

**DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE UNA
CUENCA POR MEDIO DE UNA INTERFAZ HIDROGEOMÁTICA PARA LA
GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO**

**ANTEPROYECTO DE TRABAJO DE PROFUNDIZACIÓN PRESENTADO
COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN
INGENIERÍA HIDRÁULICA E HIDROLÓGICA**

Alveiro Portilla Carvajal

Silvio Manuel Terán Rosero



UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

MAESTRÍA EN INGENIERÍA HIDRÁULICA E HIDROLÓGICA

POPAYÁN – CAUCA

2023

**DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE UNA
CUENCA POR MEDIO DE UNA INTERFAZ HIDROGEOMÁTICA PARA LA
GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO.**

**ANTEPROYECTO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PRESENTADO
COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN
INGENIERÍA HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA**

Alveiro Portilla Carvajal

Silvio Manuel Terán Rosero



Director:

Ing. M.Sc. Alberto José Caldas Constan

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA HIDRÁULICA E HIDROLÓGICA
POPAYÁN – CAUCA**

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

El director y el jurado han evaluado este documento titulado: “Determinación de parámetros morfométricos de una cuenca por medio de una interfaz hidrogeomática para la gestión del recurso hídrico”, escuchando la sustentación del mismo por sus autores y lo encuentran satisfactorio, por lo cual autorizan a los estudiantes, Alveiro Portilla Carvajal Silvio Manuel Terán Rosero para que desarrollen las gestiones administrativas para optar al título de Maestría en Ingeniería Hidráulica E Hidrológica

Director
Ing. M.Sc. Alberto José Caldas Constan

Jurado Externo
Ing. M.Sc. Maria Cristina Arenas Bautista

Jurado
Ing. M.Sc. Mauricio Aguirre Gómez

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi Familia,

Yaniny Paola Vargas

Emma salome Portilla

Arbey Portilla Carvajal

Bilmer portilla Carvajal

William Portilla Carvajal

Yamit Portilla Carvajal

...y Flor Alba Carvajal.

Alveiro

DEDICATORIA

Olga Lucia Ojeda Fernandez

Silvio José Teran Ramírez

Mariana Teran Ramírez

Alba Rosero Alarcón

Silvio Ernesto Terán Medina

Mis Hermanos

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo le damos gracias a todos a quienes nos dieron la oportunidad de avanzar un paso más hacia una meta propuesta, de ante mano damos el agradecimiento más profundo a nuestro asesor, Ingeniero Alberto José Caldas Constan, por brindarnos todo el apoyo incondicional de principio a fin.

A los docentes de la Universidad del Cauca por su compromiso con la formación brindada durante todo este proceso académico.

A nuestros compañeros de estudio y a todos nuestros amigos por su cariño, colaboración y aportes.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCION	28
2	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	30
2.1	Planteamiento del problema	30
2.2	Justificación	31
3	OBJETIVOS	33
3.1	Objetivo General	33
3.2	Objetivo específico	33
4	MARCO TEÓRICO	34
4.1	Morfología y gestión del recurso hídrico	34
4.2	Cuenca hidrográfica	34
4.3	Parámetros fisiográficos de una cuenca	35
4.4	Parámetros morfométricos	36
4.4.1	Parámetros de la red de drenaje	37
4.4.2	Parámetros del río principal	37
4.5	Hidrogeomática	37
4.5.1	Sistemas de Información geográfica	37
4.6	SIG en la Modelación Hidrológica	38
4.6.1	Python	38
4.6.2	Software y aplicaciones en SIG	38
4.6.3	Python lenguaje de programación en SIG	39
4.6.4	ArcPy	39
4.7	Experiencias internacionales y nacionales	39
5	MATERIALES Y MÉTODOS	41

5.1	Alcance	41
5.2	Pregunta	41
5.3	Descripción de los lugares de estudio	41
5.4	METODOLOGÍA	42
6	RESULTADOS	47
6.1	Objetivo 1: Diagnosticar mediante una revisión de literatura mundial la existencia de interfaces hidrogeomáticas que calculen los parámetros morfométricos de una cuenca hídrica en el marco de la gestión del recurso hídrico.	47
6.1.1	Bases de datos indexadas	47
6.1.2	Recolectar información de los parámetros morfométricos	50
6.2	Objetivo 2: Diseñar una interfaz hidrogeomática para el cálculo de los principales parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica en una cuenca piloto: Caso de estudio cuenca río Palacé (Cauca, Colombia)	52
6.2.1	Fase de inicial	52
6.2.1.1	Elaboración del código en Python	52
6.2.1.1.1	Introducción de las bibliotecas y módulos necesarios	52
6.2.1.1.2	Información del Sistema y Parámetros del Usuario	53
6.2.1.1.3	Limpieza del entorno	54
6.2.1.1.4	Estructura de Archivos y Carpetas	54
6.2.1.1.5	Carga de Parámetros desde un Archivo	55
6.2.1.1.6	Ejecución de Scripts	55
6.2.2	Fase de Análisis (Análisis Territorial)	55
6.2.2.1	Fase 1: Estructuración de la información de los SIG	55
6.2.2.1.1	Crear punto Aforo	55
6.2.2.1.2	Referencia Espacial y Coordenadas	56

6.2.2.1.3	Crear buffer	56
6.2.2.1.4	Conexión a Alaska Satellite Facility	56
6.2.2.1.5	Definir los vértices del cuadrado	57
6.2.2.1.6	Coordenadas de los vértices del cuadrado	57
6.2.2.1.7	Búsqueda de imágenes en ASF	57
6.2.2.1.8	Filtrado y Descarga de Imágenes	58
6.2.2.1.9	Descomprimir y cargar las imágenes	58
6.2.2.1.10	Crear con las imágenes descargadas el ráster	59
6.2.2.1.11	Proyecta el punto de Aforo	59
6.2.2.1.12	Consultar y Mostrar la Referencia Espacial	59
6.2.2.1.13	Manipulación y Proyección de Buffer	60
6.2.2.1.14	Verificación de la Existencia de Archivos Proyectados	60
6.2.2.1.15	Extracción por Máscara y Cálculo del Área del Buffer	60
6.2.2.1.16	Guardado y Administración de Datos Espaciales	61
6.2.2.1.17	Cambio de Símbolos y Visualización	61
6.2.3	Fase de Diseño (Análisis Territorial)	62
6.2.3.1	Fase 2: Pre-Procesamiento de la Información	62
6.2.3.1.1	Fill	62
6.2.3.1.2	Dirección del Flujo	62
6.2.3.1.3	Acumulación de Flujo	63
6.2.3.1.3.1	Calcular la cantidad de celdas que fluyen hacia cada celda del DEM.	63
6.2.3.1.3.2	Umbral de Acumulación de Flujo	63
6.2.3.1.3.3	Cálculo del Número de Celdas	63
6.2.3.1.3.4	Área de Estudio	63

6.2.3.1.3.5	Relación del Área y el número de Celdas	64
6.2.3.1.4	StreamLink	64
6.2.3.1.5	StreamOrder	64
6.2.3.1.6	StreamToFeature	65
6.2.3.1.7	Intercepción de la red hídrica	65
6.2.3.1.7.1	Crear el punto de Aforo	65
6.2.3.1.7.2	Obtener la Referencia Espacial del punto de aforo	66
6.2.3.1.7.3	Proyección a UTM Zona 18 Norte	66
6.2.3.1.7.4	Búsqueda del Segmento Más Cercano	66
6.2.3.1.7.5	Encontrar el Punto Más Cercano	67
6.2.3.1.7.6	Actualizar las Coordenadas del Punto de Aforo	67
6.2.3.1.8	Delimitación de la cuenca	67
6.2.3.1.9	Intercepción de la cuenca	68
6.2.3.1.9.1	Inicialización de Variables y Bucle Principal	68
6.2.3.1.9.2	Proceso iterativo	69
6.2.3.1.9.3	Fill del DEM	69
6.2.3.1.9.4	Dirección del Flujo	70
6.2.3.1.9.5	Acumulación del Flujo	70
6.2.3.1.9.6	Umbral de Acumulación	70
6.2.3.1.9.7	StreamLink y StreamOrder	71
6.2.3.1.9.8	StreamToFeature	71
6.2.3.1.9.9	Delimitación de la Cuenca	71
6.2.3.2	Análisis de la Cuenca hidrología	72
6.2.3.2.1	Extracción por máscara entre DEM y la cuenca	72

6.2.3.2.2	Realizar un llenado al archivo DEM de la cuenca	72
6.2.3.2.3	Realiza la Dirección de flujo de la cuenca	72
6.2.3.2.4	Realiza la Acumulación de flujo de la cuenca	73
6.2.3.2.5	Realiza la Umbral de Acumulación de la cuenca	73
6.2.3.2.6	Crear el ráster con la condicional de la cuenca	73
6.2.3.2.7	Crear el ráster con orden de las corrientes de la cuenca	74
6.2.3.2.8	Crear la red Hídrica de la cuenca	74
6.2.4	Fase 3: Procesamiento de la Información - Análisis espacial el área de estudio	74
6.2.4.1	Calcular el Área y el Perímetro de la Cuenca	74
6.2.4.1.1	Calcular el Centroides de la Cuenca	75
6.2.4.1.2	Calcular el Largo Máximo de la Cuenca	75
6.2.4.1.3	Calcular el Ancho Promedio de la Cuenca	76
6.2.4.1.4	Determinar la Dirección del Flujo	77
6.2.4.1.5	Calcular Cota Mínima, Cota Máxima y Altura Media de la Cuenca	77
6.2.4.1.6	Calcular el Coeficiente de Masividad (Km)	78
6.2.4.1.7	Calcular el Coeficiente de Compacidad (Kc)	78
6.2.4.1.8	Calcular el Coeficiente de Forma (Kf)	79
6.2.4.1.9	Calcular el Índice de Alargamiento (IA)	80
6.2.4.1.10	Calcular el Rectángulo Equivalente	81
6.2.4.1.11	Obtener Propiedades del Centroides	81
6.2.5	Fase 4: Calculo de Parámetros	82
6.2.5.1	Parámetros de la red Hídrica	82
6.2.5.1.1	Crear un mapa de pendientes a partir del DEM	82
6.2.5.1.2	Crear la tabla de la red hídrica	82

6.2.5.1.3	Agregar campos a la tabla de la red hídrica	83
6.2.5.1.4	Crea una lista de los datos a insertar en la tabla	83
6.2.5.1.5	Inserta los datos a la tabla de la red hídrica	83
6.2.5.1.6	Calcula el campo 'Nombre' basado en el valor del campo 'Orden'	84
6.2.5.1.7	Calcular el Orden de la cuenca	84
6.2.5.1.8	Agrega un campo “Long” a la capa de red Hidrica	85
6.2.5.1.9	Guardar la tabla "Tabla_RH" en la geodatabase	85
6.2.5.1.10	Calcular la longitud del río principal	85
6.2.5.2	Parámetros de relieve	86
6.2.5.2.1	Cálculo de los Niveles de la Cuenca	86
6.2.5.2.2	Definición de Rangos	86
6.2.5.2.3	Calcular el Promedio de un Rango	86
6.2.5.2.4	Procesamiento del DEM de la cuenca	87
6.2.5.2.5	Invertir el Orden de los Rangos	87
6.2.5.2.6	Cálculo del Área Total y el Área Porcentaje Total	87
6.2.5.2.7	Cálculo del Área Porcentaje para Cada Rango	88
6.2.5.2.8	Iniciar el Área Acumulada y el Área Porcentaje Acumulado	88
6.2.5.2.9	Cálculo del Área Acumulada y el Área Porcentaje Acumulado	88
6.2.5.2.10	Creación de la Tabla de Niveles	89
6.2.5.3	Parámetro de Pendiente	89
6.2.5.3.1	Crear tabla pendiente de la cuenca	89
6.2.5.3.2	Definición de campos y tipos de datos	89
6.2.5.3.3	Agregar campos a la tabla	90
6.2.5.3.4	Inserción de datos en la tabla	90

6.2.5.3.5	Reclasificar en DEM de la cuenca	90
6.2.5.3.6	Creación de una tabla de estadísticas	91
6.2.5.3.7	Actualización de la Tabla de Pendiente	91
6.2.5.3.8	Conversión de la tabla a un DataFrame de Pandas	92
6.2.5.3.9	Cálculo del promedio de pendientes de la cuenca	92
6.2.5.4	Tiempo de Concentración	93
6.2.5.4.1	Método de Kirpich:	93
6.2.5.4.2	Método de Giandoti:	93
6.2.5.4.3	Método de Temez:	94
6.2.5.4.4	Método de Passini:	94
6.2.5.4.5	Método de V.T. Chow:	95
6.2.5.4.6	Método de Clark:	95
6.2.5.4.7	Método de Ventura-Heron:	95
6.2.5.4.8	Método de Kerby (1959):	96
6.2.5.4.9	Método de Bransby Williams (1961):	96
6.2.5.4.10	Método de Kerby-Bransby Williams (1961):	96
6.2.5.4.11	Método de Sheridan (1966):	96
6.2.5.4.12	Método de Izzard (1973):	97
6.2.5.4.13	Método de Papadakis (1975):	97
6.2.5.4.14	Método del U.S. Army Corps of Engineers (1976):	97
6.2.5.4.15	Método de la Onda Cinemática (Kinematic Wave):	97
6.2.5.4.16	Método Racional:	98
6.2.6	Fase 5: Generación de Mapas	98
6.2.6.1	Elaboración de mapas	98

6.2.6.1.1	Cargar archivos shapefile en un mapa	98
6.2.6.1.2	Configurar etiquetas en capas	98
6.2.6.1.3	Cambiar la simbología de la capa de Colombia	99
6.2.6.1.4	Encontrar el Departamento que contiene un punto	99
6.2.6.1.5	Mostrar o informar sobre el resultado de la selección del Departamento	100
6.2.6.1.6	Cambiar la simbología de la capa "Dept"	100
6.2.6.1.7	Preparación del mapa "Anisis_Territorial_M"	100
6.2.6.1.8	Eliminación de todas las capas del mapa "Anisis_Territorial_M"	101
6.2.6.1.9	Agregar la capa de búfer al mapa y ajustar su simbología	101
6.2.6.1.10	Iterar sobre las capas a capturar y generar capturas de pantalla	101
6.2.6.1.11	Aplicar un efecto de zoom adicional, definir el nombre de archivo de salida y exportar el diseño	101
6.3	Validación de la Interfaz Hidrogeomática	102
6.4	Localización de la zona de estudio	102
6.5	Evaluación de los parámetros morfométricos	103
6.5.1	Análisis Territorial:	105
6.5.2	Recorte del área de estudio	106
6.5.3	Ajustes de las coordenadas del punto	107
6.5.3.1	Intersección del punto	108
6.5.4	Intersección de la cuenca de estudio	108
6.5.5	Análisis espacial de la cuenca	109
6.5.6	Cálculo de los parámetros Morfométricos	111
6.5.6.1	Parámetros de forma - Cuenca Hidrográfica Rio Palacé	111
6.5.7	hidrografía de la cuenca del rio Palacé	113

6.5.8	Longitud del Cauce Principal del rio Palacé	114
6.5.9	Pendiente de red hídrica	115
6.5.10	Pendiente de la Red Hídrica Clasificada	115
6.5.11	Curva Hipsométrica del rio Palacé	116
6.5.12	Clasificación del río de acuerdo a la curva hipsométrica	117
6.5.13	Tiempo de concentración	117
6.5.14	Comparación de resultados	122
7	CONCLUSIONES	125
8	OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES	127
9	BIBLIOGRAFÍA	128
10	ANEXOS	1

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1 Red Hidrológica de una Cuenca. Adaptada del modelo digital de elevación (DEM) facility https://asf.alaska.edu/ , específicamente de la misión Japonesa Alos Palsar para el municipio de Cauca.	34
Ilustración 2 Cuenca hidrográfica del río Palacé en el departamento del Cauca. Adaptada del modelo digital de elevación (DEM) facility https://asf.alaska.edu/ , específicamente de la misión Japonesa Alos Palsar para el municipio de Cauca.....	42
Ilustración 3 Método Simplificado	45
Ilustración 4 Entorno PyCharms.....	52
Ilustración 5 bibliotecas y módulos de arcpy	53
Ilustración 6 Parámetros del Usuario.....	53
Ilustración 7 Limpieza del entorno.....	54
Ilustración 8 Estructura de Archivos y Carpetas	54
Ilustración 9 Carga de Parámetros desde un Archivo.....	55
Ilustración 10 Ejecución de Scripts	55
Ilustración 11 Crear punto Aforo.....	55
Ilustración 12 Referencia Espacial y Coordenadas	56
Ilustración 13 Crear buffer	56
Ilustración 15 Definir los vértices del cuadrado.....	57
Ilustración 16 Coordenadas de los vértices del cuadrado.....	57
Ilustración 17 Búsqueda de imágenes en ASF	58
Ilustración 18 Filtrado y Descarga de Imágenes	58
Ilustración 19 Descomprimir y cargar las imágenes	58
Ilustración 20 Crear con las imágenes descargadas el ráster.....	59
Ilustración 21 Proyecta el punto de Aforo.....	59

Ilustración 22 Consultar y Mostrar la Referencia Espacial	59
Ilustración 23 Manipulación y Proyección de Buffer.....	60
Ilustración 24 Verificación de la Existencia de Archivos Proyectados.....	60
Ilustración 25 Extracción por Máscara y Cálculo del Área del Buffer	60
Ilustración 26 Guardado y Administración de Datos Espaciales	61
Ilustración 27 Cambio de Símbolos y Visualización.....	62
Ilustración 28 Fill del Flujo del área de estudio	62
Ilustración 29 Dirección del Flujo del área de estudio	62
Ilustración 30 Acumulación de Flujo del área de estudio	63
Ilustración 31 Cálculo del Número de Celdas del área de estudio	63
Ilustración 32 Área total de la cuenca	64
Ilustración 33 Relación del Área y el número de Celdas	64
Ilustración 34 StreamLink del área de estudio	64
Ilustración 35 StreamOrder del área de estudio.....	64
Ilustración 36 StreamToFeature del área de estudio	65
Ilustración 37 Crear el punto de Aforo.....	65
Ilustración 38 Obtener la Referencia Espacial del punto de aforo	66
Ilustración 39 Proyección a UTM Zona 18 Norte	66
Ilustración 40 Búsqueda del Segmento Más Cercano	67
Ilustración 41 Encontrar el Punto Más Cercano.....	67
Ilustración 42 Actualizar las Coordenadas del Punto de Aforo.....	67
Ilustración 43 Delimitación de la cuenca	68
Ilustración 44 Intercepción de la cuenca	68
Ilustración 45 Inicialización de Variables y Bucle Principal	68

Ilustración 46 Proceso iterativo	69
Ilustración 47 Fill del DEM.....	70
Ilustración 48 Dirección del Flujo	70
Ilustración 49 Acumulación del Flujo	70
Ilustración 50 Umbral de Acumulación.....	71
Ilustración 51 StreamLink y StreamOrder.....	71
Ilustración 52 StreamToFeature	71
Ilustración 53 Delimitación de la Cuenca.....	71
Ilustración 54 Extracción por máscara entre DEM y la cuenca	72
Ilustración 55 Realizar un llenado al archivo DEM de la cuenca	72
Ilustración 56 Realiza la Dirección de flujo de la cuenca	72
Ilustración 57 Realiza la Acumulación de flujo de la cuenca.....	73
Ilustración 58 Realiza la Umbral de Acumulación de la cuenca.....	73
Ilustración 59 Crear el ráster con la condicional de la cuenca	73
Ilustración 60 Crear el ráster con orden de las corrientes de la cuenca.....	74
Ilustración 61 Crear la red Hídrica de la cuenca	74
Ilustración 62 Calcular el Área y el Perímetro de la Cuenca.....	75
Ilustración 63 Calcular el Centroides de la Cuenca	75
Ilustración 64 Calcular el Largo Máximo de la Cuenca.....	76
Ilustración 65 Calcular el Ancho Promedio de la Cuenca.....	76
Ilustración 66 Determinar la Dirección del Flujo.....	77
Ilustración 67 Calcular Cota Mínima, Cota Máxima y Altura Media de la Cuenca	77
Ilustración 68 Calcular el Coeficiente de Masividad (Km).....	78
Ilustración 69 Calcular el Coeficiente de Compacidad (Kc).....	79

Ilustración 70	Calcular el Coeficiente de Forma (Kf).....	80
Ilustración 71	Calcular el Índice de Alargamiento (IA).....	80
Ilustración 72	Calcular el Rectángulo Equivalente	81
Ilustración 73	Obtener Propiedades del Centroides.....	82
Ilustración 74	Crear un mapa de pendientes a partir del DEM	82
Ilustración 75	Crear la tabla de la red hídrica.....	83
Ilustración 76	Agregar campos a la tabla de la red hídrica	83
Ilustración 77	Crea una lista de los datos a insertar en la tabla	83
Ilustración 78	Inserta los datos a la tabla de la red hídrica.....	83
Ilustración 79	Calcula el campo 'Nombre' basado en el valor del campo 'Orden'	84
Ilustración 80	Calcular el Orden de la cuenca.....	84
Ilustración 81	Agrega un campo “Long” a la capa de red Hidrica.....	85
Ilustración 82	Guardar la tabla "Tabla_RH" en la geodatabase	85
Ilustración 83	Calcular la longitud del río principal.....	85
Ilustración 84	Cálculo de los Niveles de la Cuenca	86
Ilustración 85	Definición de Rangos	86
Ilustración 86	Calcular el Promedio de un Rango.....	86
Ilustración 87	Procesamiento del DEM de la cuenca.....	87
Ilustración 88	Invertir el Orden de los Rangos.....	87
Ilustración 89	Cálculo del Área Total y el Área Porcentaje Total.....	88
Ilustración 90	Cálculo del Área Porcentaje para Cada Rango.....	88
Ilustración 91	Iniciar el Área Acumulada y el Área Porcentaje Acumulado	88
Ilustración 92	Cálculo del Área Acumulada y el Área Porcentaje Acumulado	88
Ilustración 93	Creación de la Tabla de Niveles.....	89

Ilustración 94 Crear tabla pendiente de la cuenca	89
Ilustración 95 Definición de campos y tipos de datos	89
Ilustración 96 Agregar campos a la tabla	90
Ilustración 97 Inserción de datos en la tabla.....	90
Ilustración 98 Reclasificar en DEM de la cuenca.....	91
Ilustración 99 Creación de una tabla de estadísticas	91
Ilustración 100 Actualización de la Tabla de Pendiente.....	92
Ilustración 101 Conversión de la tabla a un DataFrame de Pandas.....	92
Ilustración 102 Cálculo del promedio de pendientes de la cuenca.....	92
Ilustración 103 Método de Kirpich:.....	93
Ilustración 104 Método de Giandoti:.....	94
Ilustración 105 Método de Temez	94
Ilustración 106 Método de Passini.....	94
Ilustración 107 Método de V.T. Chow	95
Ilustración 108 Método de Clark	95
Ilustración 109 Método de Ventura-Heron.....	95
Ilustración 110 Método de Kerby.....	96
Ilustración 111 Método de Bransby Williams.....	96
Ilustración 112 Método de Kerby-Bransby Williams.....	96
Ilustración 113 Método de Sheridan (1966).....	96
Ilustración 114 Método de Izzard (1973).....	97
Ilustración 115 Método de Papadakis (1975).....	97
Ilustración 116 Método del U.S. Army Corps of Engineers (1976).....	97
Ilustración 117 Método de la Onda Cinemática (Kinematic Wave)	97

Ilustración 118 Método Racional	98
Ilustración 119 Cargar archivos shapefile en un mapa.....	98
Ilustración 120 Configurar etiquetas en capas.....	99
Ilustración 121 Cambiar la simbología de la capa de Colombia	99
Ilustración 122 Encontrar el Departamento que contiene un punto	99
Ilustración 123 Mostrar o informar sobre el resultado de la selección del Departamento .	100
Ilustración 124 Cambiar la simbología de la capa "Dept"	100
Ilustración 125 Preparación del mapa "Anisis_Territorial_M"	100
Ilustración 126 Eliminación de todas las capas del mapa "Anisis_Territorial_M"	101
Ilustración 127 Agregar la capa de búfer al mapa y ajustar su simbología.....	101
Ilustración 128 Iterar sobre las capas a capturar y generar capturas de pantalla.....	101
Ilustración 129Aplicar un efecto de zoom adicional.....	102
Ilustración 130 Cuenca hidrográfica del río Palacé en el departamento del Cauca. Adaptada del modelo digital de elevación (DEM) facility https://asf.alaska.edu/ , específicamente de la misión Japonesa Alos Palsar para el municipio de cauca.....	103
Ilustración 131 Ventana de la interfaz hidrogeomática	104
Ilustración 132 área de Estudio	105
Ilustración 133 Cuenca Hidrográfica Rio Palacé	113
Ilustración 134 largo máximo de la cuenca.....	113
Ilustración 135 Ancho promedio de la cuenca	113
Ilustración 136 hidrografía de la cuenca del rio Palacé.....	114
Ilustración 137 Longitud del Cauce Principal	115
Ilustración 138 Pendiente de la Red hídrica	115
Ilustración 139 Pendiente de la Cuenca Clasificada.....	116
Ilustración 140 Curva Hipsométrica.....	116

Ilustración 141 Clasificación de los ríos de acuerdo a la curva hipsométrica.....	117
Ilustración 143 Mapa del Fill en el área de estudio.....	1
Ilustración 144 Mapa de la dirección del flujo en el área de estudio	2
Ilustración 145 Mapa de la acumulación en el área de estudio	3
Ilustración 146 Mapa de la red hídrica del área de estudio	4
Ilustración 147 Mapa del Fill en la cuenca hidrográfica	5
Ilustración 148 Mapa de la acumulación de la cuenca hidrográfica.....	6
Ilustración 149 Mapa de pendiente de la cuenca hidrográfica	7
Ilustración 150 Mapa de la red Hídrica de la cuenca hidrográfica.....	8
Ilustración 151 Mapa del cauce más largo	9

Lista de Tablas

Tabla 1 Estudios Morfométricos en América Latina.....	40
Tabla 2 Búsqueda de documentos en bases de datos.....	48
Tabla 3 Análisis de bibliográfico.....	48
Tabla 4 Parámetros morfométricos.....	51
Tabla 5 Determinación de la cuenca hídrica	106
Tabla 6 Intersección del punto de Aforo	108
Tabla 7 Intersecciones de la cuenca de estudio	109
Tabla 8 Análisis espacial de la cuenca	110
Tabla 9 Parámetros de forma de la Cuenca Hidrográfica Rio Palacé	111
Tabla 10 Orden y tipo de cuenca.....	113
Tabla 11 Tiempo de concentración	117
Tabla 12 Resultados de la interfaz hidrogeomática.....	118
Tabla 13 comparación de la interfaz vs método tradicional.....	123

Lista de Anexos

Anexo 1 Mapas de la cuenca hidrográfica.....	1
--	---

RESUMEN

Los parámetros morfométricos son cruciales en la gestión hidráulica y la planificación territorial, impactando en la gestión de riesgos, el control de procesos hidrológicos, la predicción de riesgos naturales y la adaptación al cambio climático. Estos parámetros ofrecen una base cuantitativa para entender los procesos hidrológicos e hidráulicos en cuencas, clave para la mitigación de riesgos y la planificación sostenible. Sin embargo, calcularlos de manera precisa y uniforme es un reto con métodos tradicionales, a menudo complejos y costosos, que pueden generar resultados de fiabilidad variable.

Este trabajo propone una interfaz hidrogeomática innovadora, combinando Sistemas de Información Geográfica (SIG) con programación en Python. Esta herramienta busca transformar el cálculo y manejo de parámetros morfométricos mediante automatización y estandarización, prometiendo mejoras significativas en eficiencia y precisión. Se detalla cómo se utilizó esta interfaz para analizar la cuenca del río Palacé en Colombia, logrando confirmar su eficacia a través de pruebas exhaustivas y comparaciones metodológicas.

La investigación comenzó con una revisión exhaustiva de la literatura, utilizando bases de datos como ScienceDirect y SciELO, enfocándose en documentos publicados entre 2011 y 2021. Se emplearon palabras clave como "Interfaces hidrogeomáticas" y "Parámetros morfométricos", y se calculó un índice de frecuencia de citación para evaluar el interés en estas áreas. Esta revisión ayudó a identificar un creciente interés en las interfaces hidrogeomáticas y su importancia en el cálculo de parámetros morfométricos.

El Diseño de la interfaz se dividió en cinco fases: análisis, diseño, procesamiento de información, análisis espacial y generación de mapas. En la fase de análisis, se recolectó y estructuró información de SIG, incluyendo la determinación de coordenadas y la descarga y unificación de Modelos Digitales de Elevación (DEM). La fase de diseño implicó vincular estos elementos con las funciones de ArcPy para corrección de DEM, determinación de flujos y delimitación de cuencas. Las fases posteriores se centraron en el cálculo de parámetros morfométricos y la generación de mapas relevantes.

El tercer objetivo incluyó la validación de los datos obtenidos, seleccionando la cuenca del río Palacé por su importancia en la gestión hídrica regional. La interfaz fue calibrada meticulosamente para satisfacer necesidades específicas de gestión y regulación de recursos

hídricos. Se demostró su eficacia en la recopilación y cálculo de una amplia gama de parámetros. La comparación entre métodos automáticos y manuales reveló similitudes y diferencias, atribuibles a factores como la precisión de los datos de entrada y la resolución del DEM.

La herramienta automática se destacó por su rapidez y menor susceptibilidad a errores humanos, aunque su precisión depende de la calidad de los datos de entrada y del ajuste del algoritmo a las características específicas de la cuenca. Este proyecto subraya la importancia de establecer métodos estandarizados y más eficientes en la gestión hídrica, apuntando a establecer este enfoque como un referente en la gestión sostenible de recursos hídricos en el siglo XXI.

Palabras clave: Morfometría, Estudio hidrológico, Python, SIG, Gestión Hídrica.

ABSTRACT

Morphometric parameters are crucial in managing hydraulic systems and land planning, significantly influencing risk management, control of hydrological processes, natural hazard prediction, and climate change adaptation. These parameters offer a quantitative basis for comprehending hydrological and hydraulic processes in watersheds, which is vital for risk mitigation and sustainable planning. Traditional methods for calculating these parameters, however, often prove complex, costly, and yield inconsistent results.

This study introduces an innovative hydrogeomathic interface that merges Geographic Information Systems (GIS) with Python programming. This tool is designed to revolutionize the calculation and management of morphometric parameters by enabling automation and standardization, thus enhancing efficiency and accuracy. It includes a detailed application analysis of the Palacé river basin in Colombia, with its effectiveness verified through thorough testing and methodological comparisons.

The research began with a comprehensive literature review using databases like ScienceDirect and SciELO, focusing on publications from 2011 to 2021. Keywords like "Hydrogeomathic Interfaces" and "Morphometric Parameters" were used, and a citation frequency index helped assess interest in these topics. This review highlighted a growing interest in hydrogeomathic interfaces and their importance in morphometric parameter calculation.

The development of the interface encompassed five phases: analysis, design, information processing, spatial analysis, and map generation. The analysis phase involved gathering and organizing GIS data, including coordinate determination and the aggregation of Digital Elevation Models (DEM). The design phase connected these elements with ArcPy functions for DEM correction, flow determination, and basin delineation. Later phases focused on morphometric parameter calculation and relevant map creation.

The third objective entailed validating the data obtained, choosing the Palacé river basin for its significance in regional water management. The interface was rigorously calibrated to align with specific water resource management and regulation requirements. Its capability in capturing and calculating a broad spectrum of parameters was demonstrated. Comparisons

between automated and manual methods highlighted similarities and differences, influenced by the accuracy of input data and the DEM's resolution.

The automated tool excelled in speed and reduced human error susceptibility, though its accuracy depends on the quality of input data and the algorithm's fine-tuning to the basin's specific traits. This project emphasizes the need for standardized and efficient methods in water management, striving to set this approach as a standard in sustainable water resource management for the 21st century.

Keywords: Morphometry, Hydrological Study, Python, GIS, Water Management.

1 INTRODUCCION

En el contexto global de gestión de recursos hídricos, la determinación ágil, ordenada, precisa de los parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica se revela como un aspecto crucial para una gestión sostenible. Estos parámetros, que incluyen aspectos tales como la densidad del drenaje, la relación de bifurcación y las pendientes topográficas, son esenciales para descifrar la morfología y el comportamiento hidrológico de las cuencas. Su exactitud impacta directamente en múltiples facetas, tales como la comprensión del comportamiento hidrológico, la planificación y diseño de infraestructura, la gestión de riesgos de inundaciones y deslizamientos, la conservación y restauración ecológica, la adaptación al cambio climático y la gestión integrada de los recursos hídricos.

Estos parámetros son la piedra angular de una variedad de aplicaciones en hidrología y manejo de cuencas, proveyendo la información esencial para la modelización hidrológica, la planificación de infraestructuras, la gestión de riesgos, la conservación y la adaptación al cambio climático. Así, la precisión en su determinación es imperativa para tomar decisiones informadas y sostenibles en la gestión de recursos hídricos.

Históricamente, el cálculo de parámetros morfométricos ha dependido de métodos manuales, análisis cartográficos y la solución de ecuaciones. Estos procesos, además de ser tediosos y costosos, han generado resultados frecuentemente inciertos. Aunque las tecnologías emergentes, como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los modelos hidrológicos, presentan alternativas prometedoras, su implementación a menudo implica costos elevados y una curva de aprendizaje compleja.

Esta carencia de herramientas de fácil uso ha llevado a las autoridades y expertos a depender de fórmulas y procedimientos no estandarizados, derivando en resultados inconsistentes. En países en desarrollo, como Colombia, esta situación es aún más crítica. La ausencia de herramientas y algoritmos específicos para SIG intensifica la vulnerabilidad de las comunidades frente a eventos extremos, como inundaciones y deslizamientos, debido a una planificación y gestión inadecuada de las cuencas.

Por tanto, la inquietud central de este trabajo es: ¿De qué manera la determinación precisa de los parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica, utilizando herramientas

Hidrogeomáticas, puede optimizar la toma de decisiones en la gestión integral del recurso hídrico?

2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

2.1 Planteamiento del problema

En el mundo existe una gran variedad de herramientas para procesar información de la superficie de la tierra, muy pocas de estas herramientas permiten calcular con rigurosidad los parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica (Burbano-Girón et al., 2016); Esto ha generado que se desconozcan las características morfométricas de las cuencas hidrográficas tales como: la densidad del drenaje, la densidad hidrográfica, la relación de bifurcación, las pendientes topográficas, frecuencia de flujo, la longitud promedio de la red hídrica y orden de flujo entre otros parámetros (Franco & Dal Santo, 2015).

El cálculo de los parámetros morfométricos de una cuenca hidrológica puede ser realizado de manera manual, mediante análisis cartográfico y resolución de ecuaciones (Sendra, 1992). Este proceso aparte de ser engorroso es oneroso, requiere de mucho tiempo y sus resultados muestran un alto grado de incertidumbre. Adicionalmente, el uso de Sistemas de Información Geográfica -SIG junto con modelos hidrológicos y otros sistemas computacionales tales como las hojas de cálculo en Excel se pueden utilizar para obtener estos parámetros, pero resultan ser muy costoso o complicados como los de software abierto (QGIS, SAGA, HEC-HMS, SWATT, entre otros.), la combinación de varios métodos puede arrojar buenos resultados (Erdem et al., 2021).

Ante esta problemática las autoridades competentes como el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, a través de su Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico, las corporaciones autónomas regionales (CAR), la Agencia Nacional de licencias ambientales (ANLA), entre otros y los consultores están utilizando fórmulas matemáticas y procedimientos no estandarizados para calcular los parámetros morfométricos. Sin embargo, existen diferentes ecuaciones y métodos empíricos que han ocasionado que los resultados obtenidos en estas circunstancias no cuenten con la estandarización y rigurosidad necesaria para su uso en el cálculo de estos parámetros en proyectos asociados con la gestión del recurso hídrico (A.u. et al., 2021).

La vulnerabilidad de las comunidades es mayor en los países en vía de desarrollo por la falta de planificación y gestión de las cuencas hidrográficas, la deficiente planificación urbana, la degradación ambiental, y la carencia de estado (Quesada Román & Barrantes Castillo, 2017).

