

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y
CIVIL**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

**Implementación de una metodología automatizada en Python
para la delimitación de cuencas y la estimación de parámetros
fisiográficos, Ayacucho 2025**

Para optar el título profesional de:

INGENIERA CIVIL

PRESENTADO POR:

Bach. Sandra Elena DE LA CRUZ CAYHUALLA

ASESOR:

Msc. Ing. Jose Ernesto ESTRADA CÁRDENAS

AYACUCHO - PERÚ

2025

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo general implementar una metodología automatizada en Python para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos, evaluando su precisión, eficiencia computacional y confiabilidad en comparación con los métodos tradicionales y manuales utilizados actualmente.

El método de investigación empleado se basó en el uso de algoritmos hidrológicos del módulo ArcPy de ArcGIS (Fill, Flow Direction, Flow Accumulation, Snap Pour Point y Watershed), integrados en un entorno de programación en Python con enfoques de programación orientada a objetos, concurrente y gestión eficiente de recursos. Se utilizó un modelo digital de elevación (MDE) de la cuenca hidrográfica Pampas como caso de estudio. La validación se realizó mediante la comparación espacial calculando el índice de Jaccard y numérica calculando los errores relativos, RMSE y coeficiente de determinación R^2 frente a los datos oficiales de la Autoridad Nacional del Agua.

Los resultados obtenidos mostraron una similitud espacial del 99,51 % (índice de Jaccard = 0,9951) y errores relativos menores al 5 % en parámetros clave (área, longitud del cauce principal, ancho promedio y tiempo de concentración), y un coeficiente de determinación $R^2 = 0,9996$ tras la normalización de los datos obtenidos. Además, el tiempo de procesamiento automatizado fue inferior a 15 minutos, frente a más de 60 minutos en métodos tradicionales y manuales, con un uso de memoria RAM menor al 30 %.

En conclusión, la metodología automatizada desarrollada en Python demostró ser precisa, eficiente y confiable, cumpliendo con los tres pilares de la hipótesis general planteada: alta precisión, reducción significativa del tiempo de ejecución (más del 80 %) y optimización del uso de recursos computacionales. Por lo tanto, constituye una alternativa viable, escalable y reproducible para la delimitación de cuencas y obtención de parámetros fisiográficos en contextos institucionales y académicos.

Palabras Claves: Python, ArcPy, cuencas hidrográficas, parámetros fisiográficos, modelo digital de elevación, eficiencia computacional, validación, automatización, delimitación, precisión.

ABSTRACT

The general objective of this research was to implement an automated methodology in Python for the delimitation of hydrographic basin and the estimation of physiographic parameters, evaluating its accuracy, computational efficiency and reliability in comparison with the traditional and manual methods currently used.

The research method employed was based on the use of hydrological algorithms from the ArcPy module of ArcGIS (Fill, Flow Direction, Flow Accumulation, Snap Pour Point, and Watershed), integrated into a Python programming environment with object-oriented, concurrent, and resource-efficient programming approaches. A digital elevation model (DEM) of the Pampas river basin was used as a case study. Validation was performed through spatial comparison by calculating the Jaccard index and numerical comparison by calculating relative errors, RMSE, and the coefficient of determination R^2 against official data from the National Water Authority. The results showed a spatial similarity of 99.51 % (Jaccard index = 0.9951) and relative errors of less than 5 % in key parameters (area, main channel length, average width, and time of concentration), and a coefficient of determination R^2 of 0.9996 after normalization of the data. Furthermore, the automated processing time was less than 15 minutes, compared to more than 60 minutes for traditional and manual methods, with RAM usage of less than 30 %.

In conclusion, the automated methodology developed in Python proved to be accurate, efficient, and reliable, fulfilling the three pillars of the general hypothesis: high precision, a significant reduction in execution time (more than 80 %), and optimized use of computational resources. Therefore, it constitutes a viable, scalable, and reproducible alternative for watershed delineation and obtaining physiographic parameters in institutional and academic contexts.

Keywords: Python, ArcPy, watersheds, physiographic parameters, digital elevation model, computational efficiency, validation, automation, delimitation, accuracy.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la delimitación precisa de cuencas hidrográficas y la caracterización de sus parámetros fisiográficos se han constituido como la base fundamental para la planificación hidrológica, la gestión de riesgos, inundaciones, sequías y la toma de decisiones en el planteamiento de infraestructuras hidráulicas. Sin embargo, el proceso de delimitación de cuencas y obtención de sus parámetros fisiográficos han sido tradicionalmente realizados de manera manual y fragmentada en entornos de sistemas de información geográfica (SIG), lo que implica altos costos en tiempo, dependencia del operador y baja reproducibilidad de los resultados obtenidos. Esta situación es particularmente crítica en regiones geográficamente complejas donde la topografía abrupta exige análisis detallados y de manera rápida.

Frente a esta realidad problemática, es preocupante advertir que, a pesar de la disponibilidad de las herramientas SIG avanzadas, la mayoría de instituciones públicas, universidades y organismos vinculados al estudio de las cuencas en el Perú continúan utilizando procedimientos manuales para delimitar cuencas y calcular sus parámetros fisiográficos. Este enfoque tradicional presenta tres problemas principales:

1. Ineficiencia, debido a la cantidad de pasos secuenciales que deben de ejecutarse manualmente.
2. Errores humanos, ya que los resultados dependen de la experiencia y la precisión del usuario, generando inconsistencias.
3. Dificultad para la estandarización de metodologías, lo que complica la comparación de estudios entre diferentes regiones o instituciones.

En consecuencia, existe una necesidad urgente de desarrollar e implementar metodologías automatizadas que integren y optimizen estos procesos, garantizando la precisión, la eficiencia y la reproducibilidad.

Por lo tanto, la presente investigación resulta pertinente y necesaria, ya que busca abordar directamente la problemática descrita mediante la implementación de una metodología automatizada en Python. El uso de este lenguaje de programación, junto con el módulo ArcPy de ArcGIS, ofrece la posibilidad de integrar algoritmos hidrológicos (como Fill, Flow Direction, Flow Accumulation y Watershed) en un flujo de trabajo único y controlado, minimizando la intervención humana y reduciendo significativamente el tiempo de procesamiento. Asimismo, pretende ofrecer una alternativa más robusta y escalable que pueda ser adoptada por las instituciones académicas y gubernamentales, contribuyendo a mejorar la calidad, la velocidad y la confiabilidad de futuros estudios.

El objetivo principal de esta investigación es implementar una metodología automatizada en Python para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos, evaluando su precisión, eficiencia computacional y confiabilidad en comparación con los métodos tradicionales y manuales utilizados actualmente, para lo cual se plantea la siguiente hipótesis general: La implementación de la metodología automatizada en Python reduce significativamente

los tiempos de ejecución y el uso de recursos computacionales, manteniendo la precisión, en la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos.

Finalmente, para una mejor comprensión la investigación se organiza en cinco capítulos: el primero plantea el problema de la investigación, incluyendo su descripción, delimitación, formulación, justificación, limitaciones y objetivos; el segundo desarrolla el marco teórico, revisando antecedentes y fundamentando los conceptos clave sobre las cuencas hidrográficas, modelos digitales de elevación y metodologías de delimitación de cuencas; el tercero detalla la metodología empleada, incluyendo el diseño de investigación, la operacionalización de variables y el desarrollo del programa en Python; el cuarto presenta y analiza los resultados obtenidos, contrastando las hipótesis planteadas; y el quinto formula las conclusiones, recomendaciones y propuestas de trabajos futuros derivados de la investigación.

DEDICATORIA

A Dios, quien me dio la vida, la salud y la motivación para llegar hasta aquí. A mis padres, por su apoyo incondicional y por enseñarme con el ejemplo el valor del esfuerzo, la perseverancia y la honestidad; por brindarme su amor sin límites y por creer en mí incluso cuando yo misma dudaba. A mis hermanas, por sus palabras de aliento y su compañía constante. A mi esposo y a mi hija, mi mayor motivación. Gracias por ser parte de este camino y por celebrar conmigo cada pequeño avance como si fuera el más grande logro. Esta tesis está dedicada a ustedes, porque cada página lleva impregnado el esfuerzo, el cariño y la esperanza que juntos compartimos. Gracias por ser parte fundamental de este logro.

AGRADECIMIENTOS

- Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, por brindarme una formación académica de calidad, por el valioso apoyo de sus docentes y por ser el espacio donde he podido crecer tanto profesional como personalmente. Gracias a esta casa superior de estudios, he adquirido los conocimientos, principios y valores que me acompañarán a lo largo de mi vida profesional. Me siento orgulloso(a) de haber formado parte de esta prestigiosa institución.
- Expreso mi especial agradecimiento al Ingeniero José Ernesto Estrada Cárdenas por su valiosa asesoría, orientación constante y compromiso durante el desarrollo de este trabajo. Su experiencia, disposición y enseñanzas fueron fundamentales para lograr los objetivos propuestos. Agradezco profundamente su tiempo y dedicación, los cuales han sido de gran aporte tanto en lo académico como en mi formación profesional.
- A mi querida familia, mi más profundo y sincero agradecimiento. Gracias por su amor incondicional, apoyo constante y por estar presentes en cada paso de este camino. Sus palabras de aliento, comprensión y sacrificios han sido la base que me ha sostenido en los momentos más desafiantes. Este logro también es de ustedes.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

AYACUCHO, OCTUBRE 2025

SANDRA ELENA DE LA CRUZ CAYHUALLA

ÍNDICE GENERAL

portada	ii
Resumen	vii
Abstract	vii
Introducción	vii
Dedicatoria	vii
Agradecimientos	vii
1. Planteamiento del problema	1
1.1. Descripción del problema	1
1.1.1. Internacional	1
1.1.2. Nacional	2
1.1.3. Regional	3
1.2. Delimitación del problema	4
1.2.1. Espacial	4
1.2.2. Temporal	4
1.2.3. Temática y unidad de análisis	5
1.3. Formulación del problema	5
1.3.1. Problema general	5
1.3.2. Problemas específicos	5
1.4. Justificación e importancia	5
1.5. Limitaciones de la investigación	6
1.6. Objetivos	8
1.6.1. Objetivo general	8
1.6.2. Objetivos específicos	8
2. Marco teórico	9
2.1. Antecedentes	9
2.1.1. Investigaciones internacionales	9
2.1.2. Investigaciones nacionales	10
2.2. Bases teóricas	11
2.2.1. Cuencas hidrográficas	11
2.2.2. Elementos de una cuenca hidrográfica	12
2.2.3. Características de cuencas hidrográficas	16
2.2.4. Relieve de una cuenca hidrográfica	18
2.2.5. Tipo y uso del suelo de una cuenca hidrográfica	20

2.2.6. Vegetación de una cuenca hidrográfica	20
2.2.7. Partes de una cuenca hidrográfica	20
2.2.8. Tipos de cuencas hidrográficas	21
2.2.9. Delimitación de cuencas hidrográficas	23
2.2.10. Modelo digital del terreno	24
2.2.11. Modelo digital de elevación	25
2.2.12. Sistemas de información geográfica	26
2.2.13. Teorías y modelos para la delimitación de cuencas	26
2.2.14. Proceso de delimitación de cuencas hidrográficas	36
2.2.15. Obtencion de parámetros fisiográficos de cuencas	37
2.3. Marco conceptual	46
2.3.1. ASTER Global DEM (ASTER GDEM)	46
2.3.2. Delimitación de cuencas en el software ArcGIS	48
2.3.3. Delimitación automatizada de cuencas en Python	50
3. Método de la investigación	56
3.1. Enfoque	56
3.2. Alcance	56
3.3. Diseño de investigación	56
3.4. Población y muestra	57
3.5. Hipótesis	57
3.5.1. Hipótesis general	57
3.5.2. Hipótesis específicas	57
3.6. Operacionalización de variables	58
3.6.1. Variables	58
3.6.2. Definición conceptual	58
3.6.3. Definición operacional	59
3.7. Técnicas e instrumentos	60
3.8. Técnicas estadísticas aplicadas	61
3.9. Desarrollo del trabajo de tesis	62
3.9.1. Implementación del programa	62
4. Resultados	95
4.1. Análisis de resultados y contrastación de hipótesis	95
4.1.1. Primera hipótesis específica	95
4.1.2. Contrastación de la primera hipótesis específica	95
4.1.3. Aceptación de la primera hipótesis específica	105
4.1.4. Segunda hipótesis específica	105
4.1.5. Contrastación de la segunda hipótesis específica	106
4.1.6. Aceptación de la segunda hipótesis específica	107
4.1.7. Tercera hipótesis específica	107
4.1.8. Contrastación de la tercera hipótesis específica	107
4.1.9. Aceptación de la tercera hipótesis específica	110

ÍNDICE GENERAL

4.1.10. Hipótesis general	110
4.1.11. Contratación de la hipótesis general	110
4.1.12. Aceptación de la hipótesis general	111
5. Conclusiones	112
5.1. Conclusiones	112
5.2. Recomendaciones	113
5.3. Trabajos futuros	113
Bibliografía	115
Anexo 01	127
Anexo 02	134
Anexo 03	136
Anexo 04	144
Anexo 05	146

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Cuencas hidrográficas de la cuenca Pampas.	12
Figura 2.2: Divisoria de aguas de cuencas hidrográficas	13
Figura 2.3: Río principal de cuencas hidrográficas	15
Figura 2.4: Sistema de drenaje de cuencas hidrográficas	17
Figura 2.5: Partes de una cuenca hidrográfica	21
Figura 2.6: Modelo digital del terreno	25
Figura 2.7: Modelo digital de elevación	26
Figura 2.8: Algoritmo D8-dirección de flujo único	29
Figura 2.9: Algoritmo D ∞ -dirección de flujo múltiple	30
Figura 2.10: Funcionamiento del algoritmo D8	30
Figura 2.11: Jerarquización de redes de drenaje según Horton (1945)	32
Figura 2.12: Jerarquización de redes de drenaje según Strahler (1957)	32
Figura 2.13: Proceso de delimitación de cuencas en ArcGIS.	49
Figura 2.14: Proceso automatizado en Python primera parte	53
Figura 2.15: Proceso automatizado en Python segunda parte	54
Figura 2.16: Cuenca hidrográfica Pampas	55
Figura 3.1: Interfáz gráfica desarrollado	86
Figura 3.2: Funcionamiento de la interfáz gráfica del programa	87
Figura 3.3: Modelos de elevación digital utilizados	88
Figura 3.4: Parámetros de entrada principales al programa.	89
Figura 3.5: Proceso de delimitación automática en el programa.	90
Figura 3.6: Proceso de delimitación finalizado con el programa.	91
Figura 3.7: Visualización de la cuenca hidrográfica Pampas delimitada en ArcGIS. . .	94
Figura 3.8: Visualización de la cuenca hidrográfica Pampas delimitada.	94
Figura 4.1: Diagrama de flujo del script para el cálculo del índice de Jaccard.	101
Figura 4.2: Cuenca Pampas delimitada por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). .	102
Figura 4.3: Cuenca Pampas delimitada mediante el programa desarrollado.	102
Figura 4.4: Resultado visual de la similitud de las delimitaciones y del porcentaje de error entre la delimitación de la cuenca con Python y la cuenca obtenido de la Autoridad Nacional del Agua.	103
Figura 4.5: Principales características geomorfológicas de la cuenca Pampas obtenido de la Autoridad Nacional del Agua (ANA).	104
Figura 4.6: Tiempo de inicio del proceso de delimitación automática en el programa. .	106
Figura 4.7: Tiempo de término del proceso de delimitación automática en el programa.	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Clasificación de la densidad de drenaje	18
Tabla 3.1: Definición operacional de las variables de tesis	60
Tabla 4.1: Cálculo de errores absolutos y relativos de los resultado obtenidos.	105
Tabla 4.2: Comparación de parámetros fisiográficos obtenidos mediante el programa desarrollado en Python y los datos obtenidos de la Autoridad Nacional del Agua.	108
Tabla 4.3: Valores normalizados mediante Min–Max Scaler.	109
Tabla 4.4: Valores estandarizados mediante Z-score	109

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

Según Hernández-Sampieri et al. (2006), la descripción del problema viene a ser la exposición clara, detallada y contextualizada de la situación que se desea investigar, mostrando su relevancia, sus causas y sus posibles consecuencias.

También Hernández-Sampieri et al. (2006), señala que la descripción del problema deberá permitir al lector comprender la magnitud y la naturaleza de la investigación, fundamentando por qué es importante abordarlo científicamente. Además de ello, esta descripción debe delimitar el contexto geográfico, temporal y conceptual del problema, evitando ambigüedades y planteando una base sólida para la formulación de los objetivos e hipótesis de la investigación, en ese sentido para la presente investigación se describe la problemática internacional, nacional y regional.

1.1.1. Internacional

En el ámbito internacional, la delimitación y caracterización de cuencas hidrográficas se ha consolidado como un componente esencial en diversos tipos de estudios científicos y técnicos, debido a su relevancia para comprender la dinámica hidrológica, geomorfológica y ambiental de la cuenca, así como los procesos que intervienen en la generación del escurrimiento, la recarga hídrica y la distribución espacial de los recursos naturales (Bai, Xie et al., 2022).

En ese sentido las cuencas hidrográficas constituyen la unidad fundamental para los estudios hidrológicos, ya que en ellas se concentran los procesos de escorrentía, infiltración y almacenamiento de agua, los cuales determinan la disponibilidad del recurso hídrico y condicionan los fenómenos naturales como sequías, inundaciones, etc. En este contexto, disponer de información precisa y actualizada sobre la morfología de las cuencas hidrográficas resulta crucial para la planificación de proyectos de infraestructura hidráulica y la toma de decisiones en situaciones de emergencia (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2021).

Si bien existen sistemas de información geográfica como el software **ArcGIS** que permiten realizar estas tareas, la mayoría de los procesos continúan siendo ejecutados de manera manual y fragmentada: el usuario debe cargar el modelo de elevación digital (DEM), realizar uniones o mosaicos de los modelos de elevación digital, generar las direcciones y acumulaciones de flujo, identificar y reubicar manualmente los puntos de salida o desfogue de la cuenca, extraer la cuenca correspondiente y, finalmente realizar los cálculos de los parámetros fisiográficos como área, perímetro, longitud de cauces, pendiente o densidad de drenaje, etc. esto con diferentes módulos del software (Dixon & Uddameri, 2015).

Este procedimiento manual presenta tres problemas importantes:

- Ineficiencia y alto consumo de tiempo, debido a la cantidad de pasos y configuraciones que deben ejecutarse de forma secuencial durante el proceso. Esto representa un obstáculo cuando se requiere analizar múltiples cuencas hidrográficas en poco tiempo o cuando los

estudios abarcan grandes áreas geográficas.

- Errores humanos y baja reproducibilidad, ya que los resultados dependen en gran medida de la experiencia, conocimiento y precisión del usuario. Diferentes usuarios pueden obtener resultados distintos a partir de los mismos insumos de entrada, lo que genera incertidumbre y limita la confiabilidad de los resultados (Hutton et al., 2016).
- Dificultad para estandarizar metodologías, lo que complica la comparación de estudios entre diferentes regiones o instituciones, ya que cada una tendrá un resultado diferente.

En un escenario ideal, estas tareas deberían realizarse mediante procedimientos automatizados, integrados y reproducibles, que garanticen la precisión, eficacia y reduzcan la intervención manual en todo o casi todo durante el proceso. Sin embargo, la realidad es que pocos estudios han desarrollado scripts completos y documentados que automaticen de principio a fin la delimitación de cuencas hidrográficas y el cálculo de sus parámetros fisiográficos en el software **ArcGIS** (Nardini et al., 2020).

Por ello, el problema actual radica en la ausencia de metodologías consolidadas de automatización de estos procesos con el lenguaje de programación **Python** en el entorno del software **ArcGIS**, que permitan transformar en un solo flujo los procesos antes dispersos. Esta carencia dificulta y afecta directamente la capacidad de investigadores e instituciones para realizar estudios rápidos, precisos, confiables y comparables, especialmente en países en vías de desarrollo que enfrentan crecientes desafíos de seguridad hídrica.

Frente a esta situación, se plantea la necesidad de implementar una metodología automatizada en **Python** para la delimitación de cuencas y la estimación de parámetros fisiográficos, que unifique los procesos de delimitación de cuencas hidrográficas y su estimación de parámetros fisiográficos en un entorno controlado y reproducible. Con ello, se contribuye a optimizar los tiempos de análisis, reducir la dependencia del operador y generar resultados consistentes, aportando una herramienta de gran utilidad en el ámbito internacional para la gestión sostenible del recurso hídrico.

1.1.2. Nacional

En el contexto nacional, la delimitación y caracterización de las cuencas hidrográficas enfrenta grandes desafíos debido a la complejidad geográfica, la marcada variabilidad climática y la limitada disponibilidad de procedimientos automatizados que permitan obtener resultados precisos y reproducibles.

El Perú se encuentra entre los países sudamericanos más vulnerables frente a los efectos del cambio climático, lo que se evidencia en la ocurrencia de cada vez más frecuente de sequías, inundaciones y el retroceso acelerado de los glaciares andinos, fenómenos que modifican la disponibilidad temporal y espacial del recurso hídrico en las distintas regiones del país. En este contexto, la delimitación y caracterización detallada de las cuencas hidrográficas se constituye en un elemento fundamental para el desarrollo de diversos tipos de estudios científicos y técnicos, especialmente en los estudios hidrológicos e hidráulicos, que sirven de base para el diseño, planificación y evaluación de infraestructuras hidráulicas y obras de aprovechamiento hídrico (Oré, 2024).

Sin embargo, la realidad nacional evidencia limitaciones significativas en la manera en que estos procesos se llevan a cabo. En la mayoría de instituciones públicas, universidades y organismos vinculados al estudio del agua, la delimitación de cuencas y la estimación de parámetros fisiográficos continúan realizándose de manera manual, utilizando herramientas básicas de los sistemas de información geográfica (SIG) (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2018).

Este enfoque tradicional, si bien permite obtener resultados aceptables en áreas pequeñas, demanda un tiempo considerable de procesamiento y depende en gran medida de la experiencia y precisión del operador, lo cual puede generar inconsistencias o errores en los límites de cuenca obtenidos. Además, el proceso requiere ejecutar múltiples operaciones secuenciales como el llenado de depresiones, el cálculo de direcciones de flujo y acumulaciones de flujo, la definición de puntos de salida y la generación del contorno de la cuenca que deben realizarse manualmente en cada análisis, reduciendo la eficiencia y dificultando la estandarización de resultados.

Ante estas limitaciones, se plantea la necesidad de desarrollar una metodología automatizada que permita realizar la delimitación de cuencas hidrográficas y el cálculo de parámetros fisiográficos de forma rápida, precisa y reproducible.

El uso de herramientas de programación en entornos de sistemas de información geográfica (GIS), particularmente mediante el lenguaje de programación **Python**, ofrece la posibilidad de integrar y automatizar cada una de las etapas del proceso hidrológico, minimizando la intervención humana y reduciendo significativamente el tiempo de procesamiento.

De este modo, la automatización no solo optimiza el flujo de trabajo técnico, sino que también garantiza la uniformidad en la obtención de resultados y facilita la aplicación del método a diferentes áreas geográficas o modelos de elevación digital (MDE), contribuyendo así a mejorar la calidad y eficiencia de los distintos tipos de estudios para lo cual se requiere estos insumos a nivel nacional.

1.1.3. Regional

La delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de sus parámetros fisiográficos en la región de Ayacucho, Apurímac y Huancavelica presentan desafíos particulares debido a la compleja topografía andina, la variabilidad climática y la disponibilidad desigual del recurso hídrico (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2015). La región está dominada por cuencas de la vertiente del Atlántico y del Pacífico, caracterizadas por marcados contrastes altitudinales que influyen en los patrones de drenaje, la capacidad de retención de agua y la respuesta hidrológica ante eventos de precipitación (Silva, 2008).

En términos fisiográficos, las cuencas de Ayacucho, Apurímac y Huancavelica exhiben pendientes pronunciadas, suelos altamente susceptibles a la erosión y una cobertura vegetal variable, factores que afectan la generación de escorrentía, la infiltración y la estabilidad del terreno (Chávez, 2019). La caracterización morfométrica, de relieve, drenaje e hidrológica de estas cuencas es fundamental para comprender su dinámica y comportamiento hidrológico, permitiendo identificar áreas con mayor potencial de recarga hídrica, zonas de alta susceptibilidad a la erosión y regiones propensas a eventos extremos como inundaciones o sequías (Cardenas, 2017).

A pesar de su importancia, el análisis y delimitación de cuencas hidrográficas en la región aún dependen de métodos tradicionales que requieren de procesos largos en herramientas de

información geográfica (GIS) y procesos manuales extensivos, lo que limita la eficiencia y precisión de los estudios (Olaya, 2014). La resolución de los modelos de elevación digital (DEM) utilizados, la necesidad de múltiples operaciones espaciales y la dependencia de procesos manuales restringen la capacidad de realizar análisis replicables y de gran escala (Maidment, 2002). Estas limitaciones dificultan la obtención de información confiable en tiempo oportuno, lo que impacta en diversos estudios hidrológicos y ambientales (Longley et al., 2015).

En este contexto, la implementación de una metodología automatizada en Python para la delimitación de cuencas hidrográficas y el cálculo de parámetros fisiográficos representa una alternativa eficiente para optimizar estos procesos (González et al., 2020). El uso de algoritmos computacionales permite procesar grandes volúmenes de datos espaciales de manera rápida y precisa, reduciendo la intervención manual y minimizando los errores asociados a la digitalización convencional (Montoya, 2021). Además, la automatización facilita la replicabilidad del análisis en diferentes subcuencas y escalas espaciales, proporcionando resultados más consistentes y accesibles para su aplicación en estudios hidrológicos, evaluación de recursos hídricos y planificación territorial en Ayacucho, Apurímac y Huancavelica (Paredes, 2022).

1.2. Delimitación del problema

Según Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), la delimitación del problema consiste en definir con precisión el alcance de la investigación, estableciendo claramente los límites conceptuales, espaciales y temporales. Esta etapa permite enfocar la investigación, evitar que el tema sea demasiado amplio y facilitar la formulación de objetivos e hipótesis de manera clara y coherente, en ese sentido se delimita el problema de la presente investigación.

1.2.1. Espacial

Según el Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), la delimitación espacial hace referencia al ámbito geográfico en el que se desarrolla la investigación, es decir, el lugar donde se recolectan los datos, se interactúa con los sujetos de estudio, se observan los fenómenos y se aplican los instrumentos de análisis. En este contexto, la presente investigación se delimita geográficamente a los departamentos de Apurímac, Ayacucho y Huancavelica, donde se lleva a cabo el análisis, implementación y evaluación de una metodología automatizada para la delimitación de la cuenca hidrográfica Pampas y la estimación de sus parámetros fisiográficos, empleando el lenguaje de programación Python.

1.2.2. Temporal

Según el Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), la delimitación temporal constituye un componente esencial en toda investigación, pues establece el marco de tiempo en el cual se desarrollará el estudio y se llevará a cabo la recolección y análisis de los datos. En este caso, la investigación se realizó entre los meses de febrero y octubre del año 2025, período durante el cual se desarrollaron el análisis, la implementación y la evaluación de la automatización de la delimitación de la cuenca hidrográfica Pampas y la estimación de sus parámetros fisiográficos, utilizando el lenguaje de programación Python.

1.2.3. Temática y unidad de análisis

- **Temática:** La Investigación se orienta a la implementación de una metodología automatizada para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos, mediante el desarrollo y aplicación de herramientas computacionales avanzadas. La automatización propuesta busca optimizar la precisión y la eficiencia en la generación de información hidrológica fundamental, favoreciendo su utilización en la planificación territorial y en el diseño de infraestructuras estratégicas orientadas a la gestión sostenible de los recursos hídricos.
- **Unidad de análisis:** La unidad de análisis de la investigación fue la cuenca hidrográfica Pampas, ubicada en los departamentos de Apurímac, Ayacucho y Huancavelica. Su delimitación y caracterización fisiográfica fueron automatizadas mediante la implementación de algoritmos desarrollados en el lenguaje de programación **Python**. Esta metodología buscó optimizar el procesamiento de datos espaciales, garantizando una mayor precisión y eficiencia en la obtención de parámetros hidrológicos fundamentales para su análisis.

