ESTUDIO MORFOMETRICO DE LA CUENCA DEL RIO AZUL, AFLUENTE DEL RIO CALIMA, DEPARTAMENTO DEL VALLE DEL CAUCA

FREDY ALBERTO MORENO GRANDE

JEISON RICARDO ESQUIVEL JIMENEZ

Trabajo de grado para optar al título de Tecnólogo en Construcciones Civiles

Tutor: Eduardo Zamudio Huertas

Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

TECNOLOGÍA EN CONSTRUCCIONES CIVILES

2015

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

BOGOTÁ,

CONTENIDO

Pág.

1. INTRODUCCION 8
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA 9
1.2 JUSTIFICACIÓN 10

2. OBJETIVOS 11
2.1 OBJETIVO GENERAL 11
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS 11

3. MARCO REFERENCIAL 12
3.1 MARCO DE ANTECEDENTES 12
3.2 MARCO CONCEPTUAL 13
3.2.1 Hoya hidrográfica 13
3.2.2.1 Divisoria 13
3.2.2.2 Talweg 14
3.2.2.3 Vertientes 14
3.2.3. CARACTERISTICAS MORFOMÉTRICAS DE UNA CUENCA 15
3.2.3.1 Área de Drenaje: 16
3.2.3.2 Perímetro 16
3.2.4 Forma de la cuenca 16
3.2.4.1 Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad (kc) 17
3.2.4.2 Factor de forma 18
3.2.4.3 Índice de alargamiento 18
3.2.4.4 Índice asimétrico 19
3.2.5 SISTEMA DE DRENAJE 20
3.2.5.1 Orden de las corrientes de agua. 20
3.2.5.2 Densidad de drenaje (Dd): 21
3.2.6 Características del relieve de una cuenca. 23
3.2.6.1 Pendiente de la cuenca: 23
3.2.6.2 Curva hipsométrica 25
3.2.6.3 Elevación media de una hoya 26

3.2.6.4 Clima..... 27
3.2.7 Pendiente de la corriente principal:..... 28
3.2.8 Rectángulo equivalente: 29
3.3. MARCO GEOGRÁFICO 31

4. DISEÑO METODOLÓGICO..... 33

5. DESARROLLO Y RESULTADOS DE LA INVESTIGACION 34
5.1.2 Longitud axial y ancho máximo..... 34
5.1.3 Longitud de las corrientes y del cauce principal 35
5.1.4 Área de las vertientes..... 35
5.2 Forma de la cuenca 36
5.2.1 Índice de Gravelius..... 36
5.2.2 Factor de forma..... 36
5.2.3 Índice de alargamiento 37
5.2.4 Índice asimétrico:..... 37
5.3 SISTEMA DE DRENAJE..... 38
5.3.1 Orden de las corrientes..... 38
5.3.2 Densidad de drenaje 39
5.3.3 Extensión media de escorrentía..... 40
5.3.4 Sinuosidad de la corriente..... 40
5.4 CARACTERITICAS DEL RELIEVE..... 41
5.4.1 Pendiente de la cuenca 41
5.4.2 Curva de distribución de pendientes 43
5.5 Curva hipsométrica y elevación media 45
5.5.1 Error relativo del Área..... 46
5.6 Rectángulo Equivalente..... 49
5.7 Pendiente de la corriente principal..... 52
5.8 Resumen de resultados..... 54

6. ANALISIS DE RESULTADOS..... 55

7. CONCLUSIONES 57
BIBLIOGRAFIA 58
ANEXOS 59

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura. 1 Corte transversal de una divisoria topográfica. 14
Figura. 2 Vertientes y talweg de una cuenca. 15
Figura. 3 Clasificación de las corrientes según el grado. 20
Figura. 4 Extensión media de la escorrentía superficial. 22
Figura. 5 Representación gráfica de la sinuosidad. 22
Figura. 6 Ejemplo, Curva hipsométrica. 26
Figura. 7 Ejemplo, elevación media de una hoya. 26
Figura. 8 Ejemplo de rectángulo equivalente. 30
Figura. 9 Plancha IGAC. 261 I-C 31
Figura. 10 Plancha IGAC 261 3-A 32
Figura. 11 Orden de las corrientes cuenca del rio Azul. 39
Figura. 12 Índice asimétrico (Área mayor y Área menor) 41
Figura. 13 Orden de las corrientes cuenca del rio Azul. 44
Figura. 14 Cuadricula asociada a un vector, cuenca del rio Azul.. 48
Figura. 15 Curva de distribución de pendientes, cuenca del rio Azul. 51
Figura. 16 Curva hipsométrica de la cuenca del rio Azul. 53
Figura. 17 Rectángulo equivalente, cuenca del rio Azul. 51
Figura. 18 Pendientes media y media ponderada, cuenca del rio Azul. 53

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación según el área de drenaje. 16
Tabla 2 Clasificación del relieve según la pendiente. 25
Tabla 3 Interpretación de la elevación media. 28
Tabla 4 Frecuencias de las pendientes obtenidas. 42
Tabla 5 Frecuencias de las áreas para curva hipsométrica. 45
Tabla 6 Áreas y longitudes acumuladas para rectángulo equivalente. 49
Tabla 7 Datos para la elaboración el perfil longitudinal de la corriente principal.. 52
Tabla 8 Resultados finales. 52

RESUMEN

Este proyecto de investigación, es un estudio morfo métrico de la cuenca del río Azul, afluente del rio Calima, ubicado en el suroccidente del departamento del Valle del Cauca; la información base para el estudio está dada por las planchas topográficas 261 3-A y 261 I-C con escala 1:25000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Con el estudio se pretende obtener información básica del rio Azul a partir de su morfología y así clasificarlo respecto a los datos obtenidos, adicionalmente se quiere aportar y compensar el vacío en información hidrológica que se tiene del territorio nacional. Entre los datos que se pretenden obtener están: la pendiente y el ancho medio de la cuenca, el parámetro de sinuosidad, el área de drenaje, el grado de ramificación de la cuenca, etc. estos elementos y otros más, serán el producto de la investigación y proporcionaran herramientas de bastante utilidad en la vida real que sirvan como insumo a futuras investigaciones.

ABSTRACT

This research project is a metric morphological study of the basin of the Blue River, a tributary of the Rio Calima, located in the southwestern department of Valle del Cauca; the basic information for the study is given by the topographical plates 261 and 261 3-A IC with scale 1: 25000 Codazzi

With the study is to obtain basic information on Blue River from its morphology and thus classify the data regarding additionally you want to contribute and fill the gap in hydrological information we have of the country. Among the data that can be obtained they are: the slope and the average width of the basin, sinuous parameter, the drainage area, the degree of branching of the basin, etc. these elements and others, are the product of research and provide tools quite useful in real life as inputs for future research.

1. INTRODUCCION

Las características físicas de una cuenca son elementos que tienen una gran importancia en el comportamiento hidrológico de la misma. Dichas características físicas se clasifican en dos tipos según su impacto en el drenaje: las que condicionan el volumen de escurrimiento como el área y el tipo de suelo de la cuenca, y las que condicionan la velocidad de respuesta entre las que se encuentran el orden de corriente, la pendiente, la sección transversal.

Para el desarrollo del proyecto se referencian componentes teóricos, entre los cuales se encuentran obras de autores importantes en el campo de la hidrología colombiana como los ingenieros German Monsalve, Gustavo Silva Medina y Aldemar Reyes Trujillo, cada una de las respectivas obras ofrece información básica para la investigación.

1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Debido a los vacíos en información que se posee acerca de las cuencas hídricas en Colombia y en regiones como la del valle del Cauca, surge la necesidad de realizar un estudio morfométrico, en este caso, para la cuenca del rio Azul, afluente del rio Calima y con él, lograr caracterizar respecto a varias de sus particularidades morfológicas el comportamiento hidrológico que posee.

El análisis morfométrico de una cuenca es fundamental para comprender e interpretar su comportamiento morfo dinámico e hidrológico, así como para inferir indirectamente sobre la estructura, características y formas de los hidrógramas resultantes de eventos de crecidas. También permiten analizar y comprender los elementos geométricos básicos del sistema, que ante la presencia de externalidades como precipitaciones extremas interactúa para originar procesos geomorfológicos de movimientos de masa.

Estas características tratan de cuantificar por medio de índices o coeficientes el movimiento del agua y las respuestas de la cuenca a tal movimiento, dado que son un referente para establecer la dinámica esperada de la escorrentía superficial, teniendo en cuenta que aquellas cuencas con formas alargadas tienden a presentar un flujo de agua más veloz, en comparación con las cuencas redondeadas, logrando una evacuación de la cuenca más rápida y mayor desarrollo de energía cinética en el arrastre de sedientos hacia el nivel de base, principalmente.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Con esta investigación, se pretende subsanar en algo la falta de información que se posee de la hidrografía del territorio nacional, donde se tiene gran variedad de climas y las temporadas de invierno y verano que alteran notablemente el comportamiento de los ríos, canales y quebradas los cuales constituyen toda una gran red de drenaje que capta la escorrentía superficial, producto de las precipitaciones y evitan propiciar inundaciones y avenidas.

Es de vital importancia, contar con la información morfométrica de una cuenca en el momento en que se haga una intervención en su cauce, esta información apunta a conocer la afectación del sistema de drenaje natural, la cual representa un grave peligro para la vida y la integridad física de todas aquellas personas que como es costumbre tienen sus asentamientos cerca a estos cuerpos de agua.

A partir de este estudio, se podrán establecer los parámetros de evaluación de la cuenca, además esta información sirve como herramienta para un análisis espacial en el manejo y planeación del recurso hídrico, de igual forma se quiere aportar con esta investigación a los archivos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, para que en un futuro se convierta en la mayor fuente de información en estudios morfométricos de los ríos y quebradas del país.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Encontrar las particularidades morfométricas del río Azul afluente del rio Calima que determinan el comportamiento de la cuenca.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Establecer coeficientes de clasificación de la cuenca como respuesta a variaciones temporales; tendencias a inundación y avenidas torrenciales.

- Determinar la pendiente media de la hoya hidrográfica en toda la trayectoria del rio.

- Calcular el área de drenaje para establecer la forma que posee la corriente de la cuenca del rio Azul

- Determinar la extensión media de escorrentía a partir de las dimensiones de la cuenca.

- Realizar la curva hipsométrica de la cuenca para la obtención del relieve en la hoya.

3. MARCO REFERENCIAL

3.1 MARCO DE ANTECEDENTES

El estudio de las características morfométricas de una cuenca, fue iniciado originalmente por el padre de la hidrología moderna en los Estados Unidos: Robert Ermer Horton, a través de sus dos artículos de referencia internacional “Drainage basin characteristics” (1932) y “Erosional development of streams and their drainage basins hydrophysical approach to quantitative morphology”” (1945).

Los estudios morfo métricos fueron transformados de diferentes análisis puramente cualitativos y deductivos, a estudios científicos, cuantitativos y rigurosos capaces de suministrar datos hidrológicos fáciles de estimar.
En el año 1952, Arthur Newell strahler, modificó y mejoró el sistema para el análisis de la red de drenaje propuesto originalmente por Horton (1945), donde se clasifican los órdenes de los cauces de acuerdo a su jerarquía y potencia de sus afluentes; convirtiéndose desde entonces en el sistema de clasificación más usado a nivel mundial, para ordenar las redes de drenajes en cuencas hidrográficas y constituyéndose a su vez en un tema de estudio obligado para los cursos de hidrología básica y geomorfología fluvial, donde aborde el estudio de la morfométria de cuencas. De esta manera Horton y Strahler, se convirtieron en dos de los grandes investigadores de la morfométria de cuencas.[1]

ESTUDIO MORFOMÉTRICO DE LA QUEBRADA EL GUAMO CON DESEMBOCADURA EN EL RÍO SINÚ DEL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA, UNIVERSIDAD DISTRITAL, 2014.

Este trabajo tiene como estudio el análisis de una cuenca, en donde se realiza todo el análisis morfológico de esta cuenca. Aportando análisis estadísticos de acuerdo a la topografía del terreno y orientación de los afluentes, determinando los índices de forma, curvas representativas y áreas.

