que el interés es conocer los caudales máximos que se puedan presentar en un sitio determinado para distintos periodos de retorno, se procedió a elaborar las curvas de frecuencia adimensional, para las dos regiones homogéneas obtenidas.

Para esto se calculó la relación entre el caudal máximo anual y el promedio del caudal máximo de todo el registro $Q_{\max}/Q_{2.33}$, para convertir el caudal máximo a valores adimensionales.

Tabla 15. Relación funcional entre los caudales máximos anuales y el área en la región homogénea 1

T	Nombre estación						Curva regional
	La Cerrazón	Pueblo Bello	Pueblo Nuevo	Villarteaga	Río Grande	El Anil	
2.33	1	1	1	1	1	1	1
5	1.44	1.43	1.33	1.22	1.40	1.31	1.35
10	1.80	1.77	1.60	1.40	1.72	1.56	1.64
25	2.26	2.21	1.94	1.62	2.13	1.88	2.01
50	2.60	2.54	2.19	1.79	2.43	2.11	2.28
100	2.93	2.86	2.44	1.95	2.73	2.35	2.54

Gráfica 2. Curva regional de frecuencia en la región homogénea 1



Fuente: Autores

A partir de los datos hallados en la tabla 19 se obtiene una regresión mediante la hoja de cálculo Excel, y se obtiene una relación de tipo logarítmica, representada por la siguiente ecuación:

$$\frac{Q_{Tr}}{Q_{2.33}} = 0.4075 \ln(T_r) + 0.6831$$

Donde:

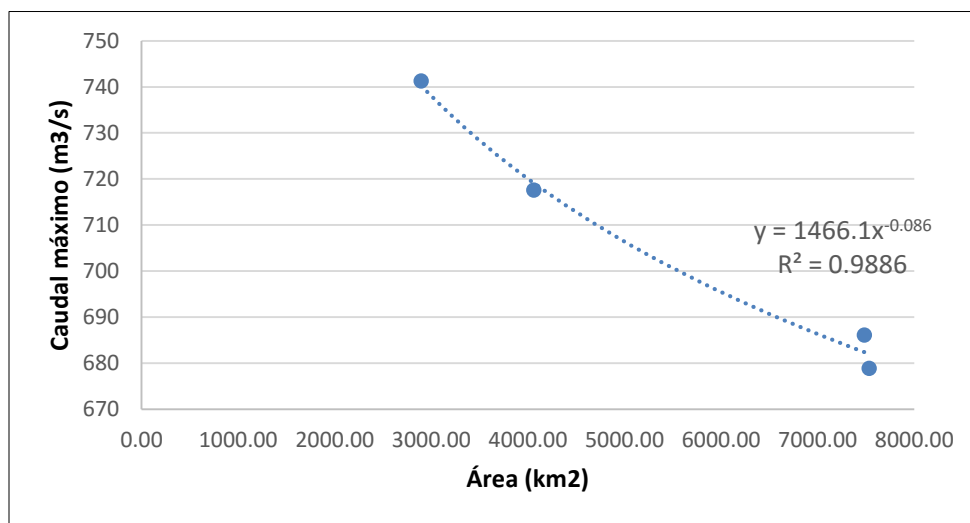
$Q_{Tr}/Q_{2.33}$ = Índice de creciente
 Tr = Período de retorno (años)

También, en la gráfica 2 se puede observar que a medida que aumenta el periodo de retorno, la relación del índice de creciente ($Q_{Tr}/Q_{2.33}$) aumenta cada vez menos. Esto es característico de una curva logarítmica. Además de esto se puede inferir que para un periodo de retorno muy grande, esta relación tendrá un valor límite de una ecuación logarítmica.

Relación del caudal medio con el área aferente en la región homogénea 2

En la Gráfica 3 se muestra la relación funcional de tipo potencial encontrada entre la media de los caudales máximos y el área de la cuenca hidrográfica hasta el sitio de cada estación. Esta ecuación potencial presenta un coeficiente de determinación muy alto de 0.988, este afirma la calidad del modelo de regionalización y sugiere un coeficiente de correlación de 0.993, mayor a 0.7 que es el valor adecuado para estudios hidrológicos como lo presenta en la Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur de la UNESCO [28].