1.3. Formulación del problema

Según Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), la formulación del problema de investigación implica expresar de manera clara, concreta y precisa la pregunta central que orienta la investigación. Esta pregunta debe ser específica, viable y susceptible de comprobarse, de modo que guíe el desarrollo de los objetivos, las hipótesis y el diseño metodológico del estudio, en ese sentido se formula los problemas de la presente investigación.

1.3.1. Problema general

¿Cómo implementar una metodología automatizada en **Python** para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos?

1.3.2. Problemas específicos

1. ¿Cuáles son los algoritmos y técnicas computacionales adecuadas para la implementación de una metodología automatizada en **Python** para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos?
2. ¿Cuál es la eficiencia computacional de la metodología automatizada implementada en **Python** para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos?
3. ¿Cuál es el grado de precisión y eficiencia de la metodología automatizada implementada en **Python** para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos, en comparación con los métodos tradicionales?

1.4. Justificación e importancia

- **Justificación:** Según Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), la justificación corresponde a las razones que explican la necesidad de realizar una investigación y la pertinencia de abordar

el problema planteado, respondiendo al por qué del estudio. En ese sentido, la presente investigación se fundamenta en que, a nivel internacional, nacional y regional, la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de sus parámetros fisiográficos constituyen procesos esenciales para comprender la dinámica hidrológica y evaluar las características físicas del territorio. No obstante, los métodos tradicionales empleados en estos análisis suelen depender de procesos largos con herramientas de sistemas de información geográfica (SIG), que requieren procedimientos manuales extensos. Esta situación implica un elevado consumo de tiempo y recursos, además de estar sujeta a errores humanos y a la variabilidad en los resultados. Frente a esta problemática, la investigación se justifica en la necesidad de desarrollar una metodología automatizada en **Python** que integre algoritmos avanzados de procesamiento espacial. Con ello, se busca optimizar los procesos de delimitación y caracterización fisiográfica de las cuencas hidrográficas, reduciendo los tiempos de análisis, mejorando la precisión de los cálculos y garantizando la reproducibilidad de los resultados. Asimismo, esta automatización permitirá disponer de información hidrológica confiable y detallada, aplicable en distintas escalas y contextos geográficos, lo que constituye un aporte relevante en la modelación ambiental, la planificación territorial y la gestión sostenible de los recursos hídricos.

- **Importancia:** Según Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), la importancia de una investigación se refiere al valor y la utilidad de los resultados que se obtendrán, respondiendo al para qué del estudio y destacando sus aportes en los ámbitos científico, técnico y social. En este marco, la presente investigación adquiere relevancia al desarrollar la modernización y optimización de los procesos de delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos mediante el uso de herramientas computacionales avanzadas. La implementación de una metodología automatizada en **Python** permite generar información hidrológica de manera rápida, precisa y reproducible, reduciendo la dependencia de procedimientos manuales y minimizando los errores en los cálculos. Esta innovación contribuye al análisis detallado de las características fisiográficas de las cuencas, fortaleciendo su estudio en diversos contextos geográficos y escalas de aplicación. De esta manera, la investigación ofrece beneficios directos a áreas como la hidrología, la modelación ambiental y la planificación territorial, al proporcionar una caracterización más eficiente del entorno natural y promover su aplicación en estudios científicos, técnicos y de gestión sostenible de los recursos hídricos.

1.5. Limitaciones de la investigación

- **Disponibilidad y calidad de los datos**

La precisión que se necesita para la delimitación de cuencas hidrográficas y para la estimación de sus parámetros fisiográficos depende en gran medida de la calidad, resolución espacial y actualización de los modelos de elevación digital (DEM) empleados. En esta investigación se utilizó el **ASTER GDEM**, un modelo global de acceso libre con resolución espacial de 30 m, generado a partir de pares estereoscópicos del sensor **ASTER** a bordo del satélite Terra. Este insumo constituye una fuente ampliamente utilizada en estudios hidrológicos por su cobertura global y disponibilidad gratuita; sin embargo, presenta limitaciones como errores

en zonas montañosas, presencia de artefactos en áreas con nubosidad o vegetación densa y una precisión vertical promedio de ± 17 m, factores que pueden afectar la definición de la red de drenaje y de las divisorias de aguas (Vidić, 2021)

A pesar de estas restricciones encontradas, la implementación de procesos automatizados en `Python` mediante la librería `ArcPy` permitió optimizar la manipulación de datos espaciales, reducir la intervención manual y garantizar la reproducibilidad de los resultados. De este modo, se logró una delimitación confiable de la cuenca hidrográfica Pampas y la estimación de sus parámetros fisiográficos adecuados para los fines de la investigación. No obstante, debe reconocerse que la utilización de DEM de mayor resolución, como productos `LiDAR` o `ALOS PALSAR` (12.5 m), podría mejorar significativamente la precisión alcanzada y abrir nuevas oportunidades para futuros estudios.

- **Restricciones en la implementación de la automatización**

El desarrollo de algoritmos de automatización específicamente cuando se trabaja con modelos de elevación digital dentro del lenguaje de programación de `Python`, sin el soporte de plataformas GIS comerciales como `ArcGIS`, enfrenta limitaciones técnicas. Algunas bibliotecas de `Python` aún presentan restricciones en la gestión eficiente de grandes volúmenes de datos espaciales o carecen de ciertas funciones avanzadas de análisis de modelos de elevación digital. Esto se traduce en mayores tiempos de procesamiento, consumo elevado de memoria computacional y una curva de aprendizaje pronunciada para su implementación. Además, la reproducibilidad de los resultados depende de la compatibilidad entre versiones de librerías y entornos de programación, lo que introduce un margen de incertidumbre técnica.

- **Limitaciones temporales y logísticas**

El desarrollo de la investigación estuvo condicionado por la disponibilidad de tiempo para la implementación de los algoritmos, la realización de pruebas y la validación con datos actualizados provenientes de instituciones autorizadas del estado. Asimismo, se presentaron restricciones logísticas vinculadas al acceso oportuno y completo a la información oficial de la cuenca de estudio, lo cual pudo influir en la exhaustividad del análisis y la veracidad de los resultados obtenidos.

- **Validación de resultados**

Aunque la automatización realizada en la investigación para la delimitación de cuencas y la obtención de los parámetros fisiográficos permite agilizar los procesos, cálculos y reducir la subjetividad en el análisis, los resultados obtenidos requieren ser contrastados con métodos tradicionales actualizados realizados por las entidades reconocidas del estado. Este proceso de validación resultó ser limitado por la disponibilidad de datos de campo actualizados, la accesibilidad geográfica a la zona de estudio y los recursos económicos necesarios para la verificación. En consecuencia, la ausencia de una validación exhaustiva puede restringir la aplicabilidad de la metodología automatizada propuesta en otros contextos geográficos.

1.6. Objetivos

Según Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), los objetivos de una investigación son las metas que se persiguen y deben de expresarse con claridad para evitar desviaciones en el proceso de estudio. Indican lo que se pretende conocer, demostrar o comprobar, en ese sentido en esta investigación se consideran los siguiente objetivos.

1.6.1. Objetivo general

Implementar una metodología automatizada en **Python** para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos.

1.6.2. Objetivos específicos

1. Seleccionar los algoritmos y técnicas computacionales adecuadas para la implementación de una metodología automatizada en **Python** para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos.
2. Determinar la eficiencia computacional de la metodología automatizada implementada en **Python** para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos.
3. Determinar el grado de precisión y eficiencia de la metodología automatizada implementada en **Python** para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos, en comparación con los métodos tradicionales.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Según Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), los antecedentes de una investigación deben seleccionarse con base en su pertinencia, actualidad, calidad y relación con las variables o el fenómeno que se investiga. Aunque se privilegia la literatura reciente, también se retoman estudios clásicos cuando resultan esenciales para la fundamentación del trabajo, en ese sentido para la presente investigación, se consideran los antecedentes más relevantes relacionados con la automatización del proceso de delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos, con un enfoque en metodologías automatizadas. Los estudios previos considerados proporcionan un marco de referencia fundamental para el desarrollo de la investigación, permitiendo identificar avances, limitaciones y oportunidades de mejora en la aplicación de herramientas computacionales para el análisis hidrológico en cuencas.

2.1.1. Investigaciones internacionales

Evaluation of automatic drainage extraction thresholds using ASTER GDEM and Cartosat-1 DEM: A case study from basaltic terrain of Central India (Reddy et al., 2018). En este estudio se realizó una evaluación específica sobre la extracción de redes de drenaje utilizando los DEMs ASTER GDEM y Cartosat-1. La investigación se enfocó en analizar cómo la elección del umbral de acumulación de flujo influye en la definición de la red hidrográfica derivada. Para ello, aplicaron distintos valores de umbral y compararon los resultados obtenidos con cartografía de referencia, observando que el preprocesamiento del DEM (llenado de depresiones y filtrado) mejora sustancialmente la correspondencia con la red real. Este estudio resaltó que la calibración adecuada de parámetros es indispensable para obtener resultados confiables, especialmente al trabajar con DEMs de 30 m de resolución.

Integrated Python and GIS approach for Geomorphometric investigation of Man River Basin, Western Madhya Pradesh, India (Rathore et al., 2021). En este estudio se propuso un enfoque integrado entre Python y herramientas SIG para la automatización de la extracción de índices geomorfológicos. Su objetivo fue demostrar que es posible calcular de manera sistemática parámetros como pendiente, curvatura, índice de forma y densidad de drenaje a partir de DEMs sin necesidad de depender exclusivamente de **software** comercial. El trabajo se centró en desarrollar flujos de trabajo reproducibles y escalables que optimizaran tanto el tiempo de procesamiento como la consistencia de los resultados. Con ello evidenciaron que la programación en Python representa una alternativa eficaz para estudios fisiográficos, permitiendo la integración de datos raster y vectoriales de manera automatizada.

Rapid Watershed Delineation Using an Automatic Outlet Relocation Algorithm (Xie, Liu et al., 2022). En este estudio se introdujo el algoritmo denominado *Automatic Outlet Relocation (AOR)*, cuyo objetivo fue corregir automáticamente la ubicación de los puntos de salida de las cuencas derivadas de DEMs. La investigación partió de la problemática de que,

en muchas ocasiones, los *outlets* generados automáticamente no coinciden con los puntos de salida observados en campo, lo cual distorsiona la delimitación de la cuenca. El algoritmo propuesto compara la posición inicial del punto de salida con las propiedades de acumulación de flujo circundantes y lo ajusta hacia un punto más representativo. Con ello lograron mejorar la concordancia entre la hidrografía simulada y los registros reales, aportando una herramienta clave para estudios hidrológicos que requieren precisión en la definición de las cuencas.

BasinMaker 3.0: A GIS toolbox for distributed watershed delineation of complex lake-river routing networks (Han et al., 2023). En este artículo desarrollaron *BasinMaker 3.0*, una caja de herramientas en SIG orientada a la delimitación distribuida de cuencas hidrográficas. El estudio buscó automatizar procesos que tradicionalmente se realizan de forma manual, como la identificación de divisorias, la extracción de redes de drenaje y la simplificación de cuencas a gran escala. Para ello, integraron algoritmos adaptativos de umbral y rutinas de procesamiento raster y vectorial, con el fin de obtener resultados consistentes y reproducibles en distintas regiones. Su trabajo demostró que la organización modular de los flujos de trabajo facilita la escalabilidad y la replicabilidad de los análisis hidrológicos.

A comparative study of automatic drainage network extraction using ASTER GDEM, SRTM DEM and Cartosat-1 DEM in parts of Kosi basin, Bihar, India (Jamal & Ali, 2023). En este estudio se evaluó la calidad de la extracción de redes de drenaje utilizando distintos DEMs de 30 m de resolución, entre ellos ASTER GDEM, SRTM y Cartosat. El propósito de la investigación fue determinar las diferencias en la densidad de drenaje, longitud de cauces y coincidencia espacial con redes de referencia en función del insumo empleado. Los resultados evidenciaron que, si bien todos los DEMs permiten obtener una red de drenaje general, existen variaciones significativas en la precisión y en los parámetros calculados, siendo algunos insumos más adecuados para zonas montañosas y otros para terrenos llanos. El estudio es especialmente relevante para justificar la elección de un DEM en investigaciones hidrológicas y geomorfológicas.

2.1.2. Investigaciones nacionales

Delimitación y codificación de unidades hidrográficas del Perú (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2014). Este informe técnico oficial detalla el proceso de delimitación, división y codificación de las cuencas hidrográficas en el Perú. La metodología presentada en el documento se basa en el uso de modelos de elevación digital y técnicas de análisis espacial para identificar y clasificar las unidades hidrográficas de manera uniforme en todo el territorio nacional. El estudio destaca la importancia de contar con un sistema estandarizado que facilite la gestión integral del recurso hídrico, permitiendo la planificación y el monitoreo de las cuencas a nivel de política pública y gestión ambiental.

Evaluación hidrogeoquímica de cuencas andinas con Python - Scipy. En esta conferencia, (Gidahatari, 2020) demuestra las capacidades de Python y la biblioteca Scipy para el análisis de datos de química del agua subterránea. Se presenta un ejemplo práctico aplicado a registros de una cuenca andina en Cajamarca, Perú. Los temas tratados incluyen la importación de datos, análisis estadístico de componentes, generación de histogramas, diagramas de barras, análisis de cajas agrupados por subcuencas y generación de isolíneas de concentración. Este enfoque destaca

la eficiencia y versatilidad de las herramientas de código abierto en estudios hidrogeoquímicos. **Modelización hidrológica semidistribuida en la cuenca del río Huancané – Puno** (Ávalos Álave, 2020). En la Universidad Nacional del Altiplano se desarrolló una tesis cuyo propósito fue automatizar la delimitación de cuencas hidrográficas mediante el uso de la herramienta **ModelBuilder** de ArcGIS. El trabajo partió de la necesidad de superar las limitaciones de los procedimientos manuales, que suelen ser lentos, repetitivos y propensos a errores. Para ello, el autor diseñó un modelo gráfico que encadenaba de manera secuencial los procesos hidrológicos más comunes en un análisis de este tipo: primero se corrigió el modelo digital de elevación con la herramienta **Fill**, luego se establecieron la dirección y la acumulación de flujo, se ajustó el punto de salida de la cuenca y, finalmente, se aplicó la herramienta **Watershed** para obtener la cuenca delimitada, la cual fue convertida de formato raster a vectorial. Una vez generada la cuenca en formato **shapefile**, se calcularon parámetros fisiográficos como el área, el perímetro, la pendiente media y la longitud del cauce principal.

El aporte principal de la investigación radicó en demostrar que, con el uso de **ModelBuilder**, es posible automatizar y estandarizar el procedimiento de delimitación de cuencas en la región de Puno, de modo que el flujo de trabajo pudiera aplicarse en diferentes DEM sin necesidad de repetir manualmente cada proceso. No obstante, el modelo dependía de un software privativo, lo que restringía su uso a quienes tuvieran acceso a la licencia de ArcGIS.

2.2. Bases teóricas

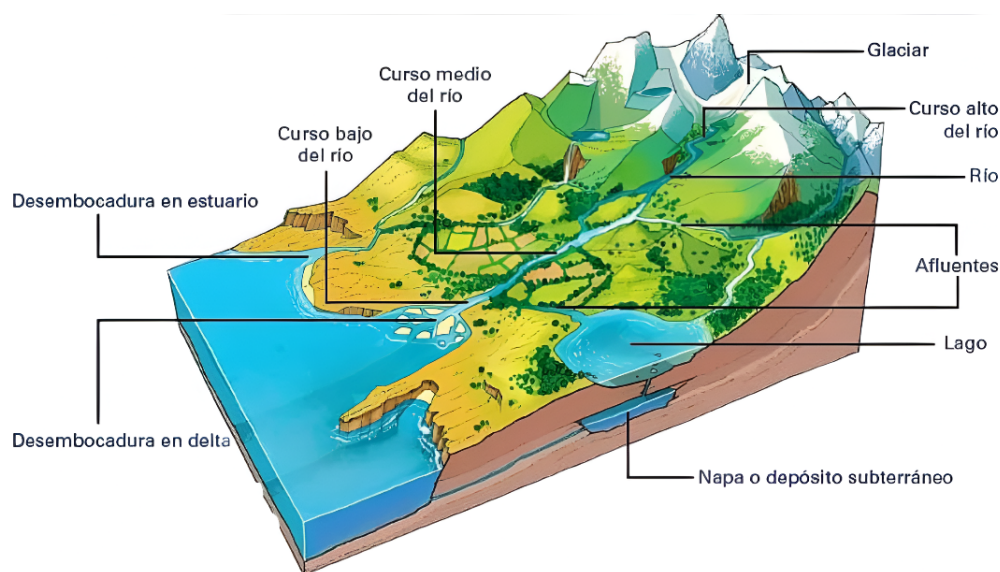
Las bases teóricas de la presente investigación se sustentan en el conocimiento acumulado en hidrología, geomorfometría, sistemas de información geográfica (GIS) y en el procesamiento automatizado de datos geospaciales. A continuación, se describen los conceptos y teorías fundamentales que sirven de soporte para la implementación de la delimitación automatizada de cuencas y la estimación de parámetros fisiográficos mediante el lenguaje de programación Python.

2.2.1. Cuencas hidrográficas

Una cuenca hidrográfica es una unidad territorial definida por divisorias naturales del relieve que drena toda el agua superficial hacia un punto común, generalmente un río, lago o embalse. Incluye todos los afluentes, ríos secundarios y la red de drenaje que aporta agua al cauce principal. La delimitación de cuencas permite estudiar el comportamiento hidrológico, planificar el uso del agua y gestionar riesgos de inundación, erosión o sequías (Martínez & López, 2010).

Figura 2.1

Cuencas hidrográficas de la cuenca Pampas.



Nota: Adaptado de (Sociedad Geográfica de Lima, 2011).

2.2.2. Elementos de una cuenca hidrográfica

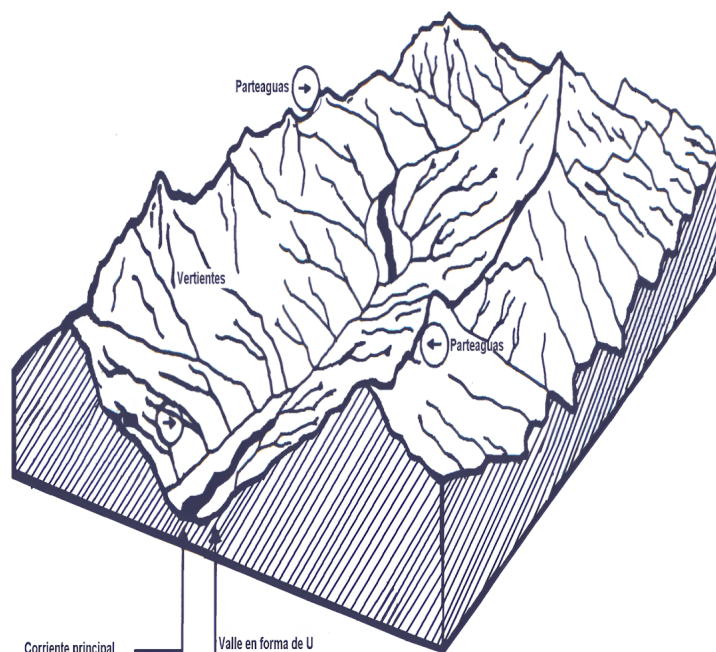
Una cuenca hidrográfica no es únicamente un espacio geográfico delimitado por accidentes topográficos; es un sistema dinámico e interconectado en el que interactúan componentes físicos, hidrológicos y ecológicos. Sus elementos principales constituyen la estructura funcional que permite la captación, transporte, almacenamiento y descarga del agua, así como la regulación de sedimentos y nutrientes (Martínez & López, 2010).

2.2.2.1. Divisoria de aguas

La divisoria de aguas es la línea topográfica imaginaria que delimita el perímetro de una cuenca hidrográfica, conformada por los puntos de mayor elevación del relieve (crestas, cumbres o lomas) que separan el escurrimiento superficial de una cuenca del de las cuencas adyacentes. Esta línea determina la dirección en la que fluye el agua: todas las precipitaciones que caen al interior de la divisoria drenan hacia un mismo cauce colector o punto de salida, mientras que las que caen al exterior se dirigen a otras cuencas (Martínez & López, 2010).

Figura 2.2

Divisoria de aguas de cuencas hidrográficas



Nota: Adaptado de (Sociedad Geográfica de Lima, 2011).

2.2.2.2. Río principal

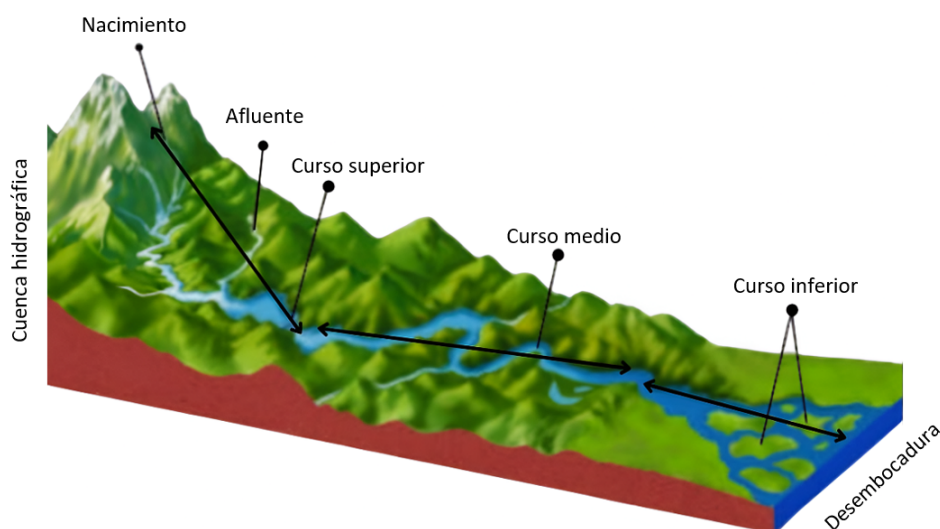
El río principal se define como el eje longitudinal dominante del sistema de drenaje de una cuenca hidrográfica, caracterizado por presentar el mayor caudal específico acumulado, la mayor longitud hidrológica efectiva y/o la máxima jerarquía en la red de drenaje según el sistema de Strahler (1957). Constituye el tramo fluvial receptor de la totalidad del escurrimiento superficial generado en la cuenca, y su trazado define la dirección general del flujo desde la cabecera hasta el punto de salida (exorreico, endorreico o arreico).

- **Curso superior del río:** Ubicado en zonas montañosas con pendientes superiores al 5 % (hasta > 30 %), se caracteriza por una alta energía del flujo que favorece la erosión vertical. Su cauce es estrecho, confinado y de sección en V, con baja sinuosidad. Aunque el caudal suele ser limitado, el transporte de sedimentos ocurre principalmente por arrastre de fondo, especialmente durante eventos de lluvia intensa. Es la zona principal de generación de escorrentía y recarga hídrica de la cuenca (Martínez & López, 2010).
- **Curso medio del río:** Se desarrolla en zonas de pendiente moderada (entre 0.5 % y 5 %), donde el río comienza a ensanchar su cauce y aumenta su caudal por la confluencia de afluentes. Predomina la erosión lateral, lo que favorece el desarrollo de meandros y la formación de terrazas fluviales. El equilibrio entre transporte y sedimentación permite una dinámica más estable que en el curso alto, aunque sigue siendo sensible a cambios en el uso del suelo y a la extracción de materiales. Es la zona de mayor interacción con actividades humanas, como agricultura, asentamientos y captación de agua (Martínez & López, 2010).

- **Curso inferior del río:** Corresponde al tramo final del río, en zonas de pendiente muy suave (menor al 0.5 %), cercano a su desembocadura. El caudal es máximo, pero la velocidad del flujo disminuye, lo que favorece la sedimentación y la formación de llanuras aluviales, meandros amplios, cauces anastomosados o deltas. La sinuosidad es alta y el cauce suele ser ancho y poco profundo. Esta zona es altamente vulnerable a inundaciones, contaminación acumulada y alteraciones por infraestructura urbana o industrial, ya que concentra los impactos generados en toda la cuenca (Martínez & López, 2010).
- **Cauce del río:** Es el conducto natural por donde fluye el agua de un río o quebrada, delimitado lateralmente por sus márgenes y verticalmente por su lecho. Puede ser permanente (con flujo continuo) o efímero (solo durante o después de lluvias). El cauce incluye el cauce menor (ocupado durante caudales ordinarios) y el cauce mayor (zona inundable durante crecidas). Su forma, ancho, profundidad y estabilidad dependen de la geología, el régimen hidrológico y la intervención antrópica, y constituye el eje fundamental para el transporte de agua, sedimentos y nutrientes a lo largo de la cuenca (Martínez & López, 2010).
- **Thalweg del río:** Es la línea imaginaria que une los puntos de máxima profundidad a lo largo del cauce de un río, siguiendo el canal de flujo principal. Representa la trayectoria de mayor velocidad y energía del agua, y suele coincidir con la zona de mayor erosión y transporte de sedimentos. En estudios hidrológicos, geomorfológicos y de delimitación de límites jurisdiccionales (especialmente en ríos fronterizos), el thalweg se utiliza como referencia técnica para definir el eje dinámico del río (Martínez & López, 2010).
- **Margen derecha:** Se define como la orilla del río ubicada a la derecha del observador que mira en dirección aguas abajo (es decir, siguiendo el sentido natural del flujo, desde la cabecera hacia la desembocadura). Esta convención topográfica estandarizada permite una identificación unívoca de las márgenes en cartografía, estudios hidrológicos, ordenamiento territorial y delimitación de límites administrativos o legales (Martínez & López, 2010).
- **Curso inferior del río:** Corresponde a la orilla del río situada a la izquierda del observador que mira en dirección aguas abajo es decir, siguiendo el flujo natural del río desde su nacimiento hacia su desembocadura. Esta convención, complementaria a la de margen derecha, es fundamental para la estandarización en cartografía, estudios fluviales, gestión de riesgos y delimitación de linderos jurisdiccionales o prediales (Martínez & López, 2010).
- **Aguas abajo:** Se refiere a la dirección del flujo del río, es decir, hacia la desembocadura o punto de salida de la cuenca. Todo lo ubicado en el recorrido del río después de un punto de referencia dado —más cerca de su desembocadura se considera aguas abajo. Este término es clave en hidrología para describir la propagación de caudales, sedimentos, contaminantes y efectos de intervenciones (como presas o vertimientos), ya que los impactos generados en un tramo se manifiestan aguas abajo (Martínez & López, 2010).
- **Aguas arriba:** Indica la dirección contraria al flujo del río, es decir, hacia la cabecera o nacimiento de la cuenca. Todo lo ubicado antes de un punto de referencia dado más cerca del origen del río se considera aguas arriba. Este concepto es fundamental en hidrología y

gestión de cuencas, ya que las condiciones del terreno, el uso del suelo y las actividades humanas en la zona aguas arriba determinan la cantidad, calidad y dinámica del agua que llega a los tramos medios e inferiores (Martínez & López, 2010).

Figura 2.3
Río principal de cuencas hidrográficas



Nota: Adaptado de (Sociedad Geográfica de Lima, 2011).