Dicho trabajo se desarrolló por medio de las planchas topográficas en donde se puede encontrar la escorrentía del relieve y la formación de las quebradas. Mediante estos planos se obtuvieron datos numéricos los cuales permitieron determinar factores particulares de la quebrada El Guamo tales como su clasificación, el área de drenaje, índices y factores, distribución de ríos y afluentes,

[1] Tomado de Pagina web: http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoreno/HIDRO/MORFOMETR%CDA%20DE%20CUENCAS.pdf, Morfología de cuencas, Prof. Alejandro Delgadillo, Prof. Ada Moreno Barrios.

elevación media pendiente y rectángulo equivalente.

ESTUDIO MORFOMÉTRICO DEL LAGO GUATAVITA (COLOMBIA), CARLOS ALBERTO RIVERA RONDÓN, ANGELA MARÍA ZAPATA & JHON CHARLES DONATO RONDÓN, PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA 2010

El objeto de este documento es el estudio del lago Guatavita a partir del desarrollo de un mapa batimétrico ubicando varios puntos a escala 1:10000. A partir de estos puntos se extendieron líneas guías sobre las cuales se midió la profundidad mediante un sonar con error de 1m. A partir de estas mediciones los datos se ubicaron por medio del método de interpolación.

Los resultados de las diferentes características morfológicos del lago tales como curva hipsométrica se obtuvieron, a partir, del área superficial y de cada sección que se calculó con el procedimiento descrito anteriormente, con el fin de analizar las implicaciones de la morfología sobre su funcionamiento y discutir algunas hipótesis que existen sobre el origen del lago (concentración de amonio. Estos resultados indican un papel muy importante de la profundidad sobre las características físicas y químicas del lago que a su vez determinan la dinámica de las comunidades biológicas y una baja productividad Fito planctónica)

3.2 MARCO CONCEPTUAL

3.2.1 Hoya hidrográfica

Una hoya hidrográfica es un área definida topográficamente, drenada por un curso de agua o un sistema conectado de cursos de agua, tal que todo el curso del caudal es descargado a través de una salida simple.[2]

3.2.2 Partes de la cuenca

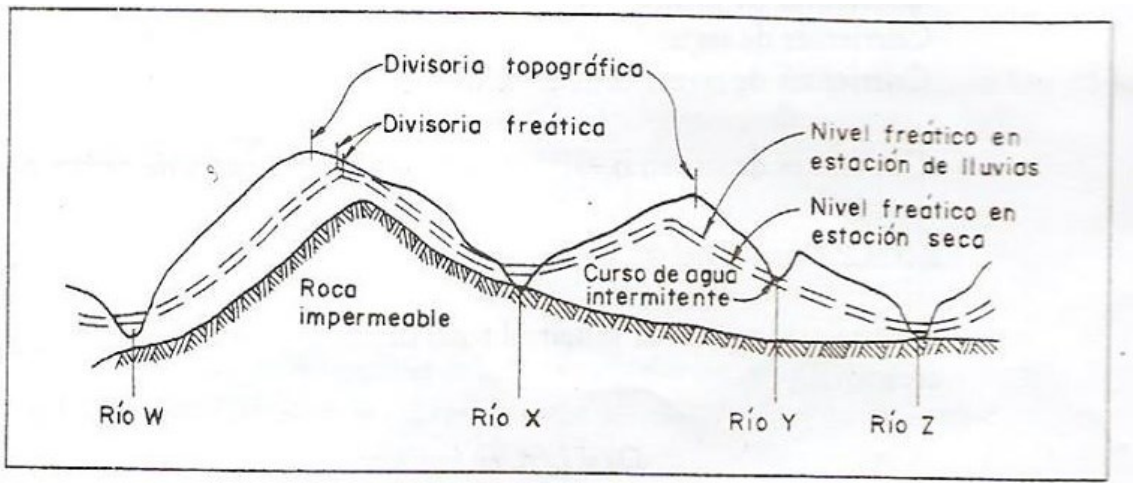
3.2.2.1 Divisoria

Se designa como divisoria la línea que separa las precipitaciones que caen en hoyas inmediatamente vecinas y que encaminan la escorrentía resultante para

[2] SAENZ M. GERMAN. Hidrología en la Ingeniería, escuela colombiana de ingenieros, Cuencas hidrográficas. P-33

uno u otro sistema fluvial. Existen dos tipos de divisorias para la delimitación de una hoya: divisoria topográfica y divisoria subterránea (Ver figura No 1), la primera se acostumbra definir el área de drenaje superficial y la segunda establece los límites de los embalses de agua subterránea, de donde se deriva el caudal de la base de la hoya hidrográfica.[3]

Figura. 1 Corte transversal de una divisoria topográfica.



3.2.2.2 Talweg

Es la línea que marca la parte más onda de un cauce, y es el camino por donde van las aguas de las corrientes naturales.[4] (Ver figura 2)

3.2.2.3 Vertientes

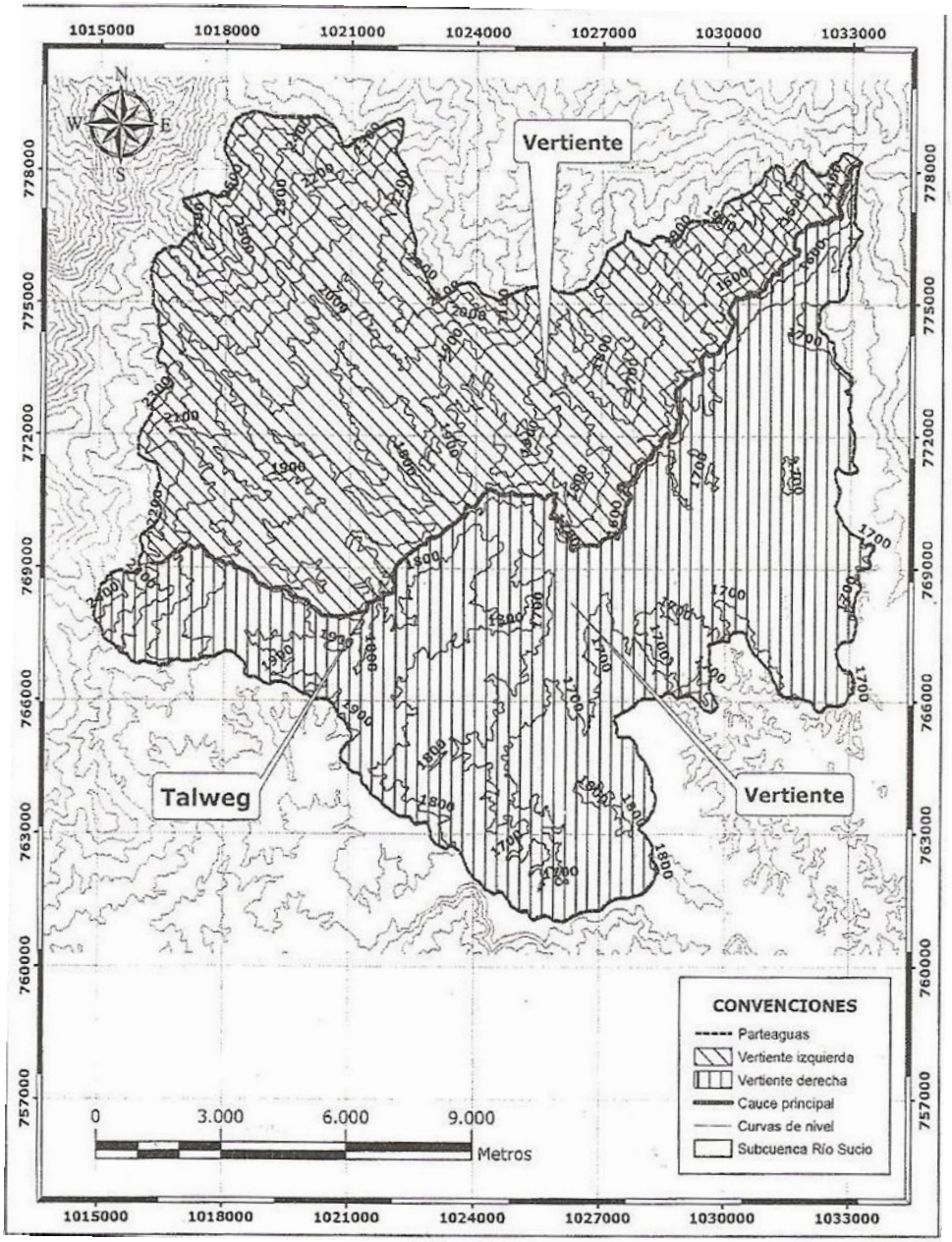
Son las áreas receptoras de agua que se extiendes a lado y lado del Talweg, desde este hasta la línea divisoria.[5] (Ver figura No. 2)

[3] SAENZ M. GERMAN. Hidrología en la Ingeniería, escuela colombiana de ingenieros, Cuencas hidrográficas. P-35

[4] CARVAJAL ESCOBAR, Yesid, BARROSO, Fabián Ulises, REYES TRUJILLO, Aldemar. Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas Universidad Del Valle, 2010. P. 22

[5] CARVAJAL ESCOBAR, Yesid, BARROSO, Fabián Ulises, REYES TRUJILLO, Aldemar. Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas Universidad Del Valle, 2010. P. 22

Figura. 2 Vertientes y Talweg de una cuenca.[6]



3.2.3. CARACTERISTICAS MORFOMÉTRICAS DE UNA CUENCA

Estas características dependen de la morfología (forma, relieve, red de drenaje, etc.) estos elementos físicos proporcionan la posibilidad de conocer la variación en

[6] CARVAJAL ESCOBAR, Yesid, BARROSO, Fabián Ulises, REYES TRUJILLO, Aldemar. Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas Universidad Del Valle, 2010.P-23

el espacio de los elementos del régimen hidrológico. Cada cuenca tiene entonces una forma determinada que guarda relación con su comportamiento hidrológico.[7]

3.2.3.1 Área de Drenaje:

Es la proyección horizontal del área de drenaje en un sistema de escorrentía. El área de la cuenca está definida por el espacio delimitado por la curva del perímetro (P). El área de la cuenca es probablemente la característica morfo métrica e hidrológica más importante; el tamaño relativo de estos espacios define o determina el nombre que adoptara el lugar según su área.[8]

Tabla 1 Clasificación según el área de drenaje.

ÁREA (Km2)	NOMBRE
< 5	Unidad
5-20	Sector
20-100	Microcuenca
100-300	Subcuenca
>300	Cuenca

3.2.3.2 Perímetro

El perímetro de la cuenca es un parámetro importante, que en conexión con el área nos permite inferir sobre la forma de la cuenca.

3.2.4 Forma de la cuenca

Esta característica es importante pues se relaciona con el tiempo que toma el agua desde los límites más extremos de la hoya hasta llegar a la salida de la

[7] CARVAJAL ESCOBAR, Yesid, BARROSO, Fabián Ulises, REYES TRUJILLO, Aldemar. Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas Universidad Del Valle, 2010.P-25

[8] CARVAJAL ESCOBAR, Yesid, BARROSO, Fabián Ulises, REYES TRUJILLO, Aldemar. Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas Universidad Del Valle, 2010.P-31

misma. También permiten analizar y comprender los elementos geométricos básicos del sistema, cuantificando por medio de índices o coeficientes el movimiento del agua y las respuestas de la cuenca a este movimiento.

3.2.4.1 Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad (kc)

Se trata de un indicador adimensional de la forma de la cuenca relacionando el perímetro de la cuenca con el área de un circulo igual al de la cuenca (circulo equivalente).

Teniendo en cuenta la relación anterior, el índice de compacidad se define como:

$$\boldsymbol{Kc = 0.28x\left[\frac{P}{\sqrt{A}}\right]}$$

Dónde:

P: Perímetro de la cuenca en Km.

A: Área de drenaje de la cuenca.

Cuanto más irregular sea la cuenca mayor será su coeficiente de compacidad a partir de este se define la forma de la cuenca tomando como criterio los rangos que se muestran a continuación.