Adicionalmente, la expansión descontrolada del espacio urbano y la continua pérdida de espacio natural han generado zonas susceptibles a presentar deslizamientos, inundaciones, aumento de los caudales en los ríos y representan una gran amenaza para las personas y la infraestructura aguas abajo (Liu et al., 2021). Países como India, Brasil y Filipinas, enfrentan transformaciones en la gestión de sus cuencas hidrográficas debido al rápido crecimiento poblacional, que altera los usos y coberturas del suelo, agravando los retos en la gestión de recursos hídricos (Barreto-Martin et al., 2021).

Actualmente, en Colombia las herramientas computacionales, algoritmos, software o extensión para programas que realicen procesamiento de datos para el cálculo de los parámetros morfométricos directamente en SIG son escasas o poco difundidas (Ossa & Estrada, 2011). En Colombia son muy pocas las técnicas de análisis de los parámetros morfométricos, una de las más usadas es la metodología USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos), empleada y modificada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2014), así como la guía metodológica Técnica para la Formulación de los planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible del 2014, que tienen como objetivo establecer criterios, técnicas y metodologías que permiten tener una mejor comprensión de la realidad del territorio (Minambiente, 2014).

Aunque hay herramientas disponibles que facilitan un análisis más detallado y proporcionan una comprensión más clara de los problemas, estas aplicaciones no siempre son accesibles. Muchas son de propiedad privada o se venden comercialmente, y a menudo funcionan de manera desarticulada, lo que obliga a los usuarios a recurrir a múltiples herramientas para lograr una solución integral. (Girona, 2017). Esto hace necesario realizar un buen cálculo de los parámetros morfométricos de las cuencas hidrográficas sin los cuales se hace imposible la toma de decisiones para la gestión del recurso hídrico.

2.2 Justificación

Los parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica son fundamentales, ya que determinan su comportamiento hidrológico y su susceptibilidad a eventos como inundaciones y sequías. Históricamente, estos parámetros han sido esenciales para la planificación y gestión de recursos hídricos. Con el desarrollo de la ingeniería y los avances tecnológicos,

particularmente en los sistemas de información geográfica (SIG), la capacidad de análisis y modelación de cuencas hidrográficas ha mejorado significativamente. Estas herramientas permiten una caracterización más precisa y detallada de las cuencas, lo que facilita la toma de decisiones informadas y la implementación de estrategias de gestión más efectivas y sostenibles.(Olmos, 2010).

La importancia que han adquirido la ciencia y disciplina en el estudio del recurso hídrico y de la seguridad hídrica en la última década, por fenómenos tales como el crecimiento demográfico, el cambio climático y la imperiosa necesidad de administrar y cuidar de manera más eficiente este recurso. Según (Shelar et al., 2022), los avances en SIG han proporcionado herramientas geomáticas a los tomadores de decisiones y responsables de los recursos naturales, como el recurso hídrico. Estas herramientas geomáticas, son muy valiosas para el análisis de problemas relacionados con este recurso.

Uno de los países con menos estudios de sus cuencas hídricas y uno de los más afectados por fenómenos relacionados con los recursos hídricos es Colombia, en donde se presentaron alrededor de 30.730 eventos entre 1900 y 2018, con un aproximado de 34 muertes (Marin et al., 2020). Ante la recurrencia de los fenómenos como El Niño Oscilación Sur (ENOS) y el cambio climático, se ha vuelto imperativo conocer al detalle todos los parámetros morfológicos de una cuenca hidrográfica. Este conocimiento debe ser de una forma correcta y rápida, que contribuiría a la toma de decisiones tendientes a la mitigación de cualquier tipo de riesgo en las zonas de vulnerabilidad de nuestro país, para la planeación del manejo de las cuencas, para la expedición de la reglamentación del uso del recurso hídrico y la reglamentación de los usos del suelo entre otros aspectos (Meza Aliaga et al., 2014).

Por otra parte, en los países en vía de desarrollo como Colombia, según (Sepulveda Millan, 2021), se evidencia la necesidad de implementar instrumentos, para superar dificultades en la instalación y la medición en la mayoría de sus cuencas; el poco uso y desarrollo de las nuevas técnicas en los SIG. Ante la escasez de herramientas hidrogeomáticas y la necesidad de conocer los parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica, de una manera rápida, segura y estandarizada para la toma de decisiones, existe la necesidad de desarrollar una interfaz hidrogeomática que esté articulada con los SIG, (Nadhim Al-neama et al., 2022).

La implementación de una interfaz hidrogeomática, buscará establecer un punto de partido para el uso y parametrización de las características morfométricas de una cuenca hidrográfica, y de esta manera suplir la carencia de este tipo de herramientas. La implementación de la interfaz de Hidrogeomática facilitará la entrada, la preparación datos espaciales, la presentación de los datos y mostrará los resultados de una manera eficiente (Lindsay, 2016). Para ello se tomó como área de estudio y de validación la cuenca del río Palacé en el Departamento del Cauca.

Finalmente, este trabajo fortalece las Líneas de énfasis de Proyectos en recursos hídricos, Control y Aprovechamiento Fluvial y Cuencas Hidrográficas en coherencia con las líneas de profundización de la maestría en Hidráulica e Hidrología de la Universidad del Cauca.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Desarrollar una interfaz hidrogeomática para determinar los parámetros morfométricos de una cuenca hídrica en el marco de la gestión del recurso hídrico: Caso de estudio cuenca río Palacé (Cauca-Colombia).

3.2 Objetivo específico

- Diagnosticar mediante una revisión de literatura mundial la existencia de interfaces hidrogeomáticas que calculen los parámetros morfométricos de una cuenca hídrica en el marco de la gestión del recurso hídrico.
- Diseñar una interfaz hidrogeomática para el cálculo de los principales parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica piloto: Caso de estudio cuenca río Palacé (Cauca, Colombia).
- Validar los resultados obtenidos por la interfaz hidrogeomática con respecto a los resultados calculados mediante el uso del método desarticulado de hojas de cálculo y SIG.

4 MARCO TEÓRICO

4.1 Morfología y gestión del recurso hídrico

La morfología y gestión del recurso hídrico se ha convertido en la última década en un requisito indispensable para evaluar el estado de las cuencas hidrográficas, el objetivo de esta evaluación generalmente es brindar información como: fenómenos hidroclimáticos, determinación de la probabilidad de aprovechamiento hídrico, determinación de las respuestas del caudal-escorrentía, tiempo de concentración, el transporte de sedimentos y detritos en la ocurrencia de eventos extremos. Como base para el desarrollo de un modelo hidrogeológico conceptual que ayude a la toma de decisiones (Parra Cuadros, 2021).

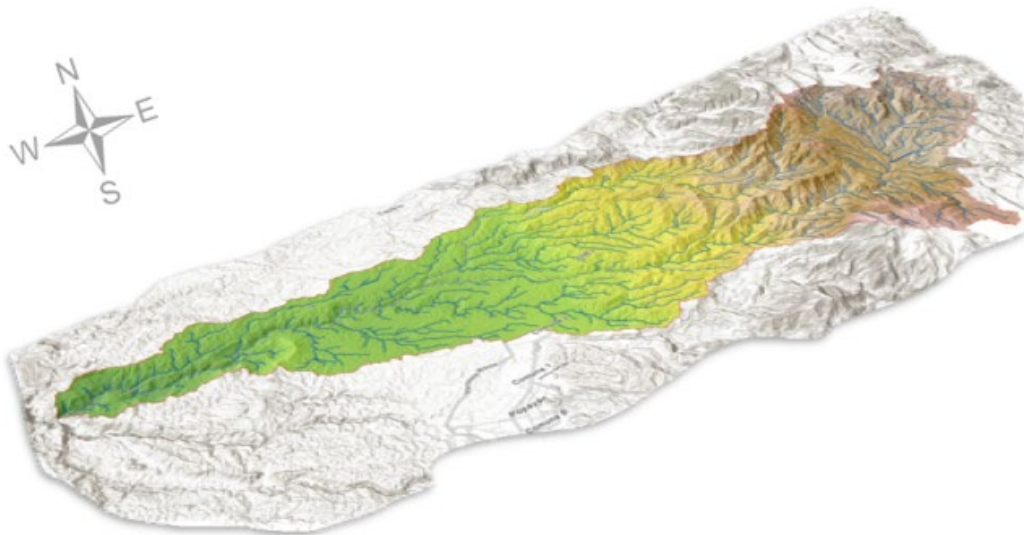


Ilustración 1 Red Hidrológica de una Cuenca. Adaptada del modelo digital de elevación (DEM) facility <https://asf.alaska.edu/>, específicamente de la misión Japonesa Alos Palsar para el municipio de Cauca.

4.2 Cuenca hidrográfica

Cuenca u hoya hidrográfica 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 (*Decreto 1729 de 2002 - Gestor Normativo - Función Pública, s/f*)

Las cuencas hidrográficas son fundamentales en el ciclo hidrológico, facilitando la circulación del agua en la tierra. Una proporción significativa del agua dulce terrestre fluye a través de estas cuencas. Además, el territorio de una cuenca hidrográfica proporciona

soporte crítico para el abastecimiento de agua potable, actividades productivas y la provisión de servicios indirectos como la regulación de hábitats (Hoggart & Thompson, 2015)

4.3 Parámetros fisiográficos de una cuenca

Los parámetros fisiográficos son cruciales para el análisis hidrológico y la comprensión de la dinámica de las cuencas hidrográficas. Incluyen:

- 1. Área de la cuenca:** Es la superficie total drenada por la red hidrográfica de la cuenca.
- 2. Forma de la cuenca:** Incluye la relación entre la longitud y la anchura de la cuenca, lo que afecta la velocidad y el volumen de la escorrentía.
- 3. Pendiente del terreno:** Determina la velocidad de escurrimiento del agua a través de la cuenca.
- 4. Longitud del cauce principal:** Es la distancia desde el punto más distante de la cuenca hasta su salida.
- 5. Densidad de la red de drenaje:** Se refiere a la extensión de la red de canales y ríos en relación con el área total de la cuenca.
- 6. Orden de los cursos de agua:** Clasifica los ríos y arroyos según su tamaño y jerarquía en la red de drenaje.

La respuesta de las cuencas hidrológicas a las precipitaciones sigue siendo un fenómeno complejo y no totalmente comprendido. Modelos y ecuaciones que simplifican sistemas complejos como las cuencas hidrológicas tienen limitaciones inherentes. Aunque estos modelos proporcionan herramientas valiosas para la gestión de recursos hídricos y la planificación de infraestructuras, es crucial reconocer sus limitaciones.

El análisis hidrológico emplea diversos métodos estadísticos para comparar cuencas hidrográficas y destacar las causas de los cambios en las características hidrológicas (Laxmi et al., 2022). Un ejemplo de esto es intentar explicar por qué dos cuencas hidrológicas bajo condiciones climáticas similares pueden tener regímenes de escorrentía muy diferentes. Las características geomórficas son determinantes en los procesos hidrológicos.

Las relaciones entre los caudales de diseño y las características fisiográficas han resultado en ecuaciones para calcular el caudal con periodo de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100 años, que

son los más usados, utilizando el área de la cuenca, su pendiente media y la densidad de drenaje, así como la relación de los escurrimientos mensuales de varias cuencas, sus áreas respectivas y las distancias entre estaciones hidrométricas para calcular la escorrentía que generará caudales de diseño (Bateman, 2017).

4.4 Parámetros morfométricos

Los parámetros morfométricos proporcionan una descripción física detallada de las cuencas hidrográficas, permitiendo la comparación entre distintas cuencas. Estas métricas incluyen, pero no se limitan a, el área de la cuenca, la pendiente media, la longitud del cauce principal y la forma de la cuenca. Su estudio es esencial para comprender la capacidad de respuesta de una cuenca ante eventos hidrológicos (Tesema, 2022).

Las herramientas metodológicas actuales, como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los Modelos Digitales de Elevación (DEM), facilitan el cálculo preciso de propiedades morfométricas. Estas herramientas han avanzado significativamente con el desarrollo de nuevas aplicaciones basadas en lenguajes computacionales. Estas aplicaciones permiten calcular parámetros complejos como los topográficos, las redes hidrográficas, y las direcciones y acumulaciones de flujo (Tesema, 2021). El cálculo de estos parámetros mejora notablemente la capacidad de adquirir y manejar información de manera precisa, lo cual es crucial para tomar decisiones informadas en la gestión integral del recurso hídrico (GIRH) (Vélez Upegui, 2013).

En el marco de la GIRH, los parámetros morfométricos se clasifican y utilizan de acuerdo a sus aplicaciones específicas, tales como:

- Modelado de escorrentía y predicción de inundaciones.
- Planificación y diseño de infraestructura hidráulica.
- Evaluación de la erosión del suelo y sedimentación.
- Conservación y restauración de ecosistemas acuáticos.
- Desarrollo de estrategias de uso y manejo sostenible del suelo.

La integración de estas métricas en la toma de decisiones permite una aproximación más holística y efectiva en la gestión de cuencas hidrográficas, contribuyendo al desarrollo sostenible y la protección de recursos hídricos.

4.4.1 Parámetros de la red de drenaje

La red de drenaje de una cuenca está constituida por los cauces a través del cual fluye la escorrentía superficial, subsuperficial y subterránea. La importancia de esta está reflejada en la formación y rapidez de drenado, además de proporcionar información de las condiciones del suelo (Dinesh et al., 2012). Las principales características son: los tipos de corrientes, modelos de drenaje, orden de corrientes; relación de bifurcación, densidad de drenaje y frecuencia de corrientes.

4.4.2 Parámetros del río principal

El río o cauce principal es la corriente cuyo punto de control se determina por la Salida del flujo, en donde la distancia principal es la distancia entre el nacimiento y el punto de control (Ghasemlounia & Utlu, 2021).

4.5 Hidrogeomática

La Geomática se puede entender como la interacción entre las Ciencias de la Tierra y la Informática que pretende establecer un sistema de técnicas y métodos para el almacenar, procesar, analizar, presentar información geográficamente referenciada (Albattah et al., 2021).

La Hidrogeomática es el conjunto de técnicas geomáticas e hidrológicas que, mediante los modelos de simulación y herramientas de información, se utilizan para resolver problemas de ingeniería hidráulica e hidrológica, ingeniería, con el fin de para optimizar el uso y administración del recurso hídrico, como los planes de ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas (POMCAS), estudio de inundaciones y sistemas hídricos urbanos y costeros.

4.5.1 Sistemas de Información geográfica

Un sistema de información geográfica (SIG) es un conjunto de programas que con bases de datos no gráficos o datos descriptivos de objetos del mundo real se representan de manera gráfica los cuales son susceptibles de algún tipo de medición como su tamaño. Según (Bedair et al., 2022), los SIG es una técnica eficiente y un marco utilizado para realizar e integrar muchos tipos diferentes de datos espaciales y geográficos (como mapas), mediante la recopilación, gestión y almacenamiento en una base de datos espacial, lo que permite un análisis y una visualización efectivos de la información geoprocesada.

4.6 SIG en la Modelación Hidrológica

En las últimas décadas el avance informático - computacional ha permitido la obtención y manejo de datos en formato digital, esto incorporado al desarrollo de los SIG, ha ocasionado que cada vez sean más utilizados en el modelado hidrológico. Los SIG actualmente poseen funciones específicas para facilitar el desarrollo de las modelaciones hidrológicas e hidráulicas, también dispone de modelos espaciales distribuidos que se basan en separar el área de estudio en zonas más pequeñas de manera homogénea, permitiendo el acercamiento al concepto de variación espacial (Korres & Schneider, 2018).

El uso de los SIG en el campo hidrológico cuenta con un número de aplicaciones para realizar modelos hidrológicos, la ingeniería hidrológica e hidráulica hoy en día está haciendo uso de su funcionalidad y potencialidad desarrollando interfaces, que facilitan la modelación del comportamiento del recurso hídrico (Rodríguez et al., 2019).

4.6.1 Python

Python es un lenguaje de programación simple y poderoso, es mucho más indulgente que lenguajes como C, C++, Fortran, Etc. igualmente cuenta con muchas herramientas fácilmente disponibles. El uso de Python en la hidrología no ha tenido un desarrollo rápido en comparación con otros campos. El acceso a herramientas SIG, matemáticas, estadísticas, Entre otros. hace de Python sea un lenguaje útil para el hidrólogo. En los últimos años la programación en Python se ha hecho popular en el uso del análisis de idoneidad de datos (Chen et al., 2022), igualmente es un lenguaje de programación poderoso, fácil de aprender y de uso libre.

4.6.2 Software y aplicaciones en SIG

Actualmente, existen diversas estrategias, técnicas y métodos que facilitan la obtención de parámetros morfométricos a través de software como ArcGIS Pro y QGIS. Estas herramientas permiten realizar interpolaciones de puntos para generar Modelos Digitales de Elevación (DEM), que son cruciales en el análisis morfométrico de cuencas (Benjumea-Hoyos et al., 2020). Además, la digitalización de información cartográfica mediante programas como ArcGIS y QGIS posibilita la generación de redes de drenaje y el cálculo de perímetros de cuencas, utilizando complementos como el módulo ArcHydro (Méndez Mata, 2016). El programa IDRISI Selva basado en SIG permite realizar unas series de rutinas

informáticas para producir mapas temáticos, generando también mapas de vulnerabilidad (Siqueira et al., 2017). El software Terraset ante llamado IDRISI Selva, ofrece herramientas para el análisis y predicción de futuros escenarios como el Usos y Coberturas del Suelo en cuencas Hidrograficas (Bunyangha et al., 2021)

En años recientes, Python se ha consolidado como un lenguaje de programación popular para el análisis de idoneidad de datos (Chen et al., 2022), así como para programar secuencias que automatizan tareas específicas en ArcGIS y QGIS. Python es un lenguaje poderoso, accesible y de uso libre, lo que ha impulsado su adopción en la comunidad de SIG.

4.6.3 Python lenguaje de programación en SIG

El análisis de datos geoespaciales es un componente clave para la toma de decisiones y la planificación del recurso hídrico. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), como ArcGIS, brindan plataformas de análisis y mapeo que nos permite recolectar y almacenar cantidades masivas de datos geoespaciales como la precipitación, humedad, temperatura entre otros datos de una Cuenca hídrica, que requieren el análisis y numerosas iteraciones (Omran et al., 2016). El análisis geoespacial de estos datos hace que la programación informática sea fundamental para automatizar el análisis geoespacial.

4.6.4 ArcPy

La integración de Python en ArcGIS dio origen a un módulo que articulo el lenguaje de programación en Python con el Software ArcGIS conocido como ArcPy. Este módulo es una herramienta importante para los estudiantes de SIG y profesionales de la hidrología. igualmente nos da manera poderosa de mejorar el análisis geoespacial desde comandos básicos de Python, hasta métodos y propiedades avanzados (Mitterer, 2022). El ArcPy muestra un conjunto de elementos de ArcGIS como complemento a la biblioteca de Python, y de esta forma da acceso desde la codificación al manejo y operación de información espacial (Tang & Matyas, 2018). En ArcGIS, los comandos de Python se usan para automatizar actividades repetitivas, así como para codificar herramientas o extensiones mejor conocidas como TOOLBOX.

4.7 Experiencias internacionales y nacionales

En Colombia en los últimos años, se han llevado a cabo diversos estudios relacionados con los parámetros morfométricos. A continuación, se presenta la Tabla 1 Estudios

Morfométricos en América Latina que resume algunas de estas investigaciones en Colombia y otros países de América Latina, junto con los autores y los objetivos de los estudios:

Tabla 1 Estudios Morfométricos en América Latina.

País	Estudio	Autor(es)	Objetivo	Método/ Modelo Utilizado
Colombia	Efecto de los parámetros morfométricos de la cuenca en los umbrales de lluvia basados físicamente para deslizamientos de tierra superficiales	(Marin et al., 2020)	Determinar umbrales de intensidad y duración de lluvias para prevenir deslizamientos.	Modelo TRIGRS
Colombia	Análisis de la relación entre variables morfométricas y biofísicas en la estimación de características probabilísticas para la oferta hídrica superficial en Colombia	(Burbano-Girón et al., 2016b).	Estimar características probabilísticas para la oferta hídrica superficial.	Análisis de Componentes Principales (ACP)
Colombia	Caracterización y clasificación de la red hidrográfica de la cuenca del río Bobo, departamento de Nariño – Colombia	(Benavides Mora et al., 2009)	Analizar morfometría para verificar drenaje y susceptibilidad de la cuenca.	Métodos de análisis geoespacial
Ecuador	Estudio en la Reserva de Biosfera del MzC	(Caldas Calle, 2020).	Obtener medidas geomorfológicas en una reserva en la cordillera de los Andes.	Teledetección y SIG (Sistemas de Información Geográfica)
México	Estudio de características morfológicas de la cuenca “Cañitas” y su relación con el riesgo de inundaciones repentinas	(Toro et al., 2021)	Evaluar el riesgo de inundaciones repentinas en la cuenca "Cañitas".	Modelo HEC-HMS (Sistema de Modelado de Hidrología de Ingeniería)
Brasil	Morfometría y perfil longitudinal de la subcuenca del río cobras en la planificación de la ubicación de presas subterráneas	(Lima et al., 2019)	Identificar ubicaciones adecuadas para la construcción de presas subterráneas.	Análisis morfométrico y perfil longitudinal.

Fuente: Elaboración propia.

En la mayoría de los casos, para el cálculo de los parámetros morfométricos se utiliza software SIG y diferentes hojas de cálculo diseñadas por cada uno y los autores no tiene parametrizado cada parámetro.

5 MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Alcance

Este trabajo pretende determinar los parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica por medio de una interfaz hidrogeomática en el marco de la gestión del recurso hídrico. El trabajo será de tipo Descriptiva, ya que se compararán los principales parámetros morfológicos de una cuenca hidrográfica obtenidos mediante el uso de la interfaz Hidrogeomática realizada en Python y los resultados obtenidos mediante el uso de hojas de cálculo Excel y SIG de manera desarticulada.

5.2 Pregunta

¿Cómo la determinación de los parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica a través de una interfaz Hidrogeomática pueden mejorar la toma de decisiones en el marco de la gestión integral del recurso hídrico?

5.3 Descripción de los lugares de estudio

El estudio se realizará en la cuenca hidrográficas del río Palacé, que cuenta con una extensión aproximada de 64,000 ha, con elevaciones que van desde 1.600 m.s.n.m. hasta los 4.000 m.s.n.m., está ubicada en los municipios de Totoró, Cajibío, Silvia, Puracé y Popayán (Colombia) los cuales están localizados hacia la parte central del departamento del Cauca, la mayor parte está conformada por terrenos de altas pendientes, en su parte alta existen ecosistemas de páramo, con cobertura de bosques naturales primarios y suelos intervenidos para agricultura y ganadería donde se ha visto un aumento considerable de pastizales desde el año 1989 hasta el 2008 (RICCLISA, 2017). La cuenca está compuesta por los ríos Palacé, río Blanco, río el Cofre, río Mota, Quebrada el Tigre y la Piedra y entre otros. La cuenca está situada geográficamente entre los 5° 28' 22.07" latitud norte y 79° 16' 50.54" longitud oeste y 5°17 '30.88 latitud norte y 79°16' 52.48" longitud oeste (Ilustración 1 Red Hidrológica de una Cuenca).

La cuenca hidrográfica del río Palacé tiene una clasificación de drenaje dendrítico que indica que su condición de drenaje es homogénea y su material geológico es homogéneo, con baja permeabilidad, con relieve levemente plano, con resistencia uniforme a la erosión (CRC, 2010)

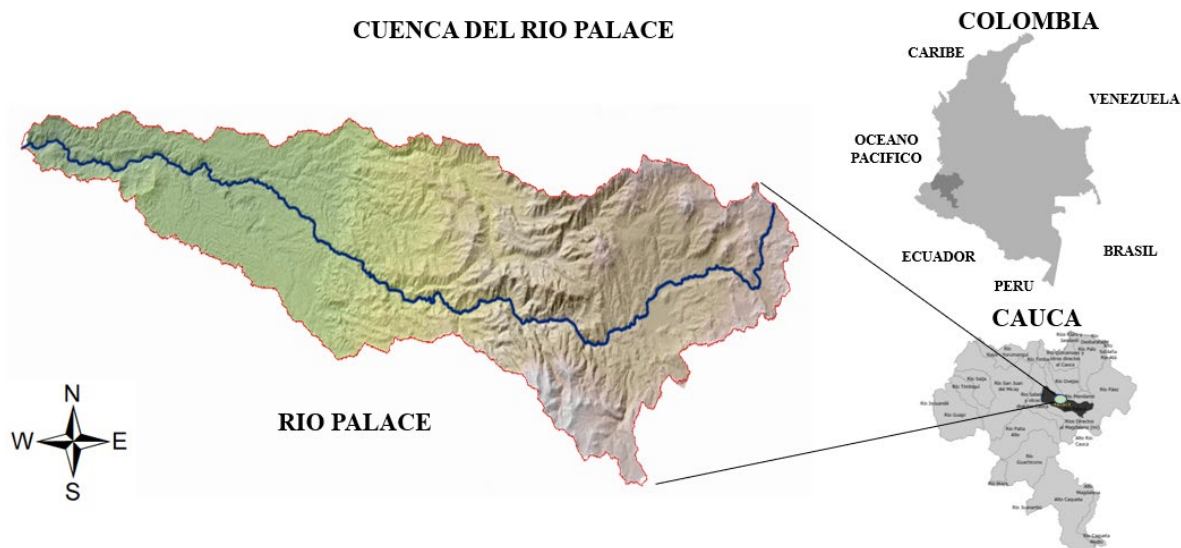


Ilustración 2 Cuenca hidrográfica del río Palacé en el departamento del Cauca. Adaptada del modelo digital de elevación (DEM) facility <https://asf.alaska.edu/>, específicamente de la misión Japonesa Alos Palsar para el municipio de Cauca.

5.4 METODOLOGÍA

La metodología para emplear para el desarrollo del presente trabajo considera los siguientes aspectos:

Objetivo 1: Diagnosticar mediante una revisión de literatura mundial la existencia de interfaces hidrogeomáticas que calculen los parámetros morfométricos de una cuenca hídrica en el marco de la gestión del recurso hídrico

ACTVIDADES A REALIZAR

Relación de la Información (Actividades)	Análisis de la Información (Actividades)
<ol style="list-style-type: none"> 1. Consulta de bases de datos indexadas (ScienceDirect, SciELO, redalyc, JSTOR y entre otras). Hacer una investigación conceptual en las bases de datos con relación a los siguientes aspectos: La cuenca, los Sistemas de Información Geográfica y los conceptos inherentes a la programación (Clasificación y estructuras de las Interfaz HIDROGEOMATICAS) en el marco de la gestión integral del recurso hídrico en los últimos 10 años (2011-2021). con relación a los siguientes aspectos: La cuenca, los Sistemas de Información Geográfica y los conceptos inherentes a la 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Clasificar los parámetros morfométricos (De Forma, De Relieve, De Drenaje). 2. Tipo y estructuración de las interfaces hidrogeomáticas integradas en el contexto del Manejo del recurso hídrico. 3. Porque Python como sistemas de programación sustentar el uso. 4. Describir los métodos existentes para el cálculo de los parámetros morfométricos de una Cuenca Hidrográfica. 5. Relacionar las herramientas más usadas por para los cálculos Parámetros Morfológicos Hidrológicos (Articula y desarticulada)

<p>programación (Clasificación y estructuras de las Interfaz HIDROGEOGRÁFICAS) en el marco de la gestión integral del recurso hídrico en los últimos 10 años (2011-2021). (Goya Heredia et al., 2020)</p> <p>2. Recolectar información de los parámetros morfométricos de parámetros de Forma. Relieve, Red de drenaje (Guerra, 2015) y su programación en Python.</p> <p>Nota: se trabajará con los parámetros más importantes de mayor frecuencia, de mayor frecuencia de incitación o de mayor interés en estudios de hidrología.</p>	
---	--

Objetivo 2: Diseñar una interfaz hidrogeomática para el cálculo de los principales parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica en una cuenca piloto: Caso de estudio cuenca río Palacé (Cauca, Colombia)

ACTVIDADES A REALIZAR

<p>Relación de la Información y Análisis de la Información (Actividades)</p>
<p>Para el diseño de la herramienta hidrogeomática se desarrollará con el lenguaje de programación Python donde se involucrarán una serie de algoritmos que permitan construir una herramienta que unifique varias tareas repetitivas para el cálculo de los principales parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica.</p> <p>Pasos para calcular los parámetros morfométricos la fase de desarrollo de software</p> <p>A continuación, se describe las fases del proceso de cálculo de los parámetros morfométricos basado en la Ecuación de (Jacobson et al., 2000).</p> <p>Fase de Análisis:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Fase 1: Estructuración de la información de los SIG <ol style="list-style-type: none"> 1.1 Determinar las coordenadas del punto de control 1.2 Descarga DEM necesarios 1.3 Unión de ser necesaria en un mosaico 1.4 Generación de un DEM 1.5 Establecer el área preliminar de trabajo 1.6 Recorte del área <p>Fase de Diseño:</p> <p>En esta fase, los elementos del modelo identificados en la fase de análisis se asocian con el lenguaje de programación que se utilizará en la implementación. En las fases 2 se muestra una breve descripción de las funciones utilizadas de la biblioteca ArcPy:</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Fase 2: Pre-Procesamiento de la Información <ol style="list-style-type: none"> 2.1 Fill Sinks: Se corregirá las imperfecciones mediante el método extracción de redes de canales a partir de datos digitales de elevación de (Tarboton et al., 1991). 2.2 Flow direction: Determinar la dirección de flujo con el modelo de (Jenson & . Domingue, 1988).

- 2.3 Flow accumulation: La acumulación de flujo de acuerdo a su pendiente de descenso con el código de (Jenson & Domingue, 1988).
- 2.4 Stream Link: Se define el cauce en segmentos no interrumpidos con el código usado en los SIG.
- 2.5 Stream Order: Se clasificar el orden de las cuencas el método propuesto por (Shreve, 1966).
- 2.6 Stream Feature: Se genera un archivo de drenaje con la técnica de (Tarboton et al., 1991).
- 2.7 Watershed Delineation: se delimita la cuenca con el algoritmo usado en los SIG

3. Fase 3: Procesamiento de la Información - Análisis espacial el área de estudio

Tomando como base el punto de control introducido en la fase 1, el algoritmo calculará los primeros parámetros morfológicos, de acuerdo con la metodología que utilizo en el análisis de variables morfométricas de (Burbano-Girón et al., 2016a):

- 3.1 El área de la cuenca
- 3.2 El perímetro de la cuenca
- 3.3 La cota máxima
- 3.4 La cota mínima
- 3.5 Crear los mapas de pendientes
- 3.6 Clasificar, Calcular de los rangos de pendientes
- 3.7 Establecer el tipo de terreno según la pendiente
- 3.8 Calcular la pendiente media de la cuenca
- 3.9 Crear el mapa de sombras
- 3.10 Calcular la longitud de la red hídrica total y la longitud de cada uno de los componentes de acuerdo con el orden de la cuenca
- 3.11 Crear las bases de datos relacionadas con pendientes y curvas de nivel (Dobos et al., 2001)

4. Fase 4: Calculo de Parámetros

En esta fase se operarán y calcularan aproximadamente 23 parámetros morfológicos de una Cuenca Hidrográfica en al redor de 6 minutos para un área aproximada de 50 ha. De acuerdo a la clasificación de geomorfometría de relieve de (Hernández Santana et al., 2017) y metodología de extracción de redes de arroyos y delimitación de cuencas con Python de (Omran et al., 2016):

4.1 Parámetros de Forma.

- 4.1.1 El índice de Gabrieliuss o de compacidad
- 4.1.2 El rectángulo equivalente lado mayor
- 4.1.3 El rectángulo equivalente lado menor
- 4.1.4 El índice de pendiente

4.2 Parámetros de Relieve

- 4.2.1 El área acumulada entre curvas
- 4.2.2 Área sobre la curva
- 4.2.3 Porcentaje del área
- 4.2.4 La pendiente de la cuenca
- 4.2.5 La pendiente promedio de la cuenca
- 4.2.6 La ocurrencia de cada uno de los rangos

4.3 Parámetros Morfométricos Hídricos

- 4.3.1 El orden de la cuenca
- 4.3.2 La cantidad de drenajes en cada uno de los órdenes
- 4.3.3 La longitud de cada uno de los drenajes en sus respectivos órdenes
- 4.3.4 La coincidencia de cada uno
- 4.3.5 La pendiente de cada uno
- 4.3.6 La pendiente promedio de la red hídrica
- 4.3.7 Pendiente del cauce principal
- 4.3.8 La densidad del drenaje
- 4.3.9 La densidad de las corrientes
- 4.3.10 Curva Hipsométrica el polígono de frecuencias.

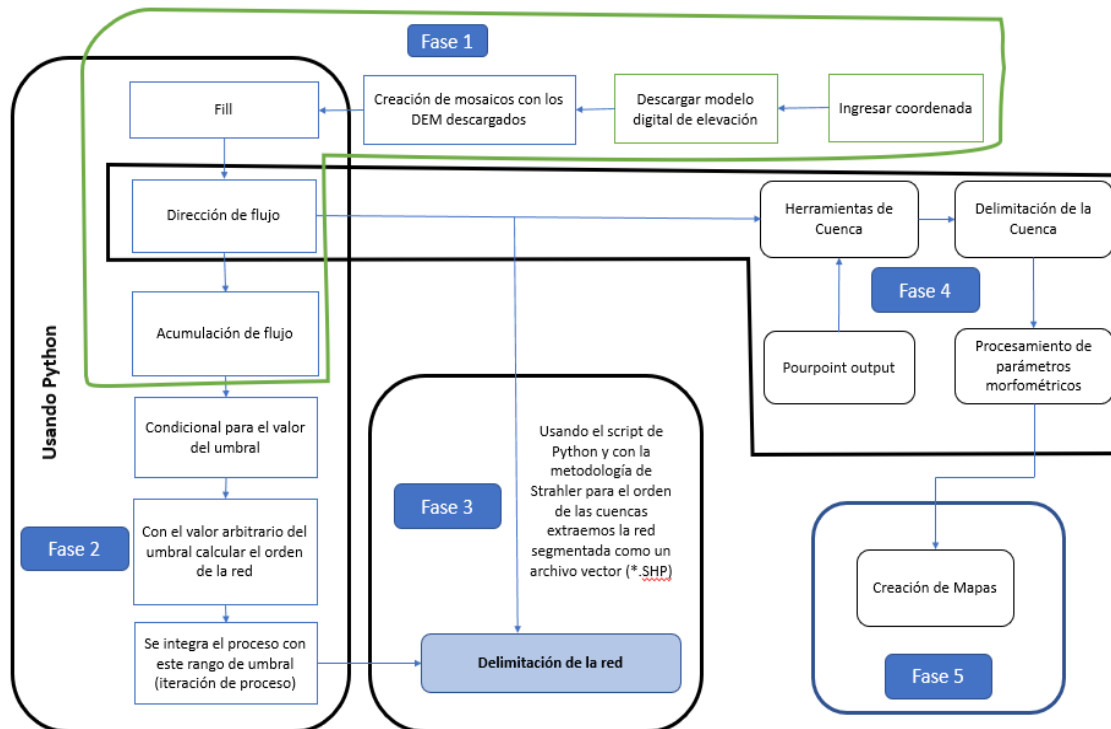
5. Fase 5: Generación de Mapas

- 5.1 Se crearan los mapas de dirección del flujo, la acumulación de flujo y densidad de drenaje mediante un algoritmo integrado de (Zhang et al., 2017).
- 5.2 Se crearan los mapas de la red hídrica, del orden de la red hídrica, mediante Uso integrado de imágenes satelitales, DEMs, datos de suelos y sustratos en el estudio de terrenos montañosos de (Giannetti et al., 2001).
- 5.3 Convertirá a formato vectorial el ultimo mapa con el fin de poder realizar los cálculos de cantidades y longitudes de los diferentes ríos que conforman la cuenca mediante el método Evaluación del potencial de escorrentía superficial de cuencas de (Nadhim Al-neama et al., 2022) .

Fase de Implementación

La implementación de este proceso se lleva a cabo utilizando la versión 2.7 del lenguaje de programación Python en conjunto con el intérprete PyCharm y la biblioteca ArcPy. Para brindar una representación visual de las etapas involucradas en el proceso de delimitación de cuencas hidrográficas y el cálculo de los Parámetros Morfométrico, se ha diseñado la Ilustración 3 Método Simplificado, Esta ilustración consiste en un diagrama de flujo que representa de manera gráfica y sencilla las diferentes etapas y sus interacciones.