2.2.2.3. Afluentes

Son cursos fluviales secundarios que, por confluencia, aportan escorrentía superficial, sedimentos y solutos al cauce principal o a un colector de jerarquía hidrológica superior, según los sistemas de clasificación de redes de drenaje. Los afluentes incrementan el caudal acumulado aguas abajo del punto de confluencia y contribuyen a la definición de la morfometría y dinámica hidrosedimentológica de la cuenca. Pueden clasificarse como tributarios de primer orden (cabezas de drenaje sin afluentes propios) o de órdenes superiores, y su régimen puede ser permanente, intermitente o efímero, dependiendo de las condiciones climáticas, geológicas y de uso del suelo en sus respectivas subcuencas. La red de afluentes constituye la estructura dendrítica que define la eficiencia del drenaje y la respuesta hidrológica de la cuenca ante eventos de precipitación. Según su régimen hidrológico y persistencia temporal del flujo, los afluentes (y los cursos fluviales en general) se clasifican según Martínez y López (2010) en:

- **Perennes:** mantienen flujo continuo durante todo el año, sostenido por aportes de escorrentía superficial y recarga subterránea (**baseflow**), incluso en periodos de sequía.
- **Intermitentes:** presentan flujo solo durante estaciones lluviosas o épocas húmedas, cesando su escurrimiento en periodos secos debido a la ausencia de recarga subterránea significativa.
- **Efímeros:** responden de forma inmediata y directa a eventos de precipitación, generándose por escorrentía superficial y desapareciendo rápidamente tras cesar la lluvia; no poseen aporte base ni flujo sostenido.

2.2.3. Características de cuencas hidrográficas

Las características de las cuencas hidrográficas resultan fundamentales para anticipar su comportamiento frente a eventos hidrológicos y para planificar de manera adecuada las medidas de respuesta.

2.2.3.1. Área de drenaje de la cuenca hidrográfica

El área de drenaje, también denominada superficie de aporte o área de captación, es la proyección horizontal de la cuenca hidrográfica delimitada por la línea divisoria de aguas. Representa el territorio que contribuye con escorrentía superficial hacia un cauce principal, siendo por tanto uno de los parámetros básicos en el estudio hidrológico de las cuencas.

La importancia del área de drenaje radica en que su magnitud está directamente relacionada con el volumen de agua que puede concentrarse en el sistema fluvial. A mayor extensión, mayor será el caudal potencial generado durante un evento de precipitación, aunque este factor también depende de características como la pendiente, la cobertura vegetal, el uso del suelo y las condiciones climáticas de la región (Martínez & López, 2010).

Es fundamental diferenciar el área de drenaje de la superficie real de la cuenca, ya que en el cálculo del área de drenaje no se consideran las irregularidades del relieve (laderas o pendientes), sino únicamente su proyección horizontal. En regiones montañosas, esta diferencia puede ser significativa, lo que influye en la estimación de parámetros hidrológicos.

Actualmente, la delimitación y medición del área de drenaje se realiza con apoyo de herramientas modernas como los sistemas de información geográfica (SIG), modelos de elevación digital (DEM) y plataformas de imágenes satelitales. Estos recursos permiten obtener resultados más precisos, aunque la calidad de la información depende de la resolución de los datos y de la disponibilidad de cartografía confiable (Martínez & López, 2010).

2.2.3.2. Forma de la cuenca hidrográfica

La forma de la cuenca está determinada principalmente por factores geológicos y constituye un parámetro de gran relevancia en hidrología debido a su incidencia en el tiempo de concentración, entendido como el intervalo que tarda una gota de lluvia en desplazarse desde el punto más distante dentro de la cuenca hasta la salida o exutorio.

Existen diferentes índices y relaciones geométricas que permiten caracterizar la forma de una cuenca. Entre ellos, destaca el índice de **Gravelius**, el cual se obtiene a partir de la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de una circunferencia que posea la misma área que la cuenca. Este índice mide el grado de circularidad de la cuenca y constituye un indicador de su propensión a generar inundaciones: cuanto más circular sea la cuenca, mayor será la concentración simultánea de escorrentía en el cauce principal (Martínez & López, 2010).

De manera complementaria, otros factores de forma, como el índice de **Horton**, buscan representar qué tan cuadrada resulta la cuenca en lugar de evaluar únicamente su circularidad. Estas métricas aportan diferentes perspectivas sobre la geometría de la cuenca y su influencia en la respuesta hidrológica.

En términos prácticos, la forma de la cuenca incide directamente en la velocidad de respuesta del sistema fluvial frente a eventos de precipitación. En cuencas de forma más circular, los puntos de la divisoria de aguas se encuentran relativamente próximos al cauce principal, lo que reduce el tiempo de concentración y eleva la probabilidad de inundaciones. Por el contrario, cuencas alargadas u ovaladas tienden a distribuir los aportes de agua en un periodo mayor, atenuando los caudales de crecida (Martínez & López, 2010).

No obstante, es importante resaltar que la forma de la cuenca no es el único factor determinante en la respuesta hidrológica; características como la pendiente, el tipo y uso del suelo, así como la cobertura vegetal, también influyen de manera significativa en la dinámica de escurrimiento superficial y en el riesgo de inundaciones.

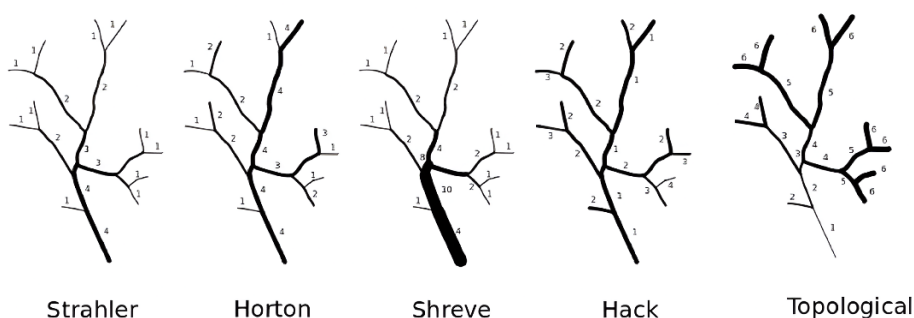
2.2.3.3. Sistema de drenaje de la cuenca hidrográfica

El sistema de drenaje de una cuenca hidrográfica representa la red de cauces por donde se concentra y evacua el agua de lluvia. Para su caracterización se utilizan dos parámetros fundamentales: el orden de corriente, que indica la jerarquización de la red hídrica, y la densidad de drenaje, que relaciona la longitud de los cauces con la superficie de la cuenca. Estos parámetros permiten evaluar la respuesta de la cuenca frente a las precipitaciones y su susceptibilidad a procesos de erosión o inundaciones.

Grado de ramificación: se define según la jerarquización de cauces propuesta por Strahler (1957). Los cursos sin tributarios corresponden a *orden 1*; la confluencia de dos cursos del mismo orden origina un cauce de orden superior (2, 3, ...). Este parámetro refleja el grado de desarrollo de la red de drenaje y depende de factores estructurales, litológicos, topográficos y climáticos.

Figura 2.4

Sistema de drenaje de cuencas hidrográficas



Nota: El orden de red clasifica los cauces fluviales según su jerarquía y ramificación en una cuenca. Métodos como los de Horton (1945) y Strahler (1957) son los más usados: el primero considera el cauce principal y el segundo es más simple y consistente. La elección del método depende del objetivo del análisis, ya que cada uno puede generar jerarquizaciones distintas.

Densidad de drenaje (Dd): se expresa como la relación entre la longitud total de los cauces (L_t) y el área de la cuenca (A), de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Dd = \frac{L_t}{A} \quad [km/km^2] \quad (2.1)$$

Este parámetro refleja el grado de disección del relieve y la eficiencia con la que una cuenca evacua el agua superficial. Su valor está condicionado principalmente por la permeabilidad de los suelos, la cobertura vegetal, la litología, la pendiente del terreno y el régimen climático. Una mayor densidad de drenaje suele asociarse con cuencas de baja infiltración, pendientes pronunciadas y rápida respuesta hidrológica. La clasificación más empleada se presenta a continuación.

Tabla 2.1
Clasificación de la densidad de drenaje

Categoría	Rango (km/km ²)
Drenaje pobre	$Dd < 0,5$
Drenaje regular	$0,5 \leq Dd < 1,5$
Drenaje bueno	$1,5 \leq Dd < 2,5$
Drenaje muy bueno	$2,5 \leq Dd < 3,5$
Drenaje excepcional	$Dd \geq 3,5$

Nota: La densidad de drenaje (Dd) refleja la eficiencia del sistema hídrico de una cuenca y depende de la permeabilidad del suelo, la vegetación y el clima, siendo clave para evaluar la escorrentía y la infiltración Chow et al. (1988).

2.2.4. Relieve de una cuenca hidrográfica

El relieve de una cuenca hidrográfica hace referencia a la configuración geomorfológica que presenta la superficie terrestre dentro de sus límites, resultado de la interacción de procesos endógenos (movimientos tectónicos, vulcanismo y orogénesis) y exógenos (erosión hídrica, eólica, glacial y antrópica). Esta interacción determina no solo la morfología del terreno, sino también los patrones de drenaje, la dinámica hidrológica y la respuesta de la cuenca frente a eventos de precipitación (Martínez & López, 2010).

- **Llanuras:** superficies de baja pendiente ($<2\%$), con baja energía de transporte y alta acumulación de sedimentos. Generalmente localizadas a menos de 500 m s. n. m., son zonas de gran productividad agrícola y de alta concentración de asentamientos humanos, lo que incrementa su vulnerabilidad frente a inundaciones.
- **Depresiones:** áreas con cotas inferiores a las regiones circundantes, formadas por subsidencia tectónica, disolución kárstica o erosión diferencial. Actúan como zonas de almacenamiento temporal de agua, favoreciendo la formación de humedales.
- **Colinas:** elevaciones aisladas de baja altitud (<300 m) formadas por procesos erosivos diferenciales o movimientos tectónicos menores. Su presencia incrementa la heterogeneidad del escurrimiento superficial.
- **Valles:** depresiones alargadas delimitadas por montañas o colinas, con redes de drenaje bien desarrolladas. Presentan alta concentración de suelos aluviales y son corredores naturales de drenaje.

- **Montañas:** elevaciones que superan los 300 m sobre su entorno inmediato, pudiendo alcanzar cotas extremas (p. ej., 8848 m del Everest). Su pendiente abrupta incrementa la velocidad de escorrentía, reduce el tiempo de concentración y favorece procesos torrenciales.
- **Cordilleras:** alineaciones montañosas producto de plegamientos tectónicos. En Sudamérica, la Cordillera de los Andes constituye el principal regulador orográfico del régimen hidrológico, controlando tanto la distribución espacial de las precipitaciones como la generación de escorrentía superficial.

El relieve constituye el principal condicionante del régimen de escurrimiento de una cuenca hidrográfica. Entre los indicadores más relevantes para la modelación hidrológica se encuentran la pendiente media y la pendiente del cauce principal, ya que determinan la velocidad de escorrentía y el tiempo de concentración. Una pendiente elevada favorece una rápida evacuación del agua, incrementa la escorrentía superficial, reduce la infiltración y aumenta el riesgo de crecidas súbitas. Por el contrario, una pendiente suave propicia una mayor infiltración, retarda el escurrimiento y contribuye a la recarga subterránea.

Para la estimación de la pendiente del cauce principal se emplean diversos métodos, entre los cuales destacan los siguientes:

- **Método del desnivel entre extremos:** La pendiente del cauce se calcula como:

$$S = \frac{H_{inicio} - H_{final}}{L} \quad (2.2)$$

donde:

- H_{inicio} : cota en el punto de inicio del cauce principal.
- H_{final} : cota en el punto final o desembocadura.
- L : longitud total del cauce principal.

Este método es el más simple, pues solo requiere las cotas extremas y la longitud del cauce. Sin embargo, puede sobreestimar la pendiente media al no considerar los tramos intermedios del perfil longitudinal, especialmente en cuencas con topografía irregular.

- **Método de la pendiente ponderada:** Consiste en ajustar una línea de tendencia al perfil longitudinal del río a partir de la información topográfica disponible. De esta forma, se obtiene una pendiente promedio que pondera adecuadamente los tramos de alta y baja declividad.
 - Ventaja: proporciona un valor más representativo de la dinámica hidráulica real.
 - Limitación: requiere datos detallados del perfil longitudinal, por lo que demanda un mayor esfuerzo en la recopilación y procesamiento de información.
- **Método de la pendiente:** Este procedimiento calcula la pendiente considerando únicamente el 70 % central del cauce principal, eliminando:
 - El 15 % inicial, correspondiente a la cabecera, donde las pendientes suelen ser elevadas.

- El 15 % final, cercano a la desembocadura, donde el cauce presenta pendientes muy suaves.

De este modo, se obtiene una estimación más realista de la pendiente efectiva del río. Es un método ampliamente utilizado en hidrología aplicada, ya que refleja mejor el comportamiento hidráulico del cauce principal, evitando la influencia de extremos atípicos en el perfil.

2.2.5. Tipo y uso del suelo de una cuenca hidrográfica

El tipo y uso del suelo determinan la magnitud de la infiltración, la generación de escorrentía superficial y, en consecuencia, la disponibilidad de agua en una cuenca. Mientras que los suelos permeables y con usos de conservación favorecen la recarga hídrica, los usos urbanos con superficies impermeables limitan la infiltración y aumentan la vulnerabilidad a inundaciones. En este sentido, el suelo constituye un elemento central para la regulación hídrica y la gestión del riesgo en el territorio (Chow et al., 1988).

2.2.6. Vegetación de una cuenca hidrográfica

La vegetación influye en la dinámica hidrológica al interceptar la precipitación, regular la infiltración y controlar la evapotranspiración. Coberturas vegetales densas, como los páramos, actúan como reservorios naturales que atenúan los caudales pico y favorecen la recarga subterránea, mientras que la ausencia de cobertura incrementa la escorrentía y la erosión. Así, la vegetación constituye un factor clave para la resiliencia de la cuenca frente a eventos extremos (Calder, 2005).

2.2.7. Partes de una cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica se divide funcional y morfológicamente en tres zonas principales: parte alta, parte media y parte baja según su posición topográfica, dinámica hidrológica, procesos geomorfológicos y grado de intervención antrópica. Esta división permite un análisis integral del comportamiento del agua, los sedimentos y las actividades humanas a lo largo del recorrido del río principal y sus afluentes.

2.2.7.1. Cuenca alta o zona de cabecera

La parte alta de una cuenca hidrográfica corresponde al sector de mayor elevación topográfica, donde se originan los afluentes principales y secundarios del sistema fluvial. Se caracteriza por pendientes pronunciadas (generalmente superiores al 30 %), suelos delgados, alta capacidad de infiltración y presencia de cobertura vegetal natural (bosques, páramos, etc.). En esta zona predominan los procesos de captación, almacenamiento temporal y regulación del escurrimiento superficial e hipodérmico. Funciona como área de recarga hídrica y control de la erosión. Cualquier alteración en su cobertura vegetal o uso del suelo impacta directamente en la cantidad, calidad y regularidad del flujo hídrico hacia las zonas inferiores de la cuenca (Martínez & López, 2010).

2.2.7.2. Cuenca media o zona de transición

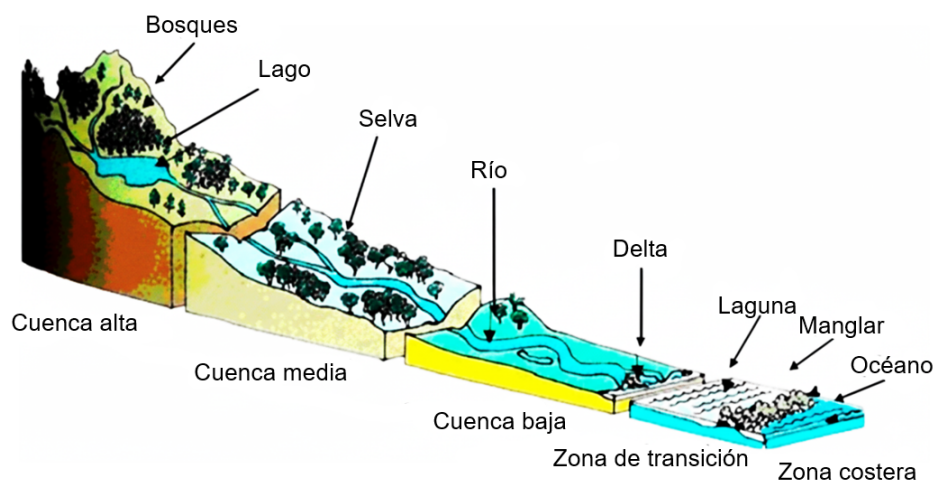
La parte media constituye la zona intermedia de la cuenca, con pendientes moderadas (entre 5 % y 30 %) y mayor desarrollo de redes de drenaje secundario que confluyen en el cauce principal. Presenta suelos más profundos y fértiles, lo que favorece actividades agropecuarias, asentamientos humanos y uso intensivo del agua para riego, consumo doméstico e industrial (Martínez & López, 2010).

2.2.7.3. Cuenca baja o zona de desembocadura

La parte baja comprende el tramo final de la cuenca, caracterizado por pendientes mínimas (inferiores al 5 %), cauces de gran capacidad de transporte y acumulación de sedimentos, y presencia frecuente de planicies aluviales, humedales o deltas. Aquí se concentran las mayores densidades poblacionales, infraestructura urbana e industrial, lo que incrementa la demanda de agua y la generación de efluentes (Martínez & López, 2010).

Figura 2.5

Partes de una cuenca hidrográfica



Nota: Adaptado de (Sociedad Geográfica de Lima, 2011).

2.2.8. Tipos de cuencas hidrográficas

Las cuencas hidrográficas, como unidades naturales de gestión del agua, pueden clasificarse de diversas maneras según el enfoque analítico o el propósito de estudio. Esta diversidad de clasificaciones responde a la necesidad de comprender sus características físicas, ecológicas, funcionales y socioeconómicas de forma integral.

2.2.8.1. Tipos de cuencas según su tamaño geográfico

Las cuencas hidrográficas, de acuerdo con su extensión territorial según el Ministerio del Ambiente del Perú (2015), se pueden clasificar en:

- **Cuencas grandes:** abarcan extensiones mayores a 50.000 hectáreas, donde el almacena-

miento natural y los cauces principales regulan gran parte de la escorrentía.

- **Cuencas medianas:** comprenden superficies entre 5.000 y 50.000 hectáreas, con un equilibrio entre regulación natural y respuesta rápida a las precipitaciones.
- **Cuencas pequeñas:** corresponden a áreas menores a 5.000 hectáreas, también denominadas microcuencas; presentan una respuesta hidrológica inmediata frente a la lluvia y cambios en el uso del suelo.

2.2.8.2. Tipos de cuencas según el ecosistema

De acuerdo con el medio o ecosistema en el que se localizan, las cuencas hidrográficas presentan condiciones naturales particulares FAO (2014), y se pueden clasificar en:

- **Cuencas áridas:** caracterizadas por precipitaciones escasas y alta evapotranspiración. Ejemplo: Cuenca del río Cañete (Perú).
- **Cuencas tropicales:** se desarrollan en zonas de alta humedad y temperatura, con abundantes lluvias. Ejemplo: Cuenca del Canal de Panamá.
- **Cuencas frías:** ubicadas en regiones altoandinas o de clima templado-frío, con temperaturas bajas y estacionalidad marcada. Ejemplo: Cuenca del Lago Titicaca.
- **Cuencas húmedas:** se encuentran en áreas con precipitaciones elevadas y permanente disponibilidad de agua.

2.2.8.3. Tipos de cuencas según su objetivo

Atendiendo a su vocación, a la capacidad natural de sus recursos, así como a los objetivos y características de su aprovechamiento, las cuencas pueden clasificarse según Foro Peruano para el Agua – GWP Perú (2008) en:

- **Hidroenergéticas:** orientadas a la generación de energía a través de centrales hidroeléctricas.
- **Para agua poblacional:** destinadas principalmente al abastecimiento de agua para consumo humano.
- **De riego:** enfocadas en el suministro de agua para actividades agrícolas.
- **De navegación:** aquellas cuyas condiciones naturales permiten el transporte fluvial.
- **Ganaderas:** utilizadas para el abastecimiento de agua en actividades pecuarias.
- **De uso múltiple:** cuencas en las que se desarrollan de manera conjunta diversos aprovechamientos del recurso hídrico.

2.2.8.4. Tipos de cuencas según su objetivo

De acuerdo con las características topográficas y los accidentes del terreno, las cuencas pueden clasificarse según FAO (2014) en:

- **Cuencas planas:** se desarrollan en terrenos con pendientes suaves, favoreciendo la acumulación de agua y el desarrollo de actividades agrícolas.
- **Cuencas de alta montaña:** localizadas en zonas de gran altitud, con pendientes pronunciadas y alta influencia de factores climáticos extremos.
- **Cuencas accidentadas o quebradas:** caracterizadas por un relieve abrupto, pendientes muy marcadas y alta susceptibilidad a erosión e inestabilidad de laderas.

2.2.8.5. Tipos de cuencas según su dirección de evacuación de las aguas

En función del destino final de las aguas, las cuencas hidrográficas se clasifican según Llamas (1993) en:

- **Exorreicas o abiertas:** drenan sus aguas hacia el mar o el océano. Ejemplo: Cuenca del río Rímac, en la vertiente del Pacífico (Perú).
- **Endorreicas o cerradas:** desembocan en lagos, lagunas o salares sin salida fluvial hacia el mar. Ejemplo: Cuenca del río Huancané, en la vertiente del lago Titicaca.
- **Arreicas:** las aguas se infiltran o evaporan antes de formar una red de drenaje definida. Son frecuentes en zonas áridas y desérticas. Ejemplos: meseta patagónica central en Argentina, desierto del Sáhara.

2.2.9. Delimitación de cuencas hidrográficas

La delimitación de cuencas hidrográficas es el procedimiento mediante el cual se determinan y trazan los límites geográficos de un área de drenaje, es decir, el territorio donde las precipitaciones pluviales, la escorrentía superficial y los flujos subterráneos convergen hacia un mismo punto de salida, denominado desfogue. Estos límites, conocidos como divisorias de aguas o *divortium aquarum*, corresponden generalmente a las crestas de montañas, cordilleras o elevaciones topográficas que separan una cuenca de otra (Gaspari et al., 2019).

El proceso se apoya en la información cartográfica, imágenes satelitales y, en la actualidad, de manera más precisa en los modelos digitales de elevación (DEM) analizados en sistemas de información geográfica (SIG). Dichas herramientas permiten identificar con alta exactitud las direcciones de flujo, las pendientes, las crestas y los valles que definen la red de drenaje natural de un territorio (Gaspari et al., 2019).

Más allá de su valor cartográfico, la delimitación constituye un paso esencial en los estudios de hidrología, ingeniería civil y gestión ambiental, ya que establece la unidad espacial mínima para la planificación y manejo de los recursos hídricos. A partir de ella se evalúa la disponibilidad de

agua para distintos usos (poblacional, agrícola, hidroenergético), se identifican zonas vulnerables a inundaciones o erosión, y se diseñan estrategias de conservación de suelos y biodiversidad (Gaspari et al., 2019).

En síntesis, la delimitación de cuencas hidrográficas no solo es una tarea técnica de trazo de límites, sino que representa la base para comprender la dinámica hidrológica de un territorio y orientar de manera sostenible las decisiones de gestión ambiental y de ordenamiento territorial.

2.2.10. Modelo digital del terreno

En palabras de Burrough y McDonnell (1998) un modelo digital del terreno (MDT) es una representación matemática en formato digital de la superficie terrestre, construida a partir de una malla regular o irregular en la que cada celda o nodo almacena un valor de altitud respecto a un sistema de referencia. Se trata de una estructura numérica que modela de manera continua y cuantitativa la variable topográfica del relieve, constituyendo la base para el análisis espacial en múltiples disciplinas.

Cuando el atributo representado corresponde específicamente a la cota o elevación del terreno desnudo (sin considerar la vegetación ni las edificaciones), el MDT se denomina modelo digital de elevación (MDE). Este debe distinguirse de otros productos derivados, como el modelo digital de superficie (MDS), que incluye elementos artificiales y naturales presentes sobre el suelo.

La generación de un MDT puede realizarse mediante diversas técnicas, entre las que destacan los levantamientos topográficos clásicos, la fotogrametría aérea, los sensores LiDAR, los radares de apertura sintética (SAR) y las misiones satelitales globales como SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) y ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). La precisión de un MDT depende de factores como:

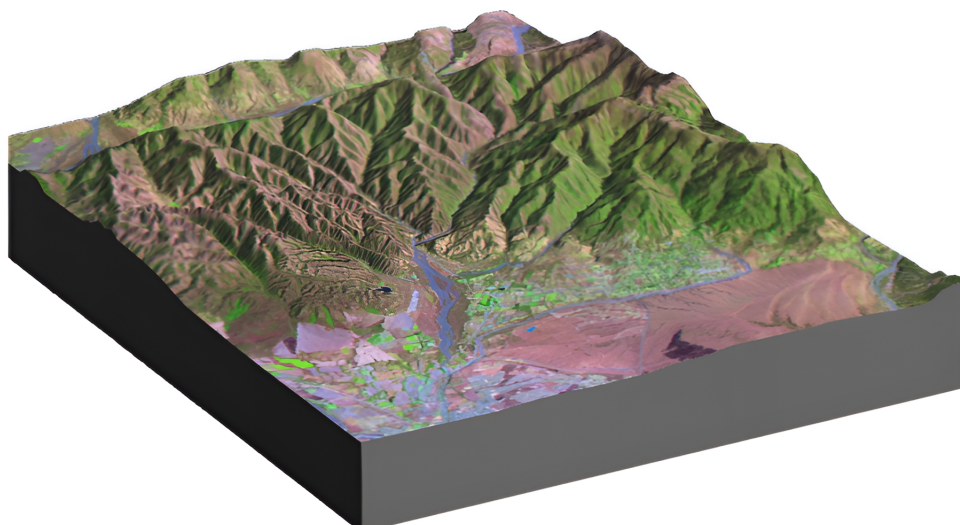
- La resolución espacial de la malla (tamaño del píxel).
- La exactitud vertical del sensor o método de levantamiento.
- El tratamiento aplicado en la interpolación de los datos.

En el campo de la ingeniería civil e hidrología, los modelos digitales de terreno constituyen una herramienta fundamental, ya que permiten:

- La delimitación automática de cuencas hidrográficas.
- La extracción de redes de drenaje y jerarquización de cauces.
- El cálculo de parámetros fisiográficos como pendientes, orientaciones (*aspect*), longitudes de cauces y áreas de captación.
- El análisis de riesgos naturales asociados a inundaciones, erosión, deslizamientos y crecidas súbitas.

En síntesis, el modelo digital de terreno proporciona una representación digital precisa del relieve terrestre que permite la simulación, análisis y modelación hidrológica con base científica, constituyéndose en un insumo esencial para la gestión integral de los recursos hídricos y la planificación territorial.

Figura 2.6
Modelo digital del terreno



Nota: Modelo digital del terreno con la superposición de una composición falso color *543 RGB* (tres bandas de la imagen satelital *LANDSAT TM 231-77*). Adaptado de (Núñez et al., 1999).

2.2.11. Modelo digital de elevación

Un modelo digital de elevación (MDE) es un tipo específico de modelo digital del terreno (MDT) en el que los datos almacenados corresponden exclusivamente a valores de altitud del relieve respecto a un sistema de referencia vertical. A diferencia de otros modelos, el MDE busca representar la superficie del terreno desnuda, es decir, sin considerar elementos temporales o antrópicos como la vegetación y las edificaciones.

En la actualidad, los modelos de elevación digital constituyen una de las principales fuentes de información para el análisis espacial y la modelación hidrológica. A partir de ellos es posible caracterizar de manera detallada la morfometría del relieve, calcular pendientes y orientaciones, generar redes de drenaje y, de manera fundamental, delimitar automáticamente cuencas hidrográficas.