- Kc1 1.00 – 1.25: Cuenca redonda a oval redonda.
- Kc2 1.25 – 1.50: Cuenca de oval redonda a oval oblonga.
- Kc3 1.50 – 1.75: Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga.[9]

[9] CARVAJAL ESCOBAR, Yesid, BARROSO, Fabián Ulises, REYES TRUJILLO, Aldemar. Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas Universidad Del Valle, 2010. P. 34

3.2.4.2 Factor de forma

Es la relación entre el área de la cuenca y el cuadrado del máximo recorrido, este parámetro mide la tendencia de la cuenca hacia las crecidas, rápidas y muy intensas a lentas y sostenidas. Es un parámetro adimensional que denota la forma redondeada o alargada de la cuenca. El factor de forma se define como:

$$F = \frac{A}{(Lm)^2}$$

Dónde:

L: Longitud axial de la cuenca en Km.

A: Área de drenaje en Km².

Una cuenca con factor de forma bajo esta menos sujeta a crecientes que otra del mismo tamaño.

F> 1: Cuenca achatada, tendencia a ocurrencia de avenidas.

F < 1: Cuenca alargada, baja susceptibilidad a las avenidas.[10]

3.2.4.3 Índice de alargamiento

Este muestra el comportamiento de la forma de la cuenca, pero esta vez no respecto a su redondez sino a su tendencia a ser de forma alargada, este parámetro relaciona la longitud axial con el ancho máximo de la cuenca. Se define como:

[10] CARVAJAL ESCOBAR, Yesid, BARROSO, Fabián Ulises, REYES TRUJILLO, Aldemar. Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas Universidad Del Valle, 2010. P. 35

$$I_a = \frac{Lm}{l}$$

Dónde:

Ia: Índice de alargamiento (Adimensional)

Lm: Longitud Máxima (Km)

l: Ancho Máximo (Km).

Este índice permite predecir el movimiento del agua en los drenajes y potencia erosiva o de arrastre, se rige a partir de los siguientes parámetros:

Ia > 1: Cuenca alargada.

Ia ≈ 1: Cuenca achatada y por lo tanto el cauce principal es corto.[11]

3.2.4.4 Índice asimétrico

Este índice evalúa la homogeneidad en la distribución de la red de drenaje, relacionando las áreas de las vertientes, mayor (A*may*) y menor (A*men*). La siguiente ecuación define el índice asimétrico:

$$\mathrm{I_{as}} = \frac{\mathrm{A_{may}}}{\mathrm{A_{men}}}$$

Dónde:

Ias: Índice Asimétrico (adimensional)

$\mathrm{A_{may}}$: Vertiente Mayor (Km).

$\mathrm{A_{men}}$: Vertiente Menor (Km).

[11] CARVAJAL ESCOBAR, Yesid, BARROSO, Fabián Ulises, REYES TRUJILLO, Aldemar. Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas Universidad Del Valle, 2010. P. 35

las: > 1: Cauce principal bastante recargado a una de las vertientes.

las: ≈ 1: Distribución uniforme del Cauce principal[12].

3.2.5 SISTEMA DE DRENAJE

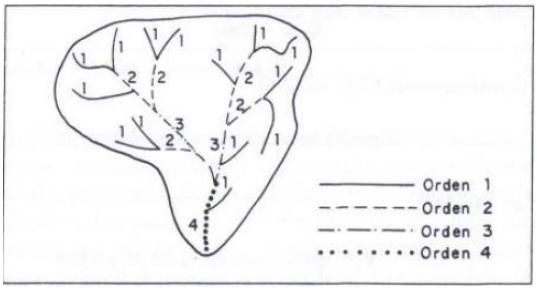
El sistema o la red de drenaje están constituidos por el cauce principal y sus tributarios, se traza considerando la constancia en el transporte de caudal de las corrientes.

3.2.5.1 Orden de las corrientes de agua.

Refleja el grado de ramificación o bifurcación dentro de una cuenca.

- Corrientes de primer orden: pequeños canales que no tiene tributarios.
- Corrientes de segundo orden: cuando dos corrientes de primer orden se unen.
- Corrientes de tercer orden: cuando dos corrientes de segundo orden se unen.
- Corrientes de orden n+1: Cuando dos corrientes de orden n se unen.

Figura. 3 Clasificación de las corrientes según el grado.[13]



[12] CARVAJAL ESCOBAR, Yesid, BARROSO, Fabián Ulises, REYES TRUJILLO, Aldemar. Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas Universidad Del Valle, 2010. P. 35

[13] SAENZ M. GERMAN. Hidrología en la Ingeniería, escuela colombiana de ingenieros, Cuencas hidrográficas. P-38

3.2.5.2 Densidad de drenaje (Dd):

Es la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la hoya y su área total.

$$D_d = \frac{L}{A}, en\ km/km^2$$

Dónde:

L: Longitud total de las corrientes de agua en km.
A: Área total de la cuenca en km².

Usualmente toma valores entre 0.5 Km/Km² para hoyas con drenaje pobre hasta 3.5 Km/Km² para hoyas excepcionalmente bien drenadas.[14]

3.2.5.3 Extensión media de la escorrentía superficial

Se define como la distancia media en que el agua de lluvia tendría que escurrir sobre los terrenos de una cuenca,

$$A = \frac{4}{L}$$

$$l = \frac{A}{4L}$$

l: Extensión media de la escorrentía superficial, en km

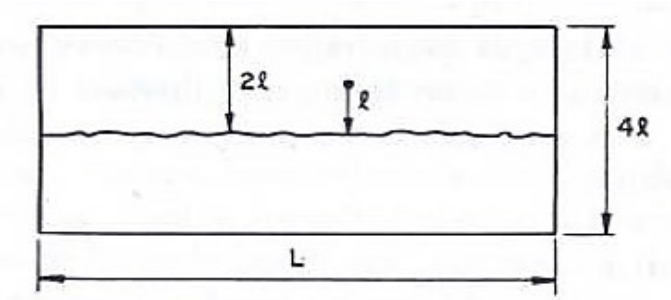
L: Longitud total de las corrientes de agua en la cuenca hidrográfica, en km

A: Área de drenaje total de la cuenca

Considerando que una cuenca de área (A) pueda ser representada por un área de drenaje rectangular, con un curso de agua de longitud L igual a la longitud total de las corrientes de agua como se muestra en la siguiente figura:

[14] SAENZ M. GERMAN. Hidrología en la Ingeniería, escuela colombiana de ingenieros, Cuencas hidrográficas. P-39

Figura. 4 Extensión media de la escorrentía superficial.[15]

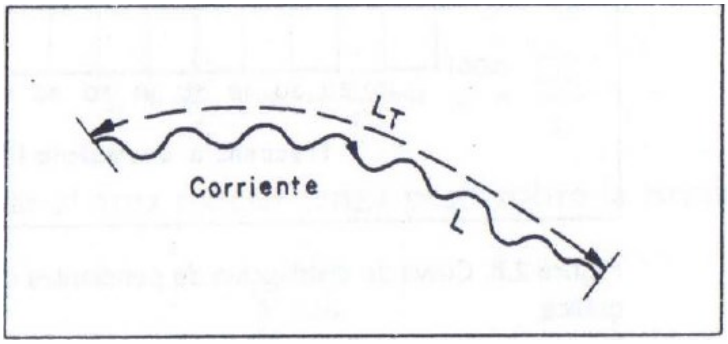


3.2.5.4 Sinuosidad de las corrientes de agua

Es la relación entre la longitud del rio principal medida a lo largo de su cauce (L) y la longitud del valle del rio principal medida en línea curva o recta (Lt)

$$S = \frac{L}{Lt}, valor\ adimensional$$

Figura. 5 Representación gráfica de la sinuosidad.[16]



Este parámetro da una medida de la velocidad de la escorrentía del agua a lo largo de la corriente. Un valor de S menor o igual a 1,25 indica una baja sinuosidad. Se define, entonces, como un rio con lineamiento recto.[17]

[15] SAENZ M. GERMAN. Hidrología en la Ingeniería, escuela colombiana de ingenieros, Cuencas hidrográficas. P-39
[16] SAENZ M. GERMAN. Hidrología en la Ingeniería, escuela colombiana de ingenieros, Cuencas hidrográficas. P-40

3.2.6 Características del relieve de una cuenca.

3.2.6.1 Pendiente de la cuenca:

Es la variación de la inclinación de una cuenca, su determinación es muy importante pues define el comportamiento de la cuenca respecto al desplazamiento de las capas de suelo, puesto que, en zonas de alta pendiente son más ocurrentes los problemas de erosión; mientras que en regiones planas aparecen principalmente problemas de drenaje y sedimentación.[18]

Esta característica afecta directamente la velocidad con la que se da la escorrentía superficial; es decir el tiempo de formación que lleva el agua de lluvias para concentrarse en el cauce principal.

El método a utilizar para la obtención de la pendiente del terreno de la cuenca será el de las cuadriculas asociadas a un vector; Este método consiste en determinar la distribución porcentual de las pendientes de los terrenos por medio de una muestra estadística de las pendientes normales a las curvas de nivel de un número grande de puntos dentro de la hoya.[19]

Los pasos de este método son los siguientes:

- Según el número de puntos a definir (por lo menos 50 puntos), trazar cuadriculas sobre el área de drenaje con espaciamiento adecuado. Cada uno de los puntos de intercepción de dichas cuadriculas define una pendiente del terreno determinada.

- Trazar la línea de nivel correspondiente a dicho punto, por medio de las líneas de nivel inmediatamente inferior o superior. Dicho paso se ejecuta por interpolación.

- Trazar una tangente a la línea de nivel por ese punto sobre la proyección horizontal o área plana de la cuenca.

- Trazar una perpendicular a la tangente trazada anteriormente, también sobre la proyección horizontal o área plana de la cuenca.

[18] CARVAJAL ESCOBAR, Yesid, BARROSO, Fabián Ulises, REYES TRUJILLO, Aldemar. Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas Universidad Del Valle, 2010. P-39

[19] SAENZ M. GERMAN. Hidrología en la Ingeniería, escuela colombiana de ingenieros, Cuencas hidrográficas. P-41

- Sobre la perpendicular trazada en el punto anterior trazar un perfil del terreno. Dicho perfil define la pendiente correspondiente al punto en consideración.

- Teniendo la pendiente de todos los puntos definidos por las cuadriculas se clasifican dichos valores por intervalos de clase.

El número de tales intervalos está en relación con el número n de puntos obtenidos, pero en general no debe ser menor de un valor comprendido entre 5 y 10. Según la ley de Sturges en número de intervalos k de una muestra de tamaño n es:

$$\boldsymbol{K = 1 + 3.3\ Log\ n}$$

Con un tamaño de intervalo de clase C = R/K, en donde R es el rango de la muestra, igual al valor máximo menos el valor mínimo y K es el número de intervalos de clase de la pendiente.

Para hallar los valores respectivos que den como resultado la pendiente media; se aplican métodos estadísticos que se relacionan en una tabla de ocurrencias y frecuencias acumuladas, presentando finalmente la curva de distribución de pendientes, donde se acostumbra dejar como ordenadas las pendientes y como abscisas las frecuencias acumuladas.[20]

La siguiente tabla muestra la clasificación de las cuencas según su pendiente:

[20] SAENZ M. GERMAN. Hidrología en la Ingeniería, escuela colombiana de ingenieros, Cuencas hidrográficas. P-41

Tabla 2 Clasificación del relieve según la pendiente.[21]

PENDIENTE MEDIA (%)	TIPO DE RELIEVE	SÍMBOLO
0-3	Plano	P_1
3-7	Suave	P_2
7-12	Medianamente Accidentado	P_3
12-20	Accidentado	P_4
20-35	Fuertemente Accidentado	P_5
35-50	Muy Fuertemente Accidentado	P_6
50-75	Escarpado	P_7
>75	Muy Escarpado	P_8

3.2.6.2 Curva hipsométrica

Es la representación gráfica de relieve de una hoya. Representa el estudio de la variación de la elevación de los varios terrenos de la hoya con referencia al nivel medio del mar. Esta variación puede ser indicada por medio de un gráfico que muestre el porcentaje de área de drenaje que existe por encima o por debajo de varias elevaciones. Dicho grafico se determina planimetrando las áreas entre curvas de nivel.