Gráfica 3. Relación funcional de tipo potencial entre los caudales máximos anuales y el área en la región homogénea 2



Fuente: Autores

A partir de los datos hallados en la tabla 18 se obtiene una regresión mediante la hoja de cálculo Excel, y se obtiene una relación de tipo potencial, representada por la siguiente ecuación:

$$Q_{2.33} = 1466.1A^{-0.086}$$

Donde:

$Q_{2.33}$: Caudal medio de los caudales máximos anuales

A: Área aferente

En la zona del bajo Sinú se forma el complejo cenagoso que es un cuerpo de agua que se forma debido a la dinámica hídrica entre el conjunto de lagunas y la cuenca media y baja del río Sinú [37]. En este se encuentran una gran cantidad de ciénagas, las cuales gracias a su vegetación permiten almacenar y liberar agua liberando los niveles de los ríos, por lo que se crea una dinámica hídrica permitiendo una amortiguación y regulación natural de los caudales máximos en caso de inundación o desbordamiento [6]. Su dinámica hídrica depende en un alto porcentaje de los intercambios con el río Sinú [38], esto justifica por qué la gráfica 3 no demuestra la relación directa entre el caudal y el área como se veía en la gráfica 1, si no que al aumentar el área aferente, el caudal disminuye.

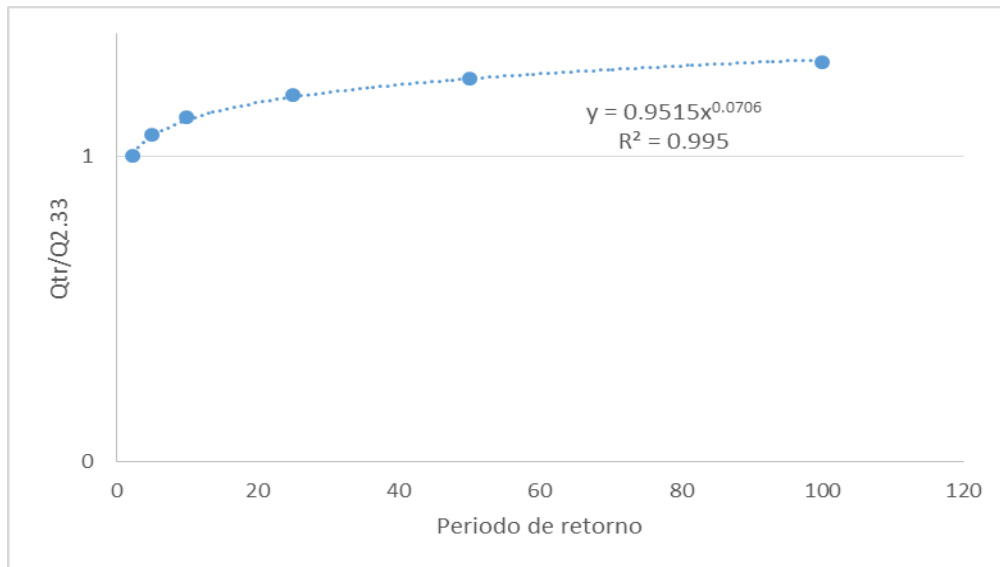
Esto demuestra la importancia que tienen las ciénagas dentro de esta cuenca, ya que son un determinante clave de la vida de los municipios que lo rodean debido a dos razones: Su función amortiguadora del nivel del río en la época lluviosa, de abril a noviembre, que evita las inundaciones excesivas en invierno; y la condición ecológica que obtiene gracias al intercambio de aguas entre ecosistemas de tipo léntico (las lagunas) y lótico (el río), convirtiéndose en un hábitat que alberga gran variedad de fauna y flora, históricamente aprovechadas por los habitantes sinuanos, que han desarrollado toda una economía a su alrededor [39].

De acuerdo con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, este complejo lagunar posee una función hidrológica de primer orden de amortiguación y regulación natural de las aguas lluvias, así como de los caudales picos y excesos de aguas que se presentan en el momento en que la capacidad del cauce natural del río Sinú es sobrepasada y presenta desbordamientos [39].