Los modelos de elevación digital pueden obtenerse mediante diversas técnicas de adquisición de datos, entre las que destacan:

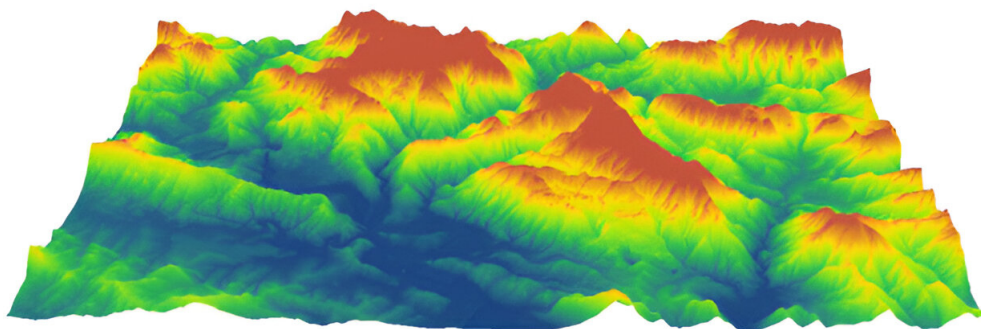
- Fotogrametría aérea y estereoscopia.
- Sensores LiDAR (*Light Detection and Ranging*), que permiten obtener nubes de puntos de alta resolución.
- Radar de apertura sintética (SAR) y misiones satelitales como SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) o ASTER GDEM.

La calidad de los modelos de elevación digital depende de su resolución espacial, que determina el tamaño del píxel y, por ende, el nivel de detalle del relieve representado. Resoluciones más finas (5m) son preferibles para estudios locales de ingeniería civil, diseño de infraestructura hidráulica

y evaluación de riesgos, mientras que resoluciones más gruesas (30m) resultan adecuadas para estudios regionales o de planificación territorial.

Figura 2.7

Modelo digital de elevación



Nota: El modelo de elevación digital proveniente de la misión *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, con una resolución espacial de 30 metros (*1 arc-second*). Adaptado de (Roa Lobo & Kamp, 2007).

2.2.12. Sistemas de información geográfica

Un sistema de información geográfica (SIG) es un conjunto integrado de **hardware**, **software**, datos geospaciales y procedimientos diseñados para capturar, almacenar, manipular, analizar y representar información geográficamente referenciada. Los SIG permiten combinar datos espaciales (ubicación de objetos en la superficie terrestre) con datos atributivos (características o propiedades de esos objetos), facilitando la comprensión de fenómenos geográficos y la toma de decisiones en planificación territorial, gestión ambiental, ingeniería, agricultura, hidrología y otras disciplinas (Burrough & McDonnell, 1998).

El SIG funciona sobre la base de capas temáticas que pueden incluir información de relieve, hidrografía, uso del suelo, infraestructura, redes de transporte, entre otras. Mediante herramientas de análisis espacial, como superposición de capas, consultas espaciales, generación de mapas de pendientes, flujos de agua y análisis de cuencas, se logra extraer conocimiento útil a partir de grandes volúmenes de datos. De esta manera, los SIG se han convertido en herramientas imprescindibles para la modelación del territorio, la planificación de recursos y la investigación científica, permitiendo procesos tanto manuales como automatizados en el manejo de información geográfica (Burrough & McDonnell, 1998).

2.2.13. Teorías y modelos para la delimitación de cuencas

Las teorías y modelos empleados para la delimitación de cuencas hidrográficas en entornos de sistemas de información geográfica (SIG) se fundamentan principalmente en el enfoque topográfico tradicional. Este enfoque se basa en la identificación de las divisorias naturales del terreno a partir de modelos digitales de elevación, lo que permite establecer con precisión los límites de las cuencas. Dichas metodologías consideran variables como la dirección y acumulación del flujo, la pendiente y la jerarquización de la red de drenaje, complementándose con la caracterización morfométrica e hidrológica del área de estudio. De esta manera, no solo se definen los límites

espaciales de la cuenca, sino que también se obtiene información clave para el análisis de la dinámica hidrológica, la planificación del uso del suelo y la gestión integral de los recursos hídricos (Gaspari et al., 2019).

2.2.13.1. Teoría del análisis digital del terreno

El análisis digital del terreno constituye un conjunto de metodologías computacionales que permiten extraer y cuantificar información geomorfológica a partir de modelos digitales del terreno o modelos de elevación digital, generando variables topográficas esenciales para la caracterización del relieve y la modelación de procesos hidrológicos, geomorfológicos y ecológicos (Wilson & Gallant, 2012). Su objetivo principal es transformar los datos discretos de elevación en indicadores derivados que describen la forma, estructura y dinámica de la superficie terrestre. Entre las principales derivadas geomorfológicas primarias que se pueden obtener se incluyen las siguientes:

- **Pendiente (S):** mide la inclinación de la superficie y se calcula como:

$$S = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta z}{\Delta d} \right) \quad (2.3)$$

donde Δz representa la diferencia de elevación entre celdas vecinas y Δd la distancia horizontal. La pendiente es un factor crítico en la determinación de la velocidad de escorrentía superficial, la erosión hídrica y la estabilidad de taludes (Moore et al., 1991).

- **Orientación de la ladera ($Aspect$):** corresponde a la dirección cardinal hacia la cual se orienta la máxima pendiente de una celda. Es fundamental para modelar la radiación solar incidente, la evapotranspiración y los patrones de humedad del suelo (Wilson & Gallant, 2012).
- **Curvaturas:** permiten identificar zonas de concentración o dispersión de flujo y sedimentos:
 - Curvatura de perfil: curvatura a lo largo de la dirección de máxima pendiente; refleja aceleración o desaceleración de flujos y potencial de erosión.
 - Curvatura de plan: curvatura perpendicular a la máxima pendiente; indica convergencia (zonas de acumulación) o divergencia (zonas de escurrimiento disperso) (Moore et al., 1991).

Además, el análisis digital de terreno permite calcular derivadas secundarias o índices geomorfológicos, tales como:

- **Índice de posición topográfica:** determina la posición relativa de un punto dentro de un perfil de elevación, útil para identificar valles y crestas.
- **Índice de humedad topográfica:** integra pendiente y contribución de área de captación para estimar saturación potencial del suelo.
- **Índice de potencial de sedimentación:** estima el transporte y acumulación de sedimentos en función de la pendiente y el área de contribución (Gessler et al., 1995).

En el contexto hidrológico y de gestión de cuencas, el análisis digital de terreno permite, delimitar cuencas hidrográficas de forma automatizada y precisa, generar redes de drenaje jerarquizadas según el orden de Strahler (1957), estimar tiempos de concentración y rutas de escorrentía y identificar zonas con riesgo de inundación o movimientos en masa.

Por lo tanto, el análisis digital de terreno no solo es una herramienta de análisis topográfico, sino también una plataforma integral para modelar procesos ambientales, optimizar la planificación territorial y apoyar la gestión sostenible de recursos hídricos y paisajísticos (Gessler et al., 1995).

2.2.13.2. Teoría del flujo superficial y dirección del flujo

El escurrimiento superficial en una cuenca hidrográfica responde principalmente a la acción de la gravedad, que impulsa el movimiento del agua desde las zonas de mayor altitud hacia los puntos de menor cota. Este comportamiento puede ser descrito mediante el gradiente hidráulico local, que en terrenos naturales suele coincidir con la pendiente topográfica. Así, la topografía del terreno se constituye en el factor primario que controla la dirección del flujo, lo que hace posible su modelación a través de un modelo digital de elevación (*DEM*).

En entornos de sistemas de información geográfica (*SIG*), la estimación de la dirección del flujo se realiza mediante algoritmos específicos, siendo el método *D8 (Deterministic Eight-neighbor Method)* uno de los más ampliamente utilizados (O'Callaghan & Mark, 1984).

Este algoritmo asigna a cada celda del *DEM* una dirección de flujo hacia una de sus ocho celdas vecinas (adyacentes u oblicuas), seleccionando aquella que presenta la menor altitud y, por tanto, el gradiente de pendiente más pronunciado. De este modo, se genera un campo direccional que define la trayectoria potencial del agua a lo largo de toda la superficie de la cuenca.

Una vez definida la dirección del flujo, se procede al cálculo de la acumulación de flujo, la cual representa el número total de celdas que descargan en una celda determinada. Este valor constituye un parámetro esencial, ya que permite identificar los puntos de convergencia del drenaje, la jerarquización de cauces y la red hidrográfica principal. Matemáticamente, la acumulación de flujo se expresa como:

$$F_A(i, j) = \sum_{(k, l) \in \Omega(i, j)} F_A(k, l) \quad (2.4)$$

donde $F_A(i, j)$ representa la acumulación de flujo en la celda (i, j) y $\Omega(i, j)$ corresponde al conjunto de celdas vecinas (k, l) que descargan su flujo en (i, j) . El valor inicial de F_A en cada celda es igual a 1 (unidad de contribución), de modo que el cálculo iterativo acumula las aportaciones de todas las celdas aguas arriba.

Cabe señalar que, aunque el algoritmo *D8* es ampliamente utilizado por su simplicidad y eficiencia computacional, presenta limitaciones en terrenos con superficies planas o convergentes, donde puede generar representaciones poco realistas del flujo. Para superar estas restricciones, se han desarrollado algoritmos alternativos como el *D ∞ (Deterministic Infinity Method)* propuesto por (Tarboton, 1997).

Este método calcula el ángulo de la pendiente máxima de cada celda a partir de un análisis continuo de direcciones, en lugar de restringir el flujo a las ocho direcciones discretas de la malla. Posteriormente, distribuye el flujo entre las dos celdas adyacentes que se encuentran en la

dirección del ángulo calculado, asignando proporciones en función de la cercanía del ángulo a cada celda receptora. Matemáticamente, el flujo f se reparte como:

$$f_i = f \cdot \left(1 - \frac{\theta}{45^\circ}\right), \quad f_j = f \cdot \frac{\theta}{45^\circ} \quad (2.5)$$

donde θ es el ángulo entre la dirección de máxima pendiente y la dirección de la celda receptora i o j .

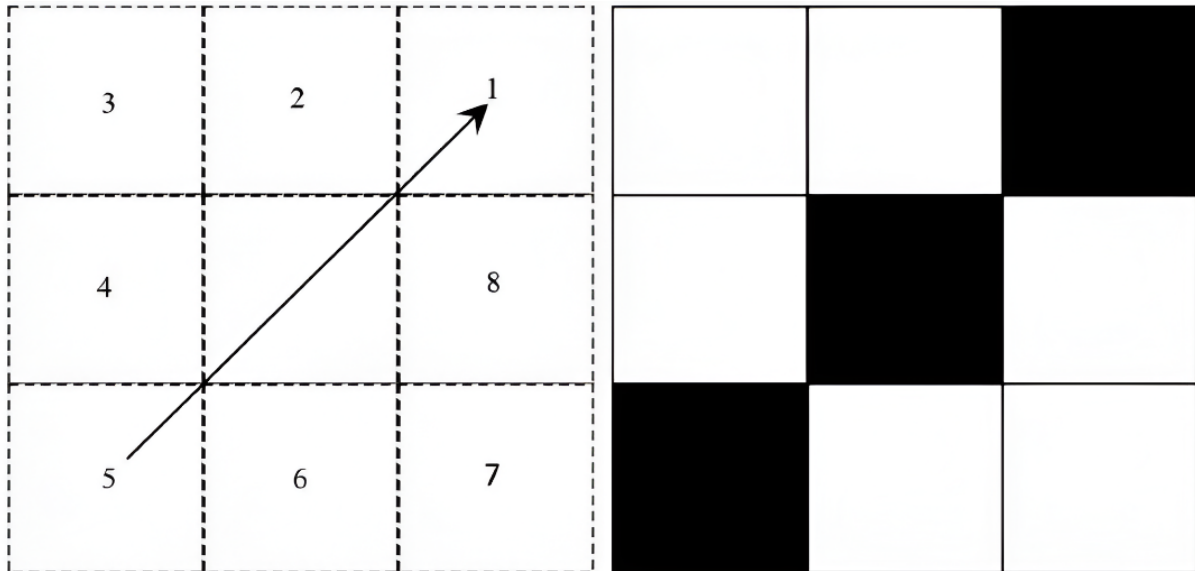
De esta forma, el algoritmo $D\infty$ permite representar de manera más realista los patrones de convergencia y divergencia del flujo, resultando especialmente útil en cuencas con topografía compleja o en áreas donde los métodos discretos generan acumulaciones artificiales de agua. Además, se ha convertido en una de las herramientas más empleadas en hidrología digital para la delineación de redes de drenaje y modelación de procesos de escorrentía superficial.

El procedimiento de dirección y acumulación de flujo constituye la base de los modelos hidrológicos distribuidos y del análisis espacial en hidrología. Estos resultados permiten:

- Definir la red de drenaje a partir de umbrales de acumulación preestablecidos.
- Identificar áreas de concentración de escorrentía y zonas potencialmente inundables.
- Delimitar con precisión las divisorias de aguas y subcuencas.
- Establecer condiciones de frontera para simulaciones hidrológicas e hidráulicas.

Figura 2.8

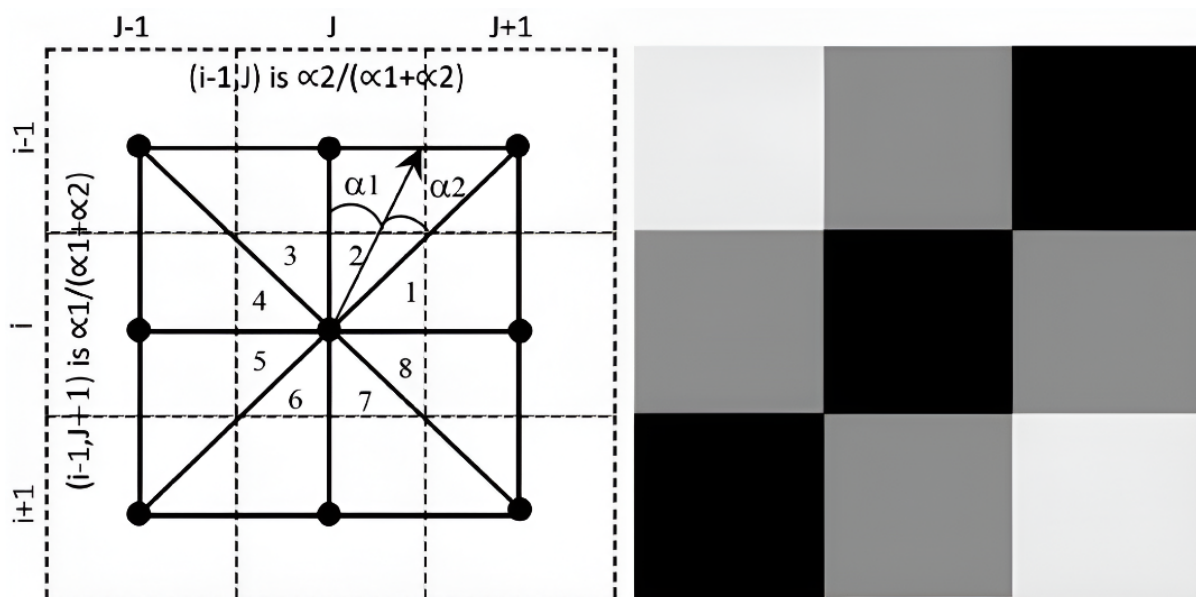
Algoritmo $D8$ -dirección de flujo único



Nota: Adaptado de Al-Muqdadí y Merkel (2011).

Figura 2.9

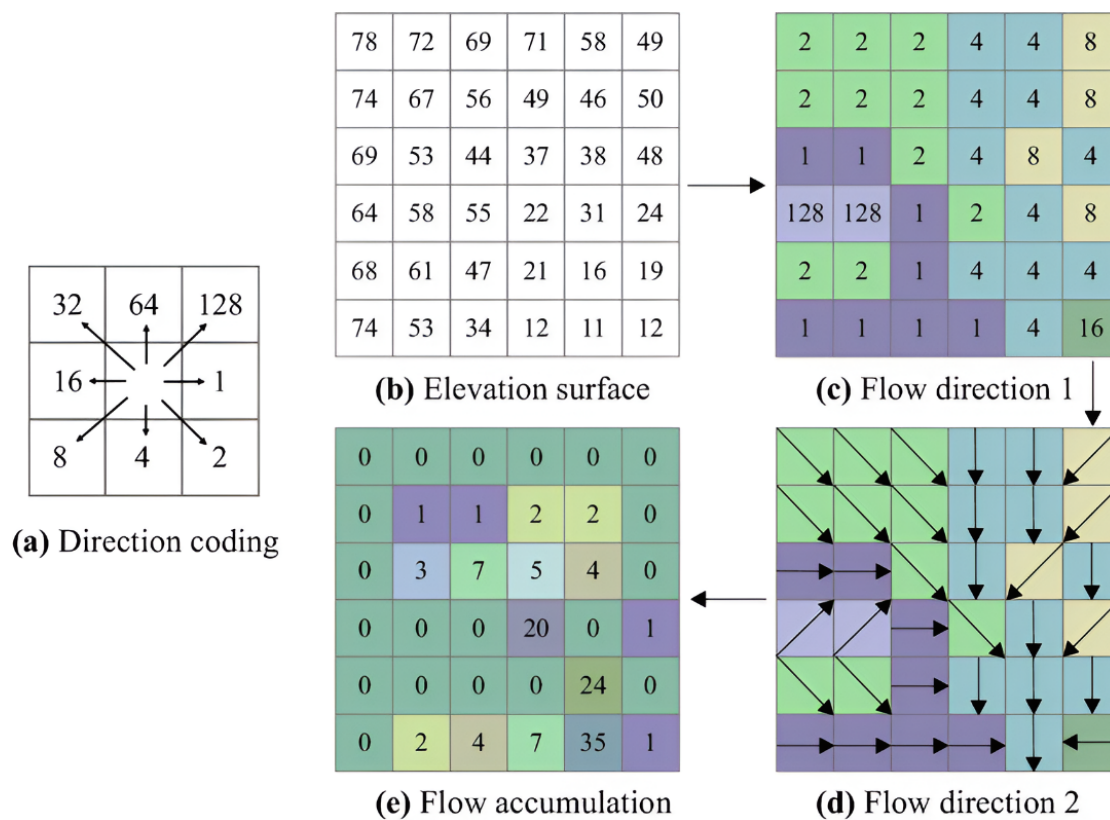
Algoritmo $D\infty$ -dirección de flujo múltiple



Nota: Adaptado de Al-Muqdad y Merkel (2011).

Figura 2.10

Funcionamiento del algoritmo D8



Nota: Adaptado de Al-Muqdad y Merkel (2011).

El algoritmo D8 (**D**eterministic 8) simula la dirección del flujo del agua en un modelo digital del terreno, asumiendo que desde cada celda el agua se desplaza hacia la celda vecina más baja entre las ocho posibles (cuatro cardinales y cuatro diagonales). Cada dirección se codifica con un valor numérico (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128). A partir de esta red de direcciones, se calcula la acumulación de flujo: las celdas que reciben aporte de muchas otras representan cauces principales, mientras que las de baja acumulación corresponden a zonas altas o divisorias. Aunque simple y eficiente, el D8 no modela flujo divergente, lo que puede limitar su precisión en terrenos muy planos (Al-Muqdadí & Merkel, 2011).

2.2.13.3. Teoría de la jerarquización de redes de drenaje

El estudio de la jerarquización de drenaje tiene sus bases en los trabajos pioneros de Horton (1945), quien formuló las primeras leyes cuantitativas sobre la organización de las redes fluviales. Posteriormente, Strahler (1957) perfeccionó estos planteamientos mediante la propuesta de un sistema de clasificación jerárquica de cauces, que actualmente constituye uno de los métodos más utilizados en hidrología, geomorfología e ingeniería civil.

En el método de Strahler, los cauces de *primer orden* corresponden a los tramos más elementales, sin tributarios. La confluencia de dos cauces de primer orden origina un cauce de *segundo orden*, y de manera análoga, la unión de dos cauces de orden u genera un cauce de orden $u + 1$. Cuando un cauce de menor orden se une con otro de orden superior, el cauce resultante mantiene el orden más alto.

Este esquema jerárquico permite representar la complejidad estructural de las redes hidrográficas y facilita el análisis de su grado de desarrollo geomorfológico. Una métrica central derivada de este método es la *razón de bifurcación* (R_b), definida como:

$$R_b = \frac{N_u}{N_{u+1}} \quad (2.6)$$

donde N_u es el número de cauces de orden u y N_{u+1} el número de cauces de orden inmediatamente superior. Este índice expresa la proporción en que disminuye el número de cauces conforme aumenta el orden.

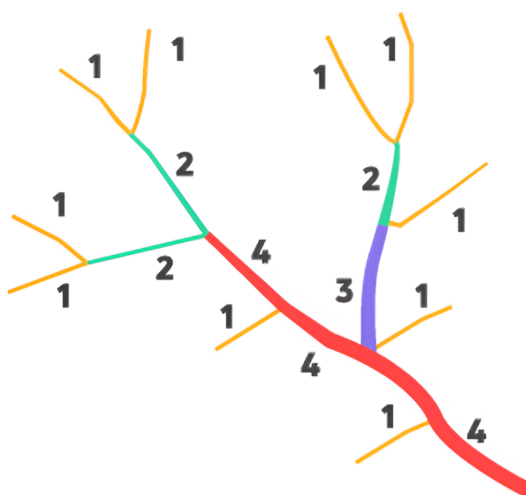
Valores bajos de R_b sugieren un sistema fluvial más integrado y estructurado, generalmente asociado a un control geológico y topográfico marcado. En cambio, valores elevados indican un patrón de drenaje menos organizado, con ramificaciones más dispersas y posiblemente condicionado por una mayor heterogeneidad litológica o por procesos geomorfológicos incipientes. De forma complementaria, la jerarquización de drenaje puede analizarse junto con otras métricas propuestas por Horton (1945), tales como:

- **Ley de los números de cauces:** el número de cauces disminuye de manera exponencial con el incremento del orden.
- **Ley de las longitudes de cauces:** la longitud media de los cauces tiende a aumentar con el orden.
- **Ley de las áreas de cuenca:** las áreas drenadas por cauces de mayor orden son progresivamente mayores.

En conjunto, estas métricas permiten cuantificar la morfometría de una red de drenaje y establecer relaciones con la geología, la tectónica y la dinámica evolutiva de la cuenca. Por ello, la teoría de la jerarquización de drenaje constituye una herramienta fundamental para comprender la organización interna de las cuencas hidrográficas, evaluar su grado de madurez geomorfológica y analizar su comportamiento hidrológico frente a distintos escenarios de precipitación y escorrentía.

Figura 2.11

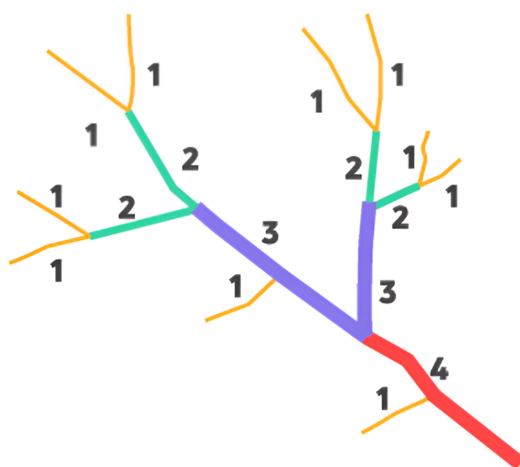
Jerarquización de redes de drenaje según Horton (1945)



Nota: Asigna orden 1 a todos los segmentos sin afluentes (cabezas de drenaje). Al confluir dos segmentos, el tramo aguas abajo recibe el máximo orden entre los tributarios más uno. Esto implica que la unión de un cauce de orden m con otro de orden n (donde $m \geq n$) genera un tramo de orden $m + 1$. Esta regla tiende a sobreestimar el orden en redes ramificadas asimétricas, adaptado de MasterGIS (2025).

Figura 2.12

Jerarquización de redes de drenaje según Strahler (1957)



Nota: El orden empieza en 1 y solo aumenta cuando se unen tramos del mismo orden; si recibe uno de menor orden, no cambia, adaptado de MasterGIS (2025).

2.2.13.4. Teoría hidrogeomorfológica y parámetros morfométricos

La hidrogeomorfología constituye un enfoque interdisciplinario que estudia la relación entre la geomorfología de una cuenca hidrográfica (forma, relieve y estructura) y los procesos hidrológicos asociados (escorrentía, concentración de caudales e infiltración). Sus fundamentos empíricos clásicos provienen de los trabajos de Horton (1945), y fueron ampliados y formalizados por autores como Strahler (1957) y Schumm (1956), estableciéndose un conjunto de parámetros morfométricos que permiten caracterizar cuantitativamente la geometría de una cuenca hidrográfica y su posible respuesta hidrológica.

A continuación se presentan los parámetros morfométricos más utilizados, su definición matemática y una breve interpretación hidrológica.

- Densidad de drenaje, D_d

$$D_d = \frac{L_t}{A} \quad (2.7)$$

donde L_t es la longitud total de la red de cauces (suma de las longitudes de todos los tramos) y A el área de la cuenca.

Según Horton (1945) los valores altos de D_d indican una red densa que favorece la rápida evacuación de escorrentía (respuesta rápida y mayor pico de caudal), asociado a suelos poco permeables, pendientes pronunciadas o escaso almacenamiento superficial; valores bajos sugieren mayor infiltración y respuesta hidrológica más atenuada.

- Índice de compacidad de Gravelius, K_c

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (2.8)$$

donde P es el perímetro de la cuenca y A su área.

Según Gravelius (1914), el $K_c \approx 1$ indica cuenca casi circular (respuesta hidrológica relativamente concentrada) y los valores mayores indican formas alargadas (respuesta más dispersa).

- Relación de elongación, R_e

$$R_e = \frac{2\sqrt{A/\pi}}{L_b} \quad (2.9)$$

donde L_b es la longitud máxima de la cuenca (longitud principal, medida a lo largo del cauce principal desde la cabecera hasta la salida) y R_e varía entre 0 y 1 donde los valores cercanos a 1 indican cuencas más circulares, valores bajos indican mayor alargamiento.

Según Strahler (1964), las cuencas más elongadas (menor R_e) suelen presentar respuestas hidrológicas más dispersas en el tiempo y cuencas con R_e elevado se aproximan a respuestas rápidas y concentradas.

- Factor de forma, F_f

$$F_f = \frac{A}{L_b^2} \quad (2.10)$$

donde, L_b es la longitud principal de la cuenca hidrográfica. Un F_f bajo indica una cuenca alargada y valores más altos indican cuenca más compactas.

Según Strahler (1964), el F_f es útil para evaluar la tendencia a concentrar la escorrentía donde cuencas con F_f cercano a 1 tienden a concentrar la escorrentía en menos tiempo que aquellas con F_f más pequeño.

- Relación de bifurcación, R_b

$$R_b = \frac{N_u}{N_{u+1}} \quad (2.11)$$

donde N_u es el número de cauces del orden u y N_{u+1} el número de cauces del orden inmediatamente superior.

Según Horton (1945), la R_b es adimensional y suele permanecer relativamente constante para cuencas hidrográficas de una misma región donde los valores altos pueden indicar fuerte control estructural o terrenos con fracturamiento y valores bajos indican redes menos jerarquizadas.

- Razón de circularidad, R_c

$$R_c = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (2.12)$$

donde $0 < R_c \leq 1$ (1 corresponde a un círculo perfecto). R_c y K_c son parámetros relacionados que describen la circularidad de la cuenca y proporcionan criterios consistentes sobre la concentración del escurrimiento.

Los parámetros morfométricos descritos proporcionan una visión cuantitativa de la geometría de la cuenca y permiten inferir tendencias generales de comportamiento hidrológico, la densidad de drenaje y factor de forma están estrechamente ligados a la rapidez y magnitud del pico de escorrentía, la compacidad y circularidad resumen la propensión de la cuenca hidrográfica a concentrar los caudales.