Ilustración 3 Método Simplificado



Fuente: Elaboración propia.

Objetivo 3: Validar los resultados obtenidos por la interfaz hidrogeomática con respecto a los resultados calculados mediante el uso del método desarticulado de hojas de cálculo y SIG.

ACTVIDADES A REALIZAR

<p style="text-align: center;">Relación de la Información (Actividades)</p>	<p style="text-align: center;">Análisis de la Información (Actividades)</p>
<p>Realizar la comparación de los resultados obtenidos con la interfaz con los datos obtenidos mediante los métodos tradicionales.</p>	<p>Validación de la herramienta: En esta fase se validarán y/o compararán los datos obtenidos de manera automática con el Interfaz Hidrogeomática, con los parámetros obtenidos en una plantilla en Excel que contendrá gráficos y el cálculo de los principales parámetros morfométricos entre ellos tenemos:</p> <p>Parámetros de Geometría como:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Área • Perímetro • Factor Forma • Centroide X • Centroide Y • Centroide Z • Índice de Gravelius • Índice de alargamiento • Rectángulo equivalente • Lado mayor del rectángulo equivalente • Lado menor del rectángulo equivalente <p>Parámetro de relieve como:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cota Máxima • Cota Mínima • Pendiente • Pendiente promedio de la Cuenca • Desnivel altitudinal • Área entre curvas de nivel • Área entre pendientes • Altitud más frecuente • Altitud de frecuencia media <p>Parámetros de hidrografía cómo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Longitud del cauce principal • Cota máxima del cauce principal • Cota mínima del cauce principal • Pendiente del cauce principal • Ángulo de flujo • Orden de la red hídrica • Longitud de la red hídrica • Pendiente promedio de la retórica • Coeficiente de masividad • Densidad de drenaje • Curva hipsométrica, tiempo de concentración y entre otros.

6 RESULTADOS

6.1 Objetivo 1: Diagnosticar mediante una revisión de literatura mundial la existencia de interfaces hidrogeomáticas que calculen los parámetros morfométricos de una cuenca hídrica en el marco de la gestión del recurso hídrico.

6.1.1 Bases de datos indexadas

Se realizó una revisión de literatura mundial para diagnosticar la existencia de interfaces hidrogeomáticas que calculen los parámetros morfométricos de las cuencas hidrográficas. La revisión se centró en los documentos publicados en los últimos 10 años (2011-2021).

La búsqueda de literatura se realizó en las siguientes bases de datos:

- ScienceDirect
- SciELO
- redalyc
- JSTOR

Se utilizaron las siguientes palabras clave para la búsqueda:

- Interfaces hidrogeomáticas
- Cuenca hidrográfica
- Sistemas de Información Geográfica
- Parámetros fisiográficos de una cuenca
- Gestión del recurso hídrico
- Python
- ArcPy
- Software y aplicaciones en SIG
- Lenguaje de programación en SIG
- Parámetros morfométricos

El análisis estadístico realizado en la búsqueda bibliográfica se basó en el índice de frecuencia de citación (IFC). Este índice se calcula dividiendo el número de documentos que citan un determinado parámetro morfométrico (PM) o método de evaluación (ME) por el número total de documentos encontrados en la búsqueda bibliográfica.

Tabla 2 Búsqueda de documentos en bases de datos

Base de datos	Interfases hidrogeomáticas	Cuenca Hidrográfica	Sistemas de Información Geográfica	Parámetros fisiográficos de una cuenca	Gestión del recurso hídrico	Python	ArcPy	Software y aplicaciones en SIG	Lenguaje de programación en SIG	Parámetros morfométricos
Google Académico	12	10	11	12	10	11	12	11	12	12
ScienceDirect	11	9	10	11	9	10	11	10	11	11
SciELO	10	8	9	10	8	9	10	9	10	10
redalyc	9	7	8	9	7	8	9	8	9	9
JSTOR	8	6	7	8	6	7	8	7	8	8
Índice medio	10	8	9	10	8	9	10	9	10	10
Cuartil medio	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la tabla muestra que las interfaces hidrogeomáticas son un tema de investigación activo. La palabra clave "interfaces hidrogeomáticas" fue la más citada en las bases de datos indexadas, lo que sugiere que existe un interés creciente en el desarrollo y uso de estas interfaces.

Las bases de datos ScienceDirect y Google Académico tuvieron el mayor número de documentos detectados para la mayoría de las palabras clave. Esto se debe a que estas bases de datos son las más grandes y tienen una mayor cobertura de la literatura científica.

Los resultados de la búsqueda sugieren que las interfaces hidrogeomáticas tienen el potencial de ser una herramienta útil para investigadores, planificadores y gestores de recursos hídricos. Estas interfaces pueden utilizarse para calcular parámetros morfométricos de las cuencas hidrográficas, que son importantes para comprender las características físicas de las cuencas y para evaluar su respuesta a los cambios ambientales.

Tabla 3 Análisis de bibliográfico

Categoría	Subcategoría	Documentos detectados	Q	%	Cuartil
Interfases hidrogeomáticas	Estudio de la cuenca	30	25	30%	Q3
	Modelación hidrológica	25	20	25%	Q2
	Gestión del agua	20	15	20%	Q1
Cuenca Hidrográfica	Geomorfología	15	10	15%	Q2
	Hidrología	10	5	10%	Q1

Categoría	Subcategoría	Documentos detectados	Q	%	Cuartil
	Gestión del agua	5	0	5%	Q1
Sistemas de Información Geográfica	Cartografía	10	5	10%	Q1
	Análisis espacial	20	15	20%	Q2
	Modelización	25	20	25%	Q2
Parámetros fisiográficos de una cuenca	Forma de la cuenca	30	25	30%	Q3
	Relieve	30	25	30%	Q3
	Cobertura vegetal	10	5	10%	Q1
Gestión del recurso hídrico	Planificación	20	15	20%	Q2
	Operación	15	10	15%	Q2
	Sostenimiento	5	0	5%	Q1
Python	Programación	10	5	10%	Q1
	Visualización	10	5	10%	Q1
	Análisis	10	5	10%	Q1
ArcPy	Herramientas	10	5	10%	Q1
	Automatización	10	5	10%	Q1
	Integración	10	5	10%	Q1
Software y aplicaciones en SIG	Software comercial	5	0	5%	Q1
	Software libre	10	5	10%	Q1
	Aplicaciones web	10	5	10%	Q1
Lenguaje de programación en SIG	Python	25	20	25%	Q2
	R	5	0	5%	Q1
	JavaScript	5	0	5%	Q1
Parámetros morfométricos	Forma de la cuenca	30	25	30%	Q3
	Relieve	30	25	30%	Q3
	Cobertura vegetal	10	5	10%	Q1

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la tabla anterior muestra que las interfaces hidrogeomáticas son un tema de investigación activo, con un aumento del interés en los últimos 10 años. La categoría "Estudio de la cuenca" es la más representada en la tabla, seguida de la categoría "Modelación hidrológica". Esto sugiere que las interfaces hidrogeomáticas se utilizan principalmente para

comprender las características físicas de las cuencas hidrográficas y para modelar el flujo de agua en estas cuencas.

Las subcategorías más representadas en la tabla son "Forma de la cuenca" y "Relieve". Esto se debe a que la forma y el relieve de las cuencas hidrográficas son importantes para comprender su comportamiento hidrológico.

Las subcategorías menos representadas en la tabla son "Software comercial" y "Lenguaje de programación en SIG". Esto se debe a que la mayoría de los documentos se centraron en el desarrollo y uso de interfaces hidrogeométricas, independientemente de la plataforma o lenguaje de programación utilizado.

6.1.2 Recolectar información de los parámetros morfométricos

En su libro "Geomorfología fluvial", Guerra (2015) proporciona una descripción detallada de los parámetros morfométricos y cómo se calculan. El libro también discute la importancia de los parámetros morfométricos para el estudio de los sistemas fluviales.

Según Guerra (2015), los parámetros morfométricos se pueden clasificar en tres categorías principales:

- **Parámetros de forma:** Estos parámetros describen la geometría de la cuenca hidrográfica. Incluyen parámetros como el área, el perímetro, la excentricidad, el factor de forma, el índice de compactación y el índice de circularidad.
- **Parámetros de relieve:** Estos parámetros describen la topografía de la cuenca hidrográfica. Incluyen parámetros como la elevación media, la elevación máxima, la elevación mínima, la pendiente media y la pendiente máxima.
- **Parámetros de red de drenaje:** Estos parámetros describen la distribución de los ríos y arroyos dentro de la cuenca hidrográfica. Incluyen parámetros como la longitud de la red de drenaje, el número de cauces, el número de orden de cauce y la densidad de drenaje.

Para facilitar la visualización y el análisis de estos datos, se incluye a continuación la Tabla 4 Parámetros morfométricos que resume la información proporcionada en el libro de Guerra (2015):

Tabla 4 Parámetros morfométricos

Nombre del parámetro morfométrico	Definición	Fórmula de cálculo	Unidad de medida	Comentarios
Factor de forma (Kf)	Relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de su semilongitud mayor.	$F = A / (L_{\text{máx}})^2$	Sin unidades	Describe la forma general de la cuenca.
Índice de alargamiento (IA)	Relación entre la semilongitud mayor y la semilongitud menor de la cuenca.	$L = L_{\text{máx}} / L_{\text{mín}}$	Sin unidades	Describe la extensión de la cuenca en la dirección de su semilongitud mayor.
Índice de compacidad (Kc)	Relación entre el área de la cuenca y el área de un círculo de igual radio.	$K = A / (\pi R^2)$	Sin unidades	Describe la compactibilidad de la cuenca.
Altitud Media	Altura media de la cuenca sobre el nivel del mar.	$H = \Sigma(h) / N$	Metros	Describe la elevación general de la cuenca.
Desnivel altitudinal	Diferencia entre la cota máxima y la cota mínima de la cuenca.	$D = h_{\text{máx}} - h_{\text{mín}}$	Metros	Describe la variación de la elevación de la cuenca.
Pendiente de la cuenca	Relación entre la diferencia de altura y la distancia horizontal entre dos puntos de la cuenca.	$P = \Delta h / \Delta x$	Sin unidades	Describe la pendiente general de la cuenca.
Longitud de la red hídrica	Longitud total de todos los cauces de la cuenca.	$L = \Sigma l$	Metros	Describe la longitud total de la red de drenaje de la cuenca.
La Densidad de corrientes	Relación entre la longitud de la red de drenaje y el área de la cuenca.	$D = L / A$	Sin unidades	Describe la densidad de la red de drenaje de la cuenca.
Orden de la red hídrica	Grado de ramificación de la red de drenaje.	$O = 1 + n$	Sin unidades	Describe la complejidad de la red de drenaje de la cuenca.
Densidad de Drenaje	Relación entre la longitud de todos los cauces de un orden determinado y el área de la cuenca.	$D_{mo} = L_{mo} / A$	Sin unidades	Describe la densidad de los cauces de un orden determinado.

Fuente: Elaboración propia.

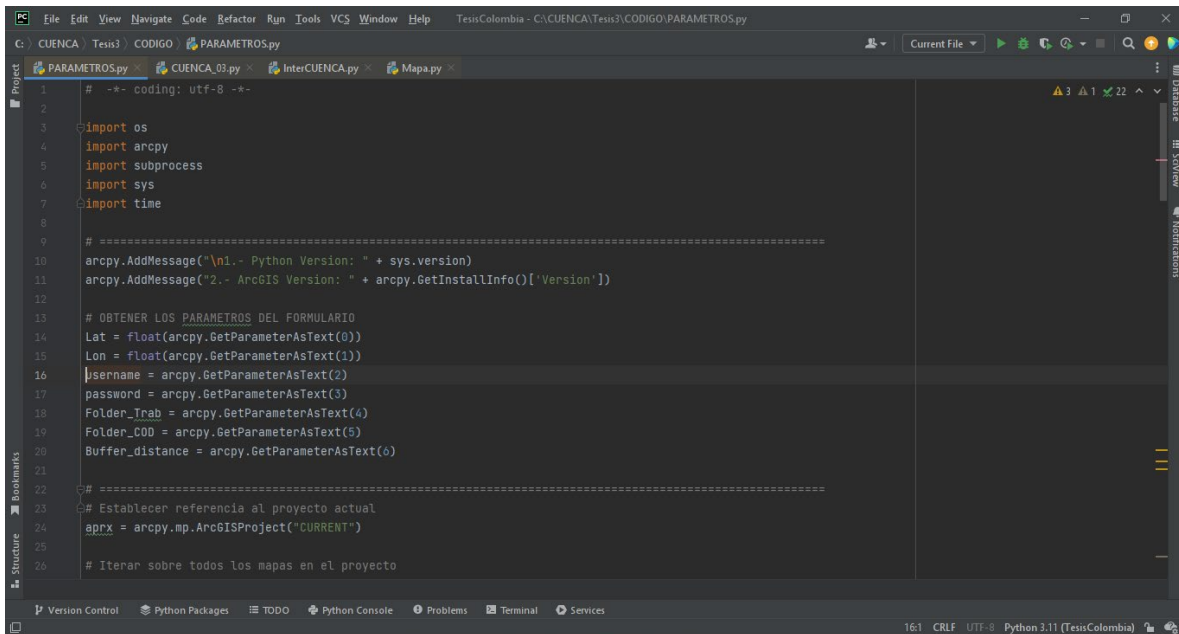
Esta tabla proporciona una referencia visual y organizada algunos de los parámetros morfométricos y sus definiciones, fórmulas de cálculo, unidades de medida y comentarios asociados.

6.2 Objetivo 2: Diseñar una interfaz hidrogeomática para el cálculo de los principales parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica en una cuenca piloto: Caso de estudio cuenca río Palacé (Cauca, Colombia)

6.2.1 Fase de inicial

6.2.1.1 Elaboración del código en Python

La elección de utilizar Python a través de PyCharm Community en nuestro estudio se basó en su accesibilidad sin costo, la versatilidad de Python para diversas tareas, su integración con bibliotecas GIS esenciales para análisis hidrológico, y el entorno de PyCharm que favorece un desarrollo iterativo gracias a su amplio diccionario de palabras. Esto nos permite acceder a una amplia gama de funciones y datos geospaciales necesarios para nuestro trabajo, simplificando así el proceso de análisis y visualización, además de acelerar la escritura y depuración de código, como se evidencia en la siguiente ilustración.



```
1  -*- coding: utf-8 -*-
2
3  import os
4  import arcpy
5  import subprocess
6  import sys
7  import time
8
9  # =====
10 arcpy.AddMessage("\n1.- Python Version: " + sys.version)
11 arcpy.AddMessage("\n2.- ArcGIS Version: " + arcpy.GetInstallInfo()['Version'])
12
13 # OBTENER LOS PARAMETROS DEL FORMULARIO
14 Lat = float(arcpy.GetParameterAsText(0))
15 Lon = float(arcpy.GetParameterAsText(1))
16 Username = arcpy.GetParameterAsText(2)
17 Password = arcpy.GetParameterAsText(3)
18 Folder_Trab = arcpy.GetParameterAsText(4)
19 Folder_COD = arcpy.GetParameterAsText(5)
20 Buffer_distance = arcpy.GetParameterAsText(6)
21
22 # =====
23 # Establecer referencia al proyecto actual
24 aprx = arcpy.mp.ArcGISProject("CURRENT")
25
26 # Iterar sobre todos los mapas en el proyecto
```

Ilustración 4 Entorno PyCharms

Esta decisión deliberada buscó aprovechar al máximo las capacidades de estas herramientas para el desarrollo eficiente de nuestra interfaz hidrogeomática.

6.2.1.1.1 Introducción de las bibliotecas y módulos necesarios

En la primera parte del código, importamos varios módulos y bibliotecas, cada uno con un propósito específico.

- **os**: Este módulo se utiliza para interactuar con el sistema operativo, lo que es esencial para crear, modificar o borrar directorios y archivos.
- **arcpy**: Es una biblioteca que proporciona funcionalidades geoespaciales.
- **subprocess**: Este módulo permite que el script ejecute comandos en el shell.
- **sys**: Se utiliza para acceder a algunas variables utilizadas por el intérprete y para interactuar con el sistema.
- **time**: Este módulo se usa para manejar el tiempo; sin embargo, no se usa en este fragmento de código.

La biblioteca `arcpy` es crucial para cualquier operación que implique manipulación de datos espaciales, como la generación de DEM (Modelo Digital de Elevación), delineación de cuencas, etc.

```
import os
import arcpy
import subprocess
import sys
import time
```

Ilustración 5 bibliotecas y módulos de arcpy

El uso de bibliotecas especializadas como arcpy permite el acceso a funcionalidades GIS que son fundamentales para el manejo de datos espaciales.

6.2.1.1.2 Información del Sistema y Parámetros del Usuario

Obtención de los parámetros introducidos por el usuario como la latitud, longitud, nombre de usuario, contraseña, y otros detalles específicos del proyecto.

```
Lat = float(arcpy.GetParameterAsText(0))
Lon = float(arcpy.GetParameterAsText(1))
username = arcpy.GetParameterAsText(2)
password = arcpy.GetParameterAsText(3)
...
```

Ilustración 6 Parámetros del Usuario

Capturar la latitud y longitud permite focalizar el área de estudio, lo cual es crucial en estudios hidrológicos. Es común requerir de un servidor para descargar datos hidrometeorológicos, por lo que los parámetros de usuario y contraseña son relevantes.

6.2.1.1.3 Limpieza del entorno

La siguiente sección se centra en el entorno, donde se elimina cualquier capa previa de los mapas en el proyecto actual.

```
aprx = arcpy.mp.ArcGISProject("CURRENT")
for mapa in aprx.listMaps():
    for lyr in mapa.listLayers():
        mapa.removeLayer(lyr)
```

Ilustración 7 Limpieza del entorno

Esta sección es importante para asegurar que el entorno esté limpio.

6.2.1.1.4 Estructura de Archivos y Carpetas

Aquí, el código crea una estructura de carpetas para guardar los resultados del análisis, lo que es importante para una gestión efectiva de datos en proyectos complejos. También crea una Geodatabase para manejar eficientemente los datos espaciales.

```
Folder_Param = os.path.join(Folder_Trab, 'PARAMETROS')
os.makedirs(Folder_Param, exist_ok=True)
...
GDB = os.path.join(Folder_Geo, 'Cuenca.gdb')
if not arcpy.Exists(GDB):
    arcpy.CreateFileGDB_management(os.path.dirname(GDB), os.path.basename(GDB))
```

Ilustración 8 Estructura de Archivos y Carpetas

La organización en carpetas y en una Geodatabase favorece la eficiencia del flujo de trabajo en análisis complejos, como los que se realizan para simular fenómenos hidrológicos y/o hidráulico

6.2.1.1.5 Carga de Parámetros desde un Archivo

```
with open(archivo_parametros, "r") as f:
    valores = f.readlines()
Lat = float(valores[0].strip())
Lon = float(valores[1].strip())
...
```

Ilustración 9 Carga de Parámetros desde un Archivo

El uso de un archivo de texto para cargar parámetros permite una mayor facilidad para realizar pruebas de sensibilidad, comunes en estudios hidrológicos, en los cuales se analizan varios escenarios con diferentes parámetros.

6.2.1.1.6 Ejecución de Scripts

```
for script in scripts:
    script_path = os.path.join(Folder_COD, script)
    with open(script_path, 'r', encoding='utf-8') as file:
        exec(file.read())
```

Ilustración 10 Ejecución de Scripts

La ejecución de múltiples scripts segmenta el análisis en partes manejables y modulares.

6.2.2 Fase de Análisis (Análisis Territorial)

6.2.2.1 Fase 1: Estructuración de la información de los SIG

6.2.2.1.1 Crear punto Aforo

En esta sección se crea un punto geoespacial llamado "Aforo" usando las coordenadas de longitud y latitud proporcionadas. El punto se almacena en una Geodatabase (GDB). Este punto es crucial para definir una estación de aforo donde se realizarán mediciones hidrométricas.

```
point = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(Lon, Lat), sr)
Af = os.path.join(GDB, "Aforo")
arcpy.CopyFeatures_management(point, Af)
```

Ilustración 11 Crear punto Aforo

Este fragmento crea un punto geoespacial que representa un sitio de aforo.

6.2.2.1.2 Referencia Espacial y Coordenadas

```
desc = arcpy.Describe(Af)
spatial_ref = desc.spatialReference
```

Ilustración 12 Referencia Espacial y Coordenadas

La referencia espacial es fundamental para asegurarse de que todas las capas geoespaciales sean compatibles entre sí. *spatial_ref* proporciona el sistema de coordenadas que será fundamental para futuras transformaciones espaciales.

6.2.2.1.3 Crear buffer

Se crea un buffer alrededor del punto "Aforo", lo que representa el área de estudio para la descarga de imágenes satelitales. Este buffer es esencial para determinar la región geográfica a evaluar, lo cual es vital para estudios de flujo de agua y modelado hidrológico.

```
arcpy.Buffer_analysis(Af, Buffer, Dist, "FULL", "ROUND", "NONE", "", "PLANAR")
```

Ilustración 13 Crear buffer

En hidrología, es común analizar las áreas circundantes a un punto de interés como un aforo. El buffer permite hacer justamente eso, analizando variables como el uso del suelo, la morfología del terreno, o el flujo de agua dentro del área.

6.2.2.1.4 Conexión a Alaska Satellite Facility

Se establece una conexión con Alaska Satellite Facility (ASF) para descargar imágenes satelitales. Esta sección asegura que el usuario pueda acceder a imágenes de alta resolución que son fundamentales para análisis hidrológico avanzado.

```
user_pass_session = asf.ASFSession().auth_with_creds(username, password)
```

Ilustración 14 Conexión a Alaska Satellite Facility

La conexión a la Alaska Satellite Facility (ASF) es crucial para obtener imágenes satelitales que podrían ser utilizadas en el análisis de fenómenos hidrológicos como inundaciones, erosiones, etc.

6.2.2.1.5 Definir los vértices del cuadrado

Se calcula el área que rodea el punto "Aforo", basado en el buffer previamente definido. Esto es vital para obtener imágenes de satélite que cubran toda el área de interés.

```
lado_distance_degrees_lat = lado_distance / km_per_degree_latitude
```

Ilustración 14 Definir los vértices del cuadrado

Este bloque de código convierte una distancia en kilómetros a grados de latitud. Es importante para definir un área de interés alrededor del punto de aforo que se ajuste a las escalas y resoluciones apropiadas.

6.2.2.1.6 Coordenadas de los vértices del cuadrado

Aquí se definen las coordenadas de los vértices del área de interés. Esto es decisivo para establecer una zona precisa para descargar imágenes satelitales.

```
vertices = [  
    (Lon - lado_distance_degrees_lon / 2, Lat - lado_distance_degrees_lat /  
    (Lon + lado_distance_degrees_lon / 2, Lat - lado_distance_degrees_lat /  
    (Lon + lado_distance_degrees_lon / 2, Lat + lado_distance_degrees_lat /  
    (Lon - lado_distance_degrees_lon / 2, Lat + lado_distance_degrees_lat /  
    ]
```

Ilustración 15 Coordenadas de los vértices del cuadrado

6.2.2.1.7 Búsqueda de imágenes en ASF

Se realiza una búsqueda de imágenes satelitales que cumplan con ciertos criterios y que se intercepten con el área definida.

```

results = asf.geo_search(
    intersectsWith=wkt,
    platform=asf.PLATFORM.ALOS,
    start='2010-01-01',
    end='2011-04-21',
    maxResults=200
)

```

Ilustración 16 Búsqueda de imágenes en ASF

Este código busca imágenes satelitales en el repositorio de la ASF que intersecten con el área definida alrededor del punto de aforo.

6.2.2.1.8 Filtrado y Descarga de Imágenes

Se aplican filtros adicionales a las imágenes para garantizar que se ajustan a los requisitos del estudio, como el tipo de haz ('FBS') y la resolución ('RTC_HI_RES'). Luego se descargan estas imágenes.

```

filtered_results = [result for result in results
    if result.properties.get('beamModeType') == 'FBS'
    and 'RTC_HI_RES' in result.properties.get('beamModeType')
    and 'RT2' in result.properties.get('fileName')]

```

Ilustración 17 Filtrado y Descarga de Imágenes

6.2.2.1.9 Descomprimir y cargar las imágenes

Las imágenes descargadas se descomprimen y cargan en el área de estudio en la Geodatabase. Cada imagen se evalúa para asegurarse de que cumpla con los requisitos de análisis, como ser un archivo TIFF y contener información DEM (Modelo de Elevación Digital).

```

file_paths = glob.glob(os.path.join(Folder_IMAGEN, "*.zip"))

for zip_file_path in file_paths:
    if is_zipfile(zip_file_path):
        with zipfile.ZipFile(zip_file_path, 'r') as zip_ref:
            zip_ref.extractall(AREA_ESTUDIO)

```

Ilustración 18 Descomprimir y cargar las imágenes

6.2.2.1.10 Crear con las imágenes descargadas el ráster

En esta última sección, se realiza un mosaico de todos los rasters descargados para crear un Modelo de Elevación Digital (DEM) unificado.

```
arcpy.MosaicToNewRaster_management(rasters,  
    GDB,  
    output_raster,  
    "",  
    "16_BIT_SIGNED",  
    "30",  
    "1",  
    "LAST",  
    "FIRST")
```

Ilustración 19 Crear con las imágenes descargadas el ráster

Esta parte crea un Mosaico Raster utilizando las imágenes descargadas. Este Mosaico Raster es un insumo fundamental para modelar fenómenos hidráulicos y realizar análisis de flujo de agua, elevación, etc.

6.2.2.1.11 Proyecta el punto de Aforo

En esta sección, se toma el shapefile de punto de aforo (`Af`) y se proyecta a un nuevo sistema de coordenadas. Un pequeño error en la geolocalización podría llevar a estimaciones erradas que afecten todo un proyecto de manejo de aguas.

```
arcpy.management.Project(Af, out_data_Af, 'PROJCS["WGS_1984_UTM_Zone_18N", ...])
```

Ilustración 20 Proyecta el punto de Aforo

Aquí, se emplea la proyección UTM, la cual es una elección adecuada para representar distancias y áreas con precisión aceptable en regiones que no son demasiado grandes, como podría ser una cuenca hidrográfica.

6.2.2.1.12 Consultar y Mostrar la Referencia Espacial

Se emplea el módulo `arcpy.Describe()` para obtener metadatos del shapefile.

```
desc = arcpy.Describe(Af)  
spatial_ref = desc.spatialReference
```

Ilustración 21 Consultar y Mostrar la Referencia Espacial

6.2.2.1.13 Manipulación y Proyección de Buffer

Similar a la Sección anterior, pero para el buffer que podría estar rodeando un punto de interés, como un pozo o una estación de medición.

```
in_data_Buffer = Buffer
out_data_Buffer = os.path.join(GDB, "Buffer_P")

arcpy.Project_management(in_data_Buffer, out_data_Buffer, sr_utm)

Buffer = out_data_Buffer

desc = arcpy.Describe(Buffer)
spatial_ref = desc.spatialReference
```

Ilustración 22 Manipulación y Proyección de Buffer

6.2.2.1.14 Verificación de la Existencia de Archivos Proyectados

Esta sección es de suma importancia para asegurar que el proceso de proyección se realizó de manera exitosa.

```
if arcpy.Exists(out_data_Af) and arcpy.Exists(out_data_Buffer):
    arcpy.AddMessage("Los archivos proyectados existen.")

    if arcpy.Exists(in_data_Af):
        arcpy.Delete_management(in_data_Af)
    if arcpy.Exists(in_data_Buffer):
        arcpy.Delete_management(in_data_Buffer)
```

Ilustración 23 Verificación de la Existencia de Archivos Proyectados

6.2.2.1.15 Extracción por Máscara y Cálculo del Área del Buffer

En estudios hidrológicos, a menudo se realiza una extracción por máscara para concentrarse en un área específica de interés.

```
DEM_AE_01 = arcpy.sa.ExtractByMask(DEM_AE_00, Buffer)
AREA_ESTUDIO_mapa.addDataFromPath(DEM_AE_01)
```

Ilustración 24 Extracción por Máscara y Cálculo del Área del Buffer

El área del buffer se calcula y se extrae para usar en cálculos en siguiente proceso.

6.2.2.1.16 Guardado y Administración de Datos Espaciales

Dado que estamos trabajando con grandes conjuntos de datos geoespaciales, es vital que se gestionen de manera eficiente. Aquí se guarda la información relevante en una Geodatabase ('GDB').

```
DEM_AE_01.save(os.path.join(GDB, "DEM_AE_01"))
```

Ilustración 25 Guardado y Administración de Datos Espaciales

6.2.2.1.17 Cambio de Símbolos y Visualización

En presentaciones académicas y para fines de publicación, la representación visual precisa de los datos es importante. Aquí se ajusta la simbología de las capas para facilitar la interpretación visual.

```
def adjust_symbology(added_layer, color_rgb):
    symbology = added_layer.symbology

    if symbology.renderer is not None and symbology.renderer.type
        symbol = symbology.renderer.symbol
        if symbol:
            symbol.outlineColor = {"RGB": [255, 0, 0, 100]}
            symbol.color = {"RGB": color_rgb}
            symbol.outlineWidth = 2
            symbology.renderer.symbol = symbol
            added_layer.symbology = symbology
```

```

adjust_symbology(buffer_layer, [255, 255, 255, 0])

for layer in mapa.listLayers():
    if layer.name == "Buffer" and layer.symbology.renderer.symbol.color != 0:
        mapa.removeLayer(layer)

```

Ilustración 26 Cambio de Símbolos y Visualización

6.2.3 Fase de Diseño (Análisis Territorial)

6.2.3.1 Fase 2: Pre-Procesamiento de la Información

6.2.3.1.1 Fill

Esta sección tiene como objetivo eliminar los sumideros en el Modelo Digital de Elevación (DEM). Los sumideros pueden causar errores en la modelación del flujo de agua.

```

Fill_AE_Ras = os.path.join(GDB, "Fill_AE")
Fill_AE = arcpy.sa.Fill(DEM_AE_01, None)
Fill_AE.save(Fill_AE_Ras)

```

Ilustración 27 Fill del Flujo del área de estudio

En la hidrología computacional, el tratamiento de sumideros en un DEM es decisivo para lograr una simulación precisa del flujo superficial. Al hacerlo, se asegura que el flujo de agua tenga una trayectoria continua.

6.2.3.1.2 Dirección del Flujo

Establecer la dirección del flujo hídrico en cada celda del DEM corregido.

```

DIR_AE_Ras = os.path.join(GDB, "DIR_AE")
DIR_AE = arcpy.sa.FlowDirection(Fill_AE)
DIR_AE.save(DIR_AE_Ras)

```

Ilustración 28 Dirección del Flujo del área de estudio

La dirección del flujo es la piedra angular para cualquier análisis hidrológico posterior. Se requiere para calcular la acumulación de flujo y, eventualmente, la red de drenaje.

6.2.3.1.3 Acumulación de Flujo

6.2.3.1.3.1 Calcular la cantidad de celdas que fluyen hacia cada celda del DEM.

```
Acc_AE_Ras = os.path.join(GDB, "Acc_AE")
Acc_AE = arcpy.sa.FlowAccumulation(DIR_AE)
Acc_AE.save(Acc_AE_Ras)
```

Ilustración 29 Acumulación de Flujo del área de estudio

La acumulación de flujo permite modelar la cantidad probable de agua que podría pasar por cada celda, que es primordial para identificar ríos y arroyos dentro del área de estudio.

6.2.3.1.3.2 Umbral de Acumulación de Flujo

El umbral de acumulación de flujo es un valor que determina qué celdas de un DEM se considerarán como parte de una red de drenaje. Este umbral se establece en función de la cantidad de flujo acumulado que pasa por una celda en particular. En términos simples, es una medida de cuántas celdas "contribuyen" al flujo de una celda específica.

6.2.3.1.3.3 Cálculo del Número de Celdas

El primer paso en el cálculo del umbral de acumulación de flujo es determinar el número total de celdas en el DEM. Esto se puede hacer fácilmente utilizando herramientas de arcpy, donde el número de filas y columnas del raster puede consultarse mediante la función `arcpy.GetRasterProperties_management()`.

```
# Obtener el número de filas y columnas del DEM
num_rows = arcpy.GetRasterProperties_management(input_dem, "ROWCOUNT").getOutput(0)
num_cols = arcpy.GetRasterProperties_management(input_dem, "COLUMNCOUNT").getOutput(0)

# Calcular el número total de celdas
num_cells = int(num_rows) * int(num_cols)
```

Ilustración 30 Cálculo del Número de Celdas del área de estudio

6.2.3.1.3.4 Área de Estudio

El siguiente paso es calcular el área total de la cuenca de estudio. Esto también puede realizarse mediante herramientas de GIS que permiten la medición de áreas.

```
with arcpy.da.SearchCursor(Buffer, "AREA") as cursor:
    for row in cursor:
        Area_AE = row[0]
```

Ilustración 31 Área total de la cuenca

6.2.3.1.3.5 Relación del Área y el número de Celdas

Una vez que se tienen ambos valores (el área total de la cuenca y el número total de celdas del DEM), se puede calcular el umbral de acumulación de flujo. Este umbral a menudo se determina como una fracción del número total de celdas, ponderado por el área de la cuenca.

```
UM_Acc = round((Area_AE / num_cells), 2)
```

Ilustración 32 Relación del Área y el número de Celdas

En este método, se asume que la relación entre el área de la cuenca y el número de celdas es una representación válida de la importancia hidrológica de ciertas áreas dentro de la cuenca.

6.2.3.1.4 StreamLink

Enumerar y conectar los segmentos de corriente en una red fluvial.

```
SL_AE_Ras = os.path.join(GDB, "SL_AE")
SL_AE = arcpy.sa.StreamLink(CON_UM, DIR_AE)
SL_AE.save(SL_AE_Ras)
```

Ilustración 33 StreamLink del área de estudio

StreamLink es importante para identificar y separar diferentes segmentos de una red de drenaje, lo cual es crucial para conocer la ordenación de corrientes.

6.2.3.1.5 StreamOrder

Asignar un orden a las corrientes según la metodología de Strahler.

```
S0_AE_Ras = os.path.join(GDB, "S0_AE")
S0_AE = arcpy.sa.StreamOrder(SL_AE, DIR_AE, "STRAHLER")
S0_AE.save(S0_AE_Ras)
```

Ilustración 34 StreamOrder del área de estudio

El orden de las corrientes es una forma de clasificar la jerarquía de la red fluvial y es útil para entender la estructura de la cuenca y para futuros análisis hidrológicos.

6.2.3.1.6 StreamToFeature

Convertir la información de la red de drenaje en un conjunto de datos vectoriales.

```
RH_AE = os.path.join(GDB, "RH_AE")
arcpy.sa.StreamToFeature(SO_AE, DIR_AE, RH_AE, "SIMPLIFY")
```

Ilustración 35 StreamToFeature del área de estudio

La conversión a un conjunto de datos vectoriales facilita la manipulación y análisis geoespacial en etapas posteriores y permite una integración más fácil con otros datos geoespaciales.

6.2.3.1.7 Intercepción de la red hídrica

El siguiente código tiene como objetivo principal determinar, de manera precisa y eficiente, interceptar el punto de control dentro de la red hidráulica en un solo paso. La capacidad de identificar de manera instantánea si un punto está dentro de la red hidráulica agiliza significativamente la definición de los límites de la cuenca.

6.2.3.1.7.1 Crear el punto de Aforo

El objetivo aquí es crear un punto de aforo en una ubicación específica. Este punto es esencial porque servirá como referencia para mediciones de flujo de agua en un río o arroyo.

```
arcpy.AddMessage(f'\n2.8.1- Crear punto Aforo:\n')
point = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(Lon, Lat), sr_wgs)
Af = os.path.join(GDB, "Aforo")
arcpy.CopyFeatures_management(point, Af)
AREA_ESTUDIO_mapa.addDataFromPath(Af)
```

Ilustración 36 Crear el punto de Aforo

El punto de aforo es esencial en estudios relacionados con la cuantificación de caudales, niveles de agua y parámetros similares.