Tabla 16. Relación funcional de tipo logarítmico entre los caudales máximos anuales y el área en la región homogénea 2

T	Nombre estación				Curva regional
	Doctrina	El Montón	Sabana Nueva	Cotoca Abajo	
2.33	1	1	1	1	1
5	1.07	1.06	1.08	1.07	1.07
10	1.12	1.12	1.14	1.13	1.13
25	1.19	1.18	1.22	1.21	1.20
50	1.25	1.23	1.27	1.26	1.25
100	1.30	1.28	1.33	1.32	1.31

Gráfica 4. Curva regional de frecuencia en la región homogénea 2



Fuente: Autores

La curva regional representa la relación funcional entre el índice de creciente promedio y el periodo de retorno. Esta ecuación de tipo potencial se representa por medio de la siguiente ecuación:

$$\frac{Q_{Tr}}{Q_{2.33}} = 0.9515Tr^{0.0706}$$

Donde:

$Q_{Tr}/Q_{2.33}$ = Índice de creciente
 Tr = Periodo de retorno (años)

Aunque en la región homogénea 1 se presenta una relación logarítmica y en la región homogénea 2 se presenta una relación potencial, ambas se comportan de la misma forma; la magnitud de los caudales empieza a aumentar hasta llegar a un punto en el que se estabilizan.

Cómo se puede observar en la gráfica 4, se ve una línea de tendencia potencial, pero esta no presenta mucha variación. Esto es consecuente con lo explicado anteriormente sobre las ciénagas y su función como amortiguadores naturales cuando suben los niveles del río.

El desarrollo del método índice de creciente, se encuentra en el anexo 21.

4.6 Fase 6: Validación de los resultados del índice de creciente

Validación de caudales máximos

Las métricas de desempeño comparan los caudales máximos observados y los caudales máximo simulado, para así poder ver que la diferencia entre esos no sea tan grande, y que el modelo aplicado sea válido.

Los caudales máximos observados, se calcularon utilizando el software Hidroesta. Para cada periodo de retorno (2.33, 5, 10, 25, 50, 100) se halló un caudal máximo. A partir de estos se obtuvieron las curvas regionales de frecuencia.

A partir de la ecuación de la curva regional de frecuencia para cada región se obtuvieron los caudales máximos simulados para cada periodo de retorno para el área de drenaje aferente a los puntos de control, en la tabla 21 se observan los caudales observados (QO) y simulados (QS).

Tabla 17. Caudales máximos observados y simulados para diferentes periodos de retorno en la región homogénea 1

Estación	Área	Periodo de retorno											
		QO	QS	QO	QS	QO	QS	QO	QS	QO	QS	QO	QS
		2.33		5		10		25		50		100	
La cerrazón	45.3	75.5	63.02	108.9	84.4	136.2	102.2	170.6	125.7	196.1	143.5	221.5	161.3
Pueblo bello	389.6	144.6	149.1	206.3	199.6	256.4	241.7	319.8	297.4	366.9	339.5	413.6	381.6
Pueblo Nuevo	851.9	263.4	203.9	350.0	273.0	420.5	330.6	509.7	406.8	575.8	464.4	641.4	522.0
Villartega	110.9	97.5	90.15	118.8	120.7	136.1	146.2	158.0	179.8	174.3	205.3	190.4	230.8
Río Grande	32.3	45.7	55.03	63.8	73.7	78.6	89.2	97.2	109.8	111.0	125.3	124.8	140.9
El Anil	705.0	140.2	189.1	183.4	253.1	218.7	306.5	263.2	377.1	296.2	430.5	329.0	483.9

Tabla 18. Caudales máximos observados y simulados para diferentes periodos de retorno en la región homogénea 2

Estación	Área	Periodo de retorno											
		QO	QS	QO	QS	QO	QS	QO	QS	QO	QS	QO	QS
		2.33		5		10		25		50		100	
Doctrina	7671.1	678.8	679.3	725.3	724.1	763.1	760.4	800	811.2	823.7	851.9	845.7	894.6
Cotoca Abajo	7530.6	741.2	680.3	788.7	725.9	827.4	761.6	876.3	812.5	912.6	853.3	948.6	896.1
El Montón	2895.2	717.5	738.6	772.2	787.4	776.9	826.9	828.5	882.1	866.8	926.4	904.7	972.9
Sabana Nueva	4061	686.1	717.5	736.1	764.8	816.7	803.2	873	856.8	914.7	899.8	956.1	945

El caudal máximo medio simulado se calculó a partir de la ecuación obtenida por la relación caudal máximo-área (Gráficas 1 y 3). Una vez hallado este, se calcularon los caudales máximos simulados para los distintos periodos de retorno, utilizando la ecuación obtenida en la curva regional de frecuencia (Gráficas 2 y 4).