2.2.13.5. Teoría de la hidrología cuantitativa y de respuesta

La hidrología cuantitativa estudia la relación entre las características fisiográficas de una cuenca hidrográfica y su respuesta ante un evento de precipitación. Uno de los parámetros más relevantes es el tiempo de concentración (T_c), definido como el tiempo requerido para que una partícula de agua situada en el punto más alejado de la cuenca alcance la salida de la misma. Este parámetro controla la forma y magnitud del hidrograma de salida, influyendo directamente en la estimación de caudales pico y en el diseño de obras hidráulicas (Chow et al., 1988).

En la bibliografía se han propuesto diversas ecuaciones empíricas y semiempíricas para la estimación de T_c , cada una desarrollada bajo condiciones fisiográficas y climáticas específicas. A continuación se presentan las más empleadas en hidrología.

- La formula de Kirpich desarrollada en 1940, según Grimaldi et al. (2012), es la fórmula empírica para estimar el tiempo de concentración en cuencas pequeñas y predominantemente rurales, que relaciona la longitud del cauce y la pendiente media. Está diseñada para trayectos con flujo superficial concentrado y pendientes moderadas a fuertes; no incorpora

rugosidad del cauce, uso de suelo ni efectos urbanos, por lo que debe usarse con precaución fuera de su rango original de calibración.

$$T_c = 0,0078 L^{0,77} S^{-0,385} \quad (2.13)$$

- La formula de **Giandotti desarrollada en 1934**, según Grimaldi et al. (2012), es la fórmula empírica desarrollada en Italia, adecuada para cuencas de tamaño pequeño a mediano. Integra explícitamente el área de la cuenca, la longitud del cauce principal y el desnivel altitudinal, ofreciendo una estimación más equilibrada del tiempo de concentración en comparación con expresiones basadas solo en pendiente y longitud. Se recomienda principalmente en regiones con hidrología similar a las cuencas de calibración originales, y debe usarse con precaución en cuencas muy urbanizadas o de gran extensión.

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{25,3\sqrt{H}} \quad (2.14)$$

- La formula de **Soil Conservation Service desarrollada en 1972**, según Grimaldi et al. (2012), es la expresión empírica propuesta por el actual *NRCS* de los Estados Unidos, ampliamente utilizada en proyectos de drenaje e hidráulica urbana y rural. El método relaciona el tiempo de concentración con la longitud del flujo superficial, la pendiente del terreno y el uso del suelo a través del parámetro Y , que representa la pérdida de agua por infiltración y retención inicial. Su versatilidad lo hace uno de los enfoques más difundidos en ingeniería hidrológica, aunque se recomienda verificar su aplicabilidad fuera de los rangos de calibración originales.

$$T_c = \frac{L^{0,8}(S + 1)^{0,7}}{1900 \sqrt{Y}} \quad (2.15)$$

- La formula de **Bransby-Williams desarrollada en 1922**, según Ganti (2018), la ecuación empírica desarrollada en Sudáfrica, utilizada principalmente para cuencas de gran extensión. Relaciona el tiempo de concentración con la longitud del cauce principal y el desnivel total, resultando útil en regiones semiáridas y con redes de drenaje extensas, aunque con limitaciones al extrapolar a cuencas más pequeñas o en condiciones urbanas.

$$T_c = 58 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (2.16)$$

- La formula de **Kerby desarrollada en 1959**, según Ganti (2018), fórmula está orientada a estimar el tiempo de concentración en tramos de flujo superficial en lámina (overland flow), particularmente en áreas urbanas o rurales con coberturas que influyen en la rugosidad. Incorpora explícitamente el coeficiente de Manning (n), la longitud del escurrimiento, la pendiente y la intensidad de lluvia de diseño (i), lo que permite reflejar las condiciones locales de escurrimiento sobre superficies no canalizadas.

$$T_c = 0,828 \frac{(n L)^{0,467}}{i^{0,467} S^{0,235}} \quad (2.17)$$

Donde las variables se definen como: L = longitud del cauce principal o flujo (m o ft), S = pendiente media (m/m o %), A = área de la cuenca (km²), H = desnivel entre cotas extremas (m), C = coeficiente de escorrentía, n = coeficiente de rugosidad de Manning, i = intensidad de lluvia (in/hr), y Y = parámetro de escorrentía propuesto por el *SCS*.

2.2.14. Proceso de delimitación de cuencas hidrográficas

La delimitación de cuencas hidrográficas a partir de un modelo de elevación digital (*DEM*) es un procedimiento sistemático que combina técnicas de análisis espacial y algoritmos hidrológicos en un sistema de información geográfica (*SIG*). El flujo de trabajo se puede descomponer en varias etapas secuenciales, la cuales son mostradas a continuación:

1. Descarga de datos base

El primer paso para la delimitación de cuencas hidrográficas consiste en la descarga del modelo digital de elevación (*DEM*), el cual representa la superficie terrestre en función de su altitud. Este archivo, generalmente en formato raster, constituye la base para todos los cálculos posteriores durante la delimitación. Adicionalmente a esto, se puede obtener un archivo vectorial (*shapefile*) con el límite aproximado de la cuenca hidrográfica o del área de estudio, que servirá como referencia para recortar y centrar los análisis en la zona de estudio.

2. *Mosaic*

Cuando la cuenca de estudio abarca varios mosaicos o modelos de elevación digital, estos deben ser integrados en un único raster continuo mediante la herramienta de mosaico. Este procedimiento asegura la homogeneidad del modelo de elevación y elimina las discontinuidades entre bloques de datos.

3. *Fill*

Los modelos digitales de elevación suelen presentar *depresiones artificiales* (*sinks*), producto de errores en la captura o procesamiento de datos. Estas depresiones interrumpen el flujo superficial del agua, generando incoherencias hidrológicas. El proceso de *Fill* corrige dichas irregularidades, rellenando los hundimientos no naturales y garantizando la continuidad del drenaje.

4. *Flow Direction*

Con el modelo de elevación digital corregido, se procede a calcular la dirección de flujo de cada celda. Este procedimiento se basa en la pendiente máxima descendente, generalmente determinada mediante el algoritmo *D8*, que asigna la salida del flujo hacia una de las ocho celdas adyacentes. El resultado es un raster en el cual cada celda contiene un valor codificado que indica la dirección del flujo.

5. *Flow Accumulation*

A partir de la dirección de flujo, se calcula la acumulación de flujo, que representa el número de celdas que drenan hacia cada punto. Esta información permite identificar zonas

de convergencia de la escorrentía y localizar los cauces principales, dado que las celdas con mayor acumulación corresponden a los sectores donde se concentra el drenaje de aguas.

6. *Conditional*

No todas las celdas con acumulación de flujo constituyen un cauce permanente. Para definir la red de drenaje, se aplica un umbral mínimo mediante la herramienta *Con (Conditional)*. Solo las celdas cuya acumulación supere dicho umbral son clasificadas como parte de la red hidrográfica. La elección de este valor umbral es crítica, ya que determina el nivel de detalle de la red resultante.

7. *Stream Link*

Este procedimiento subdivide la red hidrográfica en segmentos únicos, asignando identificadores a cada tramo de cauce comprendido entre dos confluencias. De esta forma, la red se organiza en elementos discretos que facilitan el análisis estructural de la red pluvial.

8. *Stream Order*

La red de drenaje resultante se clasifica jerárquicamente mediante un método de ordenación, siendo el más utilizado el de *Strahler*. En este sistema, los cauces sin tributarios reciben orden 1 y el orden aumenta conforme se unen cauces de igual jerarquía. Este análisis es fundamental para evaluar la estructura y complejidad de la red fluvial.

9. *Stream Feature*

La red hidrográfica definida en formato raster se convierte en un archivo vectorial de tipo polilínea. Este cambio de formato permite una representación más precisa, facilita la visualización y posibilita cálculos adicionales como la longitud de cauces o la densidad de drenaje.

10. *Watershed*

Finalmente luego de estos procesos, se ejecuta la herramienta *Watershed*, que identifica el área de contribución hídrica hacia un punto de salida o *outlet* previamente definido. El resultado es la delimitación precisa de la cuenca hidrográfica, entendida como la superficie que drena toda su escorrentía hacia un punto común. Esta delimitación constituye el producto principal del análisis y la base para estudios posteriores de carácter hidrológico, hidráulico y de gestión de recursos hídricos.

En síntesis, el procedimiento de delimitación de cuencas hidrográficas asegura que el área obtenida sea hidrológicamente consistente, convirtiéndose en una herramienta esencial para la planificación territorial, la gestión de los recursos hídricos y el diseño de infraestructuras hidráulicas.

2.2.15. Obtención de parámetros fisiográficos de cuencas

Los parámetros fisiográficos son características cuantificables de una cuenca hidrográfica que describen su forma, relieve, drenaje e hidrología. Estos parámetros son fundamentales para el análisis hidrológico y geomorfológico, ya que influyen en la respuesta de la cuenca ante eventos de precipitación y en la dinámica del escurrimiento superficial, los parámetros fisiográficos están compuestos por los siguientes parámetros (Chow et al., 1988).

- Parámetros morfométricos
- Parámetros de relieve
- Parámetros de drenaje
- Parámetros hidrológicos

2.2.15.1. Parámetros morfométricos

Los parámetros morfométricos que describen la forma y la geometría de la cuenca hidrográfica son los siguientes:

- **Área:** Según Richard J. Chorley (1984), es la extensión superficial de una cuenca hidrográfica que corresponde al área delimitada por su divisoria de aguas, generalmente expresada en kilómetros cuadrados (km^2). Este parámetro refleja la magnitud espacial de la cuenca y constituye un factor determinante en los procesos hidrológicos, pues condiciona la cantidad de precipitación que puede ser recogida y, en consecuencia, la magnitud del caudal de escorrentía generado.

Para el cálculo del área de la cuenca hidrográfica en el software **ArcGIS** se realiza a partir de la tabla de atributos de la capa vectorial previamente delimitada. Para ello, se crea un nuevo campo de tipo *Double* $\rightarrow$ *Add Field*, lo que permite almacenar valores decimales con precisión. A continuación, se procede a *Calculate Geometry* $\rightarrow$ *Área*, definiendo las unidades de salida en metros cuadrados (m^2) o directamente en kilómetros cuadrados (km^2).

De este modo, se obtiene la superficie de drenaje de la cuenca expresada en unidades adecuadas, fundamental para el análisis y caracterización hidrológica.

- **Perímetro:** Según Strahler (1957), corresponde a la longitud total de la línea divisoria de aguas que delimita la cuenca hidrográfica, expresada habitualmente en kilómetros. Este parámetro permite evaluar el grado de compacidad de la cuenca, influyendo en la forma en que se concentran los escurrimientos superficiales y en la velocidad de respuesta hidrológica del sistema.

Para el cálculo del perímetro de la cuenca en el software **ArcGIS**, se parte de la capa vectorial previamente delimitada en formato polígono. En la tabla de atributos se crea un nuevo campo de tipo *Double* $\rightarrow$ *Add Field*, con el fin de almacenar valores decimales. Posteriormente, se utiliza la herramienta *Calculate Geometry* $\rightarrow$ *Perimeter*, seleccionando las unidades de salida deseadas, preferiblemente en kilómetros (km).

De esta manera se obtiene la longitud de la divisoria de aguas de la cuenca, necesaria para el cálculo de índices morfométricos.

- **Longitud del cauce principal:** Según Horton (1945), se define como la distancia total medida a lo largo del cauce principal de la cuenca, desde su cabecera o punto más alejado en la red de drenaje hasta la desembocadura en la salida de la cuenca. Este parámetro

constituye un indicador hidrológico fundamental, ya que influye directamente en el tiempo de concentración y en la respuesta del caudal frente a eventos de precipitación.

Para determinar la longitud del cauce principal en el software **ArcGIS**, primero es necesario identificar la red de drenaje a partir del modelo de elevación digital mediante las herramientas de *Hydrology*. Una vez generada la red hidrográfica y definido el cauce principal, se convierte la línea en una entidad vectorial. Posteriormente, en la tabla de atributos de dicha capa se crea un nuevo campo de tipo *Double* → *Add Field*, y se aplica la opción *Calculate Geometry* → *Length*, especificando las unidades de salida en kilómetros (km).

De este modo se obtiene la longitud total del cauce principal, parámetro esencial para la caracterización morfométrica y para la estimación de variables hidrológicas como el tiempo de concentración.

- **Ancho promedio:** De acuerdo con Schumm (1956), el ancho promedio de una cuenca hidrográfica se define como la relación entre su área total y la longitud del cauce principal, expresado en kilómetros. Este parámetro constituye un indicador morfométrico que permite caracterizar la forma de la cuenca, diferenciando entre cuencas alargadas (valores bajos) y cuencas más compactas (valores altos), lo que influye en la concentración del escurrimiento y en la respuesta hidrológica ante eventos de precipitación.

Para su cálculo en el software **ArcGIS**, se requiere previamente haber obtenido el área de la cuenca (en km²) y la longitud del cauce principal (en km). Una vez determinados ambos parámetros mediante las herramientas de *Calculate Geometry*, el ancho promedio se calcula aplicando la relación:

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

donde:

B_p = ancho promedio (km)

A = área de la cuenca (km²)

L = longitud del cauce principal (km)

De esta forma, el ancho promedio ofrece una medida sencilla y útil para comparar la morfología de distintas cuencas y evaluar su influencia en la dinámica del escurrimiento superficial.

- **Coefficiente de compacidad:** Según Gravelius (1914), el coeficiente de compacidad (K_c) es un índice morfométrico que relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de igual área. Este parámetro permite evaluar el grado de compactación de la cuenca, de manera que valores próximos a la unidad indican formas más compactas y circulares, mientras que valores mayores reflejan cuencas más alargadas o irregulares. Su importancia radica en que la compacidad condiciona la concentración del escurrimiento: cuencas más compactas suelen generar mayores caudales pico en menor tiempo, mientras que cuencas alargadas tienden a presentar una respuesta hidrológica más atenuada.

El coeficiente de compacidad se expresa matemáticamente como:

$$K_c = \frac{0,28 \cdot P}{\sqrt{A}}$$

donde:

K_c = coeficiente de compacidad (adimensional)

P = perímetro de la cuenca (km)

A = área de la cuenca (km²)

Para su determinación en el software **ArcGIS**, se obtienen previamente el área y el perímetro de la cuenca mediante la opción *Calculate Geometry* en la tabla de atributos de la capa poligonal. Posteriormente, el índice se calcula aplicando la fórmula anterior, ya sea en la propia tabla de atributos (añadiendo un nuevo campo y usando el *Field Calculator*) o externamente en hojas de cálculo.

- **Relación de elongación:** Según Schumm (1956), la relación de elongación (R_e) es un índice morfométrico que compara el diámetro de un círculo de igual área que la cuenca con la longitud máxima de la misma. Este parámetro permite clasificar la forma de la cuenca, identificando si es más bien compacta (valores próximos a 1) o alargada (valores significativamente menores a 1). Su importancia radica en que la morfología influye en la concentración del escurrimiento y en el tiempo de respuesta hidrológica: cuencas compactas tienden a generar picos de caudal más elevados en menor tiempo, mientras que las cuencas alargadas suelen presentar respuestas más atenuadas.

La relación de elongación se define mediante la expresión:

$$R_e = \frac{2 \cdot \sqrt{\frac{A}{\pi}}}{L}$$

donde:

R_e = relación de elongación (adimensional)

A = área de la cuenca (km²)

L = longitud máxima de la cuenca (km)

Para su cálculo en el software **ArcGIS**, se obtiene inicialmente el área de la cuenca y la longitud máxima (distancia entre la cabecera más alejada y la salida de la cuenca), empleando la herramienta *Calculate Geometry* en la tabla de atributos. Posteriormente, la fórmula se aplica en un nuevo campo con el *Field Calculator* o externamente en hojas de cálculo..

- **Factor de forma:** Según Horton (1945), el factor de forma (F_f) es un índice morfométrico que relaciona el área de la cuenca con el cuadrado de su longitud máxima. Este parámetro permite evaluar la forma de la cuenca e inferir su respuesta hidrológica: valores elevados indican cuencas más compactas, con mayor propensión a generar crecidas súbitas y picos de caudal más altos; mientras que valores bajos reflejan cuencas alargadas, donde el escurrimiento se concentra de manera más gradual.

Matemáticamente se expresa como:

$$F_f = \frac{A}{L^2}$$

donde:

F_f = factor de forma (adimensional)

A = área de la cuenca (km²)

L = longitud máxima de la cuenca (km)

Para su determinación en el software **ArcGIS**, se obtiene primero el área de la cuenca (en km²) y la longitud máxima (en km) mediante la herramienta *Calculate Geometry* en la tabla de atributos. Posteriormente, el cálculo del índice se realiza añadiendo un nuevo campo y aplicando la fórmula anterior con el *Field Calculator*, o en una hoja de cálculo externa.

2.2.15.2. Parámetros de relieve

Los parámetros de relieve describen la variación altimétrica dentro de la cuenca hidrográfica y son los siguientes:

- **Altitud máxima, media y mínima:** De acuerdo con Strahler (1957), estos parámetros corresponden a los valores extremos y promedio de elevación presentes dentro de la cuenca hidrográfica, expresados en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). La altitud máxima refleja el punto más elevado dentro de la divisoria de aguas, la altitud mínima corresponde al punto de salida de la cuenca, y la altitud media constituye un valor representativo del relieve general. Estos indicadores son fundamentales para la caracterización fisiográfica, ya que influyen en la energía potencial del sistema, en la dinámica del escurrimiento y en procesos geomorfológicos asociados.

Para su determinación en el software **ArcGIS**, se emplea el modelo de elevación digital de la cuenca previamente delimitada. Mediante la herramienta *Zonal Statistics as Table* (*Spatial Analyst Tools* → *Zonal* → *Zonal Statistics as Table*), se extraen valores estadísticos de elevación en la zona definida por el polígono de la cuenca. Entre los resultados obtenidos se incluyen el valor máximo, el mínimo y la media de altitud. Estos se incorporan luego a la tabla de atributos de la cuenca, constituyendo insumos esenciales para la caracterización hidrológica y geomorfológica.

- **Pendiente media:** Según Pike y Wilson (1971), la pendiente media de una cuenca hidrográfica se define como la relación entre la diferencia de altitud y la distancia horizontal recorrida, expresándose generalmente en porcentaje (%) o en grados (°). Este parámetro es un indicador clave del relieve y controla procesos hidrológicos y geomorfológicos como la velocidad de escurrimiento, la erosión hídrica y la energía del flujo. Cuencas con pendientes más pronunciadas tienden a generar respuestas rápidas y caudales pico elevados, mientras que cuencas con pendientes suaves presentan respuestas más atenuadas.

Su cálculo puede realizarse a partir del modelo de elevación digital mediante herramientas de análisis espacial en ArcGIS. Una de las metodologías más empleadas consiste en generar el mapa de pendientes utilizando la herramienta *Slope* (*Spatial Analyst Tools* → *Surface* → *Slope*), que calcula la pendiente para cada celda del modelo de elevación digital. Posteriormente, se aplica la herramienta *Zonal Statistics as Table* sobre el polígono de la cuenca, obteniendo valores estadísticos que incluyen la pendiente media.

De esta forma, la pendiente media se incorpora como un parámetro morfométrico fundamental para el análisis hidrológico y geomorfológico de la cuenca.

- **Relieve relativo:** Según Melton (1957), el relieve relativo (R_r) se define como la diferencia entre la altitud máxima y la altitud mínima de la cuenca hidrográfica, expresada en metros. Este parámetro representa el rango altitudinal o amplitud vertical del terreno, constituyendo un indicador de la rugosidad y energía del relieve. Valores elevados de R_r reflejan cuencas montañosas y abruptas, mientras que valores bajos corresponden a cuencas de relieve suave. Su importancia radica en que influye directamente en los procesos de escorrentía, erosión, transporte de sedimentos y en la velocidad de respuesta hidrológica.

Matemáticamente se expresa como:

$$R_r = H_{max} - H_{min}$$

donde:

R_r = relieve relativo (m)

H_{max} = altitud máxima de la cuenca (m.s.n.m.)

H_{min} = altitud mínima de la cuenca (m.s.n.m.)

Para su determinación en el software ArcGIS, se emplea el modelo de elevación digital recortado por el polígono de la cuenca. Con la herramienta *Zonal Statistics as Table* (*Spatial Analyst Tools* → *Zonal* → *Zonal Statistics as Table*), se obtienen las altitudes máxima y mínima dentro de la cuenca. La diferencia entre estos valores proporciona directamente el relieve relativo.

- **Índice de rugosidad:** Según Patton y Baker (1976), el índice de rugosidad (R_n) es un parámetro morfométrico que integra el relieve relativo y la pendiente media de la cuenca, con el fin de cuantificar la variabilidad del relieve y su influencia en los procesos hidrológicos. Este índice constituye una medida de la energía del terreno, indicando la capacidad potencial de generar escurrimientos rápidos y erosión. Valores altos de R_n caracterizan cuencas montañosas con pendientes fuertes y gran disección del relieve, mientras que valores bajos corresponden a cuencas más planas y con menor respuesta hidrológica.

Matemáticamente se expresa como:

$$R_n = \frac{R_r \cdot S}{1000}$$

donde:

R_n = índice de rugosidad (adimensional)

R_r = relieve relativo (m)

S = pendiente media de la cuenca (%)

Para su determinación en el software **ArcGIS**, se calcula previamente el relieve relativo a partir de las altitudes máxima y mínima de la cuenca (*Zonal Statistics as Table*) y la pendiente media a partir del modelo de elevación digital mediante la herramienta *Slope*. Con ambos valores se aplica la fórmula anterior en un nuevo campo de la tabla de atributos o externamente en una hoja de cálculo.

2.2.15.3. Parámetros de drenaje

Los parámetros de drenaje caracterizan la red hidrográfica de la cuenca y su capacidad de evacuación del agua, y son los siguientes:

- **Densidad de drenaje:** Según Horton (1945), la densidad de drenaje (D_d) se define como la relación entre la longitud total de todos los cauces de la red hidrográfica de una cuenca y el área total de la misma, expresada en km/km^2 . Este parámetro constituye un indicador fundamental de la textura de la red de drenaje, reflejando la influencia de factores como la permeabilidad del suelo, la litología, la cobertura vegetal, la pendiente y la intensidad de las precipitaciones. Valores altos de D_d suelen estar asociados a cuencas con suelos impermeables, pendientes pronunciadas o precipitaciones intensas, mientras que valores bajos corresponden a cuencas con mayor infiltración y menor escorrentía superficial.

Matemáticamente se expresa como:

$$D_d = \frac{L_t}{A}$$

donde:

D_d = densidad de drenaje (km/km^2)

L_t = longitud total de los cauces en la cuenca (km)

A = área de la cuenca (km^2)

Para su determinación en el software **ArcGIS**, se genera la red de drenaje a partir del modelo de elevación digital mediante las herramientas de *Hydrology* (*Flow Direction*, *Flow Accumulation* y *Stream Order*). Posteriormente, la red de drenaje se vectoriza en formato de líneas, y en la tabla de atributos se obtiene la longitud total de los cauces con la opción *Calculate Geometry* → *Length* (en kilómetros). El área de la cuenca se obtiene de la capa poligonal correspondiente. Finalmente, el cociente L_t/A se calcula en un nuevo campo de la tabla o en una hoja de cálculo externa.

- **Frecuencia de drenaje:** Según Schumm (1956), la frecuencia de drenaje (F_d) se define como el número total de cauces presentes en una cuenca dividido entre su área total, expresándose en número de cauces por kilómetro cuadrado ($número/km^2$). Este índice

morfométrico refleja la intensidad con la que el relieve está disecado por la red de drenaje y permite inferir la capacidad de evacuación de aguas superficiales de la cuenca.

Un valor elevado de F_d indica un relieve intensamente disectado, asociado a suelos poco permeables, precipitaciones intensas o litologías resistentes, mientras que valores bajos se asocian a mayores procesos de infiltración, buena permeabilidad del sustrato o relieves suaves.

Su expresión matemática es:

$$F_d = \frac{N}{A}$$

donde:

F_d = frecuencia de drenaje (número/km²)

N = número total de cauces en la cuenca

A = área de la cuenca (km²)

En ArcGIS, la determinación se realiza generando la red de drenaje a partir del modelo de elevación digital mediante las herramientas *Hydrology*. Posteriormente, la red se vectoriza en formato lineal y, a través de la tabla de atributos, se contabiliza el número total de cauces (*Count*). Finalmente, se divide este valor entre el área de la cuenca previamente calculada en kilómetros cuadrados, obteniéndose el índice de frecuencia de drenaje.

- **Orden del cauce:** De acuerdo con Strahler (1964), el orden de los cauces constituye un sistema jerárquico de clasificación de la red de drenaje en función de la confluencia de sus afluentes. En este método, los cauces de cabecera sin tributarios se consideran de primer orden. Cuando dos cauces del mismo orden confluyen, el cauce resultante adquiere un orden superior. Si la unión se produce entre cauces de distinto orden, el cauce principal conserva el mayor de ellos.

El orden de los cauces es un parámetro fundamental para el análisis hidrológico, ya que permite identificar la complejidad y el grado de ramificación de la red de drenaje. Una cuenca con cauces de alto orden generalmente presenta mayor extensión espacial, mayor tiempo de concentración y mayor capacidad de transporte de caudales.

En ArcGIS, la determinación del orden de cauces se efectúa a partir del modelo de elevación digital mediante las herramientas *Hydrology*. Tras calcular la dirección y acumulación de flujo, se genera la red de drenaje (*Stream Definition*). Luego, con la herramienta *Stream Order*, se aplica el método de Strahler (1964) para asignar un valor jerárquico a cada segmento de cauce, el cual queda registrado en la tabla de atributos. De esta manera, es posible identificar el cauce principal y los órdenes inferiores de la red.

- **Razón de bifurcación:** Según Horton (1945), la razón de bifurcación (R_b) se define como la relación entre el número de cauces de un determinado orden (N_u) y el número de cauces del orden inmediatamente superior (N_{u+1}). Este índice expresa el grado de ramificación de la red de drenaje y constituye un indicador de la influencia del control estructural y litológico en la organización de la red fluvial.

Un valor bajo de R_b indica una red más uniforme y equilibrada, característica de cuencas en equilibrio morfológico y con menor control estructural, mientras que valores altos suelen reflejar mayor control tectónico, litológico o topográfico sobre la red de drenaje.

Su expresión matemática es:

$$R_b = \frac{N_u}{N_{u+1}}$$

donde:

R_b = razón de bifurcación

N_u = número de cauces de un orden u

N_{u+1} = número de cauces del orden inmediatamente superior

En ArcGIS, este parámetro se obtiene luego de asignar el *orden de Strahler* a la red de drenaje mediante la herramienta *Stream Order*. A partir de la tabla de atributos de la red, se contabiliza el número de cauces en cada orden (mediante *Summary Statistics*). Posteriormente, se calcula R_b dividiendo el número de cauces de cada orden entre los del orden siguiente. Finalmente, se puede obtener la razón de bifurcación media como el promedio de los valores calculados para todos los órdenes de la cuenca.

- **Índice de sinuosidad del cauce:** De acuerdo con Leopold et al. (1964), el índice de sinuosidad (I_s) se define como la relación entre la longitud real del cauce principal, medida siguiendo todas sus curvaturas, y la distancia en línea recta entre su nacimiento y su desembocadura. Este índice cuantifica el grado de curvatura o desviación del cauce respecto a la trayectoria más corta posible.

Valores cercanos a 1 indican cursos de agua relativamente rectos, mientras que valores más altos reflejan un mayor desarrollo de meandros y, por tanto, una mayor sinuosidad. Este parámetro está asociado a la energía fluvial, la pendiente, la carga de sedimentos y las condiciones geológicas y morfológicas del valle.