6.2.3.1.7.2 Obtener la Referencia Espacial del punto de aforo

Obtener la referencia espacial del punto de aforo para asegurar la correcta geolocalización del punto en el espacio.

```
desc = arcpy.Describe(Af)
spatial_ref = desc.spatialReference
arcpy.AddMessage(f"\n2.8.2- Referencia Espacial de Af: {spatial_ref.name}")
```

```
with arcpy.da.SearchCursor(Af, ['SHAPE@XY']) as cursor:
    for row in cursor:
        x, y = row[0]
        arcpy.AddMessage(f"\nCoordenadas de Af: \n"
                          f"X = {x}, \n"
                          f"Y = {y}\n")
```

Ilustración 37 Obtener la Referencia Espacial del punto de aforo

Conocer el sistema de referencia espacial es crucial para la coherencia del análisis.

6.2.3.1.7.3 Proyección a UTM Zona 18 Norte

Transformar las coordenadas del punto de aforo al sistema de coordenadas UTM Zona 18 Norte.

```
Af_o = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(Lon, Lat), sr_wgs)
Af_utm = Af_o.projectAs(sr_utm)
```

Ilustración 38 Proyección a UTM Zona 18 Norte

Los sistemas de coordenadas proyectadas como UTM son más adecuados para representar distancias y áreas en modelos hidráulicos y hidrológicos que los sistemas geográficos, lo cual es crucial para análisis precisos.

6.2.3.1.7.4 Búsqueda del Segmento Más Cercano

Esta parte es esencial para encontrar el segmento de río más cercano al punto de aforo. Esto es crítico para estudios de flujo de agua y modelado hidrológico.

```
min_distance = float('inf')
nearest_segment = None
```

Ilustración 39 Búsqueda del Segmento Más Cercano

El punto de aforo debe estar lo más cerca posible de un segmento de la red hidrográfica para que los datos recopilados sean representativos.

6.2.3.1.7.5 Encontrar el Punto Más Cercano

Esta sección tiene como objetivo encontrar el punto más cercano en el segmento más cercano al punto de aforo. Esto permite una precisión significativa en la medición y modelado del flujo de agua.

```
if nearest_segment_geom is None:
    arcpy.AddError("No se encontró el segmento más cercano.")
```

Ilustración 40 Encontrar el Punto Más Cercano

Una vez identificado el segmento más cercano, se necesita encontrar el punto exacto en ese segmento que esté más cerca del punto de aforo para una precisión óptima.

6.2.3.1.7.6 Actualizar las Coordenadas del Punto de Aforo

Después de encontrar el punto más cercano, se actualizan las coordenadas del punto de aforo. Esto garantiza que el punto de aforo sea el más adecuado para las mediciones.

```
with arcpy.da.UpdateCursor(Af, ['SHAPE@XY']) as cursor:
    for row in cursor:
        row[0] = (nearest_point_on_segment.X, nearest_point_on_segment.Y)
        cursor.updateRow(row)
```

Ilustración 41 Actualizar las Coordenadas del Punto de Aforo

Esta actualización garantiza que los datos de aforo recopilados sean lo más precisos posible.

6.2.3.1.8 Delimitación de la cuenca

Esta sección de código tiene como objetivo calcular la cuenca de drenaje que contribuye a un punto específico en un estudio hidrológico o hidráulico.

```
Cca_Ras = arcpy.sa.Watershed("DIR_AE", "Af_01", "OBJECTID")
Cca_Ras.save(os.path.join(GDB, "Cca_Ras"))
```

Ilustración 42 Delimitación de la cuenca

6.2.3.1.9 Intercepción de la cuenca

Inicializar la representación espacial del área de estudio para la investigación.

```
AREA_ESTUDIO_mapa.addDataFromPath(DEM_AE_00)
AREA_ESTUDIO_mapa.addDataFromPath(Cca_SHP)
```

Ilustración 43 Intercepción de la cuenca

Aquí se cargan los datos de Modelo Digital de Elevación (DEM) y el archivo Shapefile del área de estudio (Cca_SHP) al mapa. Esto es crucial para cualquier análisis subsiguiente, ya que el DEM proporcionará información altimétrica.

6.2.3.1.9.1 Inicialización de Variables y Bucle Principal

Establecer las variables y condiciones iniciales para el análisis geoespacial de buffers y DEMs (Modelos de Elevación Digital).

```
counter = 1
buffer_distance = 15 # Distancia inicial del buffer en km
continue_flag = True
# ...
while continue_flag:
    # Código de bucle
```

Ilustración 44 Inicialización de Variables y Bucle Principal

Establecer las variables iniciales y condiciones de control para automatizar el proceso de extracción y análisis.

6.2.3.1.9.2 Proceso iterativo

Realizar un proceso iterativo que busca establecer cuando ya no se da la intersección entre un buffer alrededor de una entidad geográfica llamada "Cca_SHP" y una capa llamada "Buffer" en un sistema de información geográfica (SIG)

```
while continue_flag:
    # Realizar el buffer
    buffer_name = f"Buffer_Cca_01"
    arcpy.Buffer_analysis("Cca_SHP", os.path.join(GDB, buffer_name), f"{buffer_distance} Kilometers")

    # Agregar el buffer al mapa
    arcpy.AddMessage(f"Agregando {buffer_name} al mapa.")
    mapa.addDataFromPath(os.path.join(GDB, buffer_name))

    # Comprobar la intersección
    arcpy.SelectLayerByLocation_management("Buffer", "INTERSECT", buffer_name)
    selected_count = int(arcpy.GetCount_management("Buffer").getOutput(0))
    arcpy.AddMessage(f"Número de entidades seleccionadas en 'Buffer': {selected_count}")

    if selected_count > 0:
        # Aumentar la distancia del buffer en 5 km para la próxima iteración
        buffer_distance += 5

        # Realizar una extracción por máscara del DEM
        dem_name = f"DEM_AE_01"
        arcpy.AddMessage(f"Extrayendo {dem_name} usando {buffer_name} como máscara.")
        arcpy.gp.ExtractByMask_sa("DEM_AE_00", buffer_name, os.path.join(GDB, dem_name))

        # Agregar el nuevo DEM al mapa para visualizar
        arcpy.AddMessage(f"Agregando {dem_name} al mapa.")
        mapa.addDataFromPath(os.path.join(GDB, dem_name))
```

Ilustración 45 Proceso iterativo

El bucle se ejecuta repetidamente, aumentando gradualmente el tamaño del buffer en incrementos de 5 kilómetros hasta que se encuentre una intersección con la capa "Buffer". Cuando se encuentra la intersección, el código realiza una extracción de un Modelo Digital de Elevación (DEM) usando el buffer como máscara y agrega este nuevo DEM al mapa para su visualización.

6.2.3.1.9.3 Fill del DEM

Eliminar las depresiones o "hoyos" del DEM para un flujo de agua más realista.

```
Fill_AE_Ras = os.path.join(GDB, "Fill_AE")
Fill_AE = arcpy.sa.Fill(DEM_AE_01, None)
Fill_AE.save(Fill_AE_Ras)
```

Ilustración 46 Fill del DEM

Este paso es crucial para evitar que el modelo interprete erróneamente áreas de acumulación de agua en el terreno.

6.2.3.1.9.4 Dirección del Flujo

Calcular la dirección del flujo sobre el DEM corregido.

```
DIR_AE_Ras = os.path.join(GDB, "DIR_AE")
DIR_AE = arcpy.sa.FlowDirection(Fill_AE)
DIR_AE.save(DIR_AE_Ras)
```

Ilustración 47 Dirección del Flujo

Entender la dirección del flujo de agua es esencial para modelar correctamente la hidrología de la cuenca.

6.2.3.1.9.5 Acumulación del Flujo

Calcular la acumulación de flujo de agua en el DEM.

```
Acc_AE_Ras = os.path.join(GDB, "Acc_AE")
Acc_AE = arcpy.sa.FlowAccumulation(DIR_AE)
Acc_AE.save(Acc_AE_Ras)
```

Ilustración 48 Acumulación del Flujo

La acumulación de flujo es crucial para identificar las áreas donde el agua se acumulará en mayor cantidad.

6.2.3.1.9.6 Umbral de Acumulación

Determinar el umbral de acumulación para diferenciar cauces de áreas no relevantes.

```
UM_Acc = round((Area_AE / num_cells), 2)
# ...
```

Ilustración 49 Umbral de Acumulación

Establecer un umbral nos permite filtrar y enfocar el análisis en las áreas más relevantes para el flujo de agua.

6.2.3.1.9.7 StreamLink y StreamOrder

Identificar y ordenar los cauces y sub-cuencas dentro del área de estudio.

```
SL_AE = arcpy.sa.StreamLink(CON_UM, DIR_AE)
# ...
SO_AE = arcpy.sa.StreamOrder(SL_AE, DIR_AE, "STRAHLER")
```

Ilustración 50 StreamLink y StreamOrder

Estas métricas nos permiten hacer un análisis jerárquico de la red fluvial, lo que es crucial para entender la dinámica hidrológica de la región.

6.2.3.1.9.8 StreamToFeature

Convertir el ráster de orden de flujo a un conjunto de características (*features*) vectoriales.

```
arcpy.sa.StreamToFeature(SO_AE, DIR_AE, RH_AE, "SIMPLIFY")
```

Ilustración 51 StreamToFeature

El conjunto de características vectoriales es más fácil de manipular para análisis posteriores, como la determinación de áreas de inundación o el diseño de estructuras hidráulicas.

6.2.3.1.9.9 Delimitación de la Cuenca

Identificar y delimitar la cuenca hidrográfica del área de estudio.

```
Cca_Ras = arcpy.sa.Watershed("DIR_AE", "Af_01", "OBJECTID")
# ...
```

Ilustración 52 Delimitación de la Cuenca

6.2.3.2 *Análisis de la Cuenca hidrología*

6.2.3.2.1 Extracción por máscara entre DEM y la cuenca

Extraer una subsección de un modelo digital del terreno (DEM) que está dentro del área de la cuenca definida.

```
DEM_Cca = os.path.join(GDB, "DEM_Cca")
arcpy.gp.ExtractByMask_sa(DEM_AE_01, Cca_SHP, DEM_Cca)
Cuenca_mapa.addDataFromPath(DEM_Cca)
```

Ilustración 53 Extracción por máscara entre DEM y la cuenca

La precisión de cualquier modelo hidrológico es altamente dependiente de la calidad del DEM subyacente. Al extraer solo la topografía de la cuenca de interés, optimizamos la eficiencia computacional y la precisión del análisis posterior.

6.2.3.2.2 Realizar un llenado al archivo DEM de la cuenca

Realizar una operación de llenado en el DEM para tratar los huecos o depresiones que pueden generar errores en el análisis del flujo de agua.

```
Fill_Cca = os.path.join(GDB, "Fill_Cca")
fill_result = arcpy.sa.Fill(DEM_Cca, None)
fill_result.save(Fill_Cca)
```

Ilustración 54 Realizar un llenado al archivo DEM de la cuenca

Las depresiones en un DEM suelen ser errores o artefactos de los datos, y pueden interferir con los análisis de dirección y acumulación de flujo. La operación de "Fill" es esencial para el modelado hidrológico posterior.

6.2.3.2.3 Realiza la Dirección de flujo de la cuenca

Calcular la dirección del flujo de agua en cada celda del DEM rellenado.

```
Dir_Cca_out = os.path.join(GDB, "Dir_Cca")
Dir_Cca = arcpy.sa.FlowDirection(Fill_Cca)
Dir_Cca.save(Dir_Cca_out)
```

Ilustración 55 Realiza la Dirección de flujo de la cuenca

La dirección del flujo es fundamental para entender cómo se distribuirá el agua en una cuenca durante eventos de lluvia o deshielo. Este es un paso preparatorio para el cálculo de la acumulación de flujo.

6.2.3.2.4 Realiza la Acumulación de flujo de la cuenca

Calcular el número de celdas que contribuyen al flujo en cada celda del DEM.

```
Acc_Cca_out = os.path.join(GDB, "Acc_Cca")
Acc_Cca = arcpy.sa.FlowAccumulation(Dir_Cca)
Acc_Cca.save(Acc_Cca_out)
```

Ilustración 56 Realiza la Acumulación de flujo de la cuenca

La acumulación de flujo es crucial para identificar áreas de alta escorrentía y posible erosión, lo cual es vital para el diseño de estructuras hidráulicas como presas o canales.

6.2.3.2.5 Realiza la Umbral de Acumulación de la cuenca

Determinar el umbral de acumulación para identificar corrientes significativas dentro de la cuenca.

```
UM_Acc_02 = (Area_Cca / num_cells)
UM_Acc_02 = round(UM_Acc_02, 0)
```

Ilustración 57 Realiza la Umbral de Acumulación de la cuenca

Un umbral de acumulación adecuado es crucial para identificar las vías fluviales principales y secundarias en el modelado de la cuenca.

6.2.3.2.6 Crear el ráster con la condicional de la cuenca

Identificar y numerar segmentos de flujo único en la cuenca utilizando el umbral de acumulación definido.

```
SL_Cca = arcpy.sa.StreamLink(Con_UM_Cca, Dir_Cca)
SL_Cca.save(os.path.join(GDB, "SL_Cca"))
```

Ilustración 58 Crear el ráster con la condicional de la cuenca

Esto permite una representación más detallada de las vías fluviales dentro de la cuenca y es un paso esencial antes de establecer el orden de las corrientes.

6.2.3.2.7 Crear el ráster con orden de las corrientes de la cuenca

Asignar un orden jerárquico a los segmentos de flujo.

```
S0_Cca = arcpy.sa.StreamOrder(SL_Cca, Dir_Cca, "STRAHLER")
S0_Cca.save(os.path.join(GDB, "S0_Cca"))
```

Ilustración 59 Crear el ráster con orden de las corrientes de la cuenca

El orden de las corrientes es un aspecto crítico en hidrología para la caracterización de la red fluvial de la cuenca.

6.2.3.2.8 Crear la red Hídrica de la cuenca

Crear una red fluvial de la cuenca para análisis posteriores.

```
RH_Cca = os.path.join(GDB, "RH_Cca")
arcpy.sa.StreamToFeature(S0_Cca, Dir_Cca, RH_Cca, "SIMPLIFY")
```

Ilustración 60 Crear la red Hídrica de la cuenca

La red fluvial es fundamental para el modelado y análisis de eventos hidrológicos como inundaciones y erosión del suelo.

6.2.4 Fase 3: Procesamiento de la Información - Análisis espacial el área de estudio

6.2.4.1 Calcular el Área y el Perímetro de la Cuenca

Este paso tiene como objetivo calcular el área y el perímetro de la cuenca en kilómetros cuadrados y kilómetros, respectivamente.

```

Area = arcpy.AddField_management(Cca_SHP, "Area", "Double")
Perimetro = arcpy.AddField_management(Cca_SHP, "Perimetro", "Double")
arcpy.CalculateField_management(Cca_SHP, "Area", "!SHAPE.AREA@SQUAREKILOMETERS!", "F
arcpy.CalculateField_management(Cca_SHP, "Perimetro", "!SHAPE.geodesicLength@KILOME
with arcpy.da.SearchCursor(Cca_SHP, ['Area', 'Perimetro']) as cursor:
    for row in cursor:
        Area, Perimetro = row
arcpy.AddMessage(f"\n 4.1 Area cuenca : {round(Area, 2)} Km²")
arcpy.AddMessage(f"\n 4.1 Perimetro : {round(Perimetro, 2)} Km")

```

Ilustración 61 Calcular el Área y el Perímetro de la Cuenca

El cálculo del área y el perímetro de la cuenca es esencial para comprender su tamaño y forma, lo que es fundamental en estudios hidrológicos. Estos valores proporcionan información básica sobre la cuenca y son necesarios para cálculos posteriores.

6.2.4.1.1 Calcular el Centroides de la Cuenca

Este paso tiene como objetivo calcular el centroide de la cuenca en coordenadas UTM y proyectarlo a coordenadas geodésicas (latitud y longitud).

```

Cca_Cen = os.path.join(GDB, "Cca_Cen")
Cca_CenWGS84 = os.path.join(GDB, "Cca_CenWGS84")
arcpy.management.FeatureToPoint("Cca_SHP", Cca_Cen, "CENTROID")
Cuenca_mapa.addDataFromPath(Cca_Cen)

```

Ilustración 62 Calcular el Centroides de la Cuenca

El centroide es el punto central de la cuenca y se utiliza en análisis posteriores, como el cálculo de la dirección del flujo y la ubicación de características importantes. La proyección en coordenadas geodésicas permite trabajar con datos geográficos en lugar de proyecciones cartesianas.

6.2.4.1.2 Calcular el Largo Máximo de la Cuenca

Este paso tiene como objetivo calcular el largo máximo de la cuenca en metros.

```

# 4.3 Calculo del Largo máximo de la cuenca en km
with arcpy.EnvManager(outputCoordinateSystem=sr_utm,
                      extent="Cca_SHP",
                      mask="Cca_SHP"):
    Dist1A = arcpy.sa.EucDistance("Af_01", None, 30, None, "PLANAR", None, None)
    Dist1A.save(os.path.join(GDB, "Dist1A"))
    raster1 = arcpy.Raster(Dist1A)
    Max1 = raster1.maximum
    Mean1 = raster1.mean
    Mean1_Km = Mean1 / 1000
    Max1_Km = Max1 / 1000

Cuenca_mapa.addDataFromPath(Dist1A)
arcpy.AddMessage(f"\n4.3 El largo máximo de la cuenca es: {round(Max1, 2)} en m")
arcpy.AddMessage(f"4.3 El largo máximo de la cuenca es: {round(Max1_Km, 2)} en Km\n")

```

Ilustración 63 Calcular el Largo Máximo de la Cuenca

El largo máximo de la cuenca es una medida importante para entender la geometría de la cuenca y se utiliza en la determinación de parámetros hidrológicos.

6.2.4.1.3 Calcular el Ancho Promedio de la Cuenca

Este paso tiene como objetivo calcular el ancho promedio de la cuenca en metros.

```

# 4.4 Calcular el ancho
# 4.4.1 Calcular la distancia euclidiana para el ancho

with arcpy.EnvManager(outputCoordinateSystem=sr_utm,
                      extent=Cca_SHP,
                      mask=Cca_SHP):
    Dist2A = arcpy.sa.EucDistance("Cca_Cen", None, 12.5, None, "PLANAR", None, None)
    Dist2A.save(os.path.join(GDB, "Dist2A"))
    raster2 = arcpy.Raster(Dist2A)
    Mean2 = raster2.mean
    Mean2_Km = Mean2 / 1000

# 4.4.3 Calcular el ancho promedio
Ancho = (Mean1 + Mean2) / 2
Ancho_Km = (Mean1_Km + Mean2_Km) / 2

Cuenca_mapa.addDataFromPath(Dist2A)
arcpy.AddMessage(f"\n4.4 El ancho promedio es: {round(Ancho, 2)} m")
arcpy.AddMessage(f"4.4 El ancho promedio es: {round(Ancho_Km, 2)} Km")

```

Ilustración 64 Calcular el Ancho Promedio de la Cuenca

El ancho promedio proporciona información sobre la extensión lateral de la cuenca y es relevante en análisis hidrológicos y de flujo.

6.2.4.1.4 Determinar la Dirección del Flujo

Determinar la dirección del flujo de agua en la cuenca.

```
with arcpy.da.SearchCursor(Af_01, ["SHAPE@X", "SHAPE@Y", ""]) as cursor:
    for row in cursor:
        x = row[0]
        y = row[1]

    Lat = float(y)
    Lon = float(x)

    Af_Punto = arcpy.Point(Lon, Lat)
    Cent_Punto = arcpy.Point(Centroide_X, Centroide_Y)
    line = arcpy.Polyline(arcpy.Array([Af_Punto, Cent_Punto]))
    delta_x = Lat - Centroide_X
    delta_y = Lon - Centroide_Y
    angle_rad = math.atan2(delta_y, delta_x)
    angle_deg = math.degrees(angle_rad)
    north_adjusted_angle = (90 - angle_deg) % 360
```

Ilustración 65 Determinar la Dirección del Flujo

La dirección del flujo es fundamental para modelar el movimiento del agua en la cuenca y entender cómo se comporta en diferentes condiciones.

6.2.4.1.5 Calcular Cota Mínima, Cota Máxima y Altura Media de la Cuenca

Estos valores son cruciales para entender la topografía de la cuenca y cómo influye en el flujo de agua. Son fundamentales para el análisis hidrológico.

```
# 4.6 Calculo de Cota_Maxima, Cota_Minima, Zmean,
# 4.6.1 Obtener las propiedades del raster
Cota_Minima = arcpy.GetRasterProperties_management(DEM_Cca, "MINIMUM")
Cota_Maxima = arcpy.GetRasterProperties_management(DEM_Cca, "MAXIMUM")
Zmean = arcpy.GetRasterProperties_management(DEM_Cca, "MEAN")
Cota_Minima = float(Cota_Minima.getOutput(0))
Cota_Maxima = float(Cota_Maxima.getOutput(0))
Zmean = float(Zmean.getOutput(0))

arcpy.AddMessage(f"\n4.6.1 Cota_Minima: {round(Cota_Minima, 0)}")
arcpy.AddMessage(f"4.6.1 Cota_Maxima: {round(Cota_Maxima, 0)}")
arcpy.AddMessage(f"\n4.6.1 Zmean: {round(Zmean, 2)}")
```

Ilustración 66 Calcular Cota Mínima, Cota Máxima y Altura Media de la Cuenca

6.2.4.1.6 Calcular el Coeficiente de Masividad (Km)

El coeficiente de masividad se utiliza para clasificar la cuenca según su topografía y ayuda a comprender cómo las características del terreno influyen en el comportamiento hidrológico.

```
# 4.7 Coeficiente de Masividad (Km)

def clasificar_km(Km):
    if Km >= 0 and Km <= 35:
        return "Muy montañosa"
    elif Km > 35 and Km <= 70:
        return "Montañosa"
    elif Km > 70 and Km <= 205:
        return "Relativamente plana"
    else:
        return "Plana"

def calcular_km(Zmean, Area):
    Km = Zmean / Area
    return Km

Km_cuenca = calcular_km(Zmean, Area)
clase_Km = clasificar_km(Km_cuenca)

arcpy.AddMessage(f"\n4.7 Coeficiente de Masividad (Km)"
                 f"\n Km: {Km_cuenca:.2f}")
arcpy.AddMessage(f"\n4.7 La cuenca pertenece a la clase"
                 f"\n Clase: {clase_Km}")
```

Ilustración 67 Calcular el Coeficiente de Masividad (Km)

6.2.4.1.7 Calcular el Coeficiente de Compacidad (Kc)

El coeficiente de compacidad describe la forma de la cuenca y es relevante para la hidrología, ya que la forma influye en el flujo de agua y otros procesos.

```

# 4.8 Calcular Coeficiente de Compacidad

def calcular_kc(Perimetro, Area):
    Kc = Perimetro / (2 * math.sqrt(math.pi * Area))
    return Kc

def clasificar_kc(Kc):
    if 1 ≤ Kc ≤ 1.25:
        return "Forma casi redonda a oval redonda"
    elif 1.25 < Kc ≤ 1.5:
        return "Forma oval oblonga"
    else:
        return "Forma oval oblonga a rectangular - oblonga"

Kc = calcular_kc(Perimetro, Area)
clase_Kc = clasificar_kc(Kc)

arcpy.AddMessage(f"\n4.8 Coeficiente de compacidad o indice de Gravelius (Kc)"
                 f"\n Kc: {Kc:.2f}")
arcpy.AddMessage(f"\n4.8 La cuenca pertenece a la clase"
                 f"\n Clase: {clase_Kc}")

```

Ilustración 68 Calcular el Coeficiente de Compacidad (Kc)

6.2.4.1.8 Calcular el Coeficiente de Forma (Kf)

El coeficiente de forma proporciona información adicional sobre la forma de la cuenca y puede ayudar a caracterizarla de manera más detallada.

```

# 4.9 Calcular Coeficiente de Forma
Kf = (Area / (Max1_Km ** 2))

def determinar_forma_cuenca(Kf):
    if Kf < 0.22:
        forma_cuenca = "Muy alargada"

    elif 0.22 ≤ Kf < 0.30:
        forma_cuenca = "Alargada"

    elif 0.30 ≤ Kf < 0.37:
        forma_cuenca = "Ligeramente alargada"

    elif 0.37 ≤ Kf < 0.45:
        forma_cuenca = "Ni alargada ni ensanchada"

    elif 0.45 ≤ Kf < 0.60:
        forma_cuenca = "Ligeramente ensanchada"

    elif 0.60 ≤ Kf < 0.80:
        forma_cuenca = "Ensanchada"

    elif 0.80 ≤ Kf < 1.20:
        forma_cuenca = "Muy ensanchada"

    else:
        forma_cuenca = "Rodeando el desagüe"

    return forma_cuenca

forma_cuenca = determinar_forma_cuenca(Kf)

arcpy.AddMessage(f"\n4.9 Factor de forma (Kf)\n      Kf: {Kf:.2f}")
arcpy.AddMessage(f"\n4.9 La cuenca se clasifica como\n  Clase: {forma_cuenca}")

```

Ilustración 69 Calcular el Coeficiente de Forma (Kf)

6.2.4.1.9 Calcular el Índice de Alargamiento (IA)

El índice de alargamiento proporciona información sobre si la cuenca es más alargada o achatada, lo que puede ser relevante en análisis hidrológicos.

```

# 4.10 Índice de Alargamiento
IA = Max1 / Ancho
arcpy.AddMessage(f"\n4.10 índice de Alargamiento\n  IA: {IA:.2f}")

# Se muestra la clasificación del índice de alargamiento
if IA > 1:
    arcpy.AddMessage("La cuenca es alargada.")
elif IA < 1:
    arcpy.AddMessage("La cuenca es achatada.")
else:
    arcpy.AddMessage("La cuenca es circular.")

```

Ilustración 70 Calcular el Índice de Alargamiento (IA)

6.2.4.1.10 Calcular el Rectángulo Equivalente

El rectángulo equivalente es una representación útil de la forma de la cuenca y puede ser relevante en análisis hidrológicos y geomorfológicos.

```
# 4.11 Rectangulo equivalente
desc = arcpy.Describe(Cca_SHP)
xmin = round(desc.extent.XMin, 2)
ymin = round(desc.extent.YMin, 2)
xmax = round(desc.extent.XMax, 2)
ymax = round(desc.extent.YMax, 2)

# 4.11 Calcular el rectángulo equivalente
L = max(Ancho, Max1)
l = min(Ancho, Max1)
arcpy.AddMessage(f"\n4.11 Rectangulo equivalente")
arcpy.AddMessage(f"  xmin: {xmin}")
arcpy.AddMessage(f"  ymin: {ymin}")
arcpy.AddMessage(f"  xmax: {xmax}")
arcpy.AddMessage(f"  ymax: {ymax}")
arcpy.AddMessage(f"  Lado equivalente mayor (L): {L:.2f}")
arcpy.AddMessage(f"  Lado equivalente menor (l): {l:.2f}")
```

Ilustración 71 Calcular el Rectángulo Equivalente

6.2.4.1.11 Obtener Propiedades del Centroide

Estas propiedades pueden ser relevantes en análisis posteriores y se utilizan para caracterizar el punto central de la cuenca.

```

# 4.12 Propiedades del centroide

SHP1 = os.path.join(GDB, "Cca_Interp")
arcpy.ddd.InterpolateShape("DEM_Cca",
                           "Cca_SHP",
                           SHP1,
                           None, 1, "BILINEAR", "DENSIFY", 0, "EXCLUDE")

arcpy.AddField_management(SHP1, "CEN_X", "Double")
arcpy.AddField_management(SHP1, "CEN_Y", "Double")
arcpy.AddField_management(SHP1, "CEN_Z", "Double")
arcpy.CalculateField_management(SHP1, "CEN_X", "!SHAPE.CENTROID.X!", "PYTHON_10")
arcpy.CalculateField_management(SHP1, "CEN_Y", "!SHAPE.CENTROID.Y!", "PYTHON_10")
arcpy.CalculateField_management(SHP1, "CEN_Z", "!SHAPE.CENTROID.Z!", "PYTHON_10")

data = arcpy.SearchCursor(SHP1)
for dato in data:
    CENT_X = dato.getValue("CEN_X")
    CENT_Y = dato.getValue("CEN_Y")
    Centroide_Z = dato.getValue("CEN_Z")

arcpy.AddMessage(f"\n4.12 Las coordenadas de Cca_Cen son:"
                f"\n CENT_X= {CENT_X}, "
                f"\n CENT_Y = {CENT_Y}, "
                f"\n Z= {Centroide_Z}")

```

Ilustración 72 Obtener Propiedades del Centroide

6.2.5 Fase 4: Calculo de Parámetros

6.2.5.1 Parámetros de la red Hídrica

6.2.5.1.1 Crear un mapa de pendientes a partir del DEM

Este paso es crucial para entender las características geomorfológicas de una cuenca, lo cual es esencial para los análisis hidrológicos y de escurrimiento.

```

Slope_Cca = "Slope_Cca"
Slope_Cca_Out = os.path.join(GDB, "Slope_Cca")
arcpy.ddd.Slope(DEM_Cca, Slope_Cca_Out, "PERCENT_RISE")

```

Ilustración 73 Crear un mapa de pendientes a partir del DEM

6.2.5.1.2 Crear la tabla de la red hídrica

Tener una representación tabular de la red hídrica facilita el análisis estadístico y la comprensión de la estructura de la red de drenaje.

```
Tabla_RH = os.path.join(GDB, "Tabla_RH")
arcpy.management.CreateTable(GDB, "Tabla_RH")
```

Ilustración 74 Crear la tabla de la red hídrica

6.2.5.1.3 Agregar campos a la tabla de la red hídrica

Definir qué tipo de información se va a almacenar en la tabla.

```
field_names = ["Nombre", "Orden", "Cant", "Long", "Coin", "Slope_prom", "A_B"]
field_types = ["TEXT", "SHORT", "DOUBLE", "DOUBLE", "DOUBLE", "DOUBLE", "DOUBLE"]
for field_name, field_type in zip(field_names, field_types):
    arcpy.management.AddField(Tabla_RH, field_name, field_type)
```

Ilustración 75 Agregar campos a la tabla de la red hídrica

Los campos específicos permiten una representación detallada de las características de la red hídrica.

6.2.5.1.4 Crea una lista de los datos a insertar en la tabla

```
data = [("Nacientes", 1, 0, 0, 0, 0, 0),
        ("Arroyos", 2, 0, 0, 0, 0, 0),
        ("Quebradas", 3, 0, 0, 0, 0, 0),
        ("Rios Secundarios", 4, 0, 0, 0, 0, 0),
        ("Rios Principales", 5, 0, 0, 0, 0, 0)]
```

Ilustración 76 Crea una lista de los datos a insertar en la tabla

Inicia la tabla con algunos registros facilita el análisis posterior y proporciona un formato para los datos que se ingresarán más adelante.

6.2.5.1.5 Inserta los datos a la tabla de la red hídrica

Es necesario insertar estos registros para tener un punto de partida para futuros análisis y cálculos.

```
with arcpy.da.InsertCursor(Tabla_RH, field_names) as cursor:
    for row in data:
        cursor.insertRow(row)
```

Ilustración 77 Inserta los datos a la tabla de la red hídrica

Este paso inicializa la tabla con valores de ejemplo que se utilizarán más adelante para realizar cálculos y análisis.

6.2.5.1.6 Calcula el campo 'Nombre' basado en el valor del campo 'Orden'

Realiza una clasificación de los ríos según su jerarquía.

```
expression = "get_name(!Orden!)"
codeblock = """def get_name(Orden):
    if Orden == 1:
        return 'Nacientes'
    elif Orden == 2:
        return 'Arroyos'
    elif Orden == 3:
        return 'Quebradas'
    elif Orden == 4:
        return 'Rios Secundarios'
    elif Orden == 5:
        return 'Rios Principales'
    else:
        return 'Desconocido'"""
```

Ilustración 78 Calcula el campo 'Nombre' basado en el valor del campo 'Orden'

signar nombres descriptivos a los diferentes elementos de la red hidráulica facilita la interpretación y comunicación de los resultados.

6.2.5.1.7 Calcular el Orden de la cuenca

Determinar el orden jerárquico de la red de drenaje de la cuenca para comprender mejor su complejidad.

```
OMax = arcpy.management.GetRasterProperties(SO_Cca, "MAXIMUM")
Orden_RH = int(OMax.getOutput(0))
```

Ilustración 79 Calcular el Orden de la cuenca

El orden de la cuenca es una característica importante en la hidrología, ya que se utiliza para categorizar y comprender la jerarquía de los elementos de la red hidráulica.

6.2.5.1.8 Agrega un campo "Long" a la capa de red Hidrica

```
arcpy.management.AddField(RH_Cca, "Long", "DOUBLE")
```

Ilustración 80 Agrega un campo "Long" a la capa de red Hidrica

Este campo 'Long' almacenará información sobre la longitud de los elementos de la red hidráulica, lo que es esencial para el análisis y modelado hidrológico.

6.2.5.1.9 Guardar la tabla "Tabla_RH" en la geodatabase

Guardar la tabla actualizada de la red hidráulica en la geodatabase.

```
if arcpy.Exists(tabla_actualizada):
    arcpy.management.Delete(tabla_actualizada)

arcpy.conversion.TableToTable(Tabla_RH, GDB, nombre_tabla_salida)
```

Ilustración 81 Guardar la tabla "Tabla_RH" en la geodatabase

Este paso asegura que los datos actualizados de longitud y conteo estén disponibles para futuros análisis.

6.2.5.1.10 Calcular la longitud del río principal

Identificar la longitud del río principal para determinar su importancia dentro de la cuenca.

```
Long_RP = arcpy.sa.FlowLength(Dir_Cca, "DOWNSTREAM", None)
Long_RP.save(os.path.join(GDB, "Long_RP"))
Long_RP_Max_1 = float(arcpy.GetRasterProperties_management(Long_RP, "MAXIMUM"))
Long_RP_Max_km = round((Long_RP_Max_1 / 1000), 2)
arcpy.AddMessage(f"\n5.6 Longitud del Cauce principal: {Long_RP_Max_km} Km")
```

Ilustración 82 Calcular la longitud del río principal

La longitud del cauce principal es una métrica importante en el estudio de cuencas hidrográficas, ya que proporciona información sobre la longitud total del flujo principal de agua.

6.2.5.2 Parámetros de relieve

6.2.5.2.1 Cálculo de los Niveles de la Cuenca

El objetivo de esta sección es calcular los niveles de la cuenca hidrográfica, dividiendo el rango de altitudes en varios intervalos y determinando el área correspondiente a cada intervalo.

```
Cota_Minima = float( arcpy.management.GetRasterProperties(DEM_Cca, 'MINIMUM')[0])  
Cota_Maxima = float( arcpy.management.GetRasterProperties(DEM_Cca, 'MAXIMUM')[0])
```

Ilustración 83 Cálculo de los Niveles de la Cuenca

Para comprender y gestionar eficazmente una cuenca hidrográfica, es crucial conocer la distribución de altitudes y áreas en la cuenca.

6.2.5.2.2 Definición de Rangos

En esta sección, se determina el rango de altitudes de la cuenca y se divide en intervalos específicos.

```
n_rangos = 12  
paso = round(((Cota_Maxima - Cota_Minima) / n_rangos), 2)
```

Ilustración 84 Definición de Rangos

Los intervalos ayudan a agrupar datos y a calcular estadísticas relevantes para cada rango. Esto facilita la comprensión de las características topográficas de la cuenca y su influencia en los procesos hidrológicos.

6.2.5.2.3 Calcular el Promedio de un Rango

Esta sección define una función para calcular el promedio de elevación dentro de un rango específico.

```
def calcular_promedio_rango(min_val, max_val):  
    # Convierte la ruta del raster en un objeto Raster  
    raster = arcpy.Raster(DEM_Cca)  
    raster_rango = arcpy.sa.Con((raster >= min_val) & (raster <= max_val), raster)  
    promedio = arcpy.GetRasterProperties_management(raster_rango, 'MEAN')[0]  
    return float(promedio)
```

Ilustración 85 Calcular el Promedio de un Rango

Calcular el promedio de elevación dentro de cada intervalo es crucial para comprender la elevación media en diferentes áreas de la cuenca. Esto es importante para analizar cómo varía la topografía en la cuenca y su impacto en el flujo de agua.