Como se observa en las tablas 21 y 22, el cálculo de los caudales máximos simulados es preciso, es decir, que la ecuación arrojó resultados similares pero no necesariamente cercanos a los caudales máximos observados. Los resultados indican que los caudales simulados se acercan al comportamiento esperado.

Para realizar la validación de los resultados obtenidos en la región homogénea 1, se compararon los caudales máximos observados y los caudales máximos simulados (Tabla 21), para así poder utilizar las métricas de desempeño mencionados en el numeral 3.6 (error absoluto medio y error absoluto medio relativo)

Tabla 19. Validación resultados región homogénea 1

Error	Periodo de retorno					
	2.33	5	10	25	50	100
MAE	-2.76	-4.43	-4.99	-3.64	-1.96	-0.02
RMAE	17.51	17.15	18.88	20.59	21.61	22.45

Tabla 20. Validación resultados región homogénea 2

Error	Periodo de retorno					
	2.33	5	10	25	50	100
MAE	-1.98	-5.20	-8.02	-3.75	3.43	13.38
RMAE	3.95	3.52	4.10	4.25	4.61	5.01

Para realizar la validación de los resultados obtenidos en la región homogénea 2, se compararon los caudales máximos observados y los caudales máximos simulados (Tabla 22), para así poder hallar los errores mencionados en el numeral 3.6.

El RMAE, al igual que en la región homogénea 1, muestra que los resultados obtenidos están dentro del rango aceptable de error (0-25%) estipulado por la UNESCO [28]. Este error tiende a aumentar a medida que aumenta el periodo de retorno

Es importante destacar que se espera que se presenten menos errores negativos que positivos, ya que el tener un error negativo se está subestimando información, es decir, se está estimando menos información de la que se necesita. Mientras que si los errores son positivos, se están sobreestimando, es decir, se está estimando más información de la que se necesita.

A la hora de diseñar obras hidráulicas o civiles, es mejor que se presente una sobrestimación de datos, ya que de esta forma habría una sobrestimación de

diseño, lo que es equivalente a tener un factor de seguridad más alto. Mientras que si se subestiman datos, hay posibilidad de que se presente un fallo.

Cabe destacar que el caudal máximo medio anual en la Cuenca del Río Sinú es del orden de 700 m³/s en la parte baja y del orden de 130 m³/s, valores de caudal altos, lo que sugiere que los errores presentados no son significativos, y el modelo de regionalización realizado si se asemeja a la realidad.

5. CONCLUSIONES

- Después de realizar un filtro de selección para las estaciones a utilizar en el método de índice de creciente, se tuvo un total de 14 estaciones, 9 estaciones limnimétricas y 5 estaciones limnigráficas. De las cuales 10 se ubican en la parte alta de la cuenta y 4 se ubican en la zona baja de la cuenca.
- En las 14 estaciones seleccionadas se observó que ninguna tenía más del 30% de los datos faltantes, por lo que realizó la estimación de datos faltantes por medio del método de las proporciones. Una vez estimados los datos faltantes se calcularon los caudales máximos anuales, los cuales fueron utilizados para el desarrollo del índice de creciente.
- Para la identificación de las regiones homogéneas fue importante tener en cuenta que se hubiera podido desarrollar el índice de creciente con una sola región (tomando las 14 estaciones), pero debido a la gran magnitud de esta cuenca, los resultados obtenidos no eran los deseados. Por lo que se optó por realizar un análisis cluster y utilizar el estadístico del H1 para hallar distintas regiones homogéneas con las cuales se pudiera desarrollar el método. En este caso se obtuvieron dos regiones.
- Se pudo comprobar que la distribución seleccionada (Gumbel) se ajusta favorablemente a las series de datos, ya que el coeficiente de correlación de las regiones homogéneas 1 y 2 es de 0.93 y 0.99 respectivamente, esto demuestra que no siempre la región más grande (mayor número de estaciones) será la que ofrezca un mejor ajuste regional.
- Una vez determinadas las estaciones de cada región homogénea, se desarrolló el método de índice de creciente, con el cual se obtuvieron las ecuaciones para determinar la relación entre área y caudal máximos. La ecuación obtenida para la región homogénea 1 es la siguiente:

$$Q_{2.33} = 13.691A^{0.4003}$$

La ecuación obtenida para la región homogénea 2 es:

$$Q_{2.33} = 1466.1A^{-0.086}$$

A partir de estas ecuaciones, teniendo el área aferente de un punto determinado de la cuenca que no posea registros, se puede conocer el caudal máximo de este sitio.