Su expresión matemática es:

$$I_s = \frac{L_c}{L_r}$$

donde:

I_s = índice de sinuosidad

L_c = longitud real del cauce principal (km)

L_r = longitud en línea recta entre la cabecera y la desembocadura (km)

En ArcGIS, la determinación del índice se realiza de la siguiente manera:

Primero se mide la longitud real del cauce principal a partir de la capa lineal de la red de drenaje utilizando la herramienta *Calculate Geometry*, luego se traza una línea recta entre el punto de inicio (cabecera) y el punto final (desembocadura) del cauce, calculando

su longitud y finalmente, se obtiene el índice de sinuosidad como la razón L_c/L_r , que puede calcularse en un nuevo campo de la tabla de atributos o en una hoja de cálculo externa.

2.2.15.4. Parámetros hidrológicos

Los parámetros hidrológicos describen la respuesta de la cuenca ante eventos de precipitación y su comportamiento hídrico, y son los siguientes:

- **Tiempo de concentración:** Según Kirpich (1940), el tiempo de concentración (T_c) se define como el intervalo requerido para que una gota de agua precipitada en el punto más alejado hidráulicamente de la cuenca alcance la salida o exutorio. Este parámetro es fundamental en hidrología, pues determina el tiempo de respuesta de la cuenca frente a un evento de precipitación y condiciona tanto la forma como el pico del hidrograma de escorrentía.

Existen diversas fórmulas empíricas para su estimación, siendo una de las más empleadas la ecuación de Kirpich (1940), válida para cuencas pequeñas, medianas y con pendientes relativamente uniformes:

$$T_c = 0,01947 \cdot L^{0,77} \cdot S^{-0,385}$$

donde:

T_c = tiempo de concentración (minutos)

L = longitud del cauce principal (m)

S = pendiente media del cauce (m/m)

El valor de T_c es clave para definir la duración crítica de la lluvia de diseño y, por tanto, para calcular caudales máximos en el dimensionamiento de obras hidráulicas.

En **ArcGIS**, los parámetros requeridos se obtienen midiendo la longitud del cauce principal sobre la capa lineal de la red de drenaje y calculando la pendiente media a partir de la diferencia de elevaciones entre la cabecera y la desembocadura, valores que se derivan del modelo de elevación digital. Una vez obtenidos estos datos, se sustituyen en la fórmula de Kirpich (1940) para determinar el tiempo de concentración de la cuenca.

2.3. Marco conceptual

El marco conceptual de la presente investigación establece cómo se aplican los conceptos teóricos de la sección anterior a la automatización de la delimitación de cuencas y el cálculo de parámetros fisiográficos. Este sistema se implementa en el lenguaje de programación Python y se valida en un entorno **GIS** mediante **ArcGIS**. Se detalla a continuación la estructura conceptual y los procesos involucrados para su desarrollo.

2.3.1. ASTER Global DEM (ASTER GDEM)

Según Gesch et al. (2016) el **ASTER GDEM** (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – Global Digital Elevation Model*) es un modelo de elevación digital de cobertura

casi global que representa la forma de la superficie terrestre a partir de información obtenida por el instrumento *ASTER*, a bordo del satélite *Terra*, en el marco de una misión conjunta entre la *NASA* y el *METI* de Japón. Desde su primera liberación en 2009, constituyó un hito al poner a disposición de la comunidad científica y técnica un modelo global de libre acceso con resolución espacial de aproximadamente 30 metros, mucho más detallado que los productos anteriores disponibles públicamente.

Su construcción se basa en la correlación estereoscópica de pares de imágenes ópticas adquiridas por el sensor *VNIR* de *ASTER*. A partir de millones de escenas recopiladas entre los años 2000 y 2013, se generaron modelos de elevación individuales que luego fueron integrados mediante procesos de apilamiento y mosaico, con pasos de eliminación de nubes, relleno de huecos y correcciones de artefactos. Como resultado, se obtuvo un modelo prácticamente continuo que cubre la superficie terrestre desde 83° de latitud norte hasta 83° de latitud sur, lo que equivale a más del 99 % del planeta. El producto se distribuye en mosaicos de 1° por 1° en formato *GeoTIFF*, en un sistema de coordenadas geográficas *WGS84* y alturas referidas al geoido *EGM96*.

A lo largo del tiempo se han publicado tres versiones principales. La primera, lanzada en 2009, fue pionera pero presentaba abundantes errores y artefactos derivados de la correlación estéreo. La segunda, de 2011, mejoró la cobertura global y redujo los errores sistemáticos, mientras que la versión final, conocida como *GDEM v3 (2019)*, utilizó un mayor número de escenas y algoritmos de procesamiento más robustos, lo que permitió incrementar la calidad, reducir la presencia de artefactos y mejorar la completitud de la cobertura. Sin embargo, al ser un producto generado a partir de sensores ópticos, aún presenta limitaciones: en áreas cubiertas por nubes o nieve los resultados pueden ser poco fiables; en regiones boscosas densas el modelo tiende a reflejar la altura de la vegetación en lugar del terreno desnudo; y en zonas de topografía abrupta pueden aparecer escalonamientos o errores locales.

En cuanto a la precisión, las evaluaciones independientes muestran que el *ASTER GDEM v3* alcanza un error cuadrático medio vertical (*RMSE*) cercano a los 8-9 metros en áreas de prueba dentro de Estados Unidos, con sesgos bajos. No obstante, su exactitud varía en función de la latitud, la pendiente del terreno, la cobertura del suelo y las condiciones atmosféricas al momento de la adquisición. Esto lo hace especialmente adecuado para aplicaciones a escalas regionales y continentales, como análisis morfométricos de cuencas hidrográficas, modelado hidrológico, estudios de cambio ambiental, planificación territorial, evaluación de riesgos naturales y visualización 3D. En cambio, no reemplaza a datos de mayor precisión como los generados por *LIDAR* o la fotogrametría aérea cuando se requieren resultados de escala local o de ingeniería de detalle.

El producto puede descargarse de manera gratuita a través de los portales de la *NASA* y del *LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center)*, únicamente con registro en *Earthdata*. Aunque actualmente existen modelos de elevación más recientes y de mayor precisión, como *TanDEM-X*, *MERIT DEM* o *NASADEM*, el *ASTER GDEM* conserva su vigencia como referencia fundamental por su cobertura global, su resolución relativamente alta para la época en que fue generado y su amplio uso en investigaciones científicas en todo el mundo.

2.3.2. Delimitación de cuencas en el software ArcGIS

La delimitación de cuencas en el software ArcGIS es un procedimiento sistemático que transforma un modelo digital de elevación en una representación hidrológica de la superficie terrestre, permitiendo identificar con precisión el área de aporte que drena hacia un punto de salida específico.

El proceso comienza con la descarga del modelo de elevación digital *ASTER GDEM* desde portales oficiales del LP DAAC/NASA, en formato *GeoTIFF*. Una vez cargado el modelo en ArcGIS, el primer paso técnico consiste en garantizar que el modelo de elevación digital sea hidrológicamente consistente, es decir, que el agua pueda escurrir sin interrupciones artificiales. Para ello se utiliza la herramienta *Fill*, cuya función es identificar y rellenar depresiones o sumideros creados por errores en la captura o procesamiento del modelo. Estas depresiones, de no corregirse, actuarían como trampas de agua que impedirían la continuidad del flujo. La herramienta aplica el algoritmo de relleno que eleva las celdas problemáticas hasta el nivel mínimo requerido para que el flujo sea continuo, obteniéndose así un modelo corregido (Sørensen et al., 2006).

Una vez completada esta corrección, se procede a modelar la dirección del flujo superficial mediante la herramienta *Flow Direction*. Este paso es crucial porque establece el camino que seguirá el agua en cada celda. ArcGIS utiliza el método *D8*, que evalúa las ocho celdas vecinas a cada píxel y selecciona la de menor elevación como destino del escurrimiento. El resultado es un raster direccional en el que cada celda tiene asignado un valor codificado (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128), representando la dirección cardinal u ordinal hacia la que drena. Este producto puede visualizarse como un mapa de vectores de flujo, donde se observa la red potencial de escurrimiento (Tarboton, 1997).

El siguiente paso es determinar el nivel de contribución de cada celda en el drenaje mediante la herramienta *Flow Accumulation*. Esta herramienta toma como insumo el raster de dirección de flujo y calcula cuántas celdas drenan hacia cada celda. Cuanto mayor sea el valor de acumulación, mayor será la cantidad de escurrimiento concentrado en ese punto, lo que permite identificar de manera automática los valles y cauces naturales. En la práctica, esto genera un raster en el que las celdas con valores bajos representan laderas con poco aporte, mientras que las celdas con valores muy altos corresponden a los cauces principales. Estableciendo un umbral de acumulación, el analista puede discriminar qué celdas corresponden a canales significativos y derivar de allí la red hidrográfica (Tarboton, 1997).

Posteriormente se debe definir el punto de salida o desfogue, que es el lugar al cual se desea delimitar la cuenca. Puede ser cualquier punto de interés. Este punto se introduce como una capa de puntos en ArcGIS y, para garantizar precisión, se procesa con la herramienta *Snap Pour Point*. Lo que hace esta herramienta es ajustar el punto definido por el usuario a la celda con mayor acumulación de flujo dentro de un radio especificado. De este modo, si el punto inicial no coincide exactamente con el cauce modelado, el sistema lo corrige y lo ubica sobre la red de drenaje simulada, evitando errores en la delimitación (Xie, Liu et al., 2022).

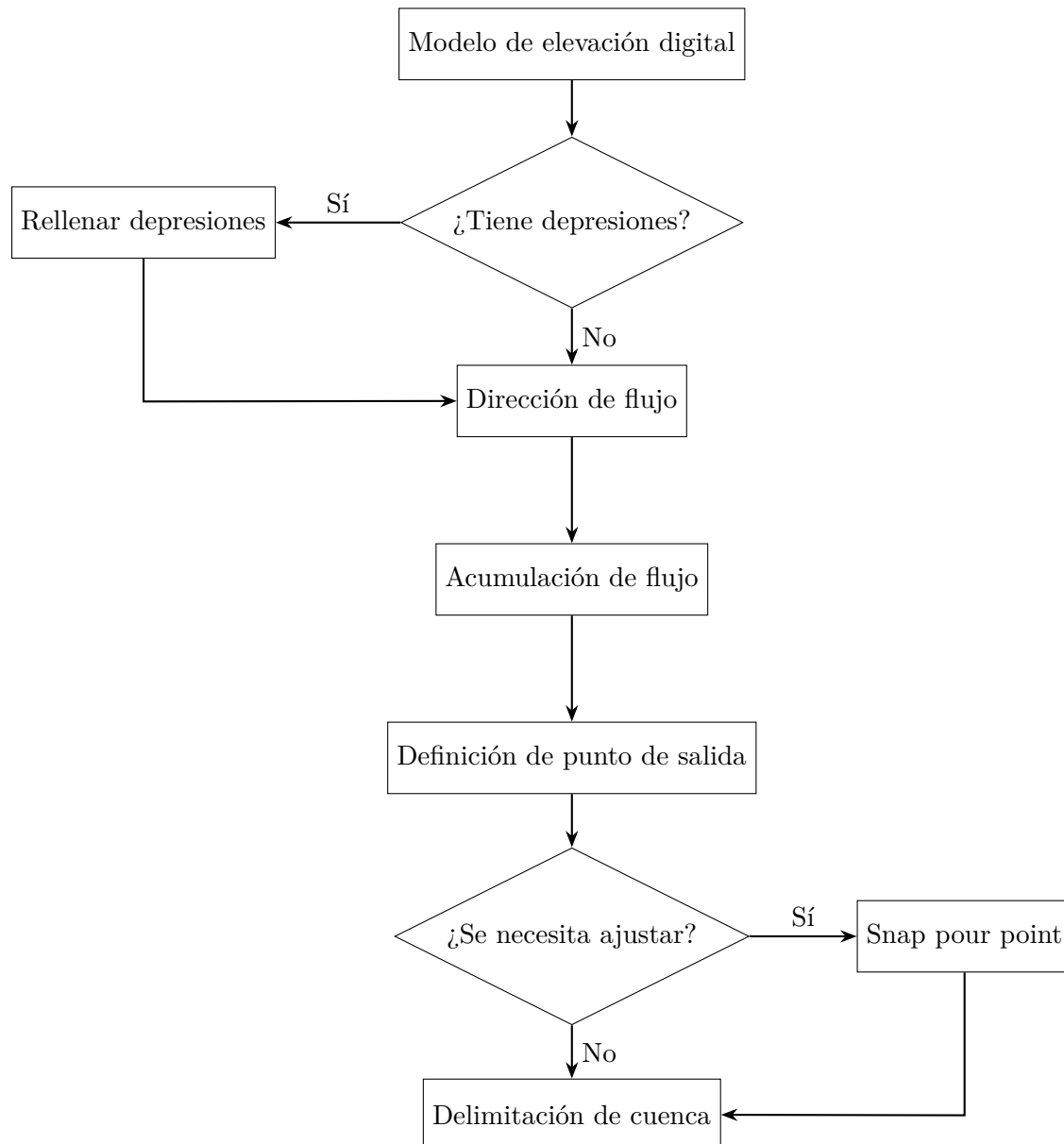
Con todos estos insumos preparados modelo digital de elevación corregido, dirección de flujo, acumulación y punto de salida ajustado, se ejecuta la herramienta *Watershed*. Esta herramienta toma el raster de dirección de flujo y el desfogue definido para rastrear aguas arriba todas las celdas que contribuyen al escurrimiento hacia ese punto. El resultado es un raster de cuenca, en

el cual cada celda recibe un valor identificador de la cuenca a la que pertenece. Posteriormente, este raster puede convertirse en un polígono vectorial, generando el límite espacial de la cuenca hidrográfica (Xie, Liu et al., 2022).

El producto final es un polígono de la cuenca delimitada automáticamente, acompañado de la red de drenaje derivada del raster de acumulación. A partir de este polígono, *ArcGIS* permite calcular parámetros fisiográficos como el área total de la cuenca, el perímetro, la pendiente media, la longitud del cauce principal, la densidad de drenaje, el coeficiente de compacidad, entre otros.

Figura 2.13

Proceso de delimitación de cuencas en ArcGIS.



Nota: Elaboración propia mediante L^AT_EX.

2.3.3. Delimitación automatizada de cuencas en Python

En palabras de Salgado Reyes (2024) la automatización mediante códigos implica el uso de lenguajes de programación y herramientas de software para diseñar y ejecutar procesos que tradicionalmente requieren intervención humana. En el contexto de sistemas de información, se refiere a la implementación de sistemas inteligentes que automatizan tareas repetitivas y procesos rutinarios, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo la posibilidad de errores humanos. Estos sistemas emplean algoritmos y scripts para ejecutar tareas de manera autónoma, optimizando recursos y tiempos de ejecución.

En este sentido la metodología implementada consiste en un sistema automatizado desarrollado en **Python** mediante el uso de las librerías **ArcPy**, **pandas**, **math**, **os**, **openpyxl**, etc, cuya finalidad es optimizar el proceso de delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos, integrándose de manera directa con el entorno de **ArcGIS**. El programa ha sido diseñado para que el usuario únicamente proporcione como insumo un modelo digital de elevación y un punto de aforo, los cuales son cargados a través de una interfaz gráfica que simplifica la interacción y evita la ejecución manual de múltiples herramientas geoespaciales. Una vez incorporados los datos de entrada, la automatización controla de forma secuencial las funciones hidrológicas de **ArcGIS**, comenzando con la corrección de depresiones en el modelo digital de elevación, seguida por la generación de direcciones y acumulaciones de flujo, la identificación y ajuste del punto de aforo sobre la red de drenaje calculada y, finalmente, la delimitación precisa de la cuenca hidrográfica correspondiente. El resultado de este proceso se visualiza de manera inmediata en la plataforma **ArcGIS**, lo cual permite validar cartográficamente la coherencia de la delimitación obtenida.

A partir del polígono de cuenca generado, el sistema calcula automáticamente un conjunto de parámetros fisiográficos fundamentales para la caracterización hidrológica, tales como el área, el perímetro, las cotas extremas, el relieve, la pendiente media, la longitud del cauce principal, la densidad de drenaje, la frecuencia de corrientes y los índices de forma asociados a la geometría de la cuenca. Estos cálculos se realizan de manera interna mediante funciones de **ArcPy** y rutinas programadas en **Python**, y los resultados son exportados en tablas organizadas en formato **Excel**, lo cual garantiza su portabilidad y facilita su incorporación en estudios de hidrología, hidráulica y planificación de recursos hídricos. La metodología, al automatizar completamente un proceso que en condiciones convencionales requeriría múltiples etapas manuales y un conocimiento especializado de herramientas **SIG**, representa una mejora sustancial en eficiencia, reproducibilidad y estandarización de resultados, constituyéndose en una herramienta técnica confiable para la gestión de información hidrográfica en el ámbito nacional.

2.3.3.1. Librerías *Python* aplicadas para la automatización

El desarrollo de la automatización para la delimitación de cuencas hidrográficas se realizó mediante el lenguaje de programación **Python**, haciendo uso de un conjunto de librerías que facilitan tanto la interacción con el usuario como el procesamiento geoespacial y la manipulación de datos. La interfaz gráfica se implementó mediante **Tkinter** y sus módulos asociados (**ttk**, **ScrolledText**, **tkFileDialog**, **tkMessageBox**), permitiendo al usuario cargar insumos como

modelos de elevación digital y el punto de aforo de manera sencilla, además de mostrar mensajes y resultados durante la ejecución del proceso, a continuación se muestra la librerías utilizadas.

- ***Tkinter***

Tkinter es la biblioteca estándar de *Python* utilizada para crear interfaces gráficas de usuario (*GUI*). Permite desarrollar aplicaciones de escritorio con ventanas, botones, cuadros de texto, menús y otros elementos interactivos de manera sencilla. Funciona como un *wrapper* del *toolkit Tcl/Tk*, brindando compatibilidad multiplataforma y una integración directa con *Python* sin necesidad de instalaciones adicionales. Aunque su apariencia puede resultar más básica en comparación con otras bibliotecas modernas, es ampliamente utilizada por su simplicidad y facilidad de aprendizaje (Python Software Foundation, 2024).

- ***os***

El módulo *os* en *Python* se define como una interfaz que conecta los programas con el sistema operativo. Proporciona funciones para administrar archivos, directorios, procesos y variables de entorno, permitiendo que un mismo código se ejecute en diferentes plataformas sin necesidad de modificaciones. En esencia, este módulo se concibe como un puente que facilita la interacción entre *Python* y las operaciones fundamentales del sistema operativo (Python Software Foundation, 2024).

- ***pandas***

pandas es una biblioteca de *Python* orientada al manejo de datos estructurados, ampliamente utilizada en ciencia de datos, estadística y aprendizaje automático, debido a su capacidad para integrar, procesar y analizar información proveniente de diversas fuentes de forma rápida y flexible (Python Software Foundation, 2024).

- ***sys***

sys es el módulo de *Python* encargado de gestionar la comunicación entre el programa y el intérprete, ofreciendo herramientas para controlar la ejecución, acceder a parámetros del entorno de ejecución y manipular flujos de entrada y salida (Python Software Foundation, 2024).

- ***threading***

threading es el módulo de *Python* encargado de gestionar la ejecución concurrente mediante hilos, brindando herramientas para crear, iniciar, pausar y sincronizar procesos ligeros dentro de una aplicación, con el objetivo de mejorar el rendimiento y la eficiencia en tareas que pueden ejecutarse en paralelo (Python Software Foundation, 2024).

- ***Queue***

Queue es el módulo de *Python* encargado de proveer estructuras de cola sincronizadas, garantizando un manejo seguro de los datos compartidos en entornos con múltiples hilos, y permitiendo la organización ordenada de tareas y la coordinación entre procesos concurrentes (Python Software Foundation, 2024).

- ***shutil***

shutil es el módulo de *Python* encargado de proporcionar herramientas que permiten la administración eficiente de archivos y carpetas, facilitando operaciones como la copia y el traslado de datos, la eliminación de directorios y el manejo de formatos de compresión, todo ello de manera portable entre diferentes sistemas operativos (Python Software Foundation, 2024).

- ***warnings***

warnings es el módulo de *Python* encargado de emitir, filtrar y administrar advertencias, brindando a los desarrolladores la posibilidad de recibir notificaciones sobre situaciones potencialmente problemáticas sin interrumpir la ejecución del programa (Python Software Foundation, 2024).

- ***win32com.client***

win32com.client es el módulo de *Python* encargado de facilitar la comunicación con componentes *COM* en sistemas *Windows*, permitiendo automatizar tareas en aplicaciones como *Microsoft Excel*, *Word*, *Outlook* u otros programas que soporten esta tecnología, además de ofrecer control directo sobre servicios y funciones expuestas por el sistema operativo (Python Software Foundation, 2024).

- ***win32api***

win32api es el módulo de *Python* que proporciona una interfaz directa con la *API* de *Windows*, permitiendo realizar tareas como la gestión de archivos, el manejo de procesos, la interacción con el registro, la captura de entradas del teclado y el ratón, y otras operaciones propias del sistema operativo (Python Software Foundation, 2024).

- ***arcpy***

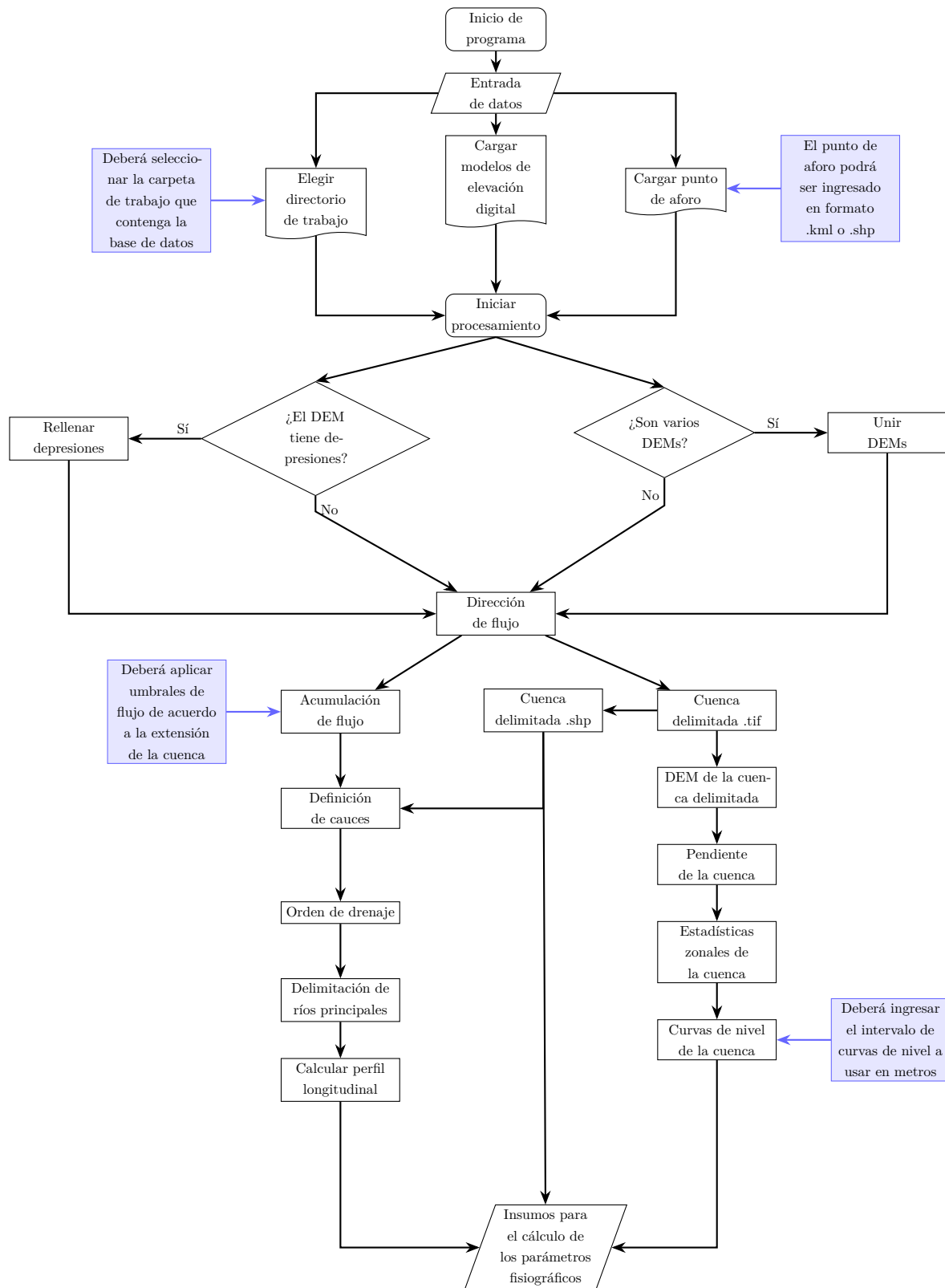
arcpy es el módulo de *Python* orientado a la geoprocesamiento en *ArcGIS*, que ofrece herramientas para manipular datos espaciales, ejecutar análisis avanzados, crear y modificar mapas, y automatizar flujos de trabajo geográficos, facilitando la integración de *Python* con las funciones propias de los sistemas de información geográfica de *Esri* (Esri, 2023).

2.3.3.2. Diagrama de flujo de la automatización

El American National Standards Institute (1970) en su norma *Flowchart Symbols and Their Usage in Information Processing (ANSI X3.5-1970)* define al diagrama de flujo como una representación gráfica utilizada para la definición, análisis o solución de un problema, en la que se emplean símbolos estandarizados (operaciones, datos, flujo, decisiones, entre otros) con el fin de mostrar la secuencia lógica de un proceso, en ese sentido se implementa el diagrama de flujo de la automatización del proceso de delimitación de cuencas y obtención de parámetros fisiográficos.

Figura 2.14

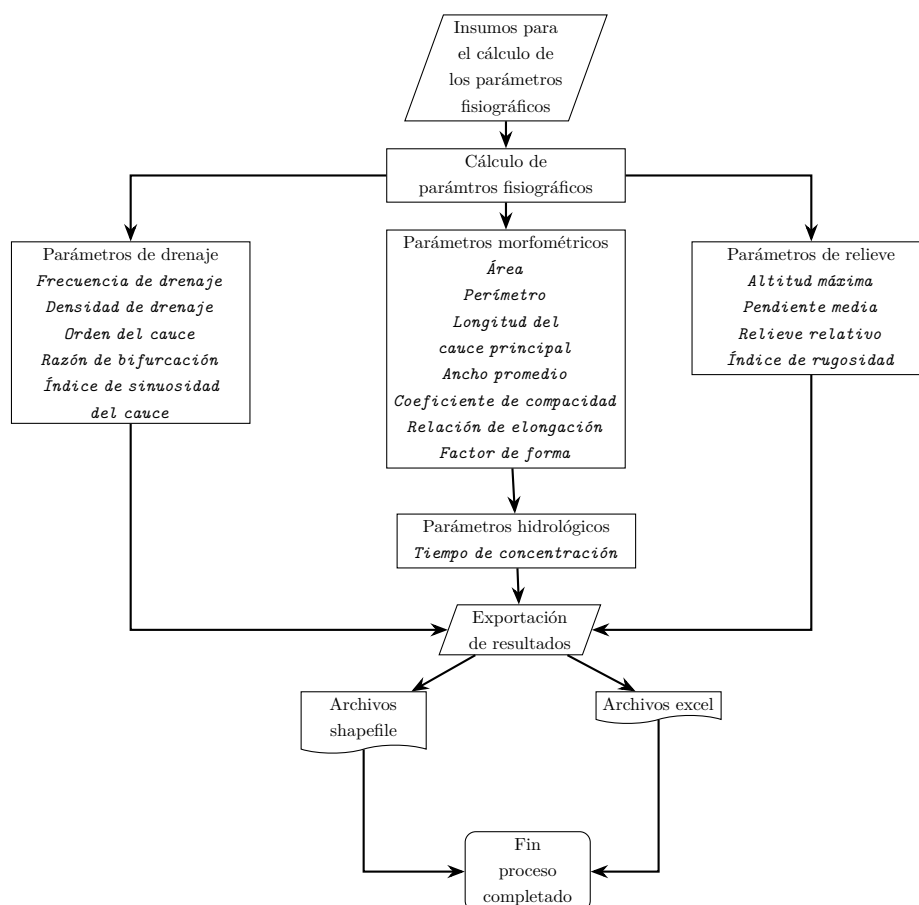
Proceso automatizado en Python primera parte



Nota: Hasta esta etapa del proceso se obtienen los insumos que servirán como base para el cálculo de los parámetros fisiográficos, en el marco de la automatización de la delimitación de cuencas y la caracterización de sus atributos. Elaborado mediante L^AT_EX.