6.2.5.2.4 Procesamiento del DEM de la cuenca

En esta sección, se realiza el procesamiento del Modelo Digital de Elevación (DEM) para calcular el área de cada rango de altitudes.

```
Area_Acum = 0 # Inicia el Area acumulada
Estad = []

for i, rango in enumerate(rangos):
    Min_val = rango[0]
    Max_val = rango[1]
    Promedio = calcular_promedio_rango(Min_val, Max_val)
```

Ilustración 86 Procesamiento del DEM de la cuenca

El procesamiento del DEM permite determinar el área de la cuenca en cada intervalo de altitud. Esto es lo básico para calcular el área acumulada y comprender cómo se distribuye el terreno en la cuenca.

6.2.5.2.5 Invertir el Orden de los Rangos

Siguiente código invierte el orden de los rangos para calcular de abajo hacia arriba.

```
Estad.reverse()
```

Ilustración 87 Invertir el Orden de los Rangos

La inversión del orden de los rangos es importante para calcular las estadísticas acumulativas de abajo hacia arriba. Esto proporciona información sobre cómo se acumulan las áreas a medida que se asciende en altitud.

6.2.5.2.6 Cálculo del Área Total y el Área Porcentaje Total

cálculo del área total y el área porcentaje total es fundamental para comprender la distribución relativa de áreas en la cuenca en función de la altitud.

```
Area_Total = sum(e['Area_Rango'] for e in Estad)
```

Ilustración 88 Cálculo del Área Total y el Área Porcentaje Total

6.2.5.2.7 Cálculo del Área Porcentaje para Cada Rango

El cálculo del área porcentaje para cada rango permite identificar qué porcentaje de la cuenca se encuentra en cada intervalo de altitud.

```
for e in Estad:  
    e['Area_Porc'] = e['Area_Rango'] / Area_Total * 100
```

Ilustración 89 Cálculo del Área Porcentaje para Cada Rango

6.2.5.2.8 Iniciar el Área Acumulada y el Área Porcentaje Acumulado

Iniciar el área acumulada y el área porcentaje acumulado es esencial para calcular estas estadísticas de manera acumulativa a medida que se asciende en altitud.

```
Area_Acum = 0  
Area_Porc_Acum = 0
```

Ilustración 90 Iniciar el Área Acumulada y el Área Porcentaje Acumulado

6.2.5.2.9 Cálculo del Área Acumulada y el Área Porcentaje Acumulado

El cálculo del área acumulada y el área porcentaje acumulado proporciona información sobre cómo se acumulan estas estadísticas a medida que se asciende en altitud.

```
# 6.8 Calcular el Area acumulada y el Area_Porc acumulado  
for e in Estad:  
    Area_Acum += e['Area_Rango']  
    e['Area_Acum'] = Area_Acum  
    Area_Porc_Acum += e['Area_Porc']  
    e['Area_Porc_Acum'] = Area_Porc_Acum
```

Ilustración 91 Cálculo del Área Acumulada y el Área Porcentaje Acumulado

Esto es valioso para comprender la contribución relativa de cada intervalo de altitud a la cuenca en su conjunto.

6.2.5.2.10 Creación de la Tabla de Niveles

En esta sección, se crea una tabla que almacena las estadísticas calculadas para cada rango de altitud.

```
# 6.12 Crear la tabla de niveles 'Tabla_Niveles'  
Tabla_Niveles = 'Tabla_Niveles'  
tabla = arcpy.CreateTable_management(GDB, Tabla_Niveles)
```

Ilustración 92 Creación de la Tabla de Niveles

La creación de una tabla que almacene las estadísticas facilita la visualización y el análisis de los resultados.

6.2.5.3 Parámetro de Pendiente

6.2.5.3.1 Crear tabla pendiente de la cuenca

El objetivo de esta sección es crear una tabla que almacenará información sobre la pendiente de diferentes tipos de relieve en una cuenca.

```
# Crear tabla PENDIENTE DE LA CUENCA  
tabla = "Tabla_Pendiente"
```

Ilustración 93 Crear tabla pendiente de la cuenca

La creación de esta tabla es fundamental para organizar y gestionar los datos de pendiente, lo que facilita su análisis.

6.2.5.3.2 Definición de campos y tipos de datos

Definir los campos de la tabla y especificar sus tipos de datos y precisión de decimales.

```
# Definición de campos y tipos de datos  
campos = ["ITEM", "Tipo_de_relieve", "Min", "Max", "Promedio", "Ocurrencia", "A_B"]  
tipos_datos = ["FLOAT", "TEXT", "FLOAT", "FLOAT", "FLOAT", "FLOAT", "FLOAT"]  
decimales = [None, None, 2, 2, 2, 0, 2]
```

Ilustración 94 Definición de campos y tipos de datos

Es importante definir los campos de la tabla con precisión para garantizar que los datos se almacenen correctamente y se puedan realizar cálculos precisos más adelante en el proceso.

6.2.5.3.3 Agregar campos a la tabla

Agregar los campos definidos previamente a la tabla.

```
# Agregar los campos a la tabla
arcpy.CreateTable_management(GDB, tabla)
```

Ilustración 95 Agregar campos a la tabla

Esto asegura que la tabla tenga la estructura adecuada para almacenar los datos de pendiente de la cuenca.

6.2.5.3.4 Inserción de datos en la tabla

Insertar datos sobre los diferentes tipos de relieve y sus rangos de pendiente en la tabla.

```
# Datos a insertar en la tabla
datos = [
    [1, 'Plano', 0, 3, 0.0, 0, 0.0],
    [2, 'Suave', 3, 7, 0.0, 0, 0.0],
    [3, 'Medianamente accidentado', 7, 12, 0.0, 0, 0.0],
    [4, 'Accidentado', 12, 20, 0.0, 0, 0.0],
    [5, 'Fuertemente accidentado', 20, 35, 0.0, 0, 0.0],
    [6, 'Muy fuertemente accidentado', 35, 50, 0.0, 0, 0.0],
    [7, 'Escarpado', 50, 75, 0.0, 0, 0.0],
    [8, 'Muy escarpado', 75, 9999, 0.0, 0, 0.0]
]
```

Ilustración 96 Inserción de datos en la tabla

Estos datos servirán como base para el análisis posterior de la pendiente de la cuenca y son esenciales para comprender la topografía de la zona de estudio.

6.2.5.3.5 Reclasificar en DEM de la cuenca

Reclasificar un archivo ráster de pendientes (*Slope_Cca*) en diferentes categorías según los rangos definidos anteriormente.

```
reclassified_slope = arcpy.sa.Reclassify(Slope_Cca, "VALUE",  
                                         arcpy.sa.RemapRange(remap_ranges),  
                                         "NODATA")
```

Ilustración 97 Reclasificar en DEM de la cuenca

La reclasificación permite simplificar y categorizar las pendientes en diferentes niveles, lo que facilita su análisis y visualización.

6.2.5.3.6 Creación de una tabla de estadísticas

Crear una tabla que almacene estadísticas de pendiente basadas en el archivo reclasificado.

```
St_Slope_Re = os.path.join(GDB, "St_Slope_Re")  
arcpy.sa.ZonalStatisticsAsTable(Slope_Cca_Re, "Value", Slope_Cca,  
                                St_Slope_Re, "DATA", "ALL", "CURRENT_SLICE", [90],  
                                "AUTO_DETECT", "ARITHMETIC", 360)
```

Ilustración 98 Creación de una tabla de estadísticas

Esta tabla de estadísticas es fundamental para comprender la distribución de pendientes en la cuenca. Proporciona información sobre los valores mínimos, máximos, promedio y ocurrencias de pendientes en las diferentes categorías reclasificadas.

6.2.5.3.7 Actualización de la Tabla de Pendiente

Actualizar la Tabla Pendiente con datos calculados a partir de las estadísticas de pendiente.

```

# Actualizar la tabla Tabla_Pendiente
with arcpy.da.UpdateCursor("Tabla_Pendiente", ["Min", "Max", "Promedio", "Ocurrencia"]) as cursor:
    i = 0
    for row in cursor:
        if i < len(st_slope_data):
            # Asignar los datos de St_Slope_Re a las columnas correspondientes en Tabla_Pendiente
            row[0] = st_slope_data[i]["MIN"]
            row[1] = st_slope_data[i]["MAX"]
            row[2] = st_slope_data[i]["MEAN"]
            row[3] = st_slope_data[i]["COUNT"]
            row[4] = row[2] * row[3]
            cursor.updateRow(row)
            i += 1

```

Ilustración 99 Actualización de la Tabla de Pendiente

Esta actualización vincula la información de pendiente en "Tabla Pendiente" con las estadísticas recién calculadas, como el promedio de pendiente y la ocurrencia.

6.2.5.3.8 Conversión de la tabla a un DataFrame de Pandas

Convertir la tabla de Pendiente en un DataFrame de Pandas para facilitar su manipulación y análisis.

```

data = arcpy.da.TableToNumPyArray("Tabla_Pendiente", ["Min", "Max", "Promedio", "Ocurrencia"])
df = pd.DataFrame(data)

```

Ilustración 100 Conversión de la tabla a un DataFrame de Pandas

Pandas ofrece una amplia gama de herramientas para explorar y procesar datos tabulares de manera eficiente, lo que simplifica el análisis de las estadísticas de pendiente y su presentación.

6.2.5.3.9 Cálculo del promedio de pendientes de la cuenca

Calcular el promedio de las pendientes de la cuenca utilizando las estadísticas obtenidas.

```

Slope_Prom_Cca = total_ab / total_ocurrencia

```

Ilustración 101 Cálculo del promedio de pendientes de la cuenca

El cálculo del promedio de pendientes proporciona una medida resumida de la topografía general de la cuenca.

6.2.5.4 *Tiempo de Concentración*

Los siguientes códigos calculan el tiempo de concentración en hidrología utilizando varios métodos.

6.2.5.4.1 Método de Kirpich:

Calcular el tiempo de concentración utilizando el método de Kirpich, que se basa en la longitud de la cuenca y la pendiente promedio.

```
arcpy.AddMessage("\n 08.6.1 METODO DE KIRPICH")
def tiempo_concentracion_kirpich(L, Slope_Prom_RP):
    # Asegurarse de que los inputs sean positivos
    if L <= 0 or Slope_Prom_RP <= 0:
        raise ValueError("Los valores de L y S deben ser positivos")

    # Calcular el tiempo de concentración
    tc_kirpich = 0.06628 * (math.pow(L, 0.77) / math.pow(Slope_Prom_RP, 0.5))

    return tc_kirpich

tc_kirpich = tiempo_concentracion_kirpich(L, Slope_Prom_RP)
```

Ilustración 102 Método de Kirpich:

Este método es uno de los métodos clásicos utilizados para estimar el tiempo de concentración en hidrología. Se basa en relaciones empíricas que consideran la longitud de la cuenca y la pendiente, lo que lo hace relevante para muchas aplicaciones hidrológicas.

6.2.5.4.2 Método de Giandoti:

Se basa en la diferencia de cotas entre la elevación máxima y mínima de la cuenca, la longitud de la cuenca y otros factores.

```
H = Cota_Max_RP - Cota_Min_RP

arcpy.AddMessage("\nMÉTODO DE GIANDOTI")
B = 4 * math.sqrt(Area)
C = 1.5 * L
D = 0.8 * math.sqrt(H)

tc_giandoti = (B + C) / D
```

Ilustración 103 Método de Giandoti:

El método de Giandoti es otra aproximación ampliamente utilizada para estimar el tiempo de concentración en cuencas. Considera factores como la elevación y longitud de la cuenca, lo que lo hace adecuado para diferentes escenarios hidrológicos.

6.2.5.4.3 Método de Temez:

Se basa en la longitud de la cuenca y la pendiente promedio.

```
info = " + METODO DE TEMEZ"
arcpy.AddMessage("\n METODO DE TEMEZ")
tc_temez = 0.3 * (L / (Slope_Prom_RP ** 0.25)) ** 0.76
```

Ilustración 104 Método de Temez

El método de Temez es un enfoque específico que puede ser aplicable en ciertas condiciones hidrológicas. Su uso se justifica en situaciones donde la longitud de la cuenca y la pendiente son factores críticos para determinar el tiempo de concentración.

6.2.5.4.4 Método de Passini:

El método de Passini es útil para cuencas de diferentes tamaños y pendientes. Su justificación radica en su capacidad para considerar múltiples factores de manera conjunta en la estimación del tiempo de concentración.

```
arcpy.AddMessage("\n METODO DE PASSINI")
tc_passini = 0.108 * ((Area * L) ** (0.33333)) / (Slope_Prom_RP ** 0.5)
```

Ilustración 105 Método de Passini

6.2.5.4.5 Método de V.T. Chow:

Calcular el tiempo de concentración utilizando el método de V.T. Chow, que se basa principalmente en la longitud de la cuenca. Es de enfoque simple pero ampliamente utilizado en hidrología.

```
arcpy.AddMessage("\n MÉTODO DE V.T. CHOW")
tc_chow = L / (1.49 * math.sqrt(Area))
```

Ilustración 106 Método de V.T. Chow

El método de V.T. Chow. se justificación radica en su facilidad de aplicación y su capacidad para proporcionar estimaciones razonables del tiempo de concentración en muchas situaciones

6.2.5.4.6 Método de Clark:

Calcular el tiempo de concentración del flujo superficial y el tiempo de concentración total utilizando el método de Clark.

```
tc_superficial = 0.8 * L / (Slope_Prom_RP ** 0.5)
tc_clark = 0.6 * tc_superficial
```

Ilustración 107 Método de Clark

Se utiliza para descomponer el tiempo de concentración en dos componentes: el tiempo de concentración del flujo superficial y el tiempo de concentración total. Esto permite un análisis más detallado de la respuesta hidrológica de la cuenca.

6.2.5.4.7 Método de Ventura-Heron:

Se basa en la pendiente promedio de la cuenca y Es relevante cuando se considera la pendiente promedio como un factor clave para el tiempo de concentración.

```
arcpy.AddMessage(round(Slope_Prom_Cca, 2))
tc_ventura_heron = 0.2 * (L ** 0.8) * (Slope_Prom_Cca ** -0.5)
```

Ilustración 108 Método de Ventura-Heron

6.2.5.4.8 Método de Kerby (1959):

Este método es de enfoque específico que utiliza un factor de retardo de escorrentía para considerar cómo se retarda el flujo en la cuenca antes de alcanzar la salida.

```
retardo_escorrentia = 0.12 # Factor de retardo de escorrentia (puede ajustarse según las condiciones de la cuenca)
tc_kerby = retardo_escorrentia * (L ** 0.5) * (Slope_Prom_Cca ** -0.33)
```

Ilustración 109 Método de Kerby

6.2.5.4.9 Método de Bransby Williams (1961):

Siguiente código se utiliza cuando se requiere considerar un coeficiente de retardo diferente al utilizado en otros métodos.

```
coeficiente_retardo = 0.9 # Coeficiente de retardo (puede ajustarse según las condiciones de la cuenca)
tc_bransby_williams = coeficiente_retardo * (L ** 0.8) * (Slope_Prom_Cca ** -0.4)
```

Ilustración 110 Método de Bransby Williams

El método se radica en su flexibilidad para ajustar el coeficiente de retardo según las condiciones específicas de la cuenca

6.2.5.4.10 Método de Kerby-Bransby Williams (1961):

Este método combina los enfoques de Kerby y Bransby Williams, lo que puede ser útil cuando se necesita considerar tanto el retardo de escorrentía como un coeficiente de retardo específico.

```
tc_kerby_bransby_williams = 0.6 * (L ** 0.8) * (Slope_Prom_Cca ** -0.5)
```

Ilustración 111 Método de Kerby-Bransby Williams

6.2.5.4.11 Método de Sheridan (1966):

Calcular el tiempo de concentración utilizando el método de Sheridan, que se basa en la longitud de la cuenca, la pendiente promedio y un coeficiente de retardo.

```
coeficiente_retardo = 0.06 # Coeficiente de retardo (puede ajustarse según las condiciones de la cuenca)
tc_sheridan = coeficiente_retardo * (L ** 0.8) * (Slope_Prom_Cca ** -0.4)
```

Ilustración 112 Método de Sheridan (1966)

El método de Sheridan se utiliza cuando se necesita un coeficiente de retardo particular para modelar el tiempo de concentración.

6.2.5.4.12 Método de Izzard (1973):

El método de Izzard se utiliza cuando se necesita un coeficiente de retardo específico para modelar el tiempo de concentración en la cuenca.

```
coeficiente_retardo = 0.3 # Coeficiente de retardo (puede ajustarse según las condiciones de la cuenca)
tc_izzard = coeficiente_retardo * (L ** 0.8) * (Slope_Prom_Cca ** -0.3)
```

Ilustración 113 Método de Izzard (1973)

6.2.5.4.13 Método de Papadakis (1975):

Calcular el tiempo de concentración utilizando el método de Papadakis, que utiliza cuando se necesita un coeficiente de retardo particular para estimar el tiempo de concentración en la cuenca.

```
coeficiente_retardo = 0.2 # Coeficiente de retardo (puede ajustarse según las condiciones de la cuenca)
tc_papadakis = coeficiente_retardo * (L ** 0.8) * (Slope_Prom_Cca ** -0.4)
```

Ilustración 114 Método de Papadakis (1975)

6.2.5.4.14 Método del U.S. Army Corps of Engineers (1976):

El método del USACE es relevante cuando se necesita un coeficiente de retardo específico para modelar el tiempo de concentración en la cuenca.

```
coeficiente_retardo = 0.9 # Coeficiente de retardo (puede ajustarse según las condiciones de la cuenca)
tc_usace = coeficiente_retardo * (L ** 0.6) * (Slope_Prom_Cca ** -0.2)
```

Ilustración 115 Método del U.S. Army Corps of Engineers (1976)

6.2.5.4.15 Método de la Onda Cinemática (Kinematic Wave):

Calcular el tiempo de concentración utilizando el método de la Onda Cinemática, que se basa en la longitud de la cuenca, la pendiente promedio y un coeficiente de rugosidad.

```
rugosidad = 0.035 # Coeficiente de rugosidad (puede ajustarse según las condiciones de la cuenca)
tc_cinematica = (L ** 0.6) * (Slope_Prom_Cca ** -0.4) * (rugosidad ** -0.1)
```

Ilustración 116 Método de la Onda Cinemática (Kinematic Wave)

Y es adecuado cuando se necesita considerar la rugosidad del terreno para estimar el tiempo de concentración.

6.2.5.4.16 Método Racional:

El método racional es útil cuando se tienen datos de intensidad de precipitación y se necesita estimar el tiempo de concentración en función de la escurrimiento directa.

```
intensidad_precipitacion = 100 # Intensidad de precipitación (mm/h)
area_cuenca = 100 # Área de la cuenca (km²)
coeficiente_escorrentia = 0.8 # Coeficiente de escurrimiento (puede ajustarse según las condiciones de la cuenca)
```

Ilustración 117 Método Racional

6.2.6 Fase 5: Generación de Mapas

6.2.6.1 Elaboración de mapas

6.2.6.1.1 Cargar archivos shapefile en un mapa

En este paso, se cargan dos archivos shapefile ("Sura" y "Colombia") en un mapa llamado "Nal_mapa". Esto es necesario para preparar los datos geoespaciales que se utilizarán en el proceso de análisis espacial.

```
Sura_layer = Nal_mapa.addDataFromPath(Sura)
colombia_layer = Nal_mapa.addDataFromPath(colombia_shp_path)
```

Ilustración 118 Cargar archivos shapefile en un mapa

6.2.6.1.2 Configurar etiquetas en capas

Se configuran las etiquetas de las capas "Suramérica" y "Colombia" en el mapa. Esto es útil para mostrar información adicional en el mapa, como nombres de países o regiones.

```
nombres_capas = ["Suramerica", "Colombia"]

for nombre_capa in nombres_capas:
    objeto_capa = list(Nal_mapa.listLayers(nombre_capa))[0]
    if hasattr(objeto_capa, 'showLabels'):
        objeto_capa.showLabels = True
```

Ilustración 119 Configurar etiquetas en capas

6.2.6.1.3 Cambiar la simbología de la capa de Colombia

Se cambia la simbología de la capa "Colombia" para ajustar su apariencia en el mapa. Esto puede incluir cambiar el color del relleno y el color del borde de la geometría.

```
colombia_lyr_obj = list(Nal_mapa.listLayers("Colombia"))[0]
colombia_symbology = colombia_lyr_obj.symbology

if hasattr(colombia_symbology, 'renderer'):
    colombia_symbology.renderer.symbol.outlineColor = {'RGB': [0, 0, 0]}
    colombia_symbology.renderer.symbol.color = {'RGB': [0, 0, 0, 0]}
    colombia_lyr_obj.symbology = colombia_symbology
```

Ilustración 120 Cambiar la simbología de la capa de Colombia

6.2.6.1.4 Encontrar el Departamento que contiene un punto

Se realiza una selección espacial para encontrar el Departamento que contiene un punto específico. Esto es útil para identificar la ubicación geográfica del punto en el contexto de los departamentos.

```
arcpy.MakeFeatureLayer_management(punto_af_01, "punto_layer")
arcpy.MakeFeatureLayer_management(Dept, "Dept_layer")
arcpy.SelectLayerByLocation_management("Dept_layer", "CONTAINS"
```

Ilustración 121 Encontrar el Departamento que contiene un punto

6.2.6.1.5 Mostrar o informar sobre el resultado de la selección del Departamento

se verifica si se ha seleccionado un departamento que contiene el punto. Si es así, se copia la geometría del departamento a un nuevo shapefile, se agrega al mapa y se informa sobre el éxito de la operación. Si no se encuentra ningún departamento, se muestra un mensaje indicando que no se ha encontrado ninguno.

```
if int(arcpy.GetCount_management("Dept_layer")[0]) > 0:
    Dept = os.path.join(Folder_Dept, "Dept.shp")
    arcpy.CopyFeatures_management("Dept_layer", Dept)
    Nal_mapa.addDataFromPath(Dept)
```

Ilustración 122 Mostrar o informar sobre el resultado de la selección del Departamento

6.2.6.1.6 Cambiar la simbología de la capa "Dept"

se cambia la simbología de la capa "Dept" para ajustar su apariencia en el mapa. Esto puede incluir cambiar el color del relleno y el color del borde de la geometría del departamento.

```
dept_layer = Nal_mapa.listLayers("Dept")[0]
symbology = dept_layer.symbology

if symbology.renderer.type == 'SimpleRenderer':
    symbology.renderer.symbol.color = {'RGB': [200, 200, 200, 255]}
    symbology.renderer.symbol.outlineColor = {'RGB': [0, 0, 0, 255]}
    dept_layer.symbology = symbology
```

Ilustración 123 Cambiar la simbología de la capa "Dept"

6.2.6.1.7 Preparación del mapa "Anisis_Territorial_M"

En este paso, se obtiene una referencia al mapa llamado "Analisis_Territorial" en el proyecto actual y se asigna a la variable "Anisis_Territorial_M_mapa". Esto prepara el mapa para las operaciones subsiguientes.

```
Territorial_mapa = aprx.listMaps("Analisis_Territorial")[0]
Anisis_Territorial_M_mapa = Territorial_mapa
```

Ilustración 124 Preparación del mapa "Anisis_Territorial_M"

6.2.6.1.8 Eliminación de todas las capas del mapa "Anisis_Territorial_M"

se eliminan todas las capas existentes en el mapa "Anisis_Territorial_M". Esto asegura que el mapa esté limpio y listo para recibir nuevas capas.

```
for capa in Territorial_mapa.listLayers():  
    Territorial_mapa.removeLayer(capa)
```

Ilustración 125 Eliminación de todas las capas del mapa "Anisis_Territorial_M"

6.2.6.1.9 Agregar la capa de búfer al mapa y ajustar su simbología

```
buffer_layer = Anisis_Territorial_M_mapa.addDataFromPath(buffer_name  
adjust_symbology(buffer_layer, [255, 255, 255, 0])
```

Ilustración 126 Agregar la capa de búfer al mapa y ajustar su simbología

se agrega una capa de búfer al mapa "Anisis_Territorial_M". Luego, se llama a la función "adjust_symbology" para ajustar la simbología de la capa de búfer. La simbología se configura para que el relleno sea transparente y el borde sea de color rojo.

6.2.6.1.10 Iterar sobre las capas a capturar y generar capturas de pantalla

se itera sobre una lista de nombres de capas ("Fill_AE", "DIR_AE", "Acc_AE", "RH_AE") que se desean capturar como mapas temáticos. Para cada capa, se añade al mapa "Anisis_Territorial_M", se ajusta el diseño del mapa y se genera una captura de pantalla. Esto permite crear rápidamente mapas temáticos para cada capa especificada.

```
capas_a_capturar1 = ["Fill_AE", "DIR_AE", "Acc_AE", "RH_AE"]
```

Ilustración 127 Iterar sobre las capas a capturar y generar capturas de pantalla

6.2.6.1.11 Aplicar un efecto de zoom adicional, definir el nombre de archivo de salida y exportar el diseño

se realiza un ajuste adicional a la escala de la cámara del marco de mapa para lograr un acercamiento menos pronunciado. Esto puede ser útil si se desea mostrar un área más amplia en el mapa. Luego, se define el nombre del archivo de salida para la captura de pantalla, que

incluye el nombre de la capa actual. Finalmente, se exporta el diseño actual del mapa en formato PNG con una resolución de 300 DPI

```
output_filename = f"Mapa_de_{capa_nombre1}.png"
output_file = os.path.join(Folder_Fig, output_filename)

layout1.exportToPNG(output_file, resolution=300)
```

Ilustración 128 Aplicar un efecto de zoom adicional

Objetivo 3: Validar los resultados obtenidos por la interfaz hidrogeomática con respecto a los resultados calculados mediante el uso del método desarticulado de hojas de cálculo y SIG.

6.3 Validación de la Interfaz Hidrogeomática

En este capítulo, se presenta una prueba exhaustiva de la interfaz hidrogeomática con datos existentes del río Palacé, para el cálculo de los parámetros morfométricos. Para llevar a cabo esta evaluación, se utilizaron datos concretos de elevación, longitud, ancho del río, entre otros factores relevantes y permitió obtener resultados precisos y consistentes, lo que confirma la robustez y confiabilidad de esta herramienta en la caracterización y estudio de la morfología.

6.4 Localización de la zona de estudio

La cuenca hidrográfica del río Palacé se ubica en Cajibío, un municipio del departamento del Cauca en Colombia. Se sitúa a unos 29 kilómetros al norte de Popayán. Además, la cabecera municipal de Cajibío se encuentra al norte del río Palacé, a una distancia de aproximadamente 8 kilómetros

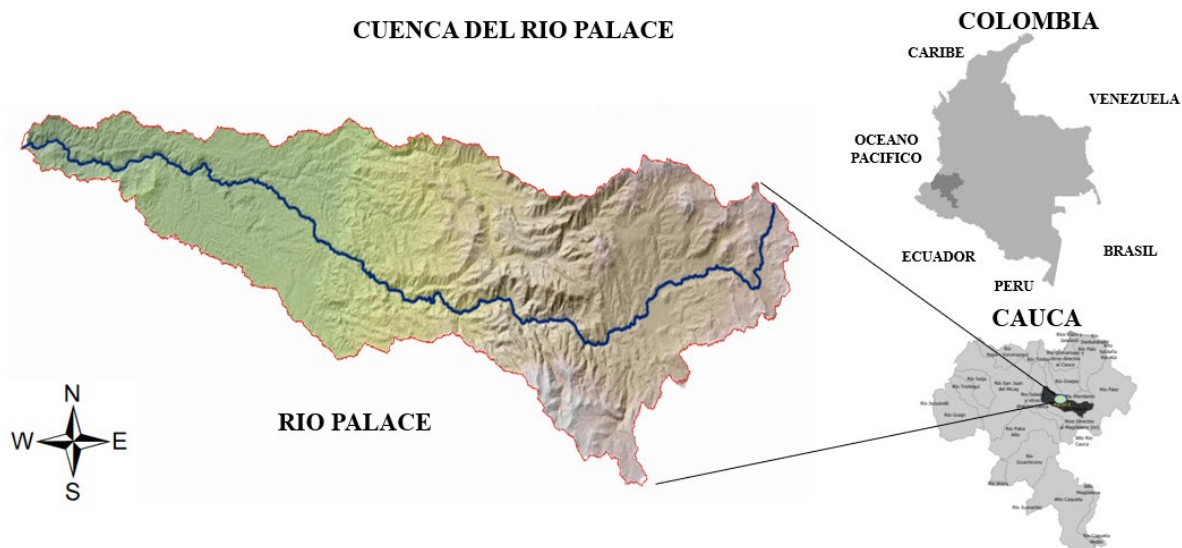


Ilustración 129 Cuenca hidrográfica del río Palacé en el departamento del Cauca. Adaptada del modelo digital de elevación (DEM) facility <https://asf.alaska.edu/>, específicamente de la misión Japonesa Alos Palsar para el municipio de cauca.

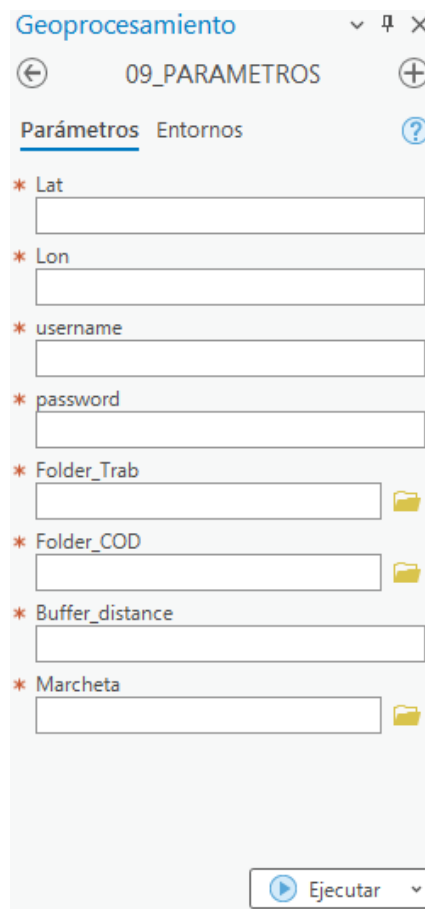
6.5 Evaluación de los parámetros morfométricos

La interfaz hidrogeomática exige una serie de datos y configuraciones particulares con el fin de llevar a cabo un cálculo preciso de los parámetros fisiográficos y realizar el análisis territorial necesario para el estudio de la cuenca hidrográfica. Estos son los elementos esenciales que se requieren para completar la tarea:

1. **Latitud del punto de aforo en grados decimales:** Es fundamental para identificar la ubicación exacta donde se realizará el análisis en la cuenca. La latitud se proporciona en formato de grados decimales.
2. **Longitud del punto de aforo en grados decimales:** Al igual que la latitud, la longitud se requiere en grados decimales y define la ubicación geográfica precisa del análisis.
3. **Usuario Alaska Satellite Facility:** Debes ingresar el nombre de usuario o las credenciales de acceso a la Alaska Satellite Facility.
4. **Contraseña Alaska Satellite Facility:** La contraseña asociada a la cuenta de usuario mencionada anteriormente, necesaria para la autenticación y el acceso a los recursos.
5. **Carpeta de trabajo:** Indica la ubicación donde deseas que se almacenen los resultados y archivos generados durante el análisis.

6. **Carpeta donde están los códigos:** Especifica la ubicación de la carpeta donde están los códigos o scripts que se utilizarán en el análisis.
7. **Carpeta donde está la plantilla de mapas:** Debes indicar la ubicación de la carpeta donde está la plantilla de mapas que se usará para crear visualizaciones o representaciones gráficas de los resultados del análisis.
8. **Distancia del buffer del análisis territorial:** Este parámetro establece la distancia desde el punto de aforo a la que se creará un buffer o zona de influencia.

En la Ilustración 131 Ventana de la interfaz hidrogeomática, se debe consignar los datos de inicio para los cálculos:



The image shows a software window titled "Geoprocesamiento" with a sub-header "09_PARAMETROS". Below the header are two tabs: "Parámetros" (selected) and "Entornos". A list of parameters is displayed, each with a red asterisk indicating it is required. The parameters and their input fields are: "Lat" (text box), "Lon" (text box), "username" (text box), "password" (text box), "Folder_Trab" (text box with a folder icon), "Folder_COD" (text box with a folder icon), "Buffer_distance" (text box), and "Marcheta" (text box with a folder icon). At the bottom right, there is a button labeled "Ejecutar" with a play icon and a dropdown arrow.

Ilustración 130 Ventana de la interfaz hidrogeomática

Para dar inicio al proceso, es necesario hacer clic en el botón "Ejecutar". Es importante destacar que la ejecución es automática, siguiendo el orden descrito en el segundo objetivo de este trabajo.

A continuación, se presentan las ilustraciones del desarrollo de la interfaz para alcanzar los resultados deseados de la interfaz hidrogeomática:

6.5.1 Análisis Territorial:

En un inicio tomando como datos las coordenadas introducidas en los campos Lat y Lon se crea un punto. A continuación, la interfaz:

- a) Se ingresa con usuario en la página Alaska Satellite Facility (<https://asf.alaska.edu/>)
- b) Se crea y carga el Buffer generado alrededor del punto
- c) busca las imágenes con la resolución indicada en el inicio (30m o 12.5 m), de la misión ALOS PALSAR
- d) Descargar las imágenes con las que procesaremos los datos
- e) Descomprimos las imágenes, se toma las imágenes referenciadas como modelo digital de elevación (DEM) RT1 (12.5 m) O RT2 (30m) según el caso.