- Finalmente, al realizar la validación de los resultados, se pudo comprobar que este método es aceptado para la determinación de caudales máximos en la Cuenca del Río Sinú para distintos periodos de retorno. Pues los errores obtenidos no son significativos. Por lo tanto, con los caudales máximos

simulados, se podrían hacer planes de gestión del riesgo, o tomarlos como base para el desarrollo de diferentes obras hidráulicas.

6. RECOMENDACIONES

A continuación se presentan algunas recomendaciones para la investigación futura de estudios en regionalización de caudales máximos por el método índice de creciente y para el seguimiento del trabajo de grado presentado.

- Utilizar para la regionalización solo estaciones limnigráficas, ya que estas llevan un registro continuo de los caudales, mientras que en las estaciones limnimétricas se lleva un registro periódico manualmente, esto no asegura que se tome el verdadero caudal máximo presentado.
- Realizar la regionalización de otras variables, como caudales mínimos, precipitación para lograr obtener una información hidrológica de la cuenca más completa

En cuando a recomendaciones más generales, se tienen las siguientes:

- Para este tipo de estudios se recomienda verificar que los datos a utilizar sean actuales, y que las series de datos tengan la misma cantidad de registros, para así reducir los rangos de incertidumbres.
- Se recomienda que las entidades encargadas del funcionamiento de las estaciones, realicen mantenimientos preventivos a los equipos de medición y monitoreo, también que el personal encargado de la recolección de datos, tenga una capacitación adecuada para así garantizar la calidad y confiabilidad de los datos.
- Se recomienda la instalación de más estaciones hidroclimatológicas, ya que en la zona de estudio la mayoría de las estaciones están suspendidas.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] K. Acosta, «La economía de las aguas del río Sinú,» *Documentos de trabajo sobre economía regional. Banco de la República*, vol. 194, pp. 1-51, 2013.
- [2] J. Hosking y J. Wallis, *Regional frequency analysis*, New York: Cambridge University Press, 1997.
- [3] Corporación autónoma regional de los valles del Sinú y del San Juan - CVS , «Diagnóstico ambiental de la cuenca hidrográfica del Río Sinú. Montería.,» 2004.
- [4] Corporación autónoma regional de los valles del Sinú y del San Jorge CVS, «Informe sobre las amenazas de erosión fluvial e inundaciones de la cuenca del Río Sinú, Departamento de Córdoba,» Montería, 2014.
- [5] P. Correa, J. Vélez y R. Smith, «Metodología de balance hídrico y de sedimentos como herramienta de apoyo para la gestión integral del complejo lagunar del Bajo Sinú,» Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2006.
- [6] Corporación autónoma regional de los valles dell Sinú y del San Jorge CVS., «Plan de acción para la temporada invernal en el departamento de Córdoba,» CVS, Córdoba, 2014.
- [7] H. P. Gallego, «SIAC: Sistema de Información Nacional de Colombia,» [En línea]. Available: <http://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=188&conID=909>.
- [8] V. Chow, *Statistical and probability analysis of hydrologic data; part I: Frequency analysis*. In: *Handbook of applied hydrology; a compendium of water resources technology*, Mc Graw Hill, 1964.
- [9] N. Greis y E. Wood, «Regional flood frequency estimation and network design,» *Water resources research*, vol. 17, nº 4, pp. 1167-1177, 1981.
- [10] C. Cunnane, «Methods and merits of regional flood frequency analysis,» *Journal of hydrology*, vol. 100, nº 1, pp. 269-290, 1988.
- [11] A. Salazar, «Análisis regional de avenidas usando el método I-Moment Caso de estudio: la costa central del Perú.,» de *III Congreso Nacional del Agua UNMSM*, 2011.
- [12] M. Alea, *Estadística con SPSS v.10.0*, Barcelona: Universidad de Barcelona, 2000.