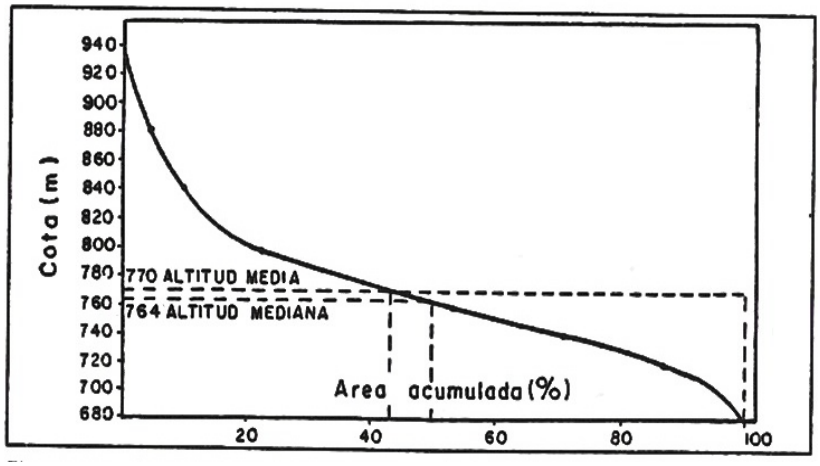
La curva hipsométrica relaciona el valor de la cota, en las ordenadas, con el porcentaje de área acumulada en las abscisas. . Para su construcción se grafican, con excepción de los valores máximos y mínimos de cota hallados, los valores menores de cota de cada intervalo de clase contra su correspondiente área acumulada. Al valor de la cota mayor encontrada corresponde el cero por ciento del porcentaje de área acumulada. Al valor de la cota mínima encontrada corresponde al ciento por ciento del porcentaje del área acumulada.[22]

Esta característica es un criterio de variación territorial, lo que genera la base para caracterizar zonas climatológicas. En La siguiente figura se observa un ejemplo típico de una curva hipsométrica:

[21] CARVAJAL ESCOBAR, Yesid, BARROSO, Fabián Ulises, REYES TRUJILLO, Aldemar. Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas Universidad Del Valle, 2010. P-40

[22] SAENZ M. GERMAN. Hidrología en la Ingeniería, escuela colombiana de ingenieros, Cuencas hidrográficas. P-44

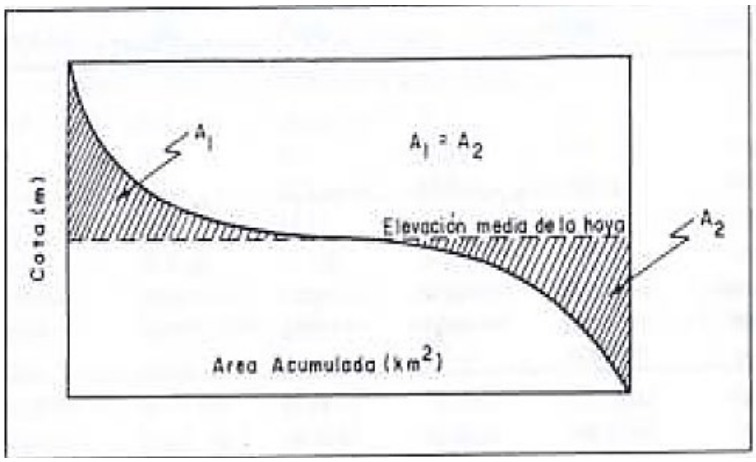
Figura. 6 Ejemplo, Curva hipsométrica.[23]



3.2.6.3 Elevación media de una hoya

La elevación media de una cuenca es aquella que determina la cota de curva de nivel que divide la cuenca en dos zonas de igual área; es decir, es la elevación correspondiente al 50 % del área total como se muestra en la figura 6.

Figura. 7 Ejemplo, elevación media de una hoya.[24]



[23] SAENZ M. GERMAN. Hidrología en la Ingeniería, escuela colombiana de ingenieros, Cuencas hidrográficas. P-45
[24] SAENZ M. GERMAN. Hidrología en la Ingeniería, escuela colombiana de ingenieros, Cuencas hidrográficas. P-46

Para estimar la elevación media se utiliza el método de área – elevación, este método inicia con la medición del área de las diferentes franjas del terreno, delimitadas por curvas de nivel consecutivas y la delimitación de la cuenca (divisoria). Se calcula mediante la ecuación:

$$E_m = \frac{\sum_{=1}^{n} A_i \, x \, e_i}{A_t}$$

En donde el valor "n" corresponde al número de intervalos de clase.

Se debe tener en cuenta que la altitud y la elevación media de una hoya son también importantes por la influencia que ejercen sobre la precipitación, sobre las pérdidas de agua por evaporación y transpiración.[25]

3.2.6.4 Clima

El clima es un sistema complejo por lo que su comportamiento es difícil de predecir, debido, normalmente a variaciones sistemáticas como las derivadas de los movimientos de la Tierra y la forma como estos movimientos afectan de manera diferente zonas o regiones climáticas.

De acuerdo a la elevación media del relieve se clasifica el clima que tiene la cuenca como lo muestra la siguiente gráfica:

[25] SAENZ M. GERMAN. Hidrología en la Ingeniería, escuela colombiana de ingenieros, Cuencas hidrográficas. P-47

Tabla 3 Interpretación de la elevación media.[26]

Elevación media	Interpretación
Entre 800 a 1000 msnm	Macro térmico, con las temperaturas siempre elevadas y constantes.
Entre 1000 y 2750 msnm	Meso térmico o piso templado.
Entre 2750 y 4700 msnm	Micro térmico o piso paramo.
A partir de 4700 msnm	Gélido, o de nieves perpetúas.

3.2.7 Pendiente de la corriente principal:

La velocidad de escurrimiento de las corrientes de agua depende de la pendiente de sus canales fluviales. En medida que este valor aumente mayor será la posibilidad de generar crecidas, ya que la capacidad de arrastre de sedimentos y la velocidad del caudal en caso de tormentas se incrementa en aquellas cuencas que presenten valores altos de pendientes. A mayor pendiente mayor velocidad.[27]

Pendiente Media: Es la diferencia total de elevación del lecho del río dividido por su longitud entre esos puntos.

$$S_1 = \frac{h_1 - h_0}{L_1 - L_0}$$

Pendiente media ponderada: Para calcularlo se traza una línea, tal que el área comprendida entre esa línea y los ejes coordenados sea igual a la comprendida entre el área bajo la curva del perfil del rio y dichos ejes.

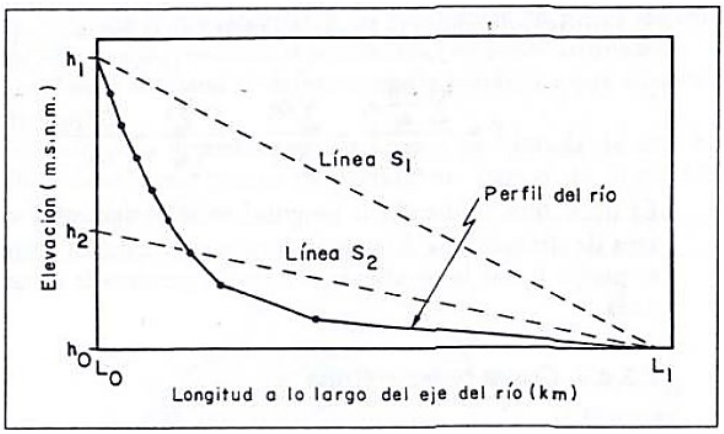
$$S_2 = \frac{h_2 - h_0}{L_1 - L_0}$$

[26] Clima. (s.f.). En *Wikipedia*. Recuperado el 16 de diciembre de 2013 de http://es.wikipedia.org/wiki/Clima

[27] SAENZ M. GERMAN. Hidrología en la Ingeniería, escuela colombiana de ingenieros, Cuencas hidrográficas. P-47

En el grafico muestra un ejemplo de cálculo de pendiente media de la corriente principal con sus pendientes media y media ponderada respectivamente.

Figura. 8 Representacion del grafica de la pendiente de la corriente principal.[28]



3.2.8 Rectángulo equivalente:

Este índice compara la influencia de las características de la hoya sobre la escorrentía, la cual se asimila la cuenca a un rectángulo que tenga el mismo perímetro y superficie y, por tanto igual coeficiente de Gravelius (Kc). Así, las curvas de nivel se transforman en rectas paralelas al lado menor del rectángulo *(l),* y el drenaje de la cuenca queda convertido en el lado menor del rectángulo.[29]

Para su construcción se toma un rectángulo con área igual a la cuenca, tal que el lado menor sea *(l)* y el mayor sea *(L)* llegando a:

$$L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.12}\left[1 + \sqrt{1 - \frac{(1.12)^2}{Kc^2}}\right]$$

[28] SAENZ M. GERMAN. Hidrología en la Ingeniería, escuela colombiana de ingenieros, Cuencas hidrográficas. P-47

[29] CARVAJAL ESCOBAR, Yesid, BARROSO, Fabián Ulises, REYES TRUJILLO, Aldemar. Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas Universidad Del Valle, 2010. P-55

$$l = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.12}\left[1 - \sqrt{1 - \frac{(1.12)^2}{Kc^2}}\right]$$

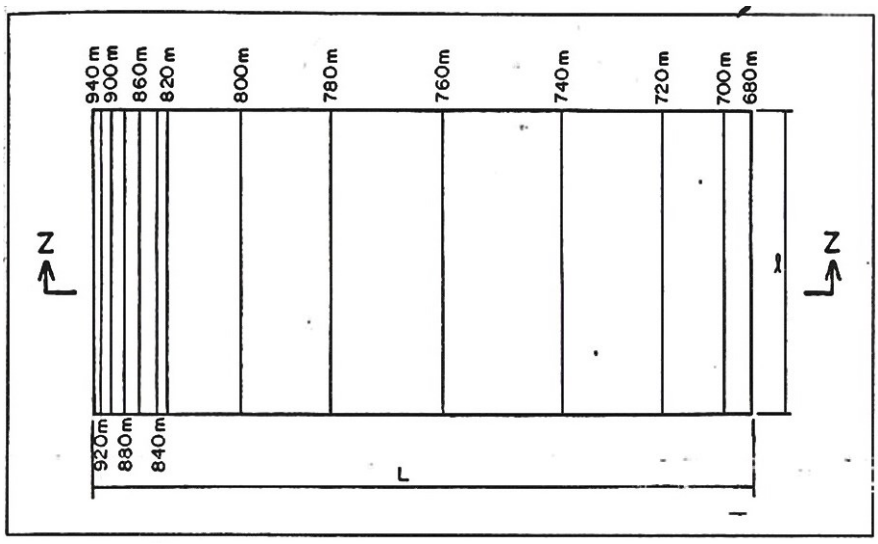
Dónde:

A: área de la hoya (km^2)
Kc: Coeficiente de Compacidad
L: Mayor longitud acumulada del rectángulo (km)
l: Menor longitud del rectángulo (km)

Se toma como base los datos presentados en la curva hipsométrica sobre los datos de cotas y área acumulada de la hoya hidrográfica.