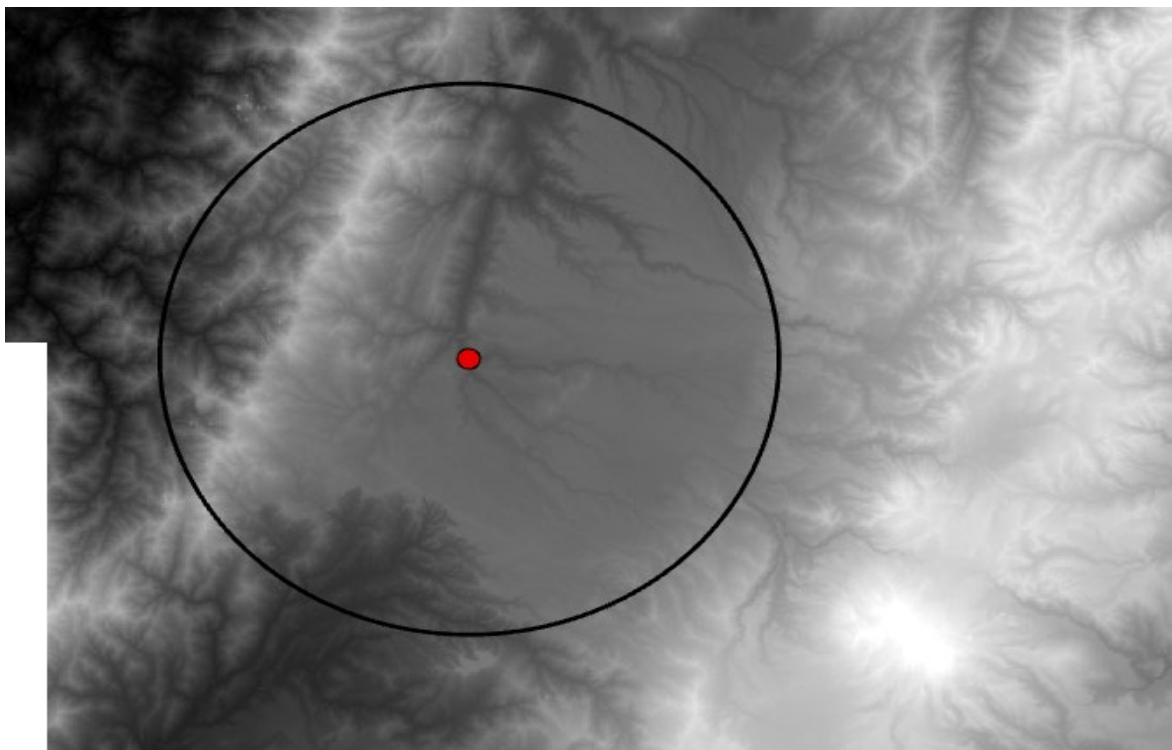


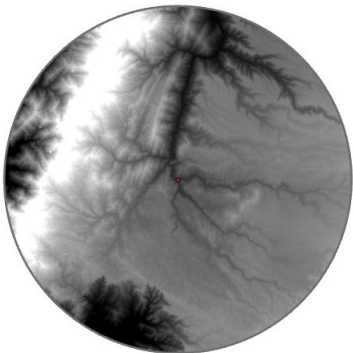

Ilustración 131 área de Estudio

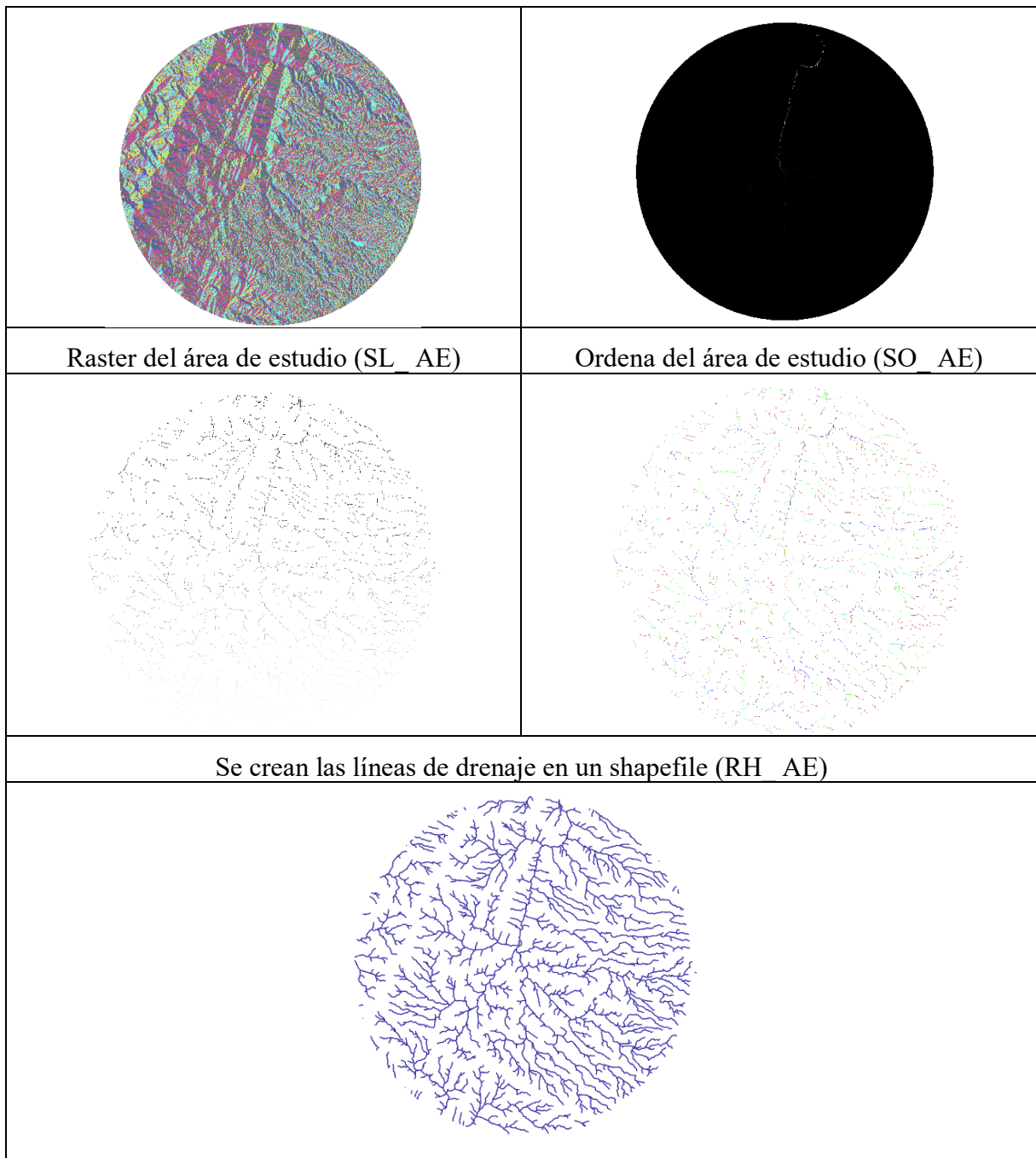
6.5.2 Recorte del área de estudio

Se carga en el SIG las imágenes y procede al recorte del DEM con el Buffer que nos da como resultado el DEM_AE_01, a continuación, se procede realizar los pasos para la determinación de la cuenca hídrica, así;

- a) Corrección del DEM mediante la instrucción Fill (fillae)
- b) Al Fill se le haya la dirección de flujo (Dir_DEM)
- c) Al Dir_DEM se le encuentra la acumulación de flujo (Acc_DEM)
- d) Se calculo el umbral de acumulación mediante la relación celdas vs áreas (UM)
- e) Se procede a calcular el condicional tomando como base (Dir_DEM Y umbral de acumulación).
- f) Se determina Stream Link (SL_DEM)
- g) Se determina el orden de la cuenca mediante el método de StreamOrder (SO_DEM)
- h) El stream se convierte en feature, que da origen a nuestra primera red hídrica del análisis territorial (RH_DEM)

Tabla 5 Determinación de la cuenca hídrica

DEM del área de estudio (DEM_AE_01)	Relleno del área de estudio (Fill_AE)
	
Direccion del área de estudio (DIR_AE)	Acomulacion del área de estudio (Acc_AE)



Fuente: Elaboración propia.

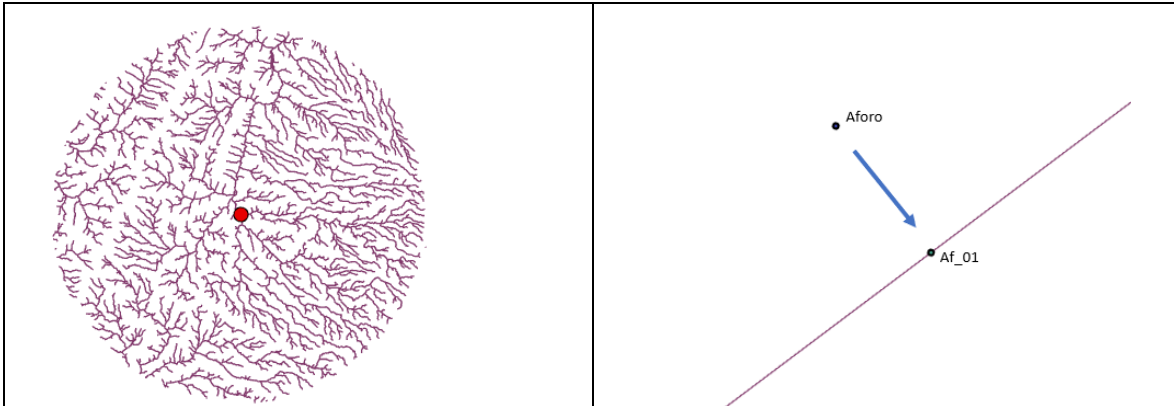
6.5.3 Ajustes de las coordenadas del punto

Realizado todos los análisis espaciales anteriores la interfaz corrobora que el punto intercepte la red hídrica para poder delimitar la cuenca

6.5.3.1 Intersección del punto

Para poder corroborar que el punto este bien localizado el interfaz ejecuta el scrip de intersección del punto para buscar el punto de intersección con la red. Cuando encuentra el punto de intersección, se crea un nuevo punto llamado Af_01 que contiene las nuevas coordenadas y es el que se utilizara para delimitar la cuenca.

Tabla 6 Intersección del punto de Aforo



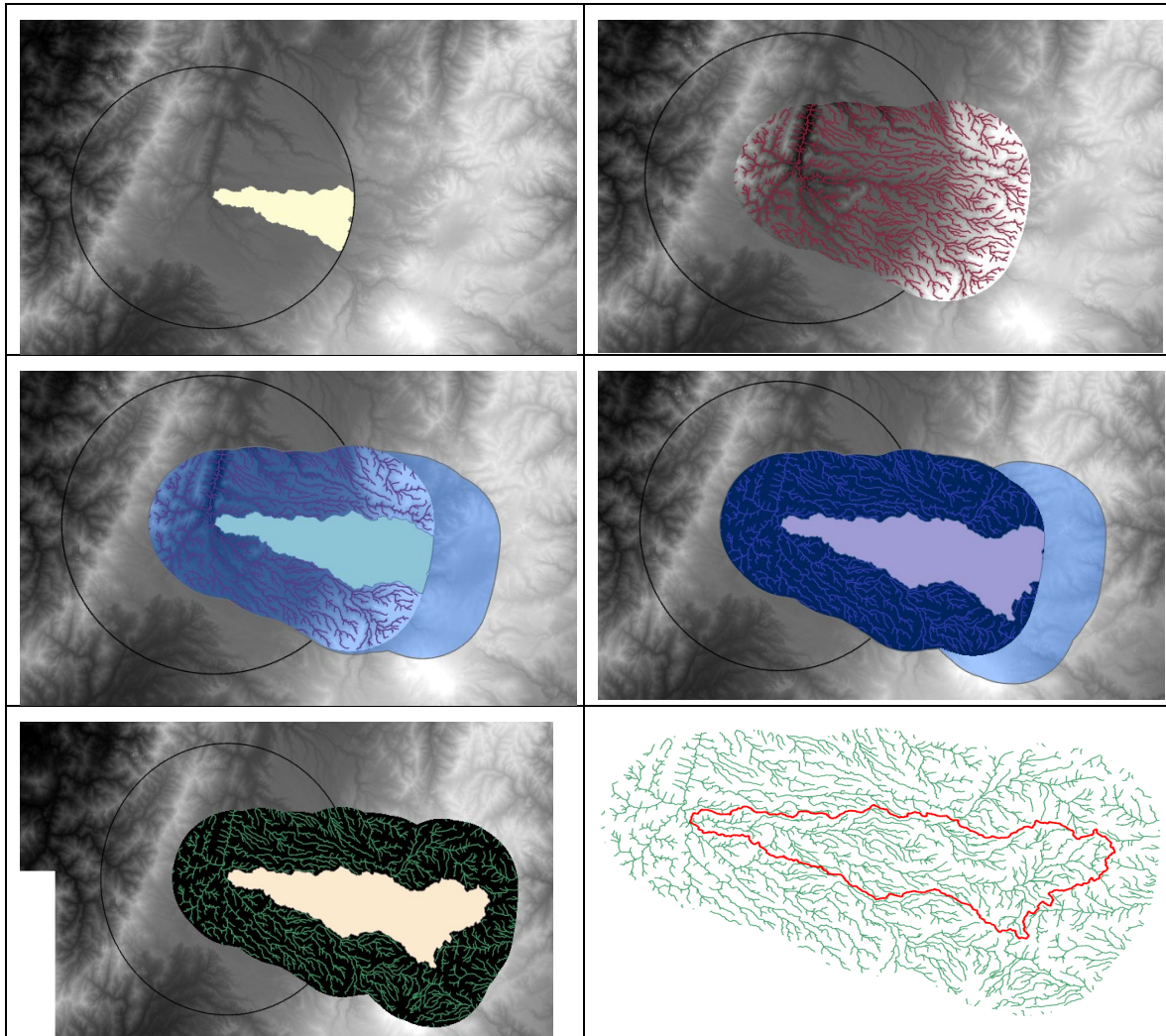
Fuente: Elaboración propia.

6.5.4 Intersección de la cuenca de estudio

El Interfaz comprueba si la cuenca intercepta al Buffer, si lo intercepte amplía el buffer de la cuenca hasta que la cuenca no intercepte el nuevo Buffer creado, se aclara que por cada iteración se genera una nueva cuenta que es la que se comprueba si es la que intercepta con el buffer con el fin de no genera cuenca cortadas por el Buffer. Una vez logrado que la cuenca no intercepte el Buffer, se procede al análisis espacial. Igualmente, el proceso permite conocer con mayor precisión la zona de estudio.

De no interceptar la cuenca se procede directamente al análisis espacial.

Tabla 7 Intersecciones de la cuenca de estudio



Fuente: Elaboración propia.



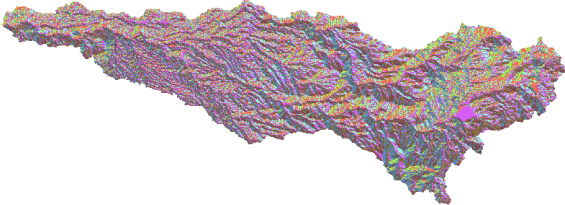
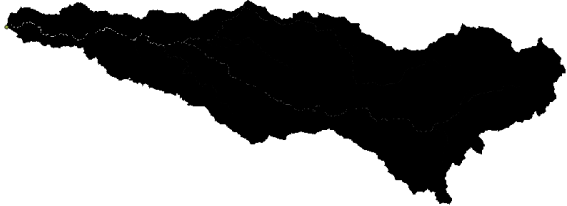

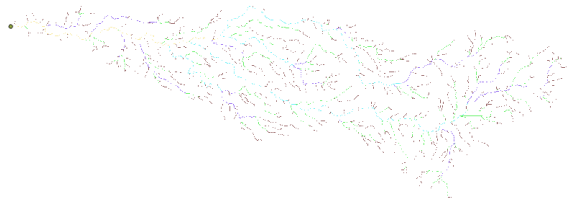
6.5.5 Análisis espacial de la cuenca

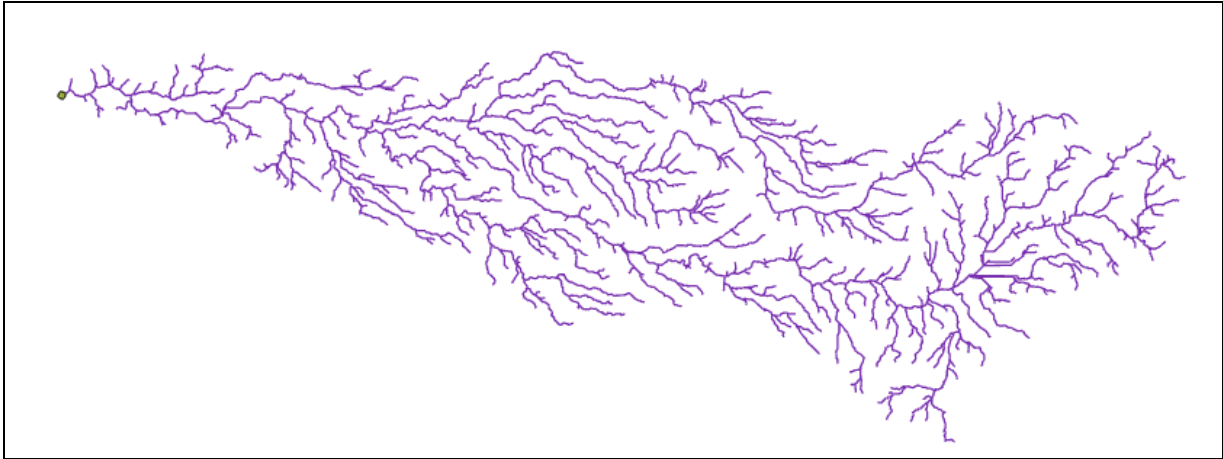
Después de obtener el archivo shapefile de la cuenca ("Cca_SHP"), se realizan los siguientes pasos de análisis espacial para delimitar una cuenca hídrica en un DEM:

- Recorte del DEM_AE_00 con el archivo Cca_SHP para obtener el DEM_Cca.
- Corrección del DEM_Cca mediante la instrucción Fill para eliminar las depresiones (Fill_Cca)
- Al Fill se le haya la dirección de flujo (Dir_Cca)
- Al Dir_DEM se le encuentra la acumulación de flujo (Acc_Cca)
- Cálculo del umbral de acumulación mediante la relación celdas vs áreas (UM_Acc)

- f) Se procede a calcular el condicional tomando como base (Dir_Cca Y UM_Acc).
- g) Determinación del StreamLink a partir del condicional (SL_Cca).
- h) Determinación del orden de la cuenca mediante el método de StreamOrder (SO_Cca)
- i) Conversión del StreamOrder en una capa vectorial para obtener la red hídrica de la cuenca (RH_Cca)

Tabla 8 Análisis espacial de la cuenca

DEM de la cuenca (DEM_Cca)	Relleno de cuenca (Fill_Cca)
	
Dirección de la cuenca (Dir_Cca)	Acomulación de la cuenca (Acc_Cca)
	
Raster de la red de drenaje (SL_Cca)	Ordena la red de drenaje (SO_Cca)
	
Se crean las líneas de drenaje en un shapefile (RH_Cca)	



Fuente: Elaboración propia.

6.5.6 Cálculo de los parámetros Morfométricos

6.5.6.1 Parámetros de forma - Cuenca Hidrográfica Rio Palacé

En la siguiente tabla se presentan los valores obtenidos para los parámetros de forma en el análisis de la cuenca río Palacé.

Tabla 9 Parámetros de forma de la Cuenca Hidrográfica Rio Palacé

DATOS DE LA CUENCA		
GEOMETRIA		
Area	Km ²	645.10
Perimetro	Km	177.94
Ancho	Km	23.23
Largo	Km	62.46
VALORES DE LAS COTAS		
Cota Minima	msnm	1,378.00
Cota Maxima	msnm	3,814.00
Desnivel altitudinal		2,436.00
COORDENADAS		
Centroide X	m	338,530.50
Centroide Y	m	278,229.04
Centroide Z	msnm	2,597.50
PUNTO DE AFORO EN WGS 1984 (4326)		
Latitud		2.56801
Longitud		-76.7665

ALTITUDES DE LA CUENCA			PUNTO DE AFORO EN UTM ZONA 18 NORTE (32618)	
Altitud Media	msnm	2,514.00	Latitud	283979.4761
Altitud mas frecuente	msnm	1,752.00	Longitud	303596.3536
Altitud de frecuencia Media	msnm	1,146.25		

Fuente: Elaboración propia.

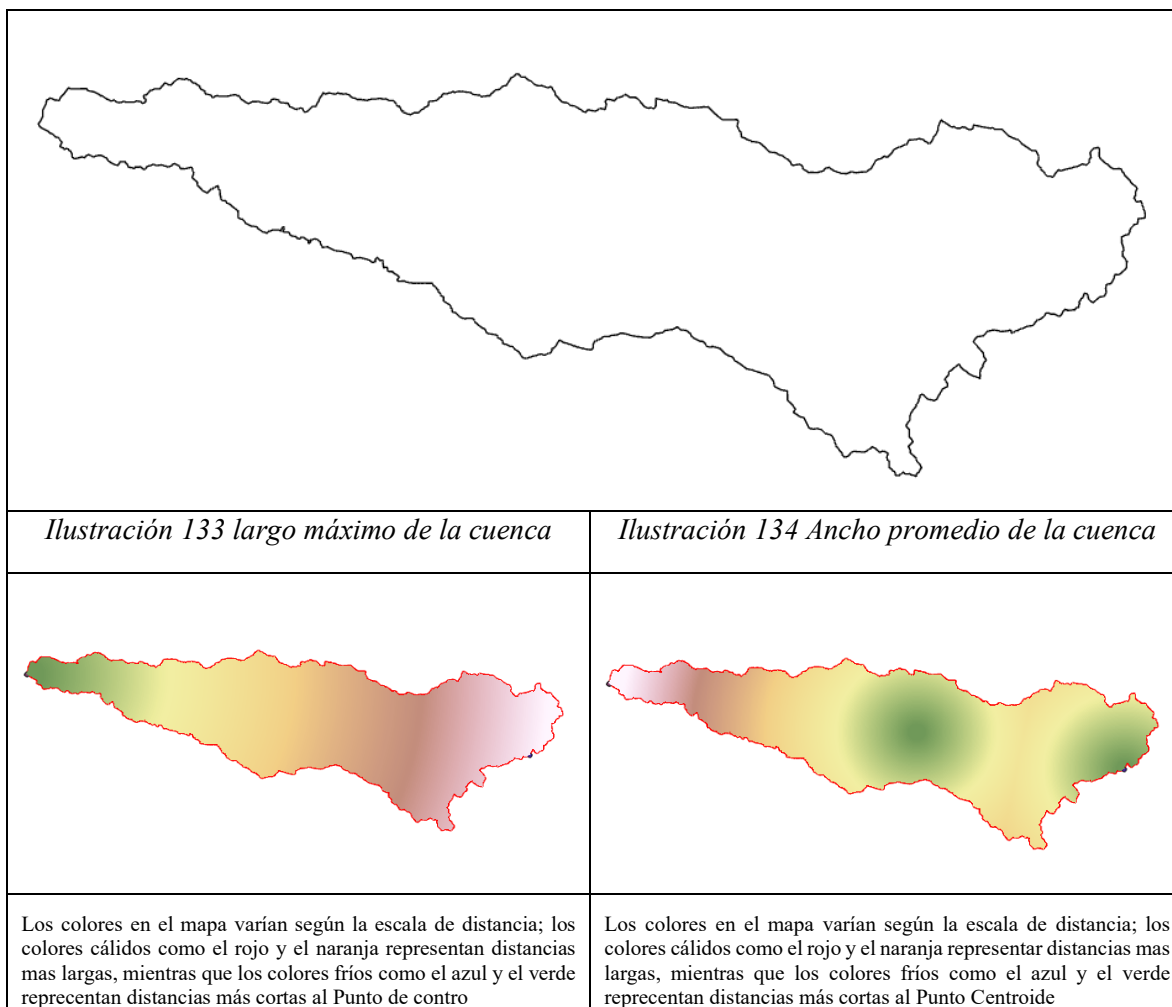
La cuenca hidrográfica del río Palacé se caracteriza por los siguientes aspectos:

- **Área** de 645.10 km², un
- **Perímetro** de 177.94 km.
- **Índice de compacidad:** 1,98. Indica una forma oval oblonga a rectangular - oblonga, de baja susceptibilidad a las avenidas torrenciales.
- **Factor de forma Kf:** 0,17. Indica una forma muy alargada, de baja susceptibilidad a las avenidas torrenciales.
- **Pendiente media:** 24,19 %. Representa un relieve fuertemente accidentado, con alta influencia sobre las crecidas instantáneas.
- **Elevación media:** 1.767 msnm. Indica un clima templado en promedio.

El largo de la Cuenca del río Palacé mediante la interfaz nos dio 62.46 km y con un ancho promedio de 23.23 km

Con el largo y el ancho promedio calculamos la relación $62.46 / 23.23$ (largo/ancho) Que da como resultado aproximadamente 2,7 lo que indica que la cuenca es más larga que ancha. Cómo se puede observar en la Ilustración 10.

Ilustración 132 Cuenca Hidrográfica Rio Palacé, Partidero de aguas



Además, se puede concluir que la cuenca del río Palacé tiene un tamaño mediano, ya que su área está entre 100 y 1,000 km².

6.5.7 hidrografía de la cuenca del río Palacé

La cuenca hidrográfica del río Palacé tiene una red de drenaje densamente desarrollada, con un total de 780.43 kilómetros de cauces. De acuerdo con la clasificación de Strahler La Cuenca es de orden 5. La red está compuesta por cauces de todos los órdenes, desde nacientes hasta ríos principales.

Tabla 10 Orden y tipo de cuenca

ORDEN	TIPO
1	Nacientes

2	Arroyos.
3	Quebradas.
4	Ríos secundarios.
5	Ríos principales.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

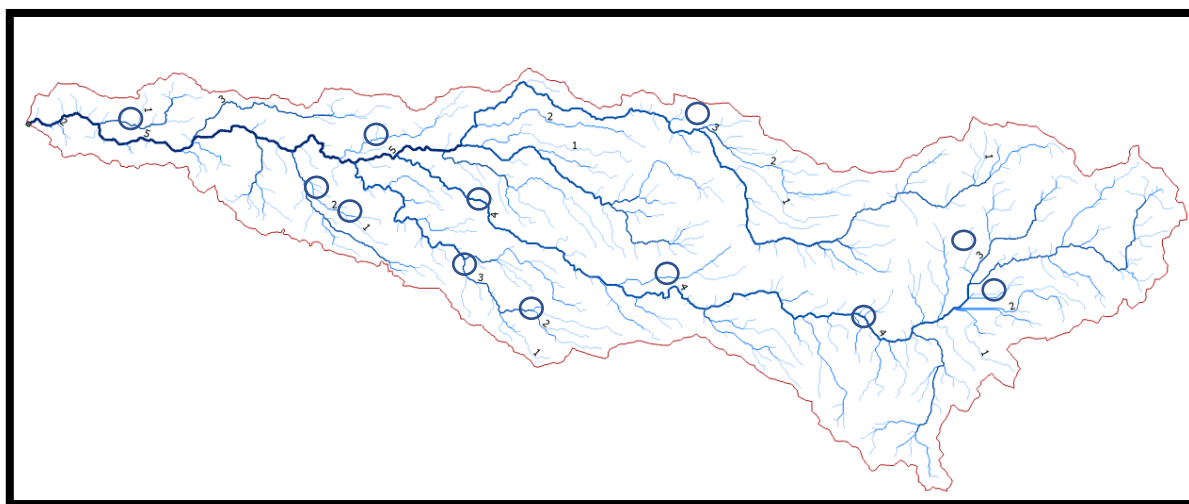


Ilustración 135 hidrografía de la cuenca del río Palacé

La pendiente promedio de la red de drenaje de la cuenca del río Palacé es de 11.60%, es una pendiente alta, lo que indica que la cuenca tiene un relieve accidentado.

6.5.8 Longitud del Cauce Principal del río Palacé

La longitud del cauce principal de una cuenca hidrográfica es la distancia horizontal entre el punto de desagüe aguas abajo y el punto de mayor altitud aguas arriba dentro de la cuenca. Es un parámetro de gran relevancia, ya que influye significativamente en la generación de escorrentía y en el tiempo de tránsito del agua desde los lugares más remotos de la cuenca hasta el punto de salida.

Para obtener esta medida, se emplearon métodos precisos y confiables, combinando la medición directa sobre un mapa topográfico con la utilización de software especializado en análisis de cuencas hidrográficas. Esta combinación de enfoques garantiza la precisión y la fiabilidad de los resultados obtenidos.

En el caso específico del río Palacé, se ha determinado que su longitud del cauce principal es de 88,13 kilómetros.

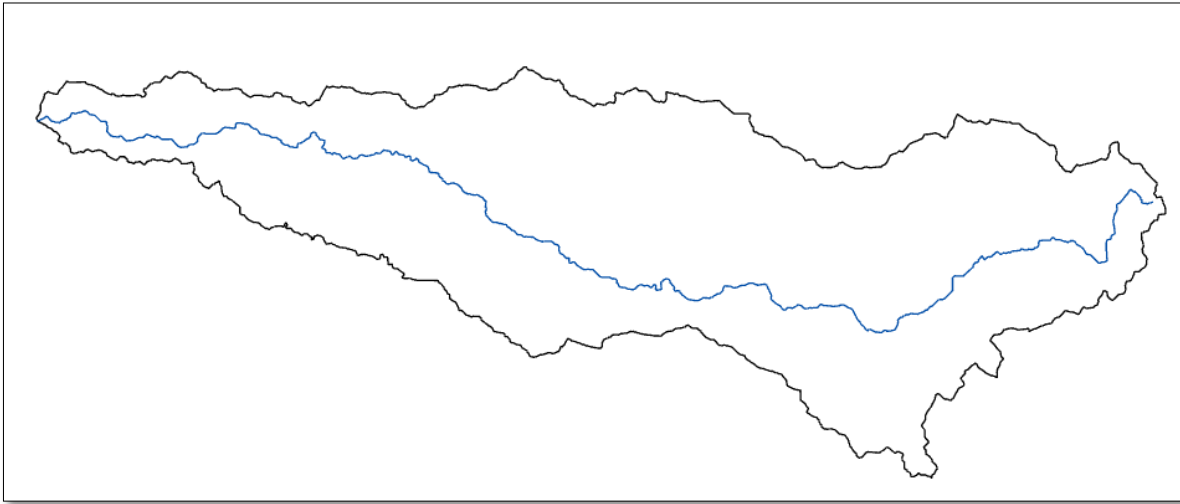


Ilustración 136 Longitud del Cauce Principal (sin escala)

6.5.9 Pendiente de red hídrica

Se crea un mapa de pendiente de la cuenca para conocer la pendiente de la red hidrográfica del río Palacé, desde las nacientes hasta los ríos principales.

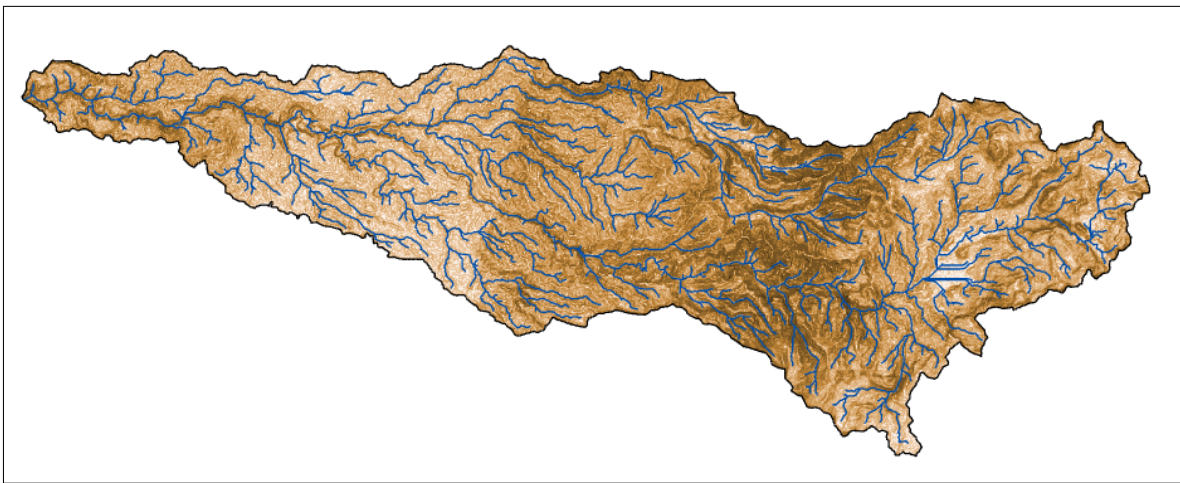


Ilustración 137 Pendiente de la Red hídrica

6.5.10 Pendiente de la Red Hídrica Clasificada

La cuenca del río Palacé presenta una pendiente media de aproximadamente el 24.19%. Sin embargo, su topografía es altamente accidentada, con una pendiente que varía entre el 20%

y el 35% en algunas zonas. Esto se debe a que la cuenca se encuentra en la cordillera de los Andes, una cadena montañosa que se caracteriza por su relieve abrupto.

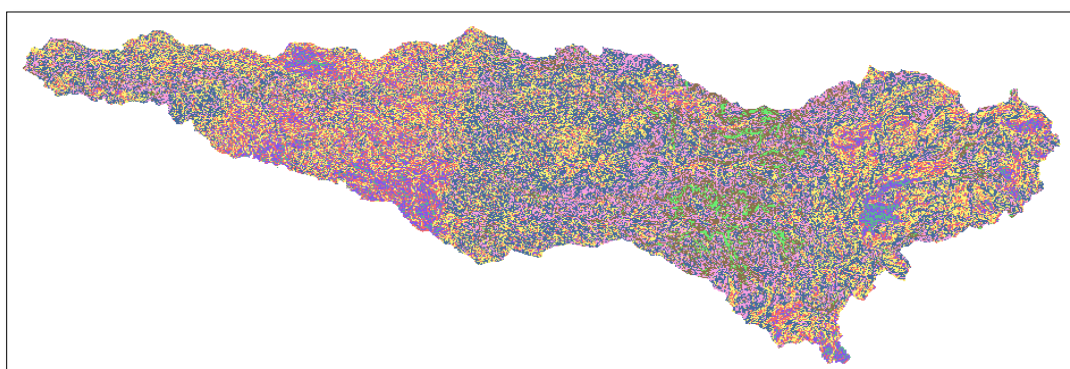


Ilustración 138 Pendiente de la Cuenca Clasificada

6.5.11 Curva Hipsométrica del río Palacé

La cuenca hidrográfica del río Palacé tiene un rango de elevaciones de 1378 metros a 3814 metros, el promedio de las elevaciones es de 1521 metros. Las clases de elevación con mayor área son las clases 1 y 2. La clase 1 tiene un área de 13.66 kilómetros cuadrados, que representa el 2.10% del área total de la cuenca. La clase 2 tiene un área de 107.19 kilómetros cuadrados, que representa el 16.52% del área total de la cuenca.

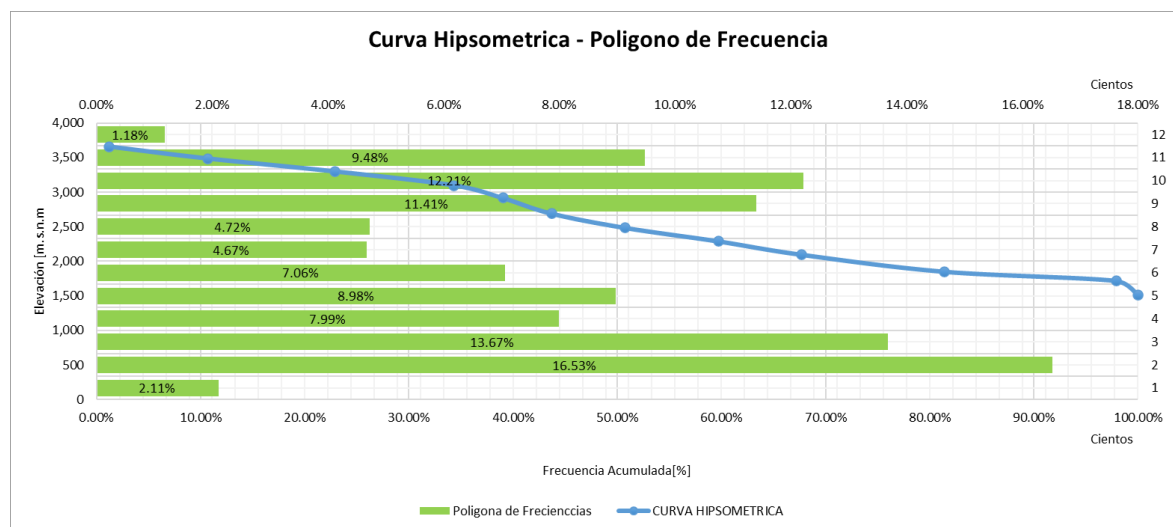


Ilustración 139 Curva Hipsométrica

Las clases de elevación con mayor área corresponden a las elevaciones más bajas. Esto indica que la mayor parte de la cuenca se encuentra en las zonas bajas. Las clases de elevación con

menor área corresponden a las elevaciones más altas. Esto muestra que las zonas altas de la cuenca ocupan una pequeña porción de la cuenca.

6.5.12 Clasificación del río de acuerdo a la curva hipsométrica

La siguiente gráfica muestra que la curva hipsométrica de la cuenca hidrográfica del río Palacé se acerca a los ríos maduros. La curva tiene una forma de campana, con una pendiente relativamente pronunciada en las zonas altas de la cuenca y una pendiente relativamente suave en las zonas bajas de la cuenca.

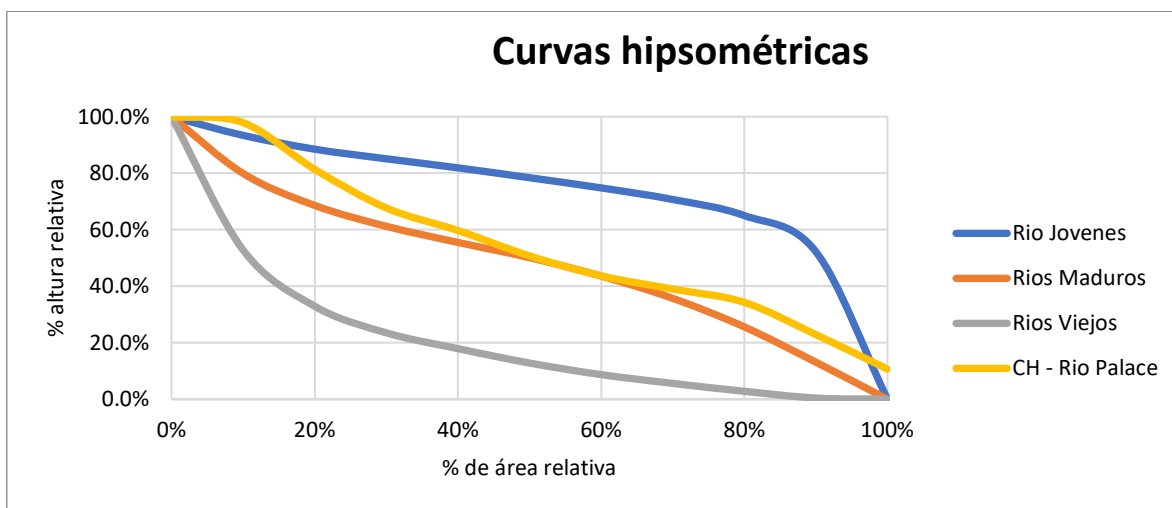


Ilustración 140 Clasificación de los ríos de acuerdo a la curva hipsométrica

La pendiente de la cuenca es relativamente moderada en este rango de elevación. Por lo tanto, la curva hipsométrica se aproxima a los ríos maduros.