Figura 2.15

Proceso automatizado en Python segunda parte



Nota: El proceso contempla el cálculo de todos los parámetros fisiográficos y la posterior exportación de los resultados obtenidos a lo largo de su ejecución. Elaborado mediante L^AT_EX.

2.3.3.3. Cuenca hidrográfica objeto de estudio

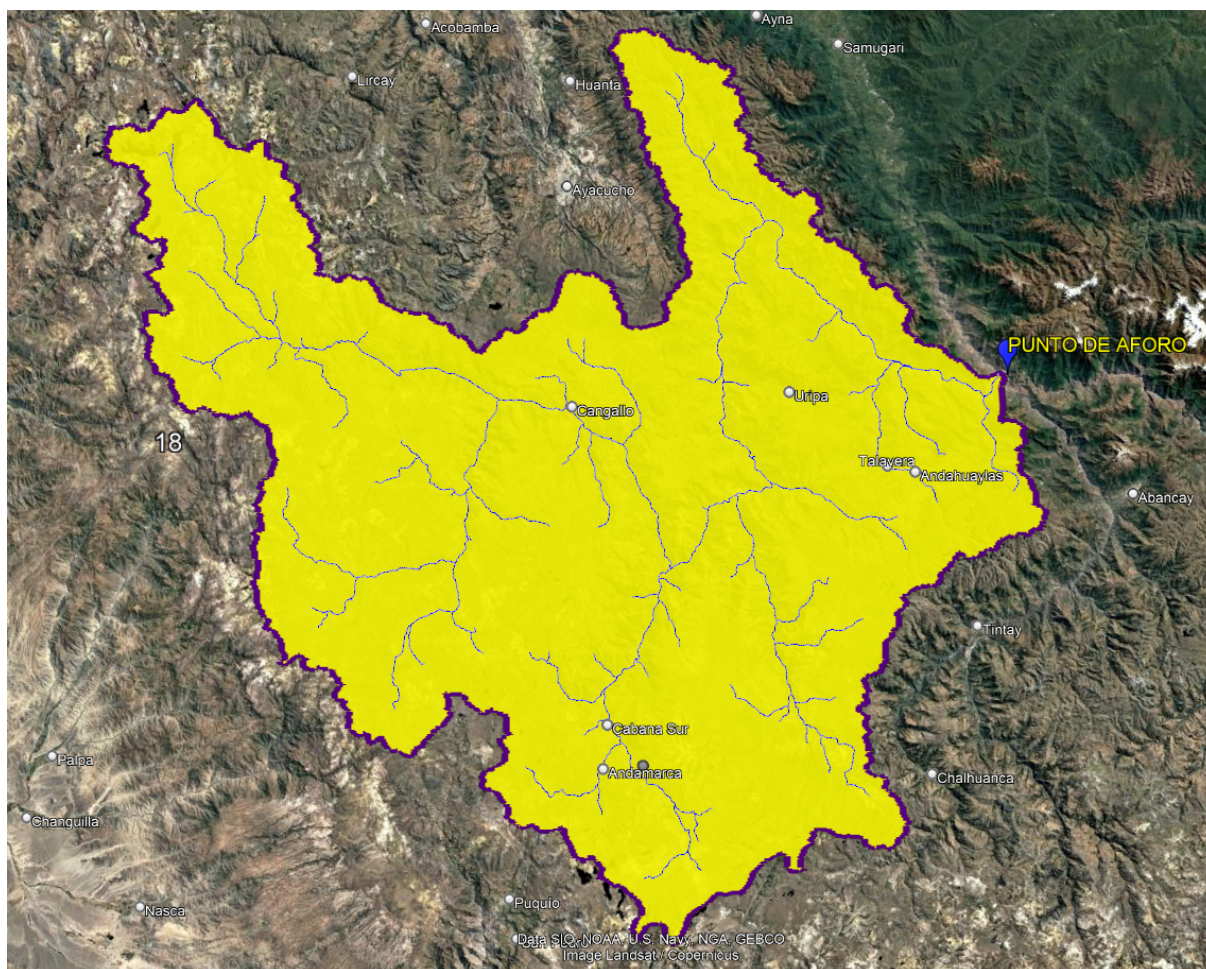
La cuenca hidrográfica del río Pampas constituye la unidad de estudio seleccionada para la presente investigación, esta cuenca forma parte de la vertiente del océano Atlántico y presenta una superficie de drenaje de 23113km^2 aproximadamente. Su cauce principal se origina en las lagunas de Choclococha y Orcococha en la región de Huancavelica la cual desemboca en la margen izquierda del río Apurímac, tras recorrer aproximadamente 424 km, esta cuenca cuenta con un perímetro de 1171 km aproximadamente y durante su trayecto recibe el aporte de diversos afluentes entre los que destacan los ríos Caracha, Sondondo, Soras, Huancaray, Chumbao y Torobamba.

Desde el punto de vista fisiográfico, la cuenca Pampas presenta un relieve bastante accidentado, con una altitud media de 4066 m.s.n.m. aproximadamente, una pendiente promedio de 0,82 %, un coeficiente de Gravelius de 2,15 y un factor de forma de 0,13. El clima que posee es variado debido a la diversidad de pisos altitudinales que presenta, y las precipitaciones se concentran principalmente entre los meses de noviembre y abril, con precipitaciones esporádicas durante mayo a octubre.

En términos políticos y administrativos, el ámbito de la cuenca Pampas se encuentra bajo la jurisdicción del Consejo de Recursos Hídricos de Cuenca Interregional Pampas (CRHC), que abarca territorios de tres departamentos que vienen a ser: Ayacucho (70,15 % de su área), Apurímac (21,64 %) y finalmente Huancavelica con (8,21 %). En conjunto, comprende 15 provincias y 90 distritos distribuidos en estas tres regiones (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2021).

Figura 2.16

Cuenca hidrográfica Pampas



Nota: Elaboración propia mediante Google Earth.

CAPÍTULO III

MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Enfoque

Según Roberto Hernández Sampieri (2014), la investigación con un enfoque cuantitativo se caracteriza por la recolección y el análisis de datos numéricos, apoyados en la medición, el uso de modelos matemáticos y la estadística en general para la prueba de hipótesis planteadas y obtener resultados objetivos. En ese sentido, el enfoque que adopta la presente investigación es el cuantitativo, ya que se basa en el procesamiento de información basada en datos numéricos mediante modelos matemáticos y algoritmos computacionales, lo que permite automatizar procesos lentos y garantizar una evaluación objetiva de los métodos aplicados para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos.

3.2. Alcance

Según Roberto Hernández Sampieri (2014), el alcance descriptivo de una investigación tiene como objetivo el especificar las propiedades, características y los perfiles más relevantes de los fenómenos sometidos al estudio, mientras que el alcance explicativo está orientado a la identificación de las causas y efectos de dichos fenómenos, estableciendo relaciones de causalidad entre las variables estudiadas. En ese sentido, la presente investigación adopta un alcance explicativo, sustentándose en un diseño no experimental del tipo comparativo, ya que se busca determinar los efectos de la implementación de una metodología automatizada en Python (variable independiente) sobre la precisión y eficiencia del proceso automatizado (variable dependiente), contrastando los resultados con los obtenidos mediante métodos tradicionales validados por instituciones autorizadas. Asimismo, incorpora una etapa descriptiva, destinada a caracterizar y documentar el proceso de la automatización implementado.

3.3. Diseño de investigación

Según Roberto Hernández Sampieri (2014), la investigación con diseño no experimental se caracteriza principalmente porque no existe la manipulación de las variables independientes, sino que estas se observan en su contexto natural tal como ocurren en la realidad estudiada. A su vez, el diseño transversal consiste en la recolección de los datos en un único momento y en una sola ocasión, con el propósito de describir los fenómenos y analizar sus relaciones en un instante específico durante el estudio.

En ese sentido, el diseño de la presente tesis es el no experimental y de tipo transversal, dado que no se manipulan variables independientes de estudio, sino que se analizan datos ya existentes mediante las técnicas computacionales en un único punto en el tiempo. Este diseño permite evaluar el desempeño de la metodología automatizada desarrollada para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos, sin la manipulación directa en los datos de entrada.

3.4. Población y muestra

De acuerdo con Roberto Hernández Sampieri (2014), la población de una investigación se define como el conjunto de todos los casos que cumplen con ciertas características o especificaciones, mientras que la muestra se define como un subgrupo de dicha población de estudio sobre el cual se recolectan los datos, con la condición de que sea lo más representativo para generalizar los resultados obtenidos. No obstante, en algunos estudios de investigación el análisis resulta tan completo que población y muestra llegan a coincidir, lo que se denomina censo.

En ese sentido de la presente tesis no se pretende una generalización hacia todas las cuencas hidrográficas del mundo, sino evaluar de manera muy detallada una metodología automatizada aplicada a un caso de estudio en específico y de relevancia para la región de Ayacucho, Apurímac y Huancavelica.

- **Población:** La cuenca hidrográfica del río Pampas en su totalidad, incluyendo las subcuencas y microcuencas que la componen, las cuales presentan características geográficas y fisiográficas bien definidas.
- **Muestra:** Coincide con la población tomada, dado que se desarrollará un análisis censal tomando como caso de estudio toda la cuenca hidrográfica del río Pampas.
- **Tipo de muestreo:** Al no seleccionarse un subgrupo, no se aplica un tipo de muestreo en el sentido convencional. En su lugar, se adopta un estudio de un caso integral, lo que elimina la necesidad de realizar inferencias estadísticas de una muestra sobre una población, esto permite una evaluación completa y sin mayores sesgos de la metodología automatizada al aplicarse sobre toda la extensión de la cuenca hidrográfica Pampas.

3.5. Hipótesis

Según Roberto Hernández Sampieri (2014), las hipótesis de trabajo, llamadas también como las hipótesis de la investigación, son planteamientos preliminares que anticipan los resultados de un estudio realizado a partir de la relación entre sus variables planteadas, en ese sentido la presente investigación plantea las siguientes hipótesis.

3.5.1. Hipótesis general

La implementación de la metodología automatizada en **Python** reduce significativamente los tiempos de ejecución y el uso de recursos computacionales, manteniendo la precisión, en la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos.

3.5.2. Hipótesis específicas

1. La selección adecuada de los algoritmos y técnicas computacionales para la implementación de una metodología automatizada en **Python** para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos, produce resultados consistentes y confiables.
2. La metodología automatizada implementada en **Python** para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos, presenta una elevada eficiencia computacional.

3. El grado de precisión y eficiencia de la metodología automatizada implementada en **Python** para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos, en comparación con los métodos tradicionales, es muy alto.

3.6. Operacionalización de variables

De acuerdo con Roberto Hernández Sampieri (2014), la operacionalización de las variables de investigación es el procedimiento mediante el cual se especifican las dimensiones, los indicadores y otros ítems que hacen posible medir una variable en una investigación. Es decir, se trata de la transformación de conceptos teóricos en aspectos observables y cuantificables que permitan la obtención de información objetiva y luego analizarla estadísticamente.

3.6.1. Variables

Segun Arias (2012), las variables constituyen los elementos centrales en toda la investigación, ya que representan características, magnitudes o cantidades que pueden modificarse y que son los objetos del análisis. De acuerdo con Huacani et al. (2020), una variable combina tanto el atributo como el concepto, lo que significa que integra una dimensión medible juntamente con la construcción lógica y teórica que permite explicar el fenómeno en estudio. En ese sentido la presente tesis toma como variables, lo siguiente:

- **Variable independiente:** Metodología automatizada en **Python**.
- **Variable dependiente:** Precisión y eficiencia en la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos.

3.6.2. Definición conceptual

En esta sección se presentan términos distintos a los de la sección del marco teórico, los cuales permiten comprender a la variable dentro del contexto específico de la investigación, considerando tanto la población como el espacio de estudio. La definición conceptual se construye a partir de fuentes académicas como diccionarios especializados, libros, revistas o artículos científicos (Pimienta, 2017).

- **Metodología automatizada en Python**

La variable metodología automatizada en **Python** se entiende como el conjunto de procedimientos sistemáticos programados en este lenguaje, que permiten estandarizar, reproducir y ejecutar de forma automática procesos de análisis y cálculo en la investigación científica. Se basa en el uso de librerías, algoritmos y frameworks que reducen la intervención manual, incrementan la eficiencia y aseguran la validez interna de los resultados (Tupsakhare, 2019).

- **Precisión y eficiencia en la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos**

La variable precisión y eficiencia en la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos se entiende como el nivel de exactitud con que los límites de una cuenca hidrográfica y sus atributos morfométricos se ajustan a las condiciones reales del

terreno, junto con la rapidez y efectividad con que estos resultados se obtienen mediante herramientas computacionales y modelos digitales de elevación. La precisión depende de factores como la resolución y calidad del modelo de elevación digital, el umbral de acumulación de flujo empleado y la concordancia espacial con datos de referencia, pudiendo alcanzar valores de hasta 94 % en métodos automáticos mejorados (Li et al., 2014; Wu et al., 2023; Xie, Zhu, Wang et al., 2022). La eficiencia, por su parte, está asociada a la optimización del tiempo y los recursos requeridos para obtener delimitaciones confiables, considerando el equilibrio entre resolución, costo computacional y calidad de los resultados (Goulden et al., 2014; Khalid, Maulud et al., 2021).

3.6.3. Definición operacional

Segun Arias (2012), la definición operacional de una variable de investigación establece con precisión el conjunto de procedimientos y acciones que se deben llevarse a cabo para medirla dentro de una investigación. En esencia, convierte un concepto abstracto en elementos observables y cuantificables, detallando los pasos mediante los cuales será identificado, registrado y evaluado en la realidad empírica.

De este modo, la definición operacional no solo orienta al investigador sobre las técnicas e instrumentos que se deben aplicar, sino que también asegura la posibilidad de replicar y verificar los resultados. Así, se constituye en un puente entre la teoría y la práctica, permitiendo transformar una idea conceptual en información empírica válida, confiable y comparable. En ese sentido se define operacionalmente las variables de la presente investigación.

Tabla 3.1
Definición operacional de las variables de tesis

VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD
Metodología automatizada en Python	Algoritmos y técnicas computacionales	- Número de algoritmos utilizados - Tipo de algoritmos utilizados - Porcentaje de automatización alcanzado en comparación con métodos tradicionales	- Unidades - Categoría - Porcentaje
	Librerías y herramientas de Python	- Lista de librerías utilizadas - Versatilidad de las herramientas empleadas	- Unidades - Escala cualitativa
	Eficiencia computacional	- Tiempo de procesamiento por tarea - Uso de memoria RAM durante la ejecución - Requisitos mínimos de hardware para ejecutar la metodología	- Minutos - Megabytes - Especificaciones de hardware
Precisión y eficiencia en la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos	Precisión en la delimitación de cuencas hidrográficas	- Índice de Jaccard - Error relativo en la extensión de la cuenca	- Adimensional - Porcentaje
	Precisión en la estimación de parámetros fisiográficos	- Error absoluto medio en la estimación de parámetros - Coefficiente de determinación entre los valores estimados y reales - Desviación estandar de los errores en los parámetros estimados	- Unidades según parámetro - Adimensional - Unidades según parámetro
	Eficiencia en la delimitación y estimación de parámetros	- Tiempo total de ejecución para completar la delimitación y el cálculo de parámetros - Reducción porcentual del tiempo en comparación con métodos tradicionales	- Minutos - Porcentaje

Nota: Elaboración propia mediante $\text{\LaTeX}$.

3.7. Técnicas e instrumentos

Según Arias (2012), las técnicas de la recolección de los datos son los procedimientos mediante los cuales se recaba la información necesaria para realizar la investigación. Estas técnicas se materializan a través de los instrumentos, que son las herramientas específicas que permiten aplicar las técnicas y registrar los datos de manera sistemática y objetiva. La elección de las técnicas e instrumentos debe de estar alineada con el alcance de la investigación y la naturaleza de las variables que se miden. En ese sentido, al tratarse de una investigación de alcance explicativo con diseño comparativo, se utilizan técnicas que permiten la obtención, procesamiento y evaluación de datos geoespaciales para la comparación de resultados.

1. **Técnica:** Análisis documental y de datos secundarios

- **Instrumentos:** Inventario de fuentes y fichas de registro para documentar los modelos digitales de elevación obtenidos de *HEARTDATA* y otras bases de datos hidrológicos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

2. **Técnica:** Procesamiento y análisis geoespacial

- **Instrumentos:**

- **Scripts de Python**, código de programación desarrollado que constituye la variable independiente de la investigación.
- **Software ArcGIS**, herramienta para realizar el proceso de manera tradicional, sirviendo como base de comparación de resultados.

3. **Técnica:** Medición y comparación de resultados

- **Instrumentos:**

- Matriz de comparación, tabla de datos para registrar los resultados obtenidos de cada método.
- Cronómetro, dispositivo para realizar la medición de la eficiencia (tiempo).
- Indicadores de precisión, métricas cuantitativas como el error porcentual para comparar la exactitud de la metodología.

4. **Técnica:** Análisis estadístico

- **Instrumentos:**

- Librerías de Python (**pandas**, **scipy**, **matplotlib** y **seaborn**), herramientas para el análisis estadístico de los datos comparativos.

3.8. Técnicas estadísticas aplicadas

Las técnicas estadísticas aplicadas se centraron en la comparación del desempeño de la metodología automatizada frente a la tradicional, evaluando la concordancia, el sesgo y la variabilidad.

1. **Técnica:** Análisis estadístico descriptivo

Se usó estas técnicas para resumir y caracterizar las mediciones obtenidas a partir de ambos métodos, se aplicaron procedimientos estadísticos en cada uno de los parámetros fisiográficos obtenidos (área, perímetro, entre otros) así como en la variable de eficiencia (tiempo). Con este propósito, se calcularon diversas medidas que permitieron describir y comparar los resultados obtenidos de manera clara y precisa.

- **Error absoluto:** se determina como la diferencia entre los valores observados y los estimados, con el fin de identificar la magnitud de las discrepancias entre ambos métodos.
- **Error porcentual:** se calcula para evaluar el nivel de precisión, expresando la diferencia relativa entre los resultados obtenidos por ambos métodos en el caso de la cuenca hidrográfica Pampas.

2. **Técnica:** Medida de similitud de la delimitación (Índice de Jaccard)

El Índice de Jaccard, también denominado *Intersección sobre Unión (IoU)*, se aplica con el objetivo de cuantificar el grado de superposición espacial entre los polígonos de la cuenca hidrográfica Pampas delimitados mediante el método automatizado (*A*) y el método tradicional (*B*).

La expresión matemática es:

$$J(A, B) = \frac{\text{Área de Intersección}}{\text{Área de Unión}}$$

Los valores próximos a 1 indican una coincidencia casi total entre ambos métodos, lo que evidenciará una alta precisión geométrica en la delimitación obtenida de manera automatizada.

3. Técnica: Visualización de datos

Las técnicas de visualización se utilizarán como complemento de los análisis estadísticos, con el fin de facilitar la interpretación y comprensión de los resultados. En particular, permitirán representar la distribución espacial del error porcentual, así como los valores del Índice de Jaccard correspondientes a la cuenca hidrográfica Pampas.

4. Software de análisis estadístico

Para implementar estas técnicas, se utilizan librerías de Python como `pandas`, `scipy`, `matplotlib` y `seaborn`. Para el cálculo del Índice de Jaccard, se emplean librerías geospaciales como `geopandas`.

3.9. Desarrollo del trabajo de tesis

Esta parte de la investigación comprende la integración de fundamentos teóricos planteados y las metodologías aplicadas con la implementación de un programa en el lenguaje de programación Python para la delimitación automática de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos.

En esta etapa, se estructura el pseudocódigo y se desarrolla el código fuente empleando librerías especializadas para el manejo de datos espaciales. Posteriormente, se selecciona la cuenca hidrográfica de estudio y se descargan los modelos digitales de elevación que corresponden a la zona, que constituyen la base para el análisis automatizado mediante el programa desarrollado.

3.9.1. Implementación del programa

En esta parte de la investigación se presenta la implementación del programa desarrollado para la delimitación automática de cuencas hidrográficas, describiendo su estructura lógica, los componentes funcionales y la organización general del código.

3.9.1.1. Pseudocódigo del programa

El proceso de implementación se inicia con la elaboración del pseudocódigo, en el cual se define la lógica general del algoritmo, las relaciones entre los distintos módulos y la secuencia de procedimientos necesarios para lograr la automatización del flujo de trabajo. Esta etapa permite establecer una visión estructurada del programa, identificar dependencias entre procesos, optimizar el orden de ejecución y prever posibles errores antes de proceder con la codificación definitiva.

```

1: function HYDROLOGICALANALYSISGUI(root)
2:   Inicializar(self, root)
3:   establecer root := root
4:   establecer títuloVentana := Análisis hidrológico y fisiográfico
5:   establecer geometría := 900x750
6:   permitir redimensionamiento de la ventana

7:   Variables de estado y configuración
8:   demPaths := lista vacía                                ▷ rutas absolutas a archivos DEMs
9:   demPathDisplay := cadena vacía                          ▷ texto resumido para mostrar en la UI
10:  aforoPath := cadena vacía
11:  workspacePath := Desktop                                ▷ valor por defecto
12:  snapDistance := 50                                     ▷ metros
13:  contourInterval := 40                                   ▷ metros
14:  threshold := 1.5                                       ▷ umbral de acumulación
15:  simplifyTolerance := 30                                ▷ metros
16:  progressVar := 0
17:  messageQueue := nueva cola
18:  cancelProcessing := falso

19:  llamar createWidgets()
20:  llamar processMessages()
21: end function

22: function CREATEWIDGETS(self)
23:  crear mainFrame con padding
24:  empaquetar mainFrame (fill = ambos, expand = verdadero)
25:  crear filesFrame como LabelFrame(Archivos de Entrada)
26:  empaquetar filesFrame (fill = X)
27:  agregar fila: etiqueta DEM(s), campo demPathDisplay, botón Examinar... → examinarDEM()
28:  agregar fila: etiqueta Aforo / Punto vertiente, campo aforoPath, botón Examinar... → examinarAforo()
29:  agregar fila: etiqueta Workspace, campo workspacePath, botón Examinar... → examinarWorkspace()

30:  crear paramsFrame como LabelFrame(Parámetros opcionales)
31:  empaquetar paramsFrame (fill = X)
32:  agregar entradas: snapDistance, contourInterval, threshold, simplifyTolerance

33:  crear buttonsFrame y empaquetar (fill = X)
34:  crear runButton Ejecutar Análisis → ejecutarAnálisis()
35:  crear cancelButton Cancelar → cancelarAnálisis() (inicialmente deshabilitado)
36:  crear exitButton Salir → root.quit()

37:  crear progressFrame (barra de progreso y etiqueta)
38:  crear textFrame como LabelFrame(Salida del proceso)
39:  crear outputText como ScrolledText (height = 15)

40:  configurar columna 1 de filesFrame con peso 1
41: end function

42: function EXAMINARDEM(self)
43:  Abrir diálogo para seleccionar múltiples archivos (.tif, .img, ...)