Para determinar la distancia entre curvas de nivel se utiliza la regla de tres, asignando a la mayor área acumulada el valor de L encontrado anteriormente y con base a esto se calculan las siguientes longitudes de acuerdo a su correspondiente área. La figura 9 muestra un ejemplo práctico de un rectángulo equivalente:

Figura. 9 Ejemplo de rectángulo equivalente.[30]



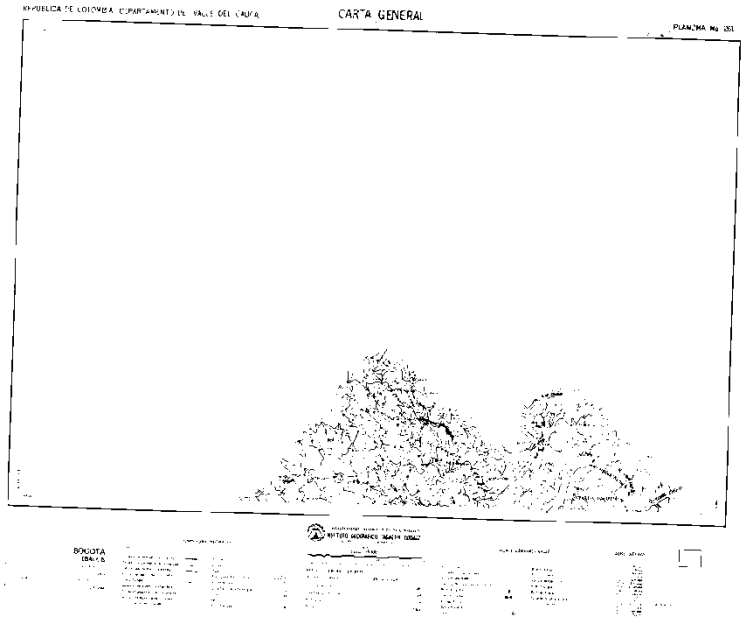
[30] SAENZ M. GERMAN. Hidrología en la Ingeniería, escuela colombiana de ingenieros, Cuencas hidrográficas. P-53

3.3. MARCO GEOGRÁFICO

El Estudio de la cuenca del rio Azul se realizará en el Municipio Calima, ubicado al noroccidente del Departamento del Valle del Cauca.

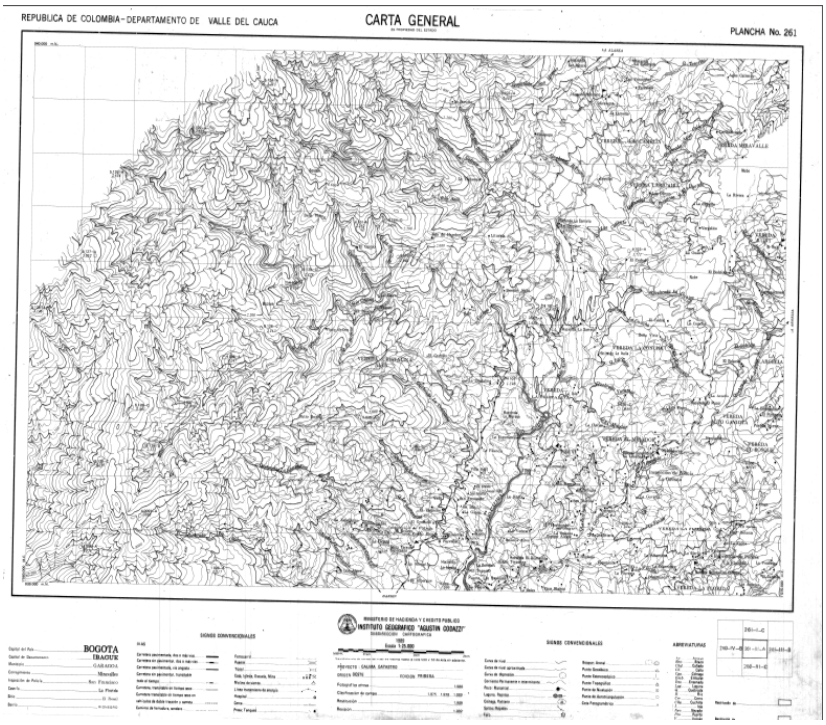
En esta cartografía se encuentra la topografía de la zona de estudio con las curvas de nivel y la hidrografía de la región, además de toda la información de ubicación a partir de coordenadas. Este documento constituye la base para el desarrollo de todo el proyecto de investigación.

Figura. 10 Plancha IGAC. 261 I-C



Instituto Geográfico Agustín Codazzi subdirección cartográfica, 1989, Cartografía topográfica departamento del Valle del Cauca, Esc. 1: 25000, plancha 261 I-C, Blanco y negro.

Figura. 11 Plancha IGAC 261 3-A



Instituto Geográfico Agustín Codazzi subdirección cartográfica, 1989, Cartografía topográfica departamento del Valle del Cauca, Esc. 1: 25000, plancha 261 3-A, Blanco y negro.

4. DISEÑO METODOLÓGICO

Esta investigación está orientada bajo un enfoque completamente cuantitativo en la medida en que los datos obtenidos inicialmente en la plancha topográfica de la zona, fueron puestos a un análisis matemático de los niveles, distancias y pendientes encontradas, además de resultados dados en valores numéricos, todo como producto de la aplicación de fórmulas para el cálculo de los elementos morfo métricos de la cuenca.

El estudio realizado es de carácter descriptivo dando una interpretación de como es el funcionamiento de la red de drenaje de la cuenca, partiendo de los valores de cada característica, centrada en medir y calcular las características en cuanto a forma y posteriormente emplear esta información como base para una nueva investigación donde se pretenda realizar un análisis a mayor profundidad.

5. DESARROLLO Y RESULTADOS DE LA INVESTIGACION

A continuación se expondrán los resultados obtenidos a partir de los cálculos y las mediciones realizadas, basados en la información topográfica del rio Azul extraída de las planchas 261 I-C y 261 3-A.

5.1 Datos iniciales.

5.1.1 Área y perímetro de la cuenca

Para determinar el área y perímetro de la cuenca primero se digitalizo la divisoria en AutoCAD 2013 y se midieron con ayuda del software estos dos elementos, arrojando los siguientes resultados.

	m²	Km²
AREA	40782793,24	40,78279324

	m	Km
PERIMETRO	36102	36,102

Según la tabla 2.1 de clasificación de áreas, la cuenca por tener un área comprendida entre 20 km² y 100 km² se clasifica como una micro cuenca.

5.1.2 Longitud axial y ancho máximo.

La longitud axial se midió desde la desembocadura del rio Azul en el rio Calima, siguiendo la corriente más larga de la cuenca hasta la cabecera más distante de esta, el ancho máximo fue medido trazando tres líneas perpendiculares a la línea de longitud axial en el sector donde se evidencio mayor longitud y se saca un promedio de la longitud de las líneas.

	m	Km
Longitud max *(axial)*	11303,5988	11,3035988

	m	Km
Ancho max	7775,747	7,775747

5.1.3 Longitud de las corrientes y del cauce principal

Se digitalizaron en AutoCAD 2013 todas las corrientes y se identificó la principal, con el software se midieron estas longitudes.

	m	Km
LONGITUD DE LAS CORRIENTES	159743,939	159,743939

	m	Km
Longitud cause Principal	12416,3665	12,4163665

5.1.4 Área de las vertientes

De la misma forma en que se midió el área total de la cuenca, se midieron las áreas de las vertientes derecha e izquierda con la diferencia en que se toma de forma individual el área entre la delimitación y la corriente principal.

	m²	Km²
A vertiente *der*	7441811,84	7,441811836

	m²	Km²
A vertiente *izq*	33340981,4	33,3409814

5.2 Forma de la cuenca

5.2.1 Índice de Gravelius:

Se calcula relacionando el área y perímetro de la microcuenca el rio Azul

Dónde:

$$Area: 40.783\ km^2$$
$$Perimetro: 36.102\ km$$

$$\boldsymbol{Kc = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}}$$

Desarrollando la formula se obtiene:

$$\boldsymbol{Kc = 0.28 * \frac{36.102}{\sqrt{40.783}}}$$

$$\boldsymbol{Kc = 1.583}$$

5.2.2 Factor de forma:

Es la relación entre el ancho medio y la longitud axial de la cuenca. La longitud axial y el área de la microcuenca del rio Azul son las siguientes:

Longitud axial de la cuenca: 11.303 km
Área: 40.783 km²

$$\boldsymbol{F = \frac{40.783\ km^2}{(11.303\ km)^2}}$$

$$\boldsymbol{F = 0.319}$$

5.2.3 Índice de alargamiento

Es la relación entre la longitud axial y el ancho máximo. En base a lo anterior se tiene:

Longitud axial de la cuenca: 11.303 km
Ancho máximo: 7.775 km

$$\boldsymbol{Ia = \frac{Lm}{l}}$$

$$\boldsymbol{Ia = \frac{11.303\ km}{7.775\ km}}$$

$$\boldsymbol{Ia = 1.570}$$

5.2.4 Índice asimétrico:

Es la relación entre el área mayor y área menor que conforman las vertientes de acuerdo a la separación de la corriente principal. Dicha relación se puede ver en la figura 12

$$A_{mayor} = 33.341\ km^2$$

$$A_{menor} = 7.442\ km^2$$

$$\text{Ias} = \frac{\text{Amayor}}{\text{Amenor}}$$

$$\boldsymbol{Ias = \frac{33.341\ Km^2}{7.442\ Km^2}}$$

$$\boldsymbol{Ias = 4.480}$$

Figura. 12 Índice asimétrico (Área mayor y Área menor).

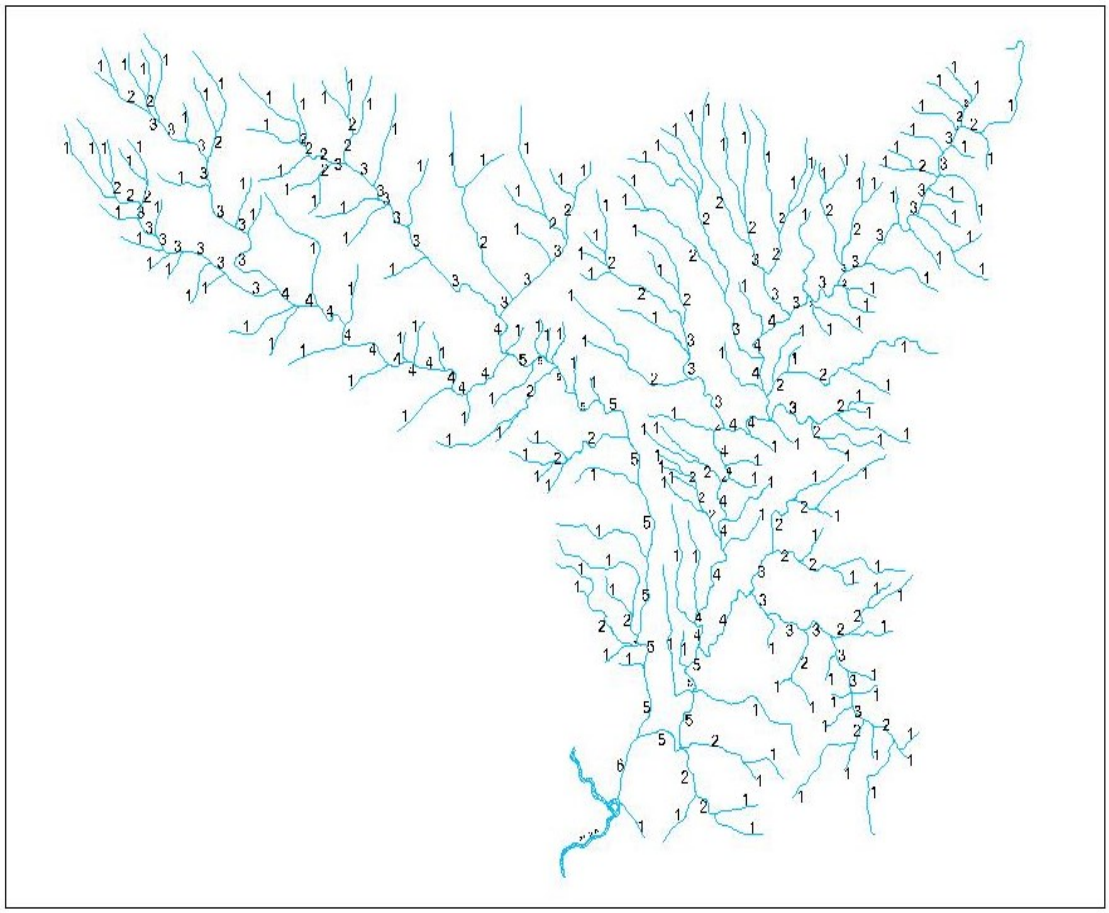


5.3 SISTEMA DE DRENAJE

5.3.1 Orden de las corrientes

El grado de ramificación o bifurcación dentro de la micro Cuenca rio Azul se clasifica como una cuenca de corrientes de sexto (6) orden, gráficamente se puede observar en la figura 13.