6.5.13 Tiempo de concentración

En el caso de la cuenca hidrográfica del río Palacé, los tiempos de concentración calculados varían significativamente entre los diferentes métodos. El tiempo de concentración promedio es de 10,17 horas, pero los valores individuales oscilan entre 0,84 y 26,87 horas.

Tabla 11 Tiempo de concentración

TIEMPO DE CONCENTRACION			
Kirpich	Tc	0.84	Horas
Giandotti	Tc	8.64	Horas
Temez	Tc	5.76	Horas
Passini	Tc	26.87	Horas

V.T. Chow	Tc	1.32	Horas
Clark	Tc	4.71	Horas
ventura	Tc	19.32	Horas
Kerby	Tc	12.00	Horas
Bransby Williams	Tc	17.58	Horas
Tc_DOOGE	Tc	7.58	Horas
Izzard	Tc	16.52	Horas
Papadakis	Tc	13.63	Horas
USACE	Tc	8.80	Horas
CHPW	Tc	8.33	Horas
Racional	Tc	8.06	Horas
PROMEDIO		10.17	Horas

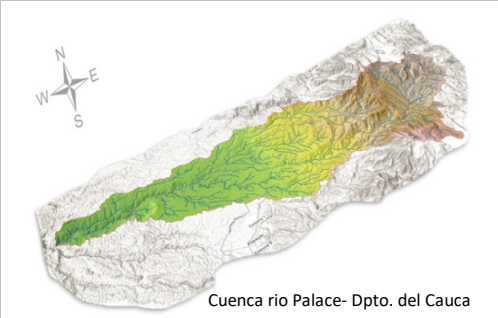
Fuente: Elaboración propia, 2023.

Los resultados de la tabla indican que la cuenca hidrográfica del río Palacé tiene unos tiempos de concentración dispersos. Esto se debe a la topografía compleja de la cuenca, que incluye una combinación de zonas montañosas, colinas y llanuras. En las zonas montañosas, el agua fluye más rápidamente, por lo que el tiempo de concentración es menor. En las zonas colinas, el agua fluye a una velocidad intermedia, y en las zonas llanas, el agua fluye más lentamente, por lo que el tiempo de concentración es mayor.

A continuación, presentamos los resultados tabulados de los cálculos realizados por la interfaz hidrogeomática en la cuenca del río Palacé. Estos resultados ofrecen un resumen detallado de los datos del cálculo de los parámetros morfométricos de la cuenca, lo que proporciona una comprensión más completa de sus características y estructura.

Tabla 12 Resultados de la interfaz hidrogeomática

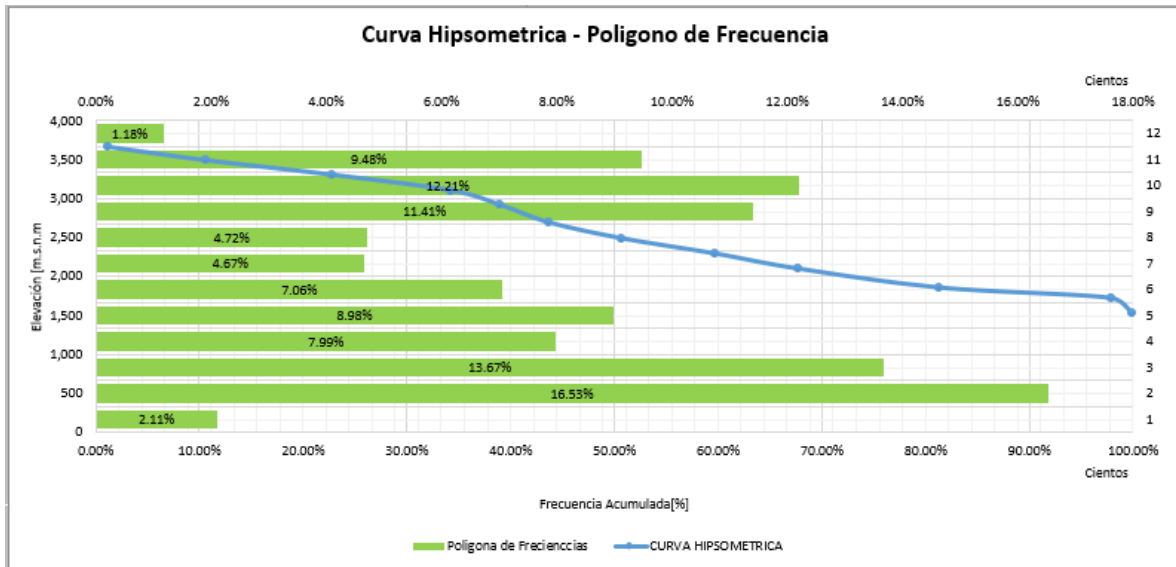
DATOS DE LA CUENCA		
GEOMETRIA		
Área	Km ²	645.10
Perímetro	Km	177.94
Ancho	Km	23.23
Largo	Km	62.46
VALORES DE LAS COTAS		
Cota Mínima	msnm	1,378.00
Cota Máxima	msnm	3,814.00
Desnivel altitudinal		2,436.00



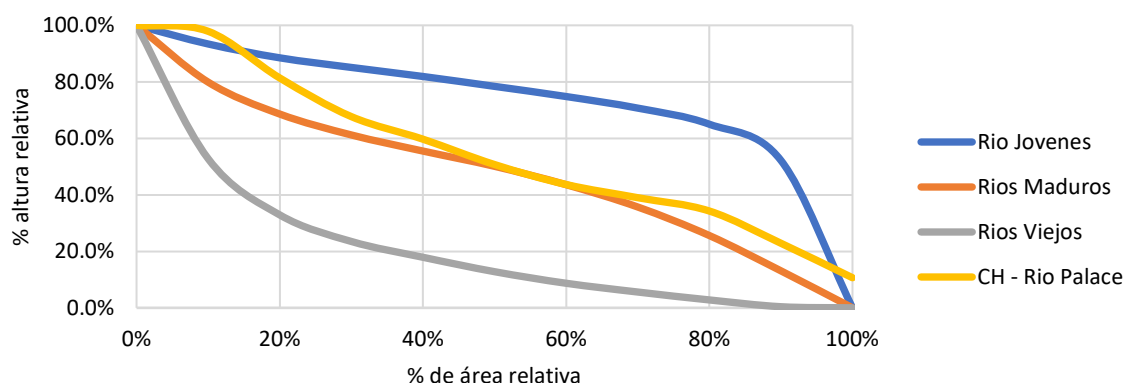
COORDENADAS			PUNTO DE AFORO EN WGS 1984 (4326)	
Centroide X	m	338,530.50	Latitud	2.56801
Centroide Y	m	278,229.04	Longitud	-76.7665
Centroide Z	msnm	2,597.50		
ALTITUDES DE LA CUENCA			PUNTO DE AFORO EN UTM ZONA 18 NORTE (32618)	
Altitud Media	msnm	2,514.00	Latitud	283979.4761
Altitud más frecuente	msnm	1,752.00	Longitud	303596.3536
Altitud de frecuencia Media	msnm	1,146.25		
PENDIENTE DE LA CUENCA				
Pendiente de la cuenca	%	24.19	Terreno Fuertemente accidentado	
HIDROGRAFIA				
Longitud del Cauce Principal	Km	88.13		
Cota Máxima Cauce Principal	msnm	3,482.16		
Cota Mínima Cauce Principal	msnm	1,378.13		
Pendiente del Cauce Principal	%	10.63	0.106	m/m
Orden de la red Hídrica	Adimensiona l	5.00		
Longitud de la red Hídrica	Km	810.16		
Pendiente promedio de la red Hídrica	%	11.60	0.116	m/m
PARAMETROS GEOMORFOLOGICOS DE CUENCA				
Nombre del Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	
Factor Forma	Kf	0.17	S/N	Muy alargada
Índice de Gravelious (Compacidad)	Kc	1.98	S/N	Forma oval oblonga a rectangular - oblonga >1, Cuenca alargada
Índice de alargamiento	IA	2.69	S/N	
Rectángulo Equivalente (Lado Mayor)	L	62.46	km	
Rectángulo Equivalente (Lado Menor)	l	23.23	km	
Densidad de Drenaje	Dd	1.26	u/km ²	
Índice de pendiente	Ip	0.27	S/N	
La Densidad de corrientes	Dc	0.35		

ESTADISTICAS DEM

ITEM	Min	Max	Promedio	Areas (Km²)	Area Acumulada	Areas en %	Areas Acum en %
1	1,378	1,581	1,521	13.66	648.56	210.58%	100.00
2	1,581	1,784	1,719	107.19	634.90	1652.71%	97.89
3	1,784	1,987	1,853	88.68	527.71	1367.41%	81.37
4	1,987	2,190	2,098	51.81	439.03	798.86%	67.69
5	2,190	2,393	2,292	58.24	387.22	897.95%	59.70
6	2,393	2,596	2,487	45.82	328.98	706.46%	50.72
7	2,596	2,799	2,693	30.29	283.16	467.03%	43.66
8	2,799	3,002	2,920	30.59	252.87	471.62%	38.99
9	3,002	3,205	3,103	73.98	222.28	1140.72%	34.27
10	3,205	3,408	3,304	79.22	148.30	1221.44%	22.87
11	3,408	3,611	3,491	61.46	69.08	947.59%	10.65
12	3,611	3,814	3,663	7.63	7.63	117.62%	1.18
				Σ	648.56		
				Promedio	54.05	Max	16.53%
				Hmedia	54.05		



Curvas hipsométricas



HIDROGRAFIA DE LA CUENCA

Clasificación	Orden Cauce	Cantidad Cauce	Longitud	Coincidencias	Pendiente prom	A * B
			(Km)	(A)	(B)	
Nacientes	1	425	400.28	15,241	12.31	187550.25
Arroyos	2	194	191.18	7390	11.56	85408.87
Quebradas	3	101	93.88	3592	8.96	32187.67
Ríos Secundarios	4	93	95.09	3639	10.84	39451.97
Ríos Principales	5	33	29.73	1093	13.16	14381.25
Longitud Total de Cauces			780.43	29,862.00		
Pendiente promedio Cauces						11.60

PENDIENTE DE LA CUENCA

ITEM	Pendientes		Promedio (A)	Ocurrencia (B)	A * B
	Min	Max			
Plano 0<3	0	2.95	1.95	18,703.00	36,506.84
Suave 3-7	3.004626036	6.98	5.11	61,190.00	312,695.09
Medianamente accidentado 7-12	7.019043922	11.98	9.54	100,942.00	962,691.88
Accidentado 12-20	12.00083542	20.00	15.94	164,760.00	2,626,504.75
Fuertemente accidentado 20-35	20.00433922	35.00	26.47	216,755.00	5,737,661.50
Muy fuertemente accidentado 35-50	35.00495911	50.00	41.34	89,277.00	3,690,967.00
Escarpado 50>75	50.00694275	75.00	59.47	49,654.00	2,952,764.75
Muy escarpado >75	75.00231171	200.37	88.07	10,111.00	890,427.63
Total				711,392.00	17,210,218.00
Pendiente promedio de la Cuenca					24.19

HIDROGRAFIA

Longitud del Cauce Principal	Km	88.13
Cota Máxima Cauce Principal	msnm	3,482.16
Cota Mínima Cauce Principal	msnm	1,378.13
Pendiente del Cauce Principal	m/m	10.630
AREA	Km2	

TIEMPO DE CONCENTRACION			
Kirpich	Tc	0.84	Horas
Giandotti	Tc	5.83	Horas
Temez	Tc	5.76	Horas
Passini	Tc	26.87	Horas
V.T. Chow	Tc	1.32	Horas
Clark	Tc	4.71	Horas
ventura	Tc	19.32	Horas
Kerby	Tc	12.00	Horas
Bransby Williams	Tc	17.58	Horas
Tc_DOOGE	Tc	7.58	Horas
Izzard	Tc	16.52	Horas
Papadakis	Tc	13.63	Horas
USACE	Tc	8.80	Horas
CHPW	Tc	8.33	Horas
Racional	Tc	8.06	Horas
PROMEDIO		9.96	Horas

Fuente: Elaboración propia, 2023.

6.5.14 Comparación de resultados

En este apartado se presenta una comparación de los resultados obtenidos mediante el método automático y el método manual de cálculo de parámetros morfométricos.

Para realizar la comparación, se utilizó la cuenca río Palacé como ejemplo. La tabla siguiente muestra los resultados obtenidos para los dos métodos.

Tabla 13 comparación de la interfaz vs método tradicional

AUTOMÁTICO			MANUAL		
DATOS DE LA CUENCA			DATOS DE LA CUENCA		
GEOMETRIA			GEOMETRIA		
Area	Km²	645.10	Area	Km²	645.10
Perimetro	Km	177.94	Perimetro	Km	177.94
Ancho	Km	23.23	Ancho	Km	24.82
Largo	Km	62.46	Largo	Km	62.46
VALORES DE LAS COTAS			VALORES DE LAS COTAS		
Cota Mínima	msnm	1,378.00	Cota Mínima	msnm	1,378.00
Cota Máxima	msnm	3,814.00	Cota Máxima	msnm	3,814.00
Desnivel altitudinal		2,436.00	Desnivel altitudinal		2,436.00
COORDENADAS			COORDENADAS		
Centroide X	m	338,530.50	Centroide X	m	338,530.50
Centroide Y	m	278,229.04	Centroide Y	m	278,229.04
Centroide Z	msnm	2,537.50	Centroide Z	msnm	2,537.50
ALTITUDES DE LA CUENCA			ALTITUDES DE LA CUENCA		
Altitud Media	msnm	2,514.00	Altitud Media	msnm	2,535.71
Altitud mas frecuente	msnm	1,752.00	Altitud mas frecuente	msnm	1,719.66
Altitud de frecuencia Media	msnm	2,513.41	Altitud de frecuencia Media	msnm	2,513.57
PENDIENTE DE LA CUENCA			PENDIENTE DE LA CUENCA		
Pendiente de la cuenca	‰	24.19	Pendiente de la cuenca	‰	25.56
HIDROGRAFIA			HIDROGRAFIA		
Longitud del Cauce Principal	Km	88.13	Longitud del Cauce Principal	Km	88.13
Cota Máxima Cauce Principal	msnm	3,462.16	Cota Máxima Cauce Principal	msnm	3,462.16
Cota Mínima Cauce Principal	msnm	1,378.13	Cota Mínima Cauce Principal	msnm	1,378.13
Pendiente del Cauce Principal	‰	10.63	Pendiente del Cauce Principal	‰	11.60
Orden de la red Hidrica	Adimensional	5	Orden de la red Hidrica	Adimensional	5
Longitud de la red Hidrica	Km	810.16	Longitud de la red Hidrica	Km	810.16
pendiente promedio de la red hidrica	‰	11.60	pendiente promedio de la red hidrica	‰	11.60



PUNTO DE AFORO EN WGS 1984 (4326)

Latitud	-2.56801
Longitud	-76.76651

PUNTO DE AFORO EN UTM ZONA 18 NORTE (32618)

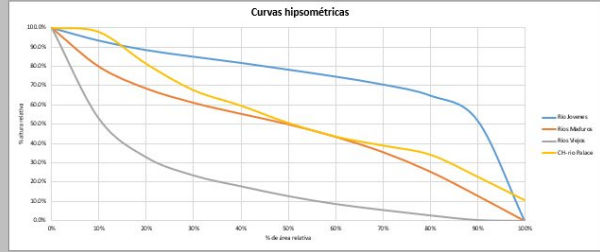
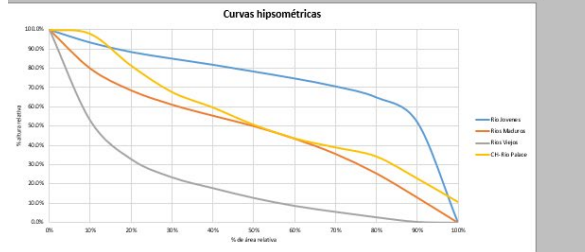
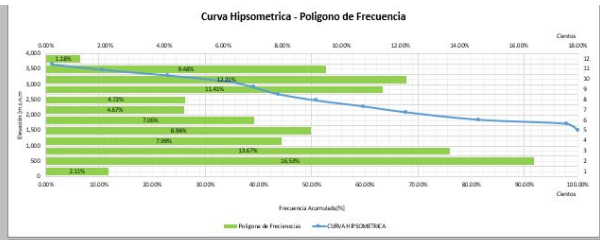
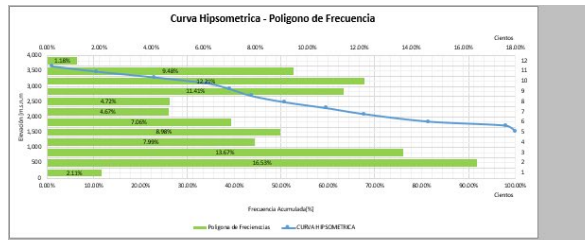
Latitud	283373.476
Longitud	303596.354

PARAMETROS GEOMORFOLÓGICOS DE CUENCA

Nombre del Parametro	Simbolo	Valor	Unidad
Factor Forma	Kf	0.17	S/N
Indice de Gravelous (Compaicidad)	Kc	1.98	S/N
Indice de alargamiento	IA	2.69	S/N
Rectangulo Equivalente (Lado Mayor)	L	81.01	km
Rectangulo Equivalente (Lado Menor)	I	7.96	km
Densidad de Drenaje	Dd	1.26	uñ.m²
Indice de pendiente	Ip	0.27	S/N

PARAMETROS GEOMORFOLÓGICOS DE CUENCA

Nombre del Parametro	Simbolo	Valor	Unidad
Factor Forma	Kf	0.17	S/N
Indice de Gravelous (Compaicidad)	Kc	1.98	S/N
Indice de alargamiento	IA	2.54	S/N
Rectangulo Equivalente (Lado Mayor)	L	81.01	km
Rectangulo Equivalente (Lado Menor)	I	7.96	km
Densidad de Drenaje	Dd	1.26	uñ.m²
Indice de pendiente	Ip	0.27	S/N



HIDROGRAFIA DE LA CUENCA

Clasificación	Orden Cauce	Cantidad Cauce	Longitud (Km)	Coincidencias (A)	Pendiente prom (B)	A * B
Nacientes	1	425	400.28	15,245	12.3	187579.79
Arroyos	2	194	191.18	7387	11.56	85395.92
Quebradas	3	101	93.88	3592	8.96	32183.98
Rios Secundarios	4	93	95.00	3038	10.84	39431.11
Rios Principales	5	33	29.73	1093	13.16	14381.25
Longitud Total de Cauces			780.43	29,862.00		
Pendiente promedio Cauces					11.60	

HIDROGRAFIA DE LA CUENCA

Clasificación	Orden Cauce	Cantidad Cauce	Longitud (Km)	Coincidencias (A)	Pendiente prom (B)	A * B
Nacientes	1	425	400.28	15,245	12.30	187,579.79
Arroyos	2	194	191.18	7,387	11.56	85,395.92
Quebradas	3	101	93.88	3,592	8.96	32,183.98
Rios Secundarios	4	93	95.00	3,038	10.84	39,431.11
Rios Principales	5	33	29.73	1,093	13.16	14,381.25
Longitud Total de Cauces			780.43	29,862.00		
Pendiente promedio Cauces					11.60	

PENDIENTE DE LA CUENCA

ITEM	Pendientes		Promedio (A)	Ocurrencia (B)	A * B
	Min	Max			
Plano 0-3	0	2.96	1.66	18,703.00	36,506.84
Suave 3-7	3.004526038	6.98	5.11	61,190.00	312,695.09
Medianamente accidentado 7-12	7.019043022	11.98	9.54	100,842.00	962,691.88
Accidentalado 12-20	12.00035421	20.00	16.94	194,790.00	2,626,924.76
Fuertemente accidentado 20-35	20.0043922	35.00	26.47	218,750.00	5,771,661.90
Muy fuertemente accidentado 35-50	35.00499111	50.00	41.34	89,277.00	3,690,967.00
Escarpado 50-75	50.00494775	75.00	62.47	49,654.00	2,992,764.79
Muy escarpado >75	75.00231171	200.37	88.07	10,111.00	890,427.03
Total			711,392.00	17,210,218.00	
Pendiente promedio de la Cuenca					24.19

PENDIENTE DE LA CUENCA

ITEM	Pendientes		Promedio (A)	Ocurrencia (B)	A * B
	Min	Max			
Plano 0-3	0.00	2.96	1.47	18,703.00	27,663.12
Suave 3-7	3.00	6.98	4.99	61,190.00	356,451.49
Medianamente accidentado 7-12	7.02	11.98	9.50	100,842.00	959,059.33
Accidentalado 12-20	12.00	20.00	16.00	194,790.00	2,626,224.76
Fuertemente accidentado 20-35	20.00	35.00	27.90	218,750.00	5,911,212.75
Muy fuertemente accidentado 35-50	35.00	50.00	42.50	89,277.00	3,794,493.68
Escarpado 50-75	50.01	75.00	62.50	49,654.00	3,103,947.37
Muy escarpado >75	75.00	200.37	137.69	10,111.00	1,392,107.60
Total			711,392.00	18,179,793.31	
Pendiente promedio de la Cuenca					25.56

HIDROGRAFIA				HIDROGRAFIA			
Longitud del Cauce Principal	m		88.13	Longitud del Cauce Principal	Km2		88.13
Cota Maxima Cauce Principal	m/m		3.482.16	Cota Maxima Cauce Principal	m/m		3.482.16
Cota Minima Cauce Principal	m/m		1.378.13	Cota Minima Cauce Principal	m/m		1.378.13
Pendiente del Cauce Principal	m/m		10.630	Pendiente del Cauce Principal	m/m		11.600
AREA	Km2		645.10	Area	Km2		645.10

TIEMPO DE CONCENTRACION				TIEMPO DE CONCENTRACION			
Kirpich	Tc	0.84	Horas	Kirpich	Tc	0.81	Horas
Glandotti	Tc	5.63	Horas	Glandotti	Tc	5.74	Horas
Tamez	Tc	5.76	Horas	Tamez	Tc	5.66	Horas
Passini	Tc	26.87	Horas	Passini	Tc	23.72	Horas
V.T. Chow	Tc	1.32	Horas	V.T. Chow	Tc	1.29	Horas
Clark	Tc	4.71	Horas	Clark	Tc	4.61	Horas
ventura	Tc	19.32	Horas	ventura	Tc	19.32	Horas
Kerby	Tc	12.00	Horas	Kerby	Tc	11.78	Horas
Bransby Williams	Tc	17.58	Horas	Bransby Williams	Tc	17.28	Horas
Tc DOOGE	Tc	7.58	Horas	Tc DOOGE	Tc	7.47	Horas
Izzard	Tc	16.52	Horas	Izzard	Tc	16.26	Horas
Papadakis	Tc	13.63	Horas	Papadakis	Tc	13.52	Horas
USACE	Tc	8.80	Horas	USACE	Tc	8.65	Horas
CHPW	Tc	8.33	Horas	CHPW	Tc	8.33	Horas
Racional	Tc	8.06	Horas	Racional	Tc	8.06	Horas
PROMEDIO		9.88	Horas	PROMEDIO		9.84	Horas

Fuente: Elaboración propia, 2023.

La anterior tabla de comparación de resultados muestra que los valores obtenidos mediante el método automático son muy similares a los obtenidos mediante el método manual. En general, los valores obtenidos mediante con la interfaz Hidrogeomática son ligeramente Diferentes a los obtenidos mediante el método comúnmente usado.

Estas diferencias se pueden atribuir a varios factores como:

- a) La cantidad de decimales usado con la interfaz geomática, que redundo en la precisión de los resultados.
- b) En el caso del cálculo de las alturas, las pendientes y la red hídrica, la interfaz de hidrogeomática toma todos los parámetros que tiene el modelo de elevación digital.
- c) La complejidad de la cuenca.
- d) En general, estas diferencias son pequeñas y no afectan la validez de los resultados.
- e) La interfaz hidrogeomática permite calcular una mayor cantidad de parámetros morfométricos en un tiempo más corto que el método de cálculo manual usado con mayor frecuencia.

7 CONCLUSIONES

Importancia de la Modelización Hidrológica: El trabajo de tesis nos amplió visión sobre la necesidad y la trascendencia de los modelos hidrológicos en la comprensión de sistemas de agua complejos. En un mundo donde los patrones climáticos están cambiando rápidamente, estos modelos se vuelven herramientas imprescindibles. Permiten anticipar cambios, comprender interacciones y, en última instancia, adoptar decisiones informadas para la gestión de recursos hídricos, que son esenciales para la supervivencia y desarrollo de comunidades.

Interconexión de Componentes Hidrológicos: En el desarrollo de la tesis se analizó la intrincada interacción entre diferentes componentes del sistema hidrológico. Es evidente que factores como la precipitación, la escorrentía superficial y subsuperficial, y la evapotranspiración no operan en silos; más bien, están interconectados en una red compleja. Cualquier cambio en uno de estos componentes puede tener repercusiones en otros, lo que puede amplificar o mitigar ciertos efectos en el sistema en su conjunto.

Rigor en la Calibración y Validación: La precisión y fiabilidad de cualquier modelo hidrológico dependen en gran medida de los procesos de calibración y validación. A través del trabajo de grado, buscamos garantizar que el modelo se ajuste y valide adecuadamente con datos reales. Esto no solo mejora la confianza en las predicciones del modelo, sino que también garantiza que los hallazgos y recomendaciones basados en él sean aplicables en la vida real.

Los resultados de la búsqueda bibliográfica muestran que las interfaces hidrogeomáticas es una herramienta valiosa para la gestión integral del recurso hídrico. Esta interfaz permite calcular una amplia gama de parámetros morfométricos, que pueden utilizarse para evaluar las características físicas y funcionales de las cuencas hidrográficas.

El uso de interfaces hidrogeomáticas puede ayudar a mejorar la toma de decisiones en la gestión del Recurso hídrico, ya que proporciona información valiosa sobre el comportamiento de las cuencas hidrográficas como los eventos hidrológicos extremos tales como inundaciones y sequías.

El análisis estadístico adaptado es similar al análisis original en términos de metodología. Sin embargo, se han realizado algunas modificaciones para adaptarlo a la búsqueda bibliográfica realizada.

Conectar con ASF abre la puerta a una amplia gama de aplicaciones en hidrología e hidráulica, desde el modelado de cuencas hidrográficas hasta el monitoreo en tiempo real de condiciones extremas como inundaciones.

La interfaz hidrogeomática es una herramienta eficaz para el cálculo de parámetros morfométricos. Los resultados obtenidos mediante esta interfaz son comparables a los obtenidos mediante el método de cálculo manual, pero con la ventaja de ser más eficientes y precisos.

La interfaz hidrogeomática permite calcular una mayor cantidad de parámetros morfométricos que el método de cálculo manual. Esto proporciona una comprensión más completa de las características y estructura de la cuenca.

Las diferencias entre los resultados obtenidos mediante los dos métodos se pueden atribuir a varios factores, como la precisión de los datos utilizados, la complejidad de la cuenca y el algoritmo utilizado por el software.

8 OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

La interfaz hidrogeomática es una herramienta en desarrollo. Es probable que se realicen mejoras en el futuro para aumentar la precisión y el rendimiento del software.

La interfaz hidrogeomática es una herramienta que puede ser utilizada para diversos fines, como la evaluación de la calidad del agua, la planificación de la gestión de los recursos hídricos y el estudio de los procesos hidrológicos.

Integrar Otras Variables: Considerar variables adicionales, como el uso del suelo o las prácticas agrícolas, podría enriquecer el modelo y ofrecer una comprensión más holística de los sistemas hidrológicos.

Educación y Divulgación: Los hallazgos del documento son cruciales no solo para los profesionales, sino también para el público en general. Sería valioso desarrollar programas de educación y divulgación para sensibilizar al público sobre la importancia de la gestión del Recurso hídrico y el impacto del cambio climático en cuencas hidrográficas.

9 BIBLIOGRAFÍA

- Albattah, M. MS., Ghayda, A. R. S., Samih, A. R. B., & Sadoun, B. (2021). Assessment of geomatics engineering techniques for landslides investigations for traffic safety. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3, Part 2), 805–814.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.06.007>
- A.u., A., K.r., B., Thomas, P. K., Anns, M., P.b., R., & Babu, S. (2021). Status of GIS-enabled morphometric analysis of river basins of Kerala, Southern India: A review and assessment. *Regional Studies in Marine Science*, 44, 101792.
<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101792>
- Bateman, A. (2017). *HIDROLOGIA BASICA Y APLICADA*. 70.
- Bedair, S., Sayed, S. A., & AlMetwaly, W. M. (2022). Enhancing Hybrid Learning using Open Source GIS-Based Maps Archiving System. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 25(3), 779–793.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.07.003>
- Benavides Mora, V., Tarlé Pissarra, T. C., & Galbiatti, J. A. (2009). Morphometric characterisation and classification of the Bobo river watershed in the Nariño department, Colombia. *Ingeniería e Investigación*, 29(3), 97–101.
<https://doi.org/10.15446/ing.investig.v29n3.15190>
- Benjumea-Hoyos, C. A., Villada, A., Castaño, J. D., Benjumea-Hoyos, C. A., Villada, A., & Castaño, J. D. (2020). Comportamiento de la estructura térmica y características morfométricas de un humedal de montaña tropical. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(171), 329–343.
<https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.1046>

- Bunyangha, J., Majaliwa, Mwanjalolo. J. G., Muthumbi, Agnes. W., Gichuki, Nathan. N., & Egeru, A. (2021). Past and future land use/land cover changes from multi-temporal Landsat imagery in Mpologoma catchment, eastern Uganda. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3, Part 2), 675–685. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.02.003>
- Burbano-Girón, J., Domínguez, E., & Barón-Ruiz, O. (2016a). Análisis de la relación entre variables morfométricas y biofísicas en la estimación de características probabilísticas para la oferta hídrica superficial en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(156), Article 156. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.291>
- Burbano-Girón, J., Domínguez, E., & Barón-Ruiz, O. (2016b). Analysis of the relationship between morphometric and biophysical variables in the estimation of probability characteristics for surface water supply in Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(156), 514–526. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.291>
- Caldas Calle, A. X. (2020). *Caracterización SIG del uso de la tierra y geomorfología del Macizo del Cajas—Ecuador*. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/33575/3/Trabajo%20de%20Titulacion.pdf>
- Chen, C., Judge, J., & Hulse, D. (2022). PyLUSAT: An open-source Python toolkit for GIS-based land use suitability analysis. *Environmental Modelling & Software*, 151, 105362. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105362>

CRC. (2010). *PLAN DE ORDENACION Y MANEJO DE LA PARTE ALTA DE LA SUBCUENCA HIDROGRAFICA DEL RIO PALACE.*

<https://www.yumpu.com/es/document/view/31450738/cuenca-rio-palace-corporacion-autonoma-regional-del-cauca>

Decreto 1729 de 2002—Gestor Normativo—Función Pública. (s/f). Recuperado el 4 de noviembre de 2023, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=5534>

Dinesh, A. C., Joseph Markose, V., & Jayappa, K. S. (2012). Bearing, azimuth and drainage (bAd) calculator: A new GIS supported tool for quantitative analyses of drainage networks and watershed parameters. *Computers & Geosciences*, 48, 67–72. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.05.016>

Dobos, E., Montanarella, L., Nègre, T., & Micheli, E. (2001). A regional scale soil mapping approach using integrated AVHRR and DEM data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 3(1), 30–42. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(01\)85019-4](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(01)85019-4)

Erdem, F., Atun, R., Yigit Avdan, Z., Atila, I., & Avdan, U. (2021). Drought analysis of Van Lake Basin with remote sensing and GIS technologies. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3, Part 2), 1093–1102. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.10.006>

Franco, A. C. V., & Dal Santo, M. A. (2015). CONTRIBUIÇÃO DA MORFOMETRIA PARA O ESTUDO DAS INUNDAÇÕES NA SUB-BACIA DO RIO LUÍS

ALVES/SC. *Mercator (Fortaleza)*, 14, 151–167.
<https://doi.org/10.4215/RM2015.1403.0009>

Ghasemlounia, R., & Utlu, M. (2021). Flood prioritization of basins based on geomorphometric properties using principal component analysis, morphometric analysis and Redvan's priority methods: A case study of Harşit River basin. *Journal of Hydrology*, 603, 127061. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127061>

Giannetti, F., Montanarella, L., & Salandin, R. (2001). Integrated use of satellite images, DEMs, soil and substrate data in studying mountainous lands. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 3(1), 25–29. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(01\)85018-2](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(01)85018-2)

Girona, U. (2017, mayo 8). ¿Qué software y herramientas de SIG utilizamos? *UNIGIS*. <https://www.unigis.es/software-sig/>

Goya-Heredia, A., Zafra-Mejía, C. A., & Rodríguez-Miranda, J. P. (2020). Tendencias metodológicas en la evaluación del grado de contaminación y de riesgos por metales pesados presentes en sedimentos viales urbanos. *Revista UIS Ingenierías*, 19(4), Article 4. <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n4-2020012>

Guerra, D. A. H. (2015). *ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS Y LAS UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO RÁQUIRA DEPARTAMENTO DE BOYACÁ A TRAVÉS DEL PROGRAMA SWAT*. 71.