- [13] F. Ganancias, «Evaluación de metodologías de regionalización hidrológica: Aplicación a los caudales máximos de cuencas representativas de la región Sur-oeste de la provincia de Córdoba,» Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, 2010.
- [14] Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación, «Hidrología aplicada a pequeñas obras hidráulicas,» Colegio de postgraduados, México, 2012.
- [15] D. Martinez, «Identificación de modelos estadísticos para la regionalización de los caudales máximos de la cuenca Magdalena-Cauca,» Universidad de la Salle, Bogotá D.C, 2005.
- [16] H. Badii y J. Castillo, «Distribuciones probabilísticas de uso común,» *International Journal of Good Conscience*, vol. 4, nº 1, pp. 149-178, 2009.
- [17] A. Aguilera, «Estimación de funciones de probabilidad, para caudales máximos, en la región del Maule,» Universidad de Talca, Chile, 2007.
- [18] T. Darlymple, «Flood frequency analysis,» *Water Supply paper*, 1960.
- [19] A. Cahuana y W. Yugar, «Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233,» Universidad San Simón, Bolivia, 2009.
- [20] L. O. Viteri, «Ajuste, validación, y aplicación del modelo EU-Rotate_N en una zona vulnerable a la contaminación por nitratos. Optimización de la fertilización nitrogenada.,» Universidad de la Rioja, Logroño, 2014.
- [21] Presidencia de la República, «Decreto Ley 2811 de 1974. Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.,» Colombia.
- [22] A. d. P. Torres Gallardo y G. A. Peñaranda Gómez, «Regionalización de caudales mínimos por métodos estadísticos de la Cuenca Magdalena Cauca,» Bogotá, 2006.
- [23] F. Ashkar, «Robust estimators in hydrologic frequency analysis,» *Engineering Hydrology*, vol. 1, pp. 347-352, 1993.
- [24] C. Tucci, Regionalización de caudales., Brasil: Editorial de Universidades, 2002.
- [25] F. Montealegre, «Dirección Nacional de Innovación Académica Universidad Nacional,» [En línea]. Available: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/palmira/5000134/contenido/cap10/lec4.htm>. [Último acceso: 24 Agosto 2015].

- [26] J. Nuñez, K. Verbist y J. Ramirez, «“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, 2010.
- [27] SPSS Inc, «Manual del usuario del sistema básico de IBM SPSS Statistics 19,» 1989, 2010.
- [28] UNESCO, ROSTLAC, «Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur.,» Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la Unesco para América Latina y el Caribe, Montevideo, 1982.
- [29] R. Linsley, M. Kohler y J. Paulus, Hidrología para ingenieros, Bogotá: McGrawHill, 1977.
- [30] Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres CMGRD, «Caracterización general de escenarios de riesgo,» Santa Cruz de Lorica, 2012.
- [31] A. Vich, F. Norte y L. Carolina, «Análisis regional de frecuencias de caudales de ríos pertenecientes a cuencas con nacientes en la cordillera de Los Andes,» *Meteorológica*, vol. 39, nº 1, pp. 3-26, 2013.
- [32] L. Nuñez, Adaptación del método de L-moments para la regionalización de eventos máximos para las cuencas de Colombia, Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2015.
- [33] R. Vilà, M. Rubio y V. Berlanga, «Cómo aplicar un cluster jerárquico en SPSS.,» *Revista d'innovació i Recerca en Educació REIRE*, vol. 7, nº 1, 2014.
- [34] A. Viglione, F. Laio y P. Claps, «A comparison of homogeneity tests for regional,» *Water Resources research*, vol. 17, p. 130, 2007.
- [35] F. Valleumbroso, Métodos probabilísticos, Chimbote: Universidad San Pedro, 2014.
- [36] J. Norbert, M. Mugo y H. Gadain, «Estimation of desing floods in ungauged catchments using a regional index flood method. A case study of Lake Victoria Basin in Kenya,» *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 4, nº 11, pp. 67-69, 2014.
- [37] I. Salazar, «Lugar encantado de las aguas: Aspectos económicos de la Ciénaga Grande del Bajo Sinú,» Centro de Estudios Económicos Regionales del Banco de la República, Cartagena de Indias, 2008.
- [38] A. Veléz, «Regla de Operación Optima para el Proyecto Hidroeléctrico Urrá I, que Minimice el Impacto Ambiental, Social, Económico sobre el Complejo Lagunar del Bajo Sinú por medio de Técnicas de Optimización,» Universidad Nacional de Colombia , Medellín, 2006.

[39] M. M. Aguilera Díaz, J. Vilorio de la Hoz y I. Salazar Mejía, La economía de las ciénagas del Caribe Colombiano, Bogotá: Banco de la República, 2011.