Figura. 13 Orden de las corrientes cuenca del rio Azul.



5.3.2 Densidad de drenaje

Es la relación entre la longitud de las corrientes y el área de la red de drenaje.

Longitud total de las corrientes (km): 159.744

Área (Km^2): 40.783

$$Dd = \frac{159.744\ km}{40.783\ km} = 3.917\ \frac{km}{km^2}$$

Cuando la densidad de drenaje (Dd) usualmente toma valores entre 0.5 km/km² para hoyas pobremente drenadas y de 3.5 km/km² para hoyas bien drenadas. Para este caso se obtuvo un valor de 3.917 km/km² originando un buen volumen de escurrimiento y desplazamiento en las corrientes de agua, es decir la cuenca tiene una buena capacidad de drenaje.

5.3.3 Extensión media de escorrentía

Se calcula dividiendo el área de la cuenca entre cuatro veces la longitud toral de las corrientes, se define a su vez como la distancia media que debe recorren una gota de agua en una precipitación sobre los terrenos de la hoya.

$$l = \frac{40.783\ km^2}{4 * 159.744\ km} = 0.064\ km$$

5.3.4 Sinuosidad de la corriente

Este valor adimensional indica la relación entre la longitud de la corriente principal y la longitud del valle de la corriente, para calcular la sinuosidad en este caso se utilizaron 4 tramos rectos.

tramos para sinuosidad	
3552,2571	
576,6771	
1498,0997	
3244,2102	*Km*
8871,2441	8,8712441

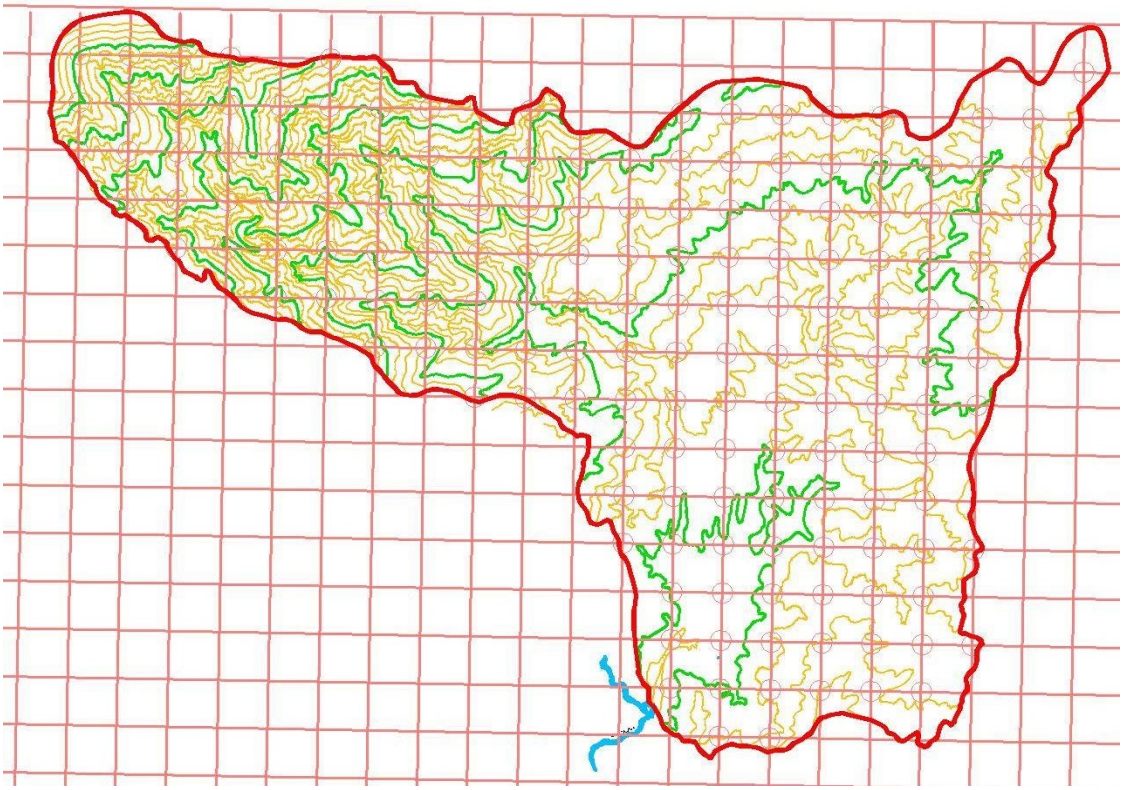
$$s = \frac{12.416\ \ km}{8.871\ km} = 1.40\ (Adimensional)$$

5.4 CARACTERITICAS DEL RELIEVE

5.4.1 Pendiente de la cuenca

El método empleado para determinar la pendiente de la cuenca fue el de las cuadriculas asociadas a un vector, sobre la digitalización de la cuenca se trazó una cuadricula de 800 m x 800 m con la cual se obtuvieron 65 puntos de intersección, que cumplen con el mínimo de 50 puntos requeridos por este método.

Figura. 14 Cuadricula asociada a un vector, cuenca del rio Azul.



En la aplicación del método se calculó un total de1861 pendientes (anexos), con estos datos se realizó la tabla de frecuencias que se presenta a continuación:
No de datos (n): 1861

Para el calcular tamaño del intervalo (C) se efectúan las siguientes operaciones

para determinar número de intervalos de clase de la pendiente (K) y el rango de la muestra (R).

$$K = 1 + 3.3 \log 1861$$

$$K = 11.790$$
$$R = 4.00 - 0.00$$

$$R = 4.00$$

Entonces C es igual a:

$$C = \frac{4.00}{11.790}$$

$$C = 0.340$$

Tabla 4 Frecuencias de las pendientes obtenidas.

PENDIENTE m/m		N ocurrencia	PORCENTAJE	PORCENTAJE ACUMULADO	PENDIENTE MEDIA DEL INTERVALO	# Ocurrencias X pend. media
0,001	0,331	1177	63,2455669	100	0,166	195,382
0,341	0,671	406	21,8162278	36,7544331	0,506	205,436
0,681	1,011	193	10,3707684	14,93820527	0,846	163,278
1,021	1,351	34	1,82697474	4,567436862	1,186	40,324
1,361	1,691	5	0,26867276	2,740462117	1,526	7,63
1,701	2,031	37	1,9881784	2,471789361	1,866	69,042
2,041	2,371	2	0,1074691	0,483610962	2,206	4,412
2,381	2,711	4	0,21493821	0,376141859	2,546	10,184
2,721	3,051	0	0	0,161203654	2,886	0
3,061	3,391	0	0	0,161203654	3,226	0
3,401	3,731	0	0	0,161203654	3,566	0
3,741	4,071	3	0,16120365		3,906	11,718
		1861	100			**707,406**

Por lo tanto la pendiente media de la cuenca es:

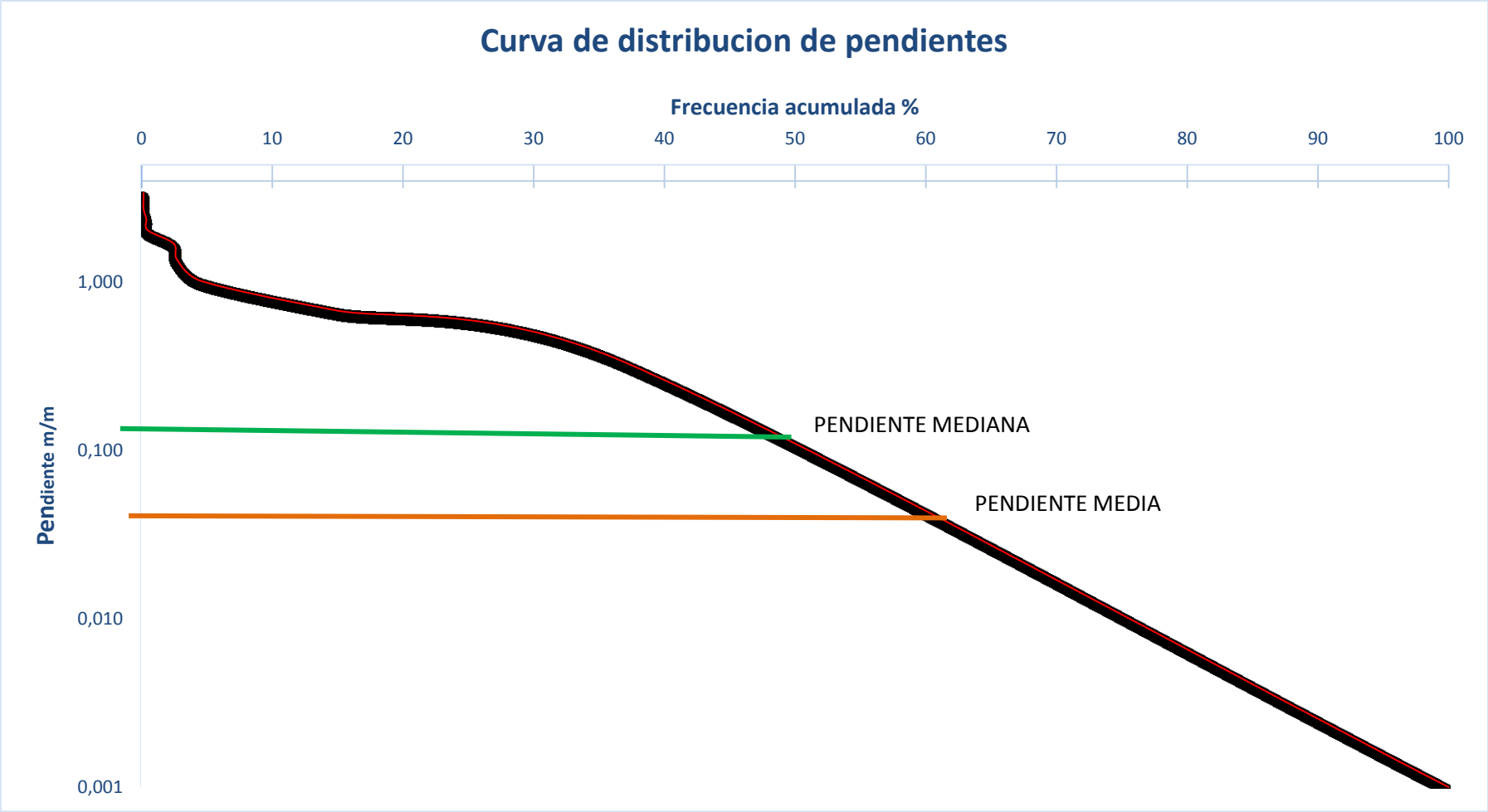
$$\text{pendiente media} = \frac{707.406 \text{ m/m}}{1861}$$

$$\text{pendiente media} = 0.380 \text{ m/m}$$

5.4.2 Curva de distribución de pendientes

En la curva de distribución de pendientes se han graficado en formato semi-logarítmico a partir de las frecuencias acumuladas y el valor mínimo de pendientes en cada rango como se muestra en la figura 14.

Figura. 15 Curva de distribución de pendientes, cuenca del rio Azul.