Hoggart, S., & Thompson, R. (2015). *Habitat Provision—An overview* | *ScienceDirect Topics*. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/habitat-provision>

- IGAC. (2014). *CLASIFICACIÓN DE LAS TIERRAS POR SU CAPACIDAD DE USO*.
<http://igacnet2.igac.gov.co/intranet/UserFiles/File/procedimientos/instructivos/2014/M40100-02%2014V2%20Para%20la%20clasificacion%20de%20las%20tierras%20por%20su%20capacidad%20de%20uso.pdf>
- Jacobson, I., BOOCH, G., & RUMBAUGH, G. (2000). *El Proceso Unificado de Desarrollo de Software*. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2003/bmfcis718d/xhtml/TH.4.xml>
- Jenson, s. K., & . Domingue, J. O. (1988). Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING*, 8.
- Korres, W., & Schneider, K. (2018). 2.04—GIS for Hydrology. En B. Huang (Ed.), *Comprehensive Geographic Information Systems* (pp. 51–80). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09635-4>
- Laxmi, G., Agrawal, N., Dixit, J., & Subashisa. (2022). A GIS-based assessment of active tectonics from morphometric parameters and geomorphic indices of Assam Region, India. *Journal of Asian Earth Sciences: X*, 8, 100115. <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2022.100115>
- Lima, A. de O., Lima-Filho, F. P., Dias, N. da S., Sousa, A. de M., & Silva, M. R. F. da. (2019). Morphometry and longitudinal profile of the river cobras sub-basin in planning the location of underground dams. *REVISTA CIÊNCIA AGRONÔMICA*, 50(4). <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20190066>

Lindsay, J. B. (2016). Whitebox GAT: A case study in geomorphometric analysis. *Computers & Geosciences*, 95, 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.07.003>

Liu, D., Cui, Y., Wang, H., Jin, W., Wu, C., Bazai, N. A., Zhang, G., Carling, P. A., & Chen, H. (2021). Assessment of local outburst flood risk from successive landslides: Case study of Baige landslide-dammed lake, upper Jinsha river, eastern Tibet. *Journal of Hydrology*, 599, 126294. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126294>

Marin, R. J., García, E. F., & Aristizábal, E. (2020). Effect of basin morphometric parameters on physically-based rainfall thresholds for shallow landslides. *Engineering Geology*, 278, 105855. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105855>

Méndez Mata, W. J. (2016). Análisis cuantitativo del relieve en cuencas de drenaje de la vertiente norte del macizo “El Ávila” (estado Vargas, Venezuela) y su significado hidrogeomorfológico. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 2016(91), 25–42. <https://doi.org/10.14350/rig.47722>

Meza Aliaga, M., Rodríguez Valdivia, A., Corvacho Ganahín, O., & Tapia Tosetti, A. (2014). ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE MICROCUENCAS AFECTADAS POR FLUJOS DE DETRITOS BAJO PRECIPITACIÓN INTENSA EN LA QUEBRADA DE CAMIÑA, NORTE GRANDE DE CHILE. *Diálogo andino*, 44, 15–24. <https://doi.org/10.4067/S0719-26812014000200003>

Minambiente. (2014). *Guía técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas*. https://www.andi.com.co/uploads/guia_de_pomcas.pdf

- Mitterer, J. A. (2022). TATOO – Python Topographic Analysis Tool Library for semi-automated setup of high-resolution integrated hydrologic models. *Environmental Modelling & Software*, 153, 105406. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105406>
- Nadhim Al-neama, S., Yang, S., & Muneer Yahya, B. (2022). Evaluation of surface run-off potential of basins in Nineveh governorate, Iraq based on morphometric analysis, using RS and GIS. *Materials Today: Proceedings*, 60, 1753–1768. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.313>
- Olmos, P. S. (2010). *Sistemas de Información Geográfica (SIG): Técnicas básicas para estudios de biodiversidad*. 58.
- Omran, A., Dietrich, S., Abouelmagd, A., & Michael, M. (2016). New ArcGIS tools developed for stream network extraction and basin delineations using Python and java script. *Computers & Geosciences*, 94, 140–149. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.06.012>
- Ossa, J. A. G., & Estrada, G. A. U. (2011). Los sistemas de información geográfica y los planes de ordenamiento territorial en Colombia. *Perspectiva Geográfica*, 247–266. <https://doi.org/10.19053/01233769.1758>
- Parra Cuadros, M. (2021). *METODOLOGÍA PARA LA CLASIFICACIÓN DE LA MORFOLOGÍA DE CORRIENTES APLICADA A LAS CUENCAS PRIORIZADAS POR LA GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN COLOMBIA*. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/22078/1/ParraMateo_2021_MetodologiaClasificacionCorrientes.pdf

Quesada Román, A., & Barrantes Castillo, G. (2017). Modelo morfométrico para determinar áreas susceptibles a procesos de ladera. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 2017(94), 37–48. <https://doi.org/10.14350/rig.57318>

RICCLISA, S. (2017). *RICCLISA - Cuantificación de áreas de coberturas terrestres sobre 3 cuencas piloto en las fajas de protección de sus ríos*. <https://www.ricclisa.org/index.php/noticias/item/239-cuantificacion-de-areas-de-coberturas-terrestres-sobre-3-cuencas-piloto-en-las-fajas-de-proteccion-de-sus-rios>

Rodríguez, D., Torrealba, W., & Rincón, J. C. (2019). EVALUACIÓN DE HERRAMIENTAS DE ENTORNO “SIG” Y SUS APLICACIONES EN LA MODELACIÓN HIDRÁULICA DE RÍOS. *Gaceta Técnica*, 20(1), 79–93.

Sendra, J. B. (1992). *Sistemas de Información Geográfica*. Rialp, Ediciones, S.A.

Sepulveda Millan, F. N. (2021). *SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL EN COLOMBIA*. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/39674/SepulvedaMillanFredNicolas2021.pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Shelar, R. S., Shinde, S. P., Pande, C. B., Moharir, K. N., Orimoloye, I. R., Mishra, A. P., & Varade, A. M. (2022). Sub-watershed prioritization of Koyna river basin in India using multi criteria analytical hierarchical process, remote sensing and GIS techniques. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 128, 103219. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103219>

Shreve. (1966). *Cómo funciona Orden de transmisión—ArcGIS Pro | Documentación.*

<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-stream-order-works.htm>

Siqueira, H. E., Pissarra, T. C. T., do Valle Junior, R. F., Fernandes, L. F. S., & Pacheco, F.

A. L. (2017). A multi criteria analog model for assessing the vulnerability of rural catchments to road spills of hazardous substances. *Environmental Impact Assessment Review*, 64, 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.02.002>

Tang, J., & Matyas, C. J. (2018). Arc4nix: A cross-platform geospatial analytical library for

cluster and cloud computing. *Computers & Geosciences*, 111, 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.11.011>

Tarboton, D. G., Bras, R. L., & Rodriguez-Iturbe, I. (1991). On the extraction of channel

networks from digital elevation data. *Hydrological Processes*, 5(1), 81–100. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050107>

Tesema, T. A. (2021). Impact of identical digital elevation model resolution and sources on

morphometric parameters of Tena watershed, Ethiopia. *Heliyon*, 7(11), e08345. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08345>

Tesema, T. A. (2022). Erosion hotspot mapping using integrated morphometric parameters

and Land use/land cover of Jigjiga Watershed, Ethiopia. *Heliyon*, 8(6), e09780. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09780>

Toro, M. D. C., Estupiñán, E. C., Navarrete, X. A. Z., Bravo, M. E. R., & Zambrano, P. E. I.

(2021). Estudio de características morfológicas de la cuenca “Cañitas” y su relación

con el riesgo de inundaciones repentinas. *Dilemas contemporáneos: Educación, Política y Valores*. <https://doi.org/10.46377/dilemas.v8i.2605>

Vélez Upegui, J. I. (2013). ESTRATEGIA DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA: INTEGRACIÓN CONCEPTUAL DE HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y GEOMORFOLOGÍA. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 37(144), 393–409.

Zhang, H., Yao, Z., Yang, Q., Li, S., Baartman, J. E. M., Gai, L., Yao, M., Yang, X., Ritsema, C. J., & Geissen, V. (2017). An integrated algorithm to evaluate flow direction and flow accumulation in flat regions of hydrologically corrected DEMs. *CATENA*, 151, 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.12.009>

10 ANEXOS

Anexo 1 Mapas de la cuenca hidrográfica

Ilustración 141 Mapa del Fill en el área de estudio

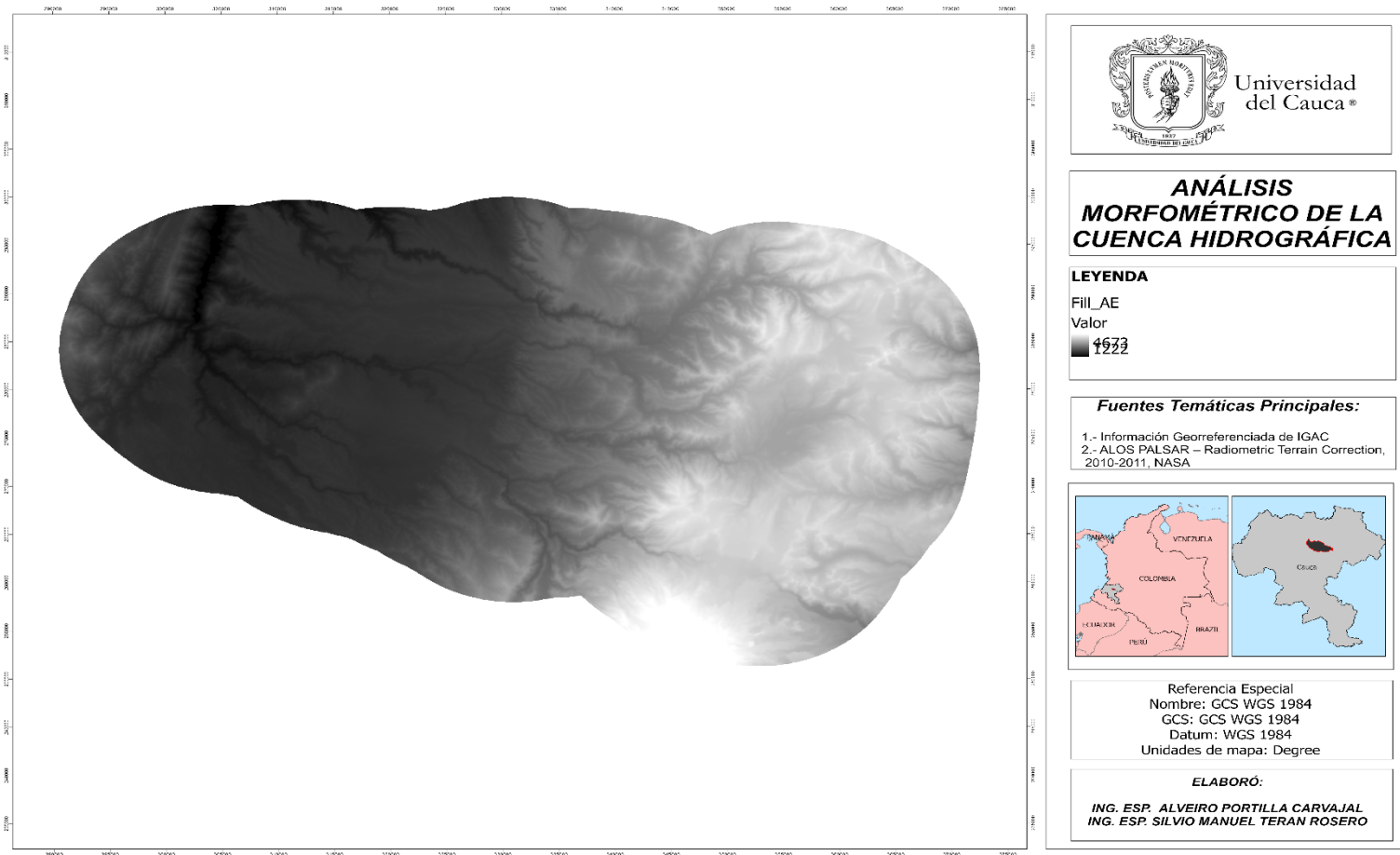


Ilustración 142 Mapa de la dirección del flujo en el área de estudio

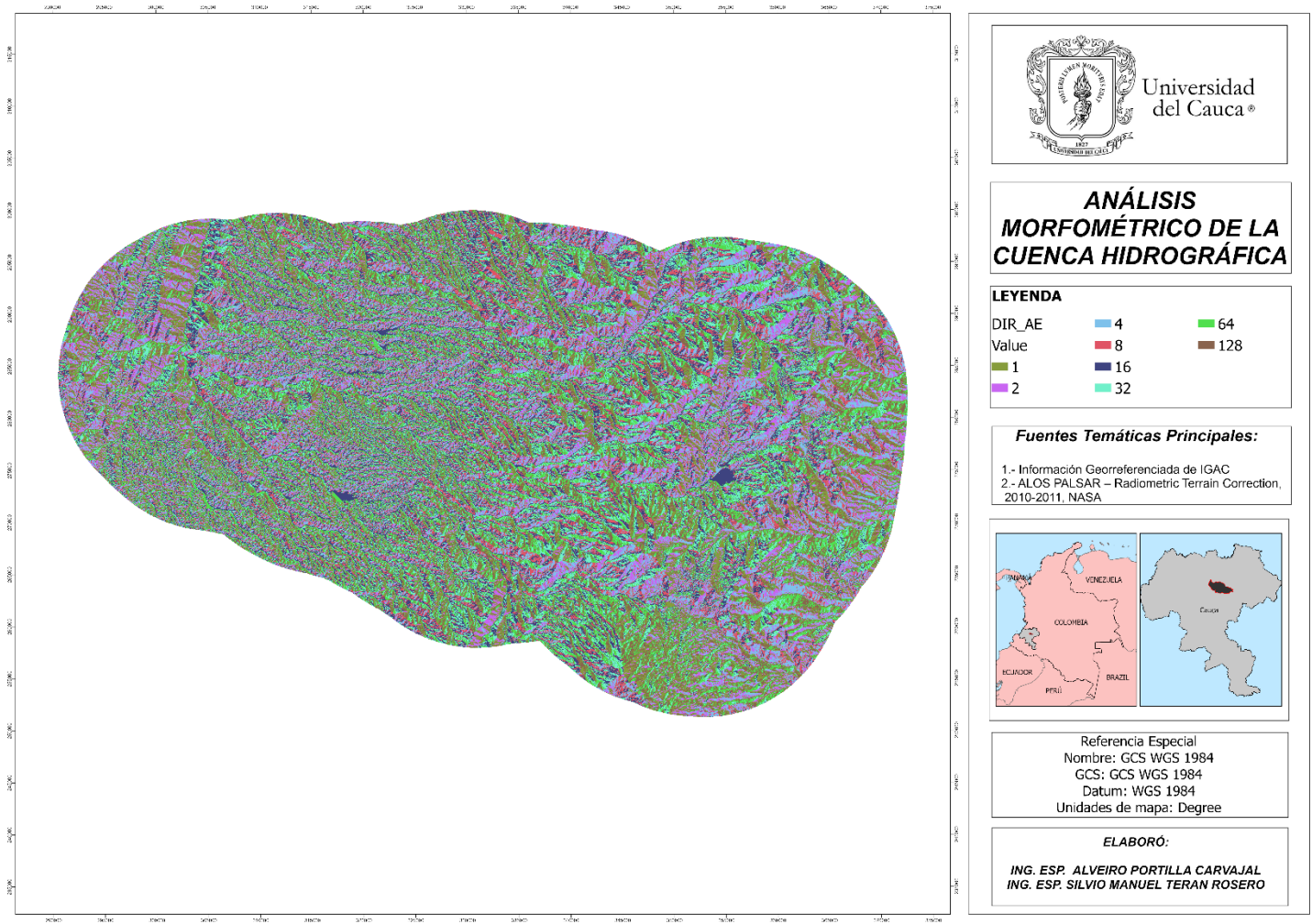


Ilustración 143 Mapa de la acumulación en el área de estudio

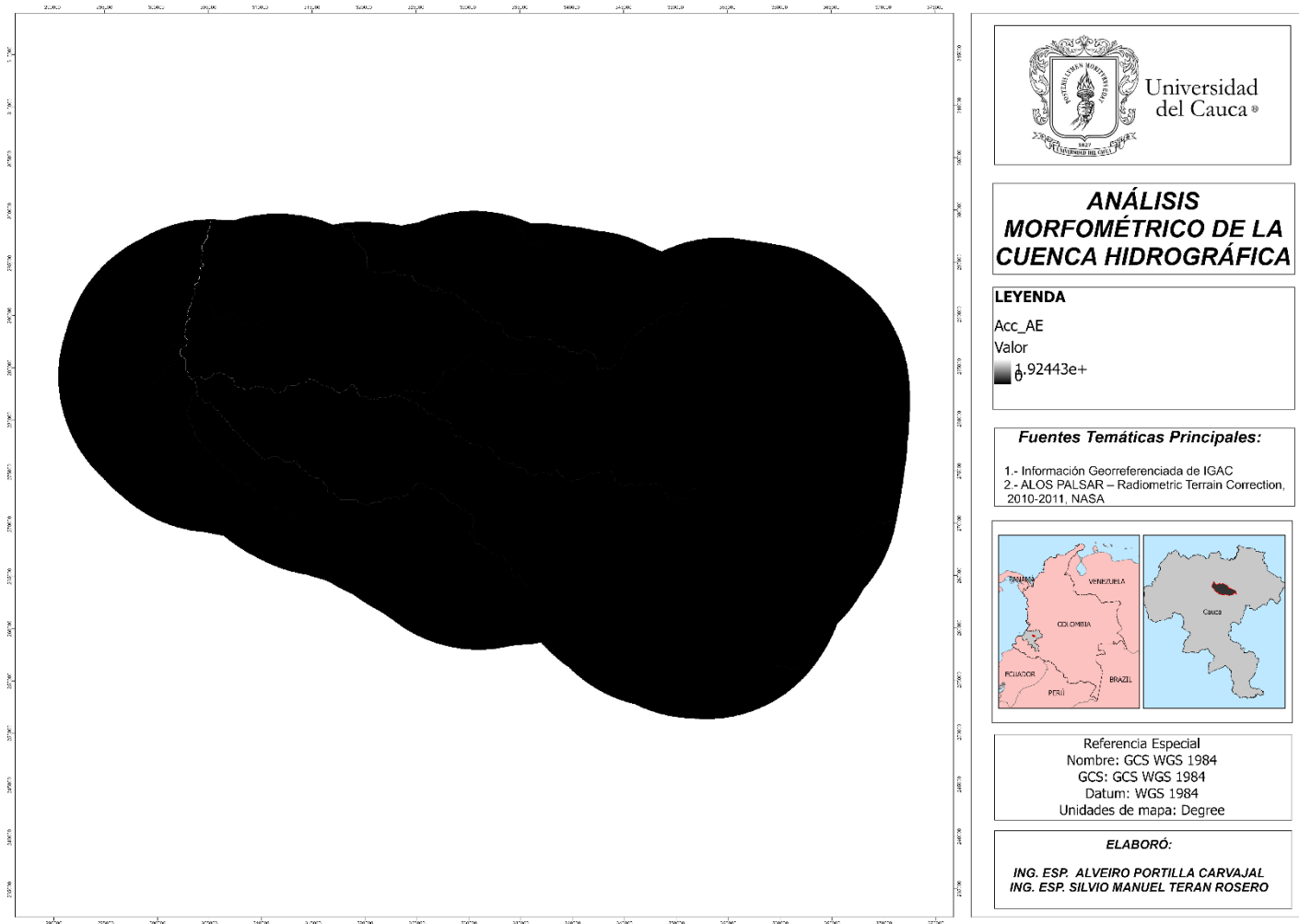


Ilustración 144 Mapa de la red hídrica del área de estudio

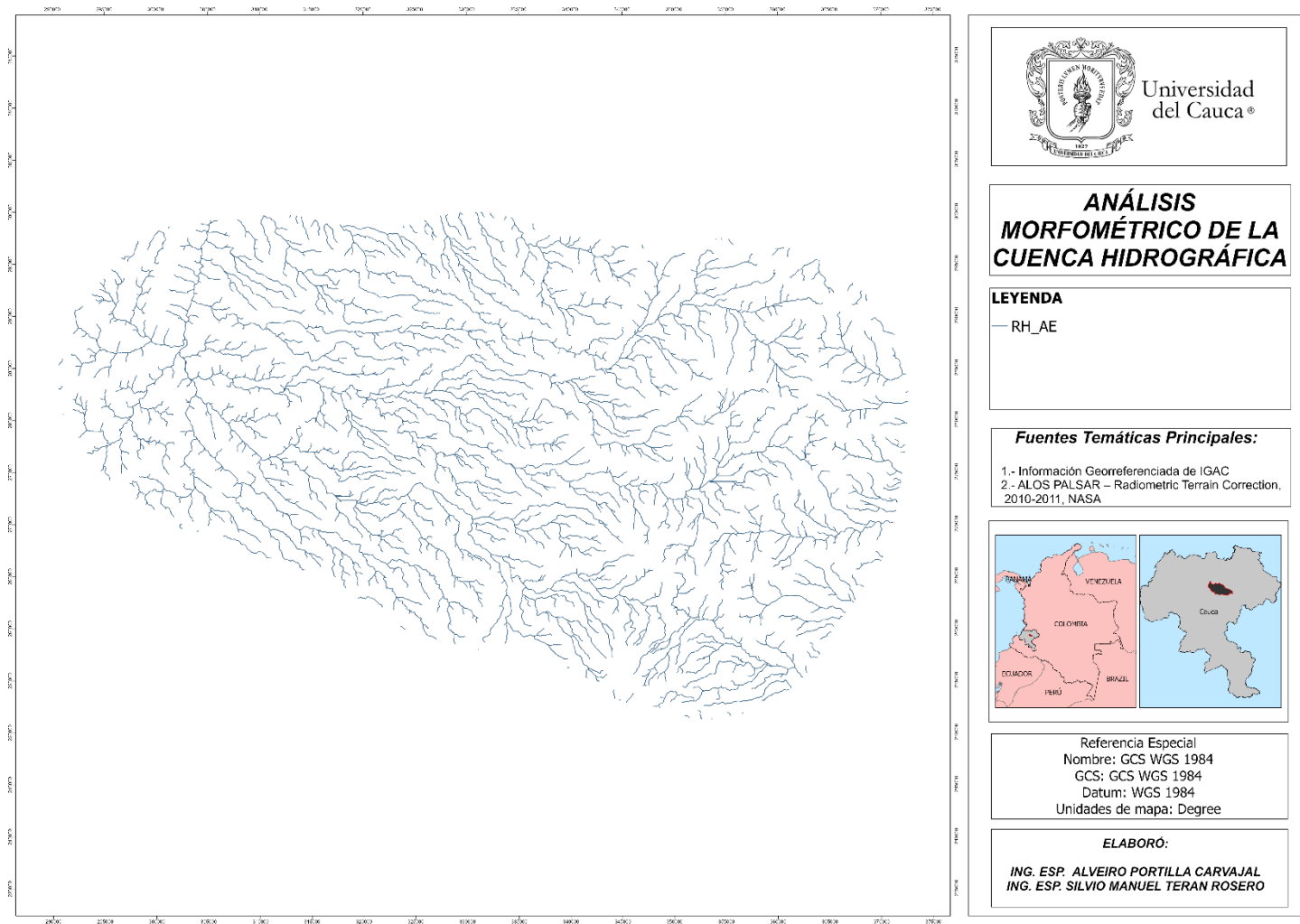


Ilustración 145 Mapa del Fill en la cuenca hidrográfica

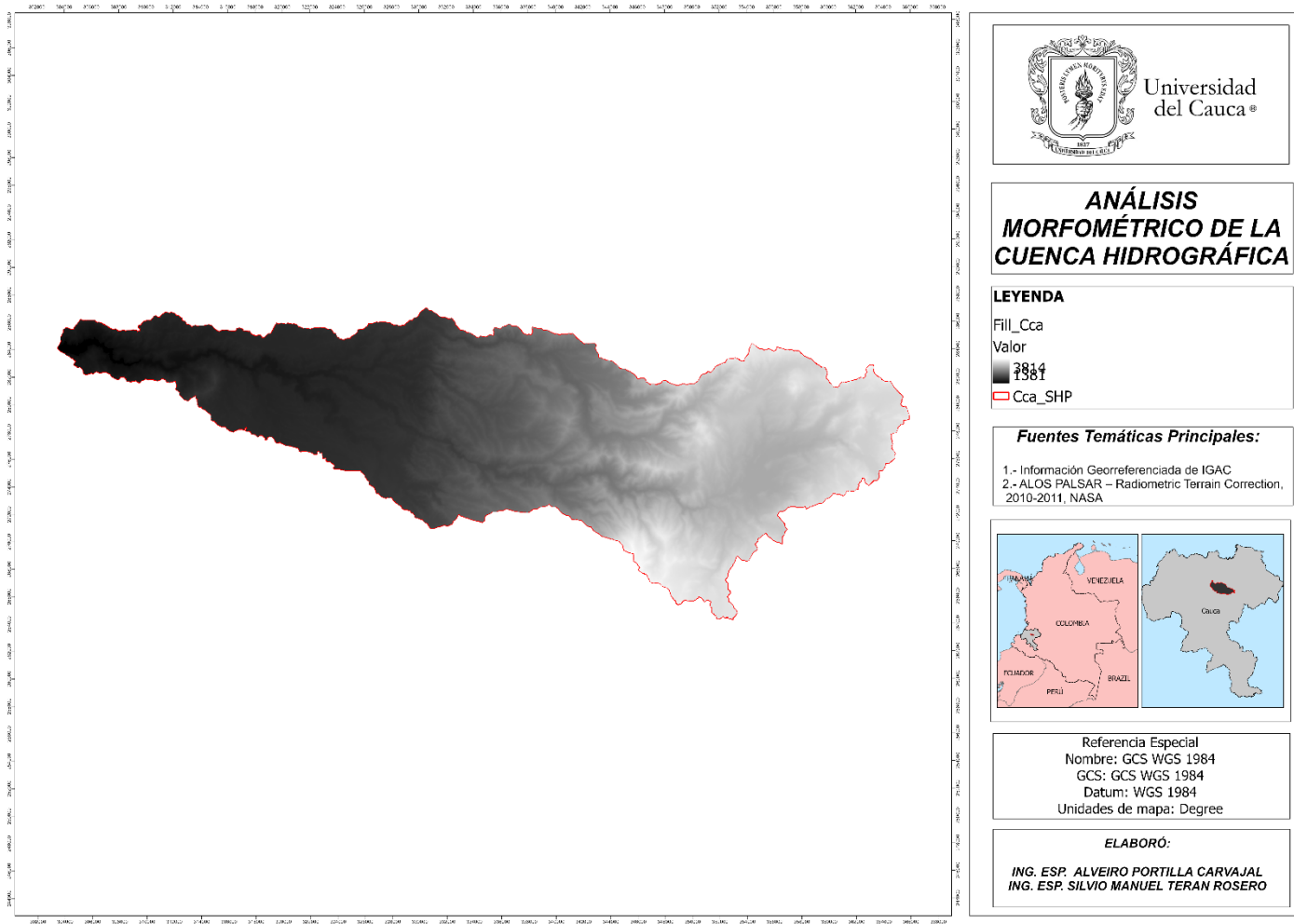


Ilustración 146 Mapa de la acumulación de la cuenca hidrográfica

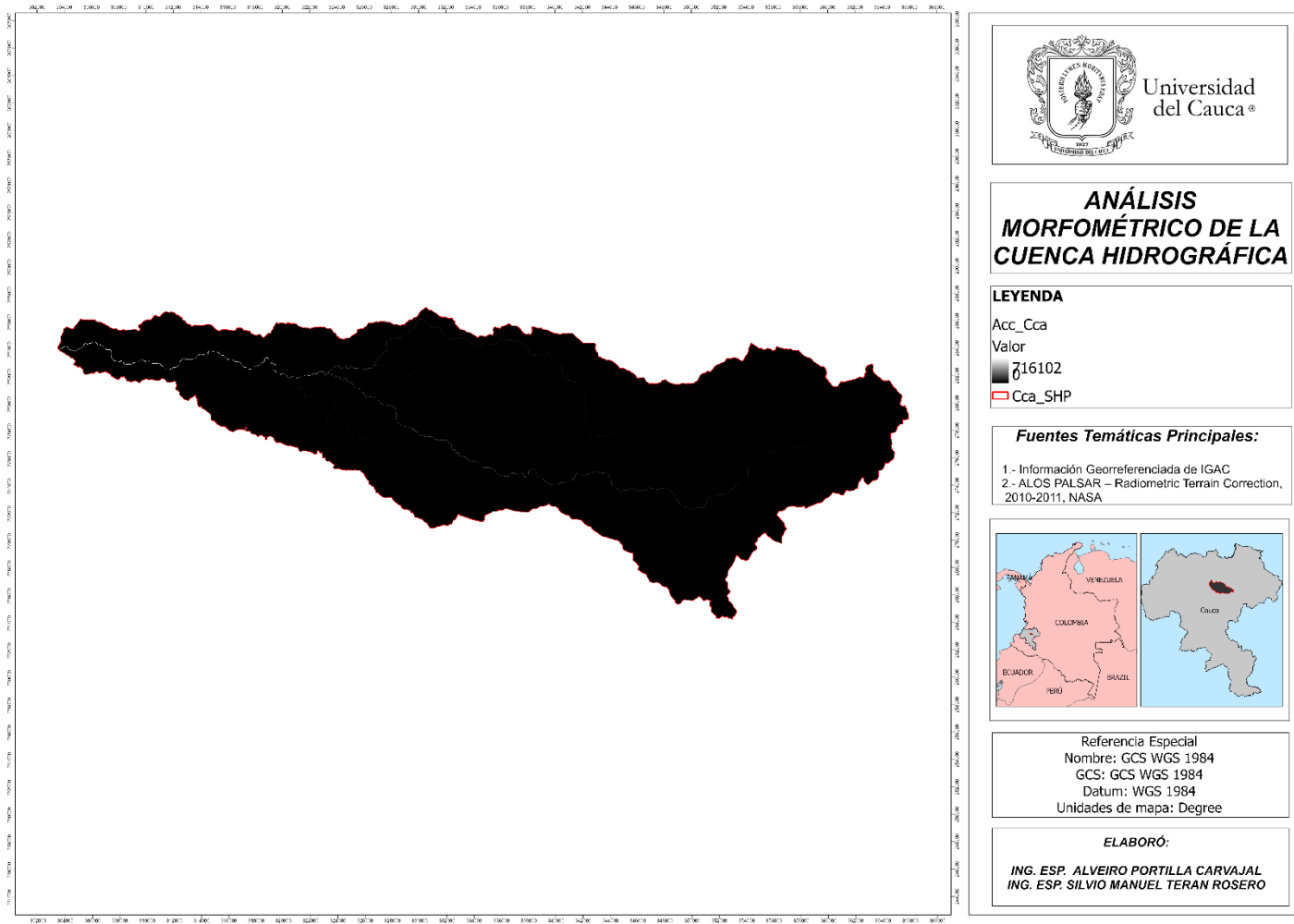


Ilustración 147 Mapa de pendiente de la cuenca hidrográfica

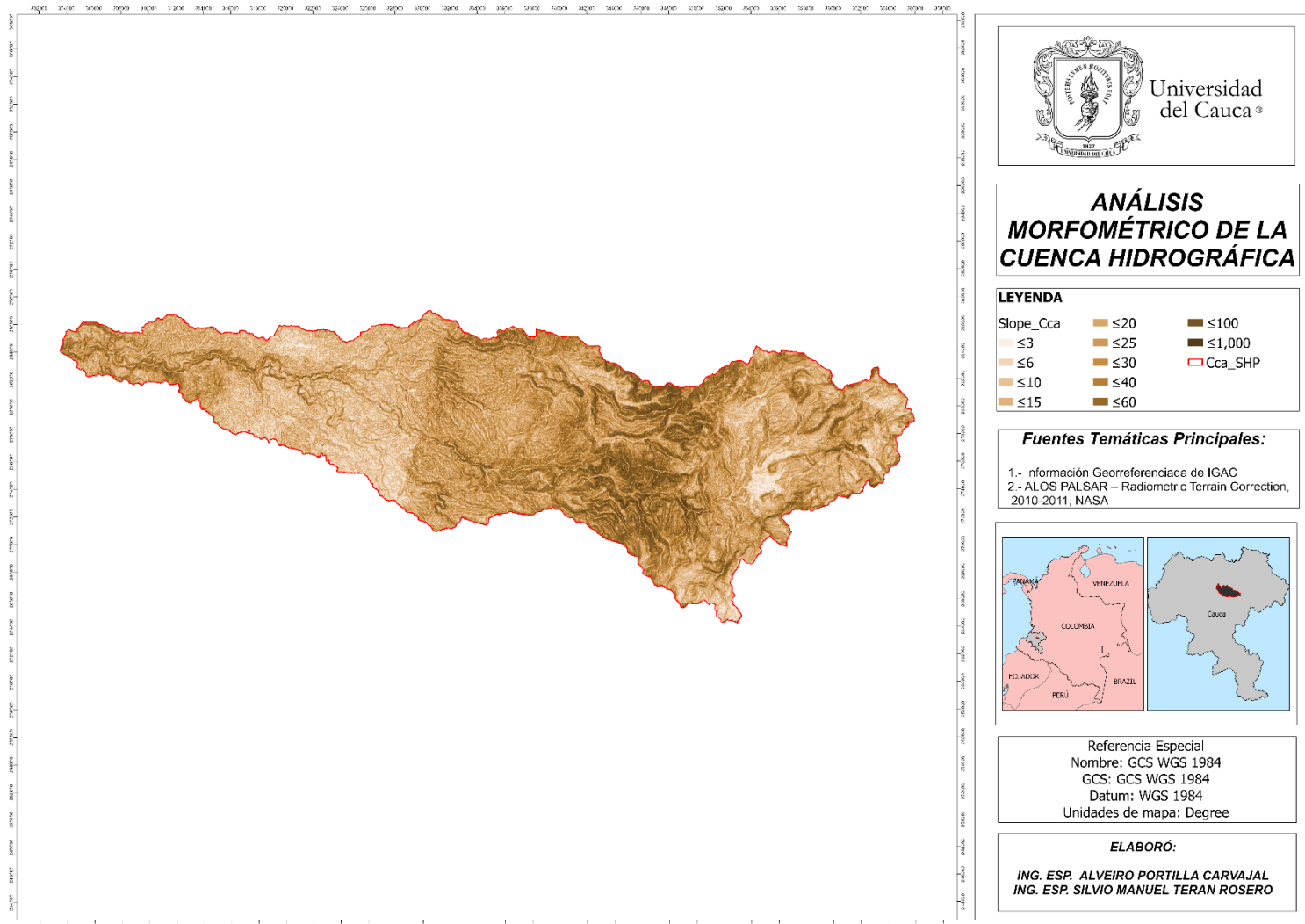


Ilustración 148 Mapa de la red Hidrica de la cuenca hidrográfica

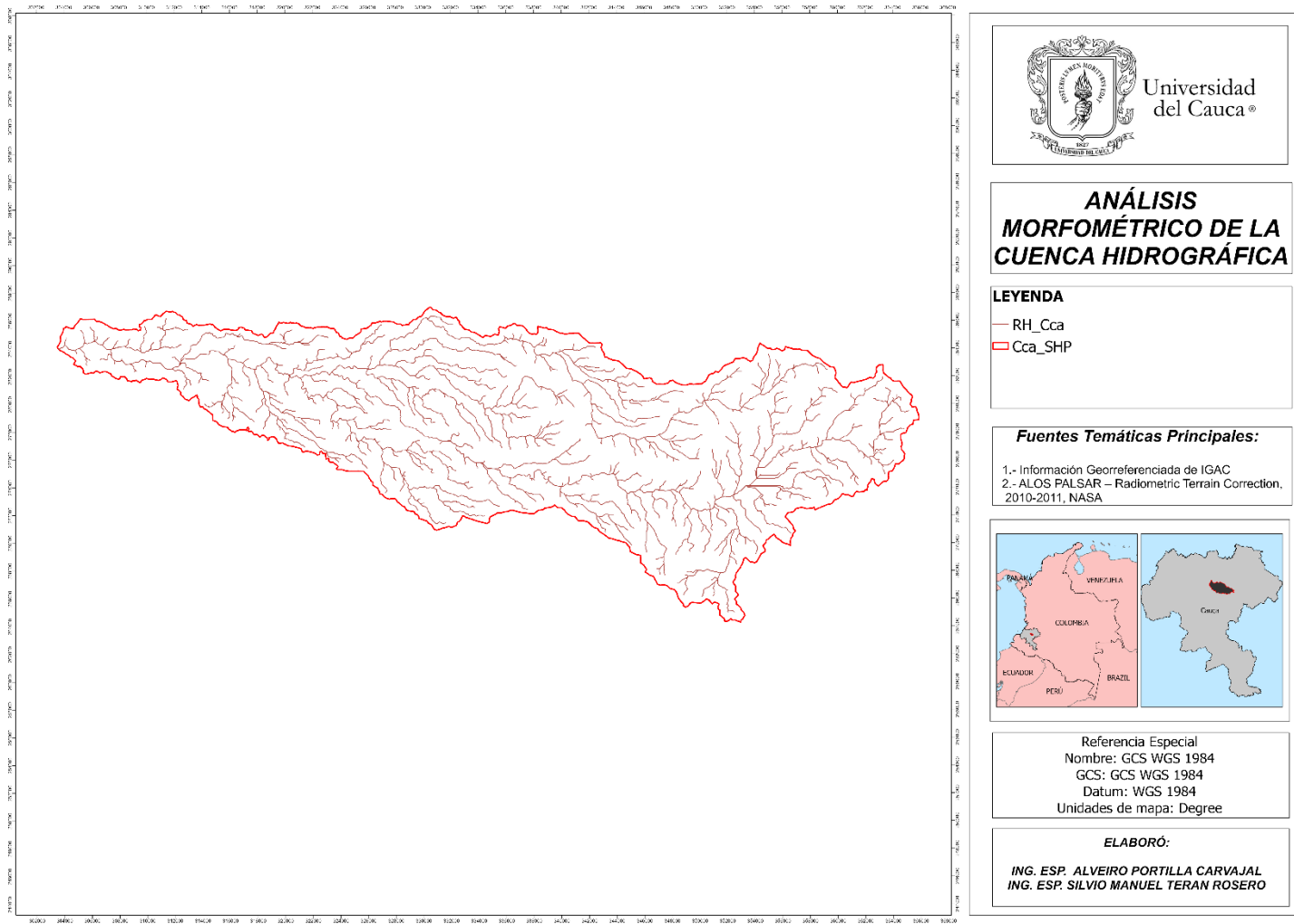


Ilustración 149 Mapa del cauce más largo