Con la distribución de pendientes de manera gráfica, se halla la pendiente mediana que equivale al 50% de la frecuencia acumulada y que es igual a 0.12 m/m

5.5 Curva hipsométrica y elevación media

La curva hipsométrica representa el porcentaje de área acumulada igualada o excedida para una cota determinada. Para su construcción se grafican los valores menores de las cotas de cada intervalo con su correspondiente área acumulada a excepción de los valores máximos y mínimos de cota hallados, además de conocer las equidistancias entre las curvas de nivel, una vez conocida la información proporcionada por los planos se prepara un cuadro de la siguiente manera:

Tabla 5 Frecuencias de las áreas para curva hipsométrica.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Cotas intervalo de clase (msnm)	Cota media del intervalo (msnm)	Área (km^2)	Área acumulada (km^2)	Porcentaje de Área (%)	Porcentaje acumulado de Área (%)	Columna (2) X Columna (3)
3450 - 3400	3425	0.028	0.028	0.070	0.070	97.301
3400 - 3350	3375	0.062	0.091	0.153	0.223	209.595
3350 - 3300	3325	0.083	0.174	0.204	0.427	276.345
3300 - 3250	3275	0.117	0.291	0.288	0.715	383.415
3250 - 3200	3225	0.156	0.446	0.383	1.098	502.419
3200 - 3150	3175	0.190	0.636	0.466	1.564	602.141
3150 - 3100	3125	0.207	0.843	0.510	2.074	647.738
3100 - 3050	3075	0.206	1.050	0.507	2.581	634.505
3050 - 3000	3025	0.221	1.271	0.544	3.125	669.432
3000 - 2950	2975	0.247	1.518	0.607	3.732	734.567
2950 - 2900	2925	0.261	1.779	0.642	4.375	764.114
2900 - 2850	2875	0.277	2.056	0.681	5.056	796.762
2850 - 2800	2825	0.359	2.416	0.883	5.939	1015.009
2800 - 2750	2775	0.394	2.810	0.969	6.909	1093.838
2750 - 2700	2725	0.443	3.252	1.088	7.997	1205.896
2700 - 2650	2675	0.513	3.766	1.262	9.259	1373.297
2650 - 2600	2625	0.490	4.256	1.205	10.464	1286.593

2600 - 2550	2575	0.483	4.739	1.189	11.653	1244.913
2550 - 2500	2525	0.499	5.239	1.228	12.881	1260.997
2500 - 2450	2475	0.511	5.750	1.257	14.138	1265.156
2450 - 2400	2425	0.532	6.282	1.308	15.446	1290.457
2400 - 2350	2375	0.545	6.827	1.340	16.786	1294.172
2350 - 2300	2325	0.586	7.413	1.441	18.227	1362.378
2250 - 2000	2225	0.638	8.647	1.569	21.260	1419.635
2200 - 2150	2175	0.626	9.273	1.540	22.800	1362.363
2150 - 2100	2125	0.670	9.943	1.648	24.448	1424.359
2100 - 2050	2075	0.731	10.675	1.798	26.246	1517.430
2050 - 2000	2025	0.958	11.632	2.355	28.601	1939.763
2000 - 1950	1975	1.262	12.894	3.102	31.703	2491.478
1950 - 1900	1925	2.043	14.937	5.024	36.727	3932.965
1900 - 1850	1875	2.579	17.516	6.342	43.068	4835.912
1850 - 1800	1825	4.175	21.691	10.265	53.333	7619.165
1800 - 1750	1775	2.939	24.630	7.225	60.559	5216.017
1750 - 1700	1725	4.181	28.811	10.281	70.840	7212.893
1700 - 1650	1675	5.618	34.429	13.814	84.654	9410.658
1650 - 1600	1625	4.255	38.684	10.461	95.115	6913.571
1600 - 1550	1575	1.888	40.572	4.643	99.758	2974.313
1550 - 1500	1525	0.098	40.671	0.242	100.000	150.186
TOTAL	-	40.671	-	-	-	79786.731

La elevación media de la Micro Cuenca del río Calima empleando el método área – elevación se calculó a través de la siguiente ecuación:

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i \, x \, e_i}{A_t}$$

En donde: $A_i \, x \, e_i$ corresponde a la columna (7) de la tabla 5.

A_t Corresponde al Área total de la columna (3)

Según la tabla y la fórmula anterior, se tiene que:

$$E_m = \frac{79786.731}{40.671}$$

$$E_m = 1961.770 \text{ m.s.n.m}$$

5.5.1 Error relativo del Área

El error numérico generado a la hora de la toma del área de drenaje respecto con el área total obtenida por la tabla 5; se genera con el uso de aproximaciones como lo fueron en la toma de áreas entre curvas de nivel; arrojando un error relativo que resulta de representar aproximadamente un procedimiento matemático exacto, se define como:

$$Er = \frac{|A - A_t|}{A} * 100\%$$

En donde:

A_t = Área total (valor teórico) obtenido en la columna (3) de la tabla 5.

A = Área de drenaje (valor experimental) obtenida anteriormente.

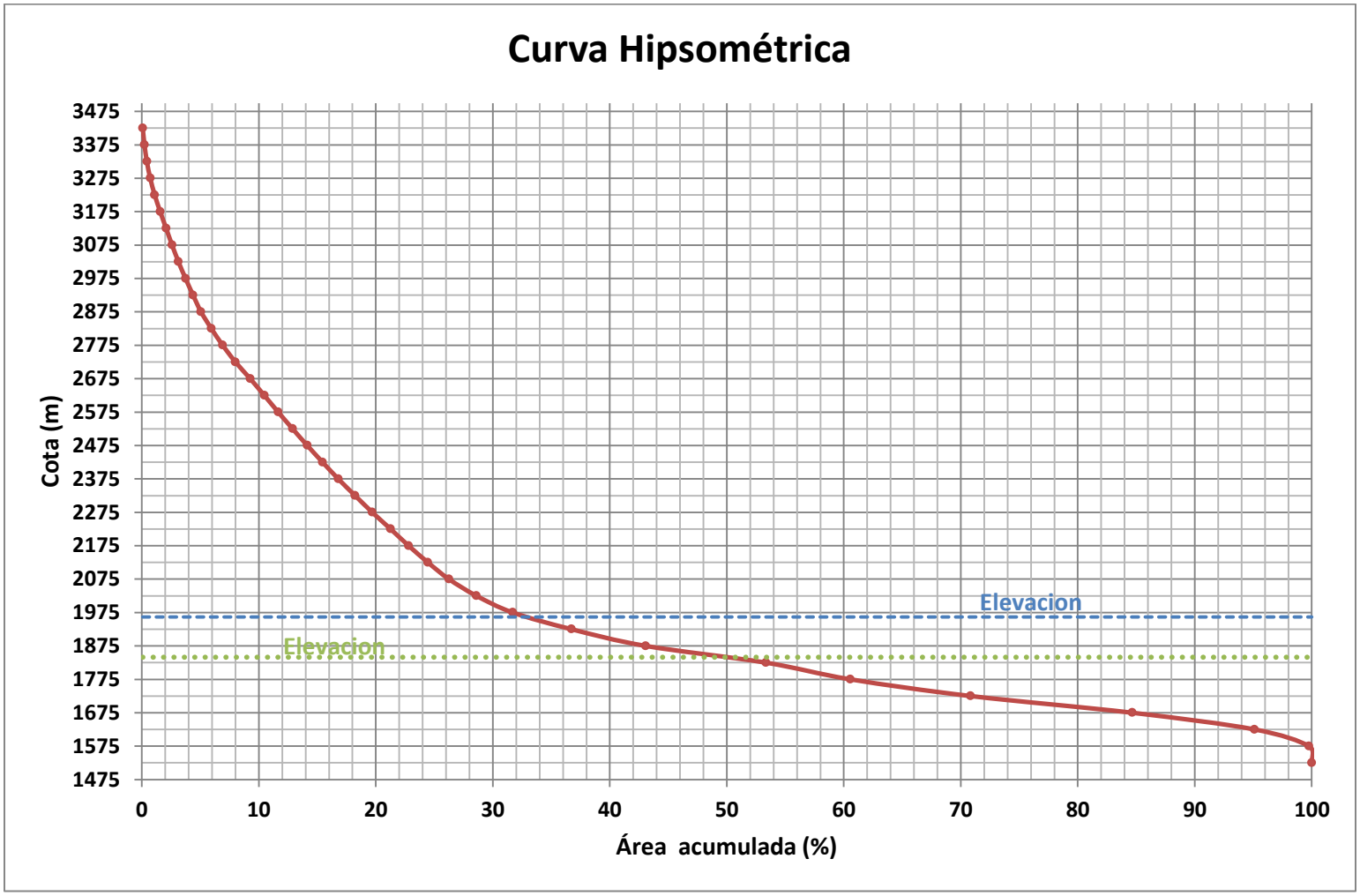
Según lo anterior se tiene que el error:

$$E_r = \frac{|40.783 - 40.671|}{40.783} * 100\%$$

$$E_r = 0.275\%$$

Se puede observar que el error relativo que refleja en caso del área no es trascendente ya que representa solamente un 0.275% con respecto al valor teórico.

Figura. 16 Curva hipsométrica de la cuenca del rio Azul.



5.6 Rectángulo Equivalente

Las distancias entre las curvas de nivel en el rectángulo equivalente son proporcionales a las áreas que separan dichas curvas en la hoya hidrográfica.

Para determinar la distancia entre las curvas de nivel en el rectángulo equivalente se utilizan los cálculos presentados a continuación, tomando como base los valores dados en la tabla 6.

Tabla 6 Áreas y longitudes acumuladas para rectángulo equivalente.

(1)	(2)	(3)
Cotas intervalo de clase (msnm)	Área acumulada de Hoya Hidrográfica (km²)	Longitudes acumuladas del rectángulo equivalente (km)
3450 - 3400	0.028	0.011
3400 - 3350	0.091	0.034
3350 - 3300	0.174	0.066
3300 - 3250	0.291	0.110
3250 - 3200	0.446	0.169
3200 - 3150	0.636	0.241
3150 - 3100	0.843	0.319
3100 - 3050	1.050	0.397
3050 - 3000	1.271	0.481
3000 - 2950	1.518	0.574
2950 - 2900	1.779	0.673
2900 - 2850	2.056	0.778
2850 - 2800	2.416	0.914
2800 - 2750	2.810	1.063
2750 - 2700	3.252	1.230
2700 - 2650	3.766	1.424
2650 - 2600	4.256	1.610
2600 - 2550	4.739	1.792
2550 - 2500	5.239	1.981
2500 - 2450	5.750	2.175
2450 - 2400	6.282	2.376
2400 - 2350	6.827	2.582
2350 - 2300	7.413	2.804
2300 - 2250	8.009	3.029
2250 - 2000	8.647	3.270

2200 - 2150	9.273	3.507
2150 - 2100	9.943	3.761
2100 - 2050	10.675	4.037
2050 - 2000	11.632	4.400
2000 - 1950	12.894	4.877
1950 - 1900	14.937	5.649
1900 - 1850	17.516	6.625
1850 - 1800	21.691	8.204
1800 - 1750	24.630	9.315
1750 - 1700	28.811	10.897
1700 - 1650	34.429	13.022
1650 - 1600	38.684	14.631
1600 - 1550	40.572	15.345
1550 - 1500	40.671	15.382

.A: $40.671\ \mathrm{km}^2$

Kc: 1.583

$$L = \frac{1.583\ \sqrt{40.671}}{1.12}\left[1 + \sqrt{1 - \frac{(1.12)^2}{40.671^2}}\right]$$

$$L = 15.382\ Km$$

$$l = \frac{1.583\ \sqrt{40.671}}{1.12}\left[1 - \sqrt{1 - \frac{(1.12)^2}{40.671^2}}\right]$$

$$l = 2.644\ Km$$

Estas dos ecuaciones respetan las condiciones del rectángulo equivalente ya que se conserva el área y el perímetro de la hoya. Aplicando una regla de tres se hallan las longitudes acumuladas del rectángulo equivalente, como ejemplo se tomara el primer dato:

$$X = \frac{15.382 * 0.028}{40.671}$$

$$X = 0.011\ km$$

RECTANGULO EQUIVALENTE

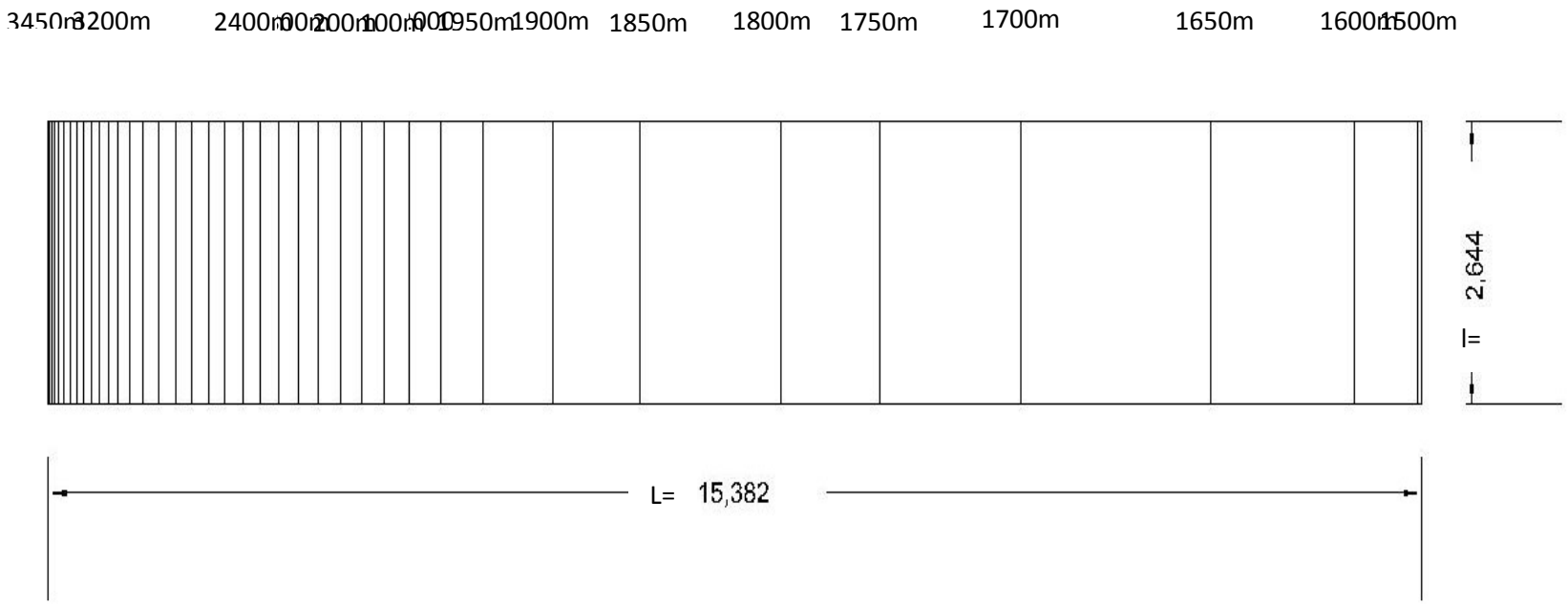


Figura. 17 Rectángulo equivalente, cuenca del rio Azul.

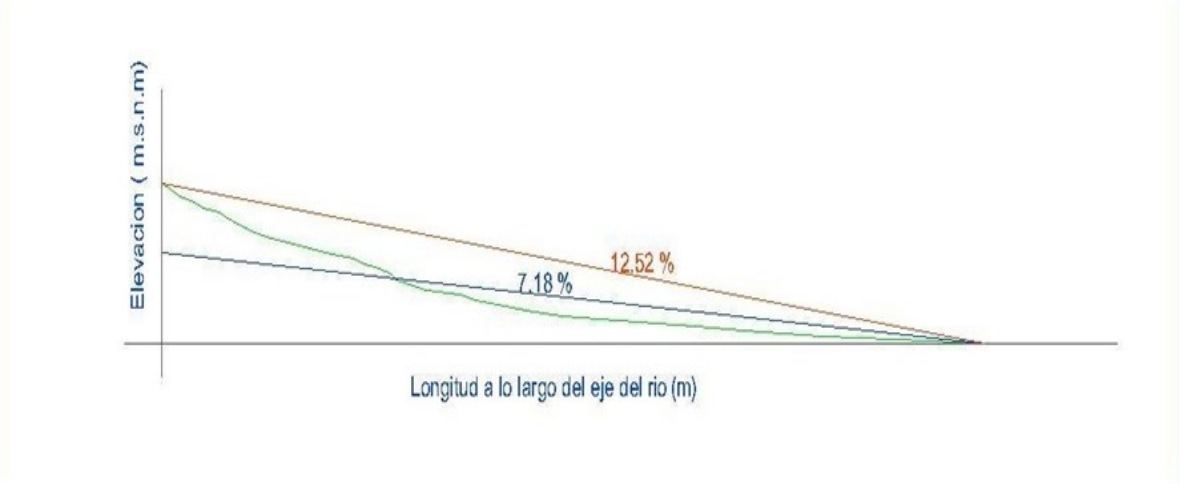
5.7 Pendiente de la corriente principal

Para calcular la pendiente de la corriente principal se midió con el software AutoCAD 2013 la longitud entre curvas de nivel por las que pasaba el curso de agua, se relacionó una longitud de recorrido y con estos puntos se trazó la siguiente gráfica:

Tabla 7 Datos para la elaboración el perfil longitudinal de la corriente principal.

Cota	Abscisa
3080	0
3050	70.8694
2950	278.983
2900	487.8581
2850	624.2753
2800	868.891
2750	986.431
2700	1101.644
2650	1266.84
2600	1393.1753
2550	1649.8138
2500	1979.9138
2450	2235.309
2400	2548.694
2350	2884.1712
2300	3054.3397
2250	3279.0061
2200	3466.1476
2150	3535.1392
2100	3731.3014
2050	3988.0241
2000	4492.9036
1950	4728.0968
1900	5068.5406
1850	5493.5441
1800	6034.7416
1750	6895.7959
1700	8048.4687
1650	8775.2617
1600	9974.2133
1550	11564.2756
1525	12416.3665

Figura. 18 Pendiente media y media ponderada, cuenca del rio Azul.



La pendiente media se ha calculado con las cotas mayor y menor de la corriente principal y la longitud total de la corriente.

$$P.media.S1 = \frac{3080 - 1525}{(12416.367 - 0)} * 100$$

$$P.media\ S1 = 12.524\ \%$$

Para calcular la pendiente media ponderada fue necesario haber determinado el área bajo la curva del perfil longitudinal, esto se realizó en el software AutoCAD 2013 y se obtuvo un área de 5533375.269 m² con la que se determinó *h2*.

$$h2 = \frac{2 * 5533375{,}269\text{m}^2}{12416.367\ m}$$

$$h2 = 891.303\ \text{m}$$

Con el área y h2 calculados se procede a determinar la pendiente media ponderada, la cual arroja una pendiente más razonable.

$$P.media\ ponderada.S2 = \frac{891.303\ m - 0}{12416.367\ \text{m}} * 100$$

$$P.media\ ponderada.S2 = 7.178\ \%$$

5.8 Resumen de resultados

Tabla 8 Resultados finales.

Elementos y características Morfométricas	Unidades / Valor
Área de drenaje	km²
	40,783
Perímetro	km
	36,102
Coeficiente de Compacidad (*Kc*)	Adimensional
	1,583
Longitud axial	km
	11,303
Factor de forma (*F*)	Adimensional
	0,319
Ancho máximo	km
	7,775
Índice de alargamiento (*Ia*)	Adimensional
	1,570
Área Vertiente mayor	km²
	33,341
Áreas Vertiente menor	km²
	7,442
Índice asimétrico (*Ias*)	Adimensional
	4,480
Longitud total de las corrientes	km
	159,744
Longitud del cauce principal	km
	12,416
Orden de las corrientes	grado (º)
	seis
Densidad de drenaje	km/km²
	3,917
Extensión media de la escorrentía	km²
	0,064
Pendiente media de la cuenca	(%)
	38
Elevación media	m.s.n.m
	1961,770
Sinuosidad	Adimensional
	1,40

6. ANALISIS DE RESULTADOS

A partir de los datos obtenidos en el desarrollo de la investigación de la cuenca del rio Azul afluente del rio Calima, se infieren los siguientes análisis:

El área de drenaje obtenida mediante AutoCAD fue de 40.783 km², a partir de lo anterior se le da el nombre de Micro cuenca según la tabla1 de clasificación según el área de drenaje

Como parte del estudio de la Microcuenca del rio Azul se necesitaron del cálculo de algunos índices para la caracterización.

El índice de compacidad (K_c) obtenido es de 1.583; lo que permite determinar; según los parámetros mencionados anteriormente. Que se trata de una cuenca de formal oval oblonga a rectangular oblonga, teniendo poca tendencia a crecientes o concentración de altos volúmenes de agua de escorrentía.

El factor de forma (F) obtenido es de 0.319; que clasifica esta microcuenca de acuerdo a los parámetros mencionados anteriormente, como una cuenca alargada de baja susceptibilidad a las crecientes rápidas y muy intensas.

El índice de alargamiento (I_a) para el caso de la microcuenca del rio Azul I_a de: 1.53; indica que se trata de microcuenca alargada debido a que la longitud máxima es mayor al ancho máximo (>1).

El cálculo del índice asimétrico (I_{as}) obtenido es de 4.480, como se trata de un valor muy superior a uno y de acuerdo a las áreas de las vertientes derecha e izquierda calculadas anteriormente la Microcuenca del rio Azul, indica que la corriente principal esta recargada ampliamente hacia la vertiente derecha. Por lo tanto se puede afirmar que los volúmenes de escorrentía de esta parte son mayores.

Para conocer el sistema de drenaje de la microcuenca El rio Azul se obtuvieron características a partir del rio principal y sus tributarios, tales características se mencionan a continuación:

Las corrientes de la microcuenca El Rio Azul, refleja un grado de bifurcación de orden seis, es decir, cuenta con gran cantidad de ramificaciones tributarias.

El valor de la densidad del drenaje (D_d) es de 3.197 km/km²; lo que determina que se trata de una cuenca que genera grandes volúmenes de escurrimientos con descensos veloces y buena capacidad de drenaje.

La extensión media de la escorrentía superficial obtuvo un valor de: 0.064 Km, tratándose de una gran hoya hidrográfica ya que las pérdidas generadas en una parte de la hoya debida a las divisorias topográficas son compensadas con ganancias en otras partes de esta.

La sinuosidad da una medida de la velocidad de la escorrentía del agua; para el caso de la microcuenca del rio Azul se obtuvo una sinuosidad de 1.400 clasificándose como una alta sinuosidad y obedeciendo a un rio con lineamiento curvo.

Para dar a conocer la característica topográfica del terreno de la microcuenca se implementa el método de la cuadriculas asociadas a un vector, obteniendo una pendiente media de 38.01 %; clasificando así al terreno como Muy fuertemente accidentado (P6).

La elevación media de la microcuenca El rio Azul se calculó por el método de área-elevación obteniendo un valor de: 1961.970 m.s.n.m. indican que es una Micro Cuenca de una elevación con un término elevado en altitud, por lo cual posee un clima templado o Mesotérmico según la tabla 3.

7. CONCLUSIONES

7.1 El análisis morfométrico es de gran importancia en el estudio de la microcuenca del rio Azul, ya que se constituye un criterio para establecer la magnitud de parámetros e interpretar los fenómenos que ocurren en ésta.

7.2 Al establecer relaciones y comparaciones de las características morfométricas con datos hidrológicos conocidos, pueden determinarse indirectamente valores hidrológicos en regiones de interés práctico donde falten datos o por razones de carácter fisiográficas o económicas no sea factible el acceso e implementación de equipos para su comportamiento.

7.3 Se determina que la cuenca del rio azul está caracterizada de forma general como una subcuenta de forma oval oblonga, la cual a pesar de tener una pendiente fuerte con corrientes de alta velocidad, tendrá muy poca posibilidad a inundaciones y avenidas por contar con una buena red de drenaje y forma alargada.

BIBLIOGRAFIA

INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI. Subdirección cartográfica, Cartografía topográfica departamento del Valle del Cauca, Esc. 1: 25000, plancha 261 3-A, Blanco y negro, 1989.

MONSALVE SAENZ, German. Hidrología en la Ingeniería. 2 ed. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1999.

REYES TRUJILLO, Aldemar. BARROSO, Fabián. CARVAJAL ESCOBAR, Yesid. Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas. Primera reimpresión. Santiago de Cali: Programa editorial Universidad del Valle, 2010.

APARICIO MIJARES, Francisco Javier. Fundamentos de Hidrología de superficie. Duodécima reimpresión. México DF: Limusa S.A. Grupo Noriega editores, 2004.

ANEXOS

Dos archivos en AutoCAD 2013, Un archivo en Excel 2010.

1. Planos:
    - Orden de las corrientes.
    - Perfil de la cuenca.
    - Divisoria del cuenca.
    - Plancha, extraída del IGAC.

2. Cálculos y gráficas archivo Excel.