```

```
44:   if el usuario selecciona archivos then
45:       demPaths := lista de rutas seleccionadas
46:       demPathDisplay := cadena con nombres base unidos para mostrar
47:   end if
48: end function

49: function EXAMINARAFORO(self)
50:     abrir diálogo para seleccionar un archivo (shp, kml, ...)
51:     if archivo seleccionado then
52:         aforoPath := ruta seleccionada
53:     end if
54: end function

55: function EXAMINARWORKSPACE(self)
56:     abrir diálogo de selección de carpeta
57:     if carpeta seleccionada then
58:         workspacePath := ruta seleccionada
59:     end if
60: end function

61: function REGISTRARSALIDA(self, mensaje)
62:     if hilo actual  $\neq$  MainThread then
63:         poner (log, mensaje) en messageQueue
64:     else
65:         insertar mensaje + salto de línea en outputText
66:         desplazar outputText al final
67:         actualizar tareas inactivas de root
68:     end if
69: end function

70: function ACTUALIZARPROGRESO(self, valor, texto)
71:     if hilo actual  $\neq$  MainThread then
72:         poner (progress, (valor, texto)) en messageQueue
73:     else
74:         progressVar := valor
75:         if texto no vacío then
76:             mostrar texto en etiqueta de progreso
77:         end if
78:         actualizar tareas inactivas de root
79:     end if
80: end function

81: function CANCELARANALISIS(self)
82:     cancelProcessing := verdadero
83:     poner (log, Cancelando proceso...) en messageQueue
84: end function

85: function PROCESSMESSAGES(self)
86:     ▷ Este procedimiento debe programarse periódicamente en el hilo principal
87:     intentar:
88:     while verdadero do
89:         intentar:
```



```
90: obtener tipoMsg, datosMsg desde messageQueue sin espera
91: if tipoMsg = log then
92:     insertar datosMsg + salto de línea en outputText; desplazar al final
93: else if tipoMsg = progress then
94:     progressVar := datosMsg.0; mostrar datosMsg.1 en etiqueta de progreso
95: else if tipoMsg = finished then
96:     habilitar runButton; deshabilitar cancelButton
97:     actualizarProgreso(100, Proceso completado)
98: else if tipoMsg = error then
99:     habilitar runButton; deshabilitar cancelButton
100:     actualizarProgreso(0, Error en el proceso); mostrar alerta con datosMsg
101: else if tipoMsg = cancelled then
102:     habilitar runButton; deshabilitar cancelButton
103:     actualizarProgreso(0, Proceso cancelado); mostrar advertencia
104: end if
105: except cola vacía:
106:     romper
107: end except
108: end while
109: Finally
110:     :programar processMessages() después de 100 ms en el hilo principal
111: end Finally
112: end function

113: function EJECUTARANALISIS(self)
114:     if demPaths vacío or aforoPath vacío then
115:         mostrar error... Seleccione archivos dem y aforo..
116:         return
117:     end if
118:     for cada ruta en demPaths do
119:         if no existe ruta then
120:             mostrar error ..dem no encontrado: + ruta
121:             return
122:         end if
123:     end for
124:     if aforoPath no existe then
125:         mostrar error ..Archivo de aforo no encontrado.
126:         return
127:     end if
128:     cancelProcessing := falso
129:     deshabilitar runButton; habilitar cancelButton
130:     borrar contenido de outputText
131:     actualizarProgreso(0, Iniciando análisis...)
132:     crear hilo con objetivo executeAnalysis(self) (daemon = verdadero)
133:     iniciar hilo
134: end function

135: function VERIFICARCANCELADO(self)
136:     if cancelProcessing then
137:         poner (cancelled, nulo) en messageQueue
138:         return verdadero
139:     end if
140:     return falso
```

```

141: end function

142: function BORRARSEGURO(self, dataset)
143:                                     ▷ Intentar borrar dataset si existe
144:     intentar:
145:     if arcpy.Exists(dataset) then
146:         arcpy.Delete_management(output)
147:     end if
148:     except :
149:         pasar
150:     end except
151: end function

152: function EXECUTEANALYSIS(self)
153:     intentar:
154:     registrarSalida(Importando arcpy y configurando entorno...)
155:                                     ▷ Importar bibliotecas
156:     importar arcpy; from arcpy import env; from arcpy.sa import *
157:     intentar:
158:     arcpy.CheckOutExtension(Spatial)
159:     arcpy.CheckOutExtension(3D)
160:     except :
161:         mostrar error ..Extensiones Spatial o 3D no disponibles.
162:         poner (error, ..Extensiones no disponibles) en messageQueue
163:         return
164:     end except
165:     arcpy.env.overwriteOutput := verdadero
166:     arcpy.env.workspace := workspacePath
167:     arcpy.env.compression := LZ77                                     ▷ opcional
168:     actualizarProgreso(5, Configurando entorno...)
169:     if verificarCancelado() then
170:         return
171:     end if
172:     registrarSalida(Paso 1: Preparar DEMs)
173:     actualizarProgreso(10, Preparando DEMs...)
174:     if longitud(demPaths) >1 then
175:         registrarSalida(Creando mosaico de DEMs...)
176:         demMosaico := arcpy.MosaicToNewRaster_management(demPaths, arcpy.env.workspace, dem-
mosaico.tif, 32_BIT_FLOAT, 1, MEAN)
177:         demOriginal := demMosaico
178:     else
179:         demOriginal := demPaths[0]
180:         registrarSalida(Usando DEM único: + demOriginal)
181:     end if
182:     if verificarCancelado() then
183:         return
184:     end if
185:     registrarSalida(Paso 2: Verificar sistema de coordenadas)
186:     srTarget := SpatialReference(32718)
187:     if arcpy.Describe(demOriginal).spatialReference.name != srTarget.name then
188:         registrarSalida(Reproyectando DEM a + srTarget.name)
189:         demProj := unirRutas(arcpy.env.workspace, dem-proj.tif)

```

```

190:         arcpy.ProjectRaster_management(demOriginal, demProj, srTarget)
191:         demOriginal := demProj
192:     end if
193:     if verificarCancelado() then
194:         return
195:     end if
196:     registrarSalida(Paso 3: Relleno de depresiones (Fill))
197:     actualizarProgreso(20, Rellenando depresiones...)
198:     demFilled := Fill(Raster(demOriginal))
199:     if verificarCancelado() then
200:         return
201:     end if
202:     registrarSalida(Paso 4: Dirección de flujo)
203:     actualizarProgreso(30, Calculando dirección de flujo...)
204:     flowDir := FlowDirection(demFilled)
205:     if verificarCancelado() then
206:         return
207:     end if
208:     registrarSalida(Paso 5: Acumulación de flujo)
209:     actualizarProgreso(40, Calculando acumulación...)
210:     flowAcc := FlowAccumulation(flowDir)
211:     if verificarCancelado() then
212:         return
213:     end if
214:     registrarSalida(Paso 6: Extracción de red de drenaje)
215:     actualizarProgreso(50, Extrayendo red de drenaje...)
216:     streamRaster := Con(flowAcc >= threshold, 1)
217:     if verificarCancelado() then
218:         return
219:     end if
220:     registrarSalida(Paso 7: Vectorización de drenaje)
221:     actualizarProgreso(60, Vectorizando drenaje...)
222:     streamsShp := unirRutas(arcpy.env.workspace, streams.shp)
223:     arcpy.RasterToPolyline_conversion(streamRaster, streamsShp, NO_SIMPLIFY, VALUE)
224:     if verificarCancelado() then
225:         return
226:     end if
227:     registrarSalida("Paso 8: Ajuste de puntos de vertiente (snap)")
228:     actualizarProgreso(65, Ajustando puntos de vertiente...)
229:     if aforoPath != cadena vacía then
230:         pourPointsRaster := unirRutas(arcpy.env.workspace, pour-points-raster.tif)
231:         arcpy.FeatureToRaster_conversion(aforoPath, id, pourPointsRaster, 1)
232:         snappedPP := SnapPourPoint(pourPointsRaster, flowAcc, snapDistance)
233:     else
234:         snappedPP := nulo
235:     end if
236:     if verificarCancelado() then
237:         return
238:     end if
239:     registrarSalida(Paso 9: Delimitación de cuenca)
240:     actualizarProgreso(75, Delimitando cuenca...)
241:     if snappedPP != nulo then

```

```

242:     watershedRaster := Watershed(flowDir, snappedPP)
243: else
244:     pourCell := seleccionarCeldaMayor(flowAcc, areaInteres)
245:     watershedRaster := Watershed(flowDir, pourCell)
246: end if
247: arcpy.RasterToPolygon_conversion(watershedRaster, unirRutas(arcpy.env.workspace, watershed.shp),
    NO_SIMPLIFY, Value)
248: if verificarCancelado() then
249:     return
250: end if
251: registrarSalida(Paso 10: Post-procesamiento (limpieza y simplificación))
252: actualizarProgreso(85, Post-procesamiento de redes...)
253: watershedSimp := unirRutas(arcpy.env.workspace, watershed-simp.shp)
254: arcpy.SimplifyPolygon_cartography(unirRutas(arcpy.env.workspace, watershed.shp), watershedSimp,
    simplifyTolerance)
255: arcpy.Merge_management(streamsShp, unirRutas(arcpy.env.workspace, streams-merged.shp))
256: arcpy.Dissolve_management( unirRutas(arcpy.env.workspace,
    streams-merged.shp), unirRutas(arcpy.env.workspace, streams-dissolved.shp))
257: if verificarCancelado() then
258:     return
259: end if
260: registrarSalida(Paso 11: Cálculo de parámetros fisiográficos)
261: actualizarProgreso(90, Calculando parámetros fisiográficos...)
262: polCuenca := watershedSimp
263: areaM2 := calcularArea(polCuenca)           ▷ usar arcpy.management.CalculateGeometryAttributes
264: perimetro := calcularPerimetro(polCuenca)
265: zonalTable := ZonalStatisticsAsTable(polCuenca, Value, demFilled, unirRutas(arcpy.env.workspace,
    elev_stats.dbf), , ALL)
266: elevMax, elevMin, elevMean := extraerEstadisticos(zonalTable)
267: relieve := elevMax - elevMin
268: longestFlowPath := calcularLongestFlowPath(streamsShp, polCuenca)
269: totalChannelLength := sumarLongitudes(unirRutas(arcpy.env.workspace, streams-dissolved.shp))
270: drainageDensity := totalChannelLength / areaM2
271: calcularIndicesGeom(polCuenca)
272: if verificarCancelado() then
273:     return
274: end if
275: registrarSalida(Paso 12: Guardar productos y reportes)
276: actualizarProgreso(95, Exportando resultados...)
277: arcpy.CopyFeatures_management(polCuenca, unirRutas(arcpy.env.workspace, watershed-final.shp))
278: arcpy.CopyFeatures_management(unirRutas(arcpy.env.workspace, streams-dissolved.shp), unirRu-
    tas(arcpy.env.workspace, streams-final.shp))
279: arcpy.TableToTable_conversion(zonalTable, arcpy.env.workspace, elev_stats.xls)
280: escribixlsParametros(unirRutas(arcpy.env.workspace, fisiograficos.xls))
281: actualizarProgreso(100, Proceso completado)
282: registrarSalida(Proceso completado correctamente)
283: poner (finished, nulo) en messageQueue
284: except e:
285:     importar traceback
286:     registrarSalida(Error en executeAnalysis: + str(e))
287:     poner (error, str(e)) en messageQueue
288: end except

```

```
289: Finally
290:     :intentar:
291:     arcpy.CheckInExtension(Spatial)
292:     arcpy.CheckInExtension(3D")
293:     except :
294:         pasar
295:     end except
296:     intentar:
297:     borrar temporales en arcpy.env.workspace + /in_memory/*
298:     llamar gc.collect()
299:     except :
300:         pasar
301:     end except
302: end Finally
303: end function
304: if name == main then
305:     crear root como Tk()
306:     crear app como HydrologicalAnalysisGUI(root)
307:     ejecutar root.mainloop()
308: end if
```

3.9.1.2. Entorno de desarrollo y componentes utilizados

Posteriormente, se define el entorno de desarrollo y los componentes técnicos que permitirán la construcción del programa. Estos abarcan herramientas orientadas al diseño de interfaces gráficas, la gestión de archivos y rutas del sistema, la manipulación de datos estructurados, la ejecución de procesos en paralelo y la comunicación con plataformas de análisis geoespacial. La integración de estos elementos posibilita que el programa funcione de manera estable, rápida y con una adecuada interacción entre el usuario y el sistema, garantizando además la compatibilidad con software especializado en información geográfica, a continuación de muestran las librerías utilizadas, para ello.

- **Tkinter, ttk, ScrolledText, tkFileDialog, tkMessageBox:** Para crear y gestionar la interfaz gráfica de usuario (GUI), incluyendo ventanas, botones, entradas de texto, diálogos para seleccionar archivos y mensajes emergentes.
- **os y shutil:** Para manejar las operaciones del sistema de archivos, como verificar la existencia de rutas, crear directorios y copiar archivos al área de trabajo.
- **sys y time:** Para proporcionar el acceso a variables del sistema y funciones de tiempo, usadas para registrar la hora de inicio y duración del análisis.
- **threading y Queue:** Para permitir ejecutar el análisis hidrológico en un hilo secundario para no bloquear la interfaz, y facilitar la comunicación segura entre hilos mediante una cola de mensajes.
- **math:** Para operar funciones matemáticas básicas, necesarias para calcular índices fisiográficos.

- **warnings**: Para suprimir advertencias no críticas generadas por ArcPy.
- **gc**: Para realizar una limpieza manual de la memoria al final del proceso para liberar los recursos.
- **arcpy** (y submódulos como **arcpy.sa**, **arcpy.da**): Para utilizar la biblioteca geoespacial de Esri; que es el núcleo del análisis hidrológico, permitiendo operaciones raster y vectoriales (relleno de depresiones, dirección de flujo, delimitación de la cuenca, estadísticas zonales, etc.).
- **pandas**: para manipular y organizar los resultados numéricos (parámetros fisiográficos) en estructuras de datos y los exportar en archivos Excel.
- **win32com.client**, **win32api**: Módulos para la integración con Windows (importados pero no utilizados activamente en el código actual).

3.9.1.3. Código fuente implementado

Finalmente, se desarrolla el código fuente siguiendo una estructura modular y jerárquica que facilita su comprensión, mantenimiento y ampliación futura. Cada módulo cumple una función específica dentro del flujo general, abarcando desde la carga de los datos de entrada, el procesamiento hidrológico y geomorfológico, hasta la generación de resultados y su representación visual. Este enfoque estructurado permite que el sistema se ejecute de forma autónoma, asegurando la trazabilidad de los procesos, la consistencia de los resultados y la posibilidad de adaptación a diferentes escenarios o cuencas de estudio.

```
1  # -*- coding: utf-8 -*-
2  import Tkinter as tk
3  import ttk as ttk
4  import tkFileDialog as filedialog
5  import tkMessageBox as messagebox
6  import ScrolledText
7  import os
8  import pandas as pd
9  import sys
10 import time
11 import threading
12 import Queue
13 import shutil
14 import math
15 import warnings
16 import gc
17 import win32com.client
18 import win32api
19 warnings.filterwarnings("ignore", category=UserWarning, module="arcpy")
20 class HydrologicalAnalysisGUI:
21     def __init__(self, root):
22         self.root = root
23         self.root.title("Análisis Hidrológico y Fisiográfico v2.0")
24         self.root.geometry("900x750")
```

```
25 self.root.resizable(True, True)
26 self.dem_paths = []
27 self.dem_path = tk.StringVar()
28 self.aforo_path = tk.StringVar()
29 self.workspace_path = tk.StringVar(value=os.path.expanduser("~/Desktop"))
30 self.snap_distance = tk.IntVar(value=50)
31 self.contour_interval = tk.IntVar(value=40)
32 self.umbra1 = tk.DoubleVar(value=1.5)
33 self.simplify_tolerance = tk.IntVar(value=30)
34 self.progress_var = tk.DoubleVar()
35 self.message_queue = Queue.Queue()
36 self.cancel_processing = False
37 self.create_widgets()
38 self.process_messages()
39 def create_widgets(self):
40     main_frame = ttk.Frame(self.root, padding="10")
41     main_frame.pack(fill=tk.BOTH, expand=True)
42     files_frame = ttk.LabelFrame(main_frame, text="Archivos de Entrada",
padding="10")
43     files_frame.pack(fill=tk.X, pady=5)
44     ttk.Label(files_frame, text="Archivo(s) DEM:").grid(row=0, column=0,
sticky=tk.W, pady=2)
45     ttk.Entry(files_frame, textvariable=self.dem_path, width=50).grid(row=0,
column=1, sticky=tk.EW, pady=2)
46     ttk.Button(files_frame, text="Examinar", command=self.browse_dem).grid(row
=0, column=2, padx=5, pady=2)
47     ttk.Label(files_frame, text="Punto de Aforo:").grid(row=1, column=0,
sticky=tk.W, pady=2)
48     ttk.Entry(files_frame, textvariable=self.aforo_path, width=50).grid(row=1,
column=1, sticky=tk.EW, pady=2)
49     ttk.Button(files_frame, text="Examinar", command=self.browse_aforo).grid(
row=1, column=2, padx=5, pady=2)
50     ttk.Label(files_frame, text="Directorio de Trabajo:").grid(row=2, column
=0, sticky=tk.W, pady=2)
51     ttk.Entry(files_frame, textvariable=self.workspace_path, width=50).grid(
row=2, column=1, sticky=tk.EW, pady=2)
52     ttk.Button(files_frame, text="Examinar", command=self.browse_workspace).
grid(row=2, column=2, padx=5, pady=2)
53     params_frame = ttk.LabelFrame(main_frame, text="Par metros Opcionales",
padding="10")
54     params_frame.pack(fill=tk.X, pady=5)
55     ttk.Label(params_frame, text="Distancia de Ajuste (metros):").grid(row=0,
column=0, sticky=tk.W, pady=2)
56     ttk.Entry(params_frame, textvariable=self.snap_distance, width=10).grid(
row=0, column=1, sticky=tk.W, pady=2)
57     ttk.Label(params_frame, text="Intervalo de Curvas (metros):").grid(row=0,
column=2, sticky=tk.W, pady=2,
58     padx=(20, 0))
59     ttk.Entry(params_frame, textvariable=self.contour_interval, width=10).grid
(row=0, column=3, sticky=tk.W, pady=2)
60     ttk.Label(params_frame, text="Umbral Red H drica:").grid(row=1, column=0,
sticky=tk.W, pady=2)
```

```

61     ttk.Entry(params_frame, textvariable=self.umbral, width=10).grid(row=1,
62         column=1, sticky=tk.W, pady=2)
63     ttk.Label(params_frame, text="Tolerancia Suavizado:").grid(row=1, column
64         =2, sticky=tk.W, pady=2, padx=(20, 0))
65     ttk.Entry(params_frame, textvariable=self.simplify_tolerance, width=10).
66         grid(row=1, column=3, sticky=tk.W,
67         pady=2)
68     buttons_frame = ttk.Frame(main_frame)
69     buttons_frame.pack(fill=tk.X, pady=10)
70     self.run_button = ttk.Button(buttons_frame, text="Ejecutar An lisis",
71         command=self.run_analysis)
72     self.run_button.pack(side=tk.LEFT, padx=5)
73     self.cancel_button = ttk.Button(buttons_frame, text="Cancelar", command=
74         self.cancel_analysis, state=tk.DISABLED)
75     self.cancel_button.pack(side=tk.LEFT, padx=5)
76     ttk.Button(buttons_frame, text="Salir", command=self.root.quit).pack(side=
77         tk.RIGHT, padx=5)
78     progress_frame = ttk.Frame(main_frame)
79     progress_frame.pack(fill=tk.X, pady=5)
80     self.progress_bar = ttk.Progressbar(progress_frame, variable=self.
81         progress_var, maximum=100)
82     self.progress_bar.pack(fill=tk.X)
83     self.progress_label = ttk.Label(progress_frame, text="Listo para iniciar")
84     self.progress_label.pack()
85     text_frame = ttk.LabelFrame(main_frame, text="Salida del Proceso", padding
86         ="10")
87     text_frame.pack(fill=tk.BOTH, expand=True, pady=5)
88     self.output_text = ScrolledText.ScrolledText(text_frame, wrap=tk.WORD,
89         height=15)
90     self.output_text.pack(fill=tk.BOTH, expand=True)
91     files_frame.columnconfigure(1, weight=1)
92     def browse_dem(self):
93         filenames = filedialog.askopenfilenames(
94             title="Seleccionar archivos DEM",
95             filetypes=[("Archivos TIFF", "*.tif"), ("Archivos IMG", "*.img"), ("Todos
96                 los archivos", "*.*")]
97         )
98         if filenames:
99             self.dem_paths = list(filenames)
100             basenames = [os.path.basename(p) for p in self.dem_paths]
101             self.dem_path.set("; ".join(basenames))
102     def browse_aforo(self):
103         filename = filedialog.askopenfilename(
104             title="Seleccionar archivo de Punto de Aforo",
105             filetypes=[("Shapefiles", "*.shp"), ("KML", "*.kml"), ("Todos los archivos
106                 ", "*.*")]
107         )
108         if filename:
109             self.aforo_path.set(filename)
110     def browse_workspace(self):
111         dirname = filedialog.askdirectory(title="Seleccionar Directorio de Trabajo
112             ")

```



```
101     if dirname:
102         self.workspace_path.set(dirname)
103     def log_output(self, message):
104         if threading.current_thread().name != 'MainThread':
105             self.message_queue.put(('log', message))
106         else:
107             self.output_text.insert(tk.END, message + "\n")
108             self.output_text.see(tk.END)
109             self.root.update_idletasks()
110     def update_progress(self, value, text=None):
111         if threading.current_thread().name != 'MainThread':
112             self.message_queue.put(('progress', (value, text)))
113         else:
114             self.progress_var.set(value)
115             if text:
116                 self.progress_label.config(text=text)
117                 self.root.update_idletasks()
118     def cancel_analysis(self):
119         self.cancel_processing = True
120         self.message_queue.put(('log', "Cancelando proceso..."))
121     def process_messages(self):
122         try:
123             while True:
124                 try:
125                     msg_type, msg_data = self.message_queue.get_nowait()
126                     if msg_type == 'log':
127                         self.output_text.insert(tk.END, msg_data + "\n")
128                         self.output_text.see(tk.END)
129                     elif msg_type == 'progress':
130                         value, text = msg_data
131                         self.progress_var.set(value)
132                         if text:
133                             self.progress_label.config(text=text)
134                     elif msg_type == 'finished':
135                         self.run_button.config(state=tk.NORMAL)
136                         self.cancel_button.config(state=tk.DISABLED)
137                         self.update_progress(100, "Proceso completado")
138                         messagebox.showinfo("Proceso Completado",
139 "El analisis hidrológico ha finalizado correctamente.")
140                     elif msg_type == 'error':
141                         self.run_button.config(state=tk.NORMAL)
142                         self.cancel_button.config(state=tk.DISABLED)
143                         self.update_progress(0, "Error en el proceso")
144                         messagebox.showerror("Error", "Error: {}".format(msg_data))
145                     elif msg_type == 'cancelled':
146                         self.run_button.config(state=tk.NORMAL)
147                         self.cancel_button.config(state=tk.DISABLED)
148                         self.update_progress(0, "Proceso cancelado")
149                         messagebox.showwarning("Proceso Cancelado", "El analisis fue cancelado
por el usuario.")
150                 except Queue.Empty:
151                     break
```

```
152     finally:
153         self.root.after(100, self.process_messages)
154     def run_analysis(self):
155         if len(self.dem_paths) == 0 or not self.aforo_path.get():
156             messagebox.showerror("Error", "Por favor seleccione los archivos DEM y de
157             Punto de Aforo.")
158         return
159         for dem_path in self.dem_paths:
160             if not os.path.exists(dem_path):
161                 messagebox.showerror("Error", "El archivo DEM '{}' no existe.".format(
162                     dem_path))
163             return
164         if not os.path.exists(self.aforo_path.get()):
165             messagebox.showerror("Error", "El archivo de punto de aforo no existe.")
166         return
167         self.cancel_processing = False
168         self.run_button.config(state=tk.DISABLED)
169         self.cancel_button.config(state=tk.NORMAL)
170         self.output_text.delete(1.0, tk.END)
171         self.update_progress(0, "Iniciando an lisis...")
172         thread = threading.Thread(target=self.execute_analysis)
173         thread.daemon = True
174         thread.start()
175     def check_cancelled(self):
176         """Verificar si el proceso fue cancelado"""
177         if self.cancel_processing:
178             self.message_queue.put(('cancelled', None))
179             return True
180             return False
181     def safe_delete(self, dataset):
182         """Eliminar dataset de forma segura"""
183         try:
184             if arcpy.Exists(dataset):
185                 arcpy.Delete_management(dataset)
186         except:
187             pass
188     def execute_analysis(self):
189         try:
190             self.log_output("Importando ArcPy y m dulos necesarios...")
191             import arcpy
192             import arcpy.sa as sa
193             arcpy.CheckOutExtension("Spatial")
194             self.log_output("Configuraci n inicial optimizada...")
195             arcpy.env.overwriteOutput = True
196             arcpy.env.parallelProcessingFactor = "0" # Usar 75% de los cores
197             disponibles
198             arcpy.env.compression = "LZ77" # Comprimir outputs para ahorrar espacio
199             arcpy.env.pyramid = "PYRAMIDS -1 NEAREST DEFAULT 75 NO_SKIP"
200             arcpy.env.rasterStatistics = "STATISTICS 1 1 (null)"
201             self.log_output("Activamos las extensiones necesarias...")
202             if arcpy.CheckExtension("Spatial") == "Available":
203                 arcpy.CheckOutExtension("Spatial")
```

```
201     else:
202         raise Exception("La extensión Spatial Analyst no está disponible")
203     if arcpy.CheckExtension("3D") == "Available":
204         arcpy.CheckOutExtension("3D")
205     if self.check_cancelled():
206         return
207     self.log_output("Configuramos el workspace...")
208     workspace = self.workspace_path.get()
209     if not os.path.isdir(workspace):
210         os.makedirs(workspace)
211     arcpy.env.workspace = workspace
212     self.log_output("Sistema de coordenadas...")
213     sistema_coordenadas_proyectado = arcpy.SpatialReference(32718) #
WGS_1984_UTM_Zone_18S
214     arcpy.env.outputCoordinateSystem = sistema_coordenadas_proyectado
215     self.log_output("Iniciando análisis hidrológico optimizado...")
216     self.log_output("Hora de inicio: {}".format(time.strftime("%H:%M:%S")))
217     self.log_output("Directorio de trabajo: {}".format(workspace))
218     self.log_output("PASO 1: Preparar DEMs...")
219     self.update_progress(5, "Preparando DEMs...")
220     if self.check_cancelled():
221         return
222     self.log_output("Procesamiento de dems...")
223     if len(self.dem_paths) > 1:
224         self.log_output("Creando mosaico de {} DEMs...".format(len(self.dem_paths)
225         ))
226         dem_mosaico = os.path.join(workspace, "dem_mosaico.tif")
227         arcpy.MosaicToNewRaster_management(
228             input_rasters=self.dem_paths,
229             output_location=workspace,
230             raster_dataset_name_with_extension="dem_mosaico.tif",
231             coordinate_system_for_the_raster=sistema_coordenadas_proyectado,
232             pixel_type="16_BIT_SIGNED",
233             number_of_bands=1,
234             mosaic_method="MEAN"
235         )
236         dem_original = dem_mosaico
237     else:
238         dem_original = self.dem_paths[0]
239         if not dem_original.startswith(workspace):
240             basename = os.path.basename(dem_original)
241             dem_workspace = os.path.join(workspace, basename)
242             shutil.copy2(dem_original, dem_workspace)
243             dem_original = dem_workspace
244         snap_distance = self.snap_distance.get()
245         contour_interval = self.contour_interval.get()
246         umbral = self.umbral.get()
247         simplify_tolerance = self.simplify_tolerance.get()
248         self.log_output("PASO 2: Preparar punto de aforo...")
249         self.update_progress(10, "Preparando punto de aforo...")
250         if self.check_cancelled():
251             return
```

```
251 aforo_src = self.aforo_path.get()
252 aforo_ext = os.path.splitext(aforo_src)[1].lower()
253 if aforo_ext == ".kml":
254     self.log_output("Convirtiendo KML a Shapefile...")
255     aforo_temp = os.path.join(workspace, "aforo_temp")
256     arcpy.KMLToLayer_conversion(aforo_src, workspace, "aforo_temp")
257     aforo_gdb = os.path.join(workspace, "aforo_temp.gdb")
258     self.log_output("Buscar el feature class de puntos...")
259     arcpy.env.workspace = aforo_gdb
260     datasets = arcpy.ListDatasets(feature_type='feature')
261     point_fc = None
262     for dataset in datasets:
263         arcpy.env.workspace = os.path.join(aforo_gdb, dataset)
264         fcs = arcpy.ListFeatureClasses()
265         for fc in fcs:
266             desc = arcpy.Describe(fc)
267             if desc.shapeType == 'Point':
268                 point_fc = os.path.join(aforo_gdb, dataset, fc)
269                 break
270         if point_fc:
271             break
272     arcpy.env.workspace = workspace
273     if point_fc:
274         punto_aforo = os.path.join(workspace, "punto_aforo.shp")
275         arcpy.CopyFeatures_management(point_fc, punto_aforo)
276     else:
277         raise Exception("No se encontraron puntos en el archivo KML")
278     else:
279         if not aforo_src.startswith(workspace):
280             punto_aforo = os.path.join(workspace, "punto_aforo.shp")
281             arcpy.CopyFeatures_management(aforo_src, punto_aforo)
282         else:
283             punto_aforo = aforo_src
284         self.log_output("Re proyectamos punto de aforo si es necesario...")
285         desc_aforo = arcpy.Describe(punto_aforo)
286         if desc_aforo.spatialReference.factoryCode != 32718:
287             punto_proyectado = os.path.join(workspace, "punto_proyectado.shp")
288             arcpy.Project_management(punto_aforo, punto_proyectado,
289                                     sistema_coordenadas_proyectado)
289             self.safe_delete(punto_aforo)
290             punto_aforo = punto_proyectado
291         self.log_output("PASO 3: Re proyectar DEM si es necesario...")
292         self.update_progress(15, "Verificando proyecci n DEM...")
293         if self.check_cancelled():
294             return
295         desc_dem = arcpy.Describe(dem_original)
296         if desc_dem.spatialReference.factoryCode != 32718:
297             self.log_output("Proyectando DEM...")
298             dem_proyectado = os.path.join(workspace, "dem_proyectado.tif")
299             arcpy.ProjectRaster_management(
300                 dem_original, dem_proyectado, sistema_coordenadas_proyectado,
301                 "BILINEAR", desc_dem.meanCellHeight
```

```
302 )
303 dem = dem_proyectado
304 else:
305 dem = dem_original
306 self.log_output("PASO 4: Hidrolog a b sica...")
307 self.update_progress(20, "Corrigiendo sumideros...")
308 if self.check_cancelled():
309 return
310 self.log_output("Corrigiendo sumideros del dem...")
311 fill_raster = sa.Fill(dem)
312 fill_path = os.path.join(workspace, "fill.tif")
313 fill_raster.save(fill_path)
314
315 self.log_output("Calculando direcci n de flujo del dem...")
316 flow_direction = "flow_dir.tif"
317 flow_dir = arcpy.sa.FlowDirection(fill_path)
318 flow_dir.save(flow_direction)
319 self.log_output("Calculando acumulaci n de flujo...")
320 flow_accumulation = "flow_acc.tif"
321 flow_acc = arcpy.sa.FlowAccumulation(flow_dir)
322 flow_acc.save(flow_accumulation)
323 self.log_output("Preparando punto de aforo...")
324 if not arcpy.ListFields(punto_aforo, "POUR_VAL"):
325 arcpy.AddField_management(punto_aforo, "POUR_VAL", "SHORT")
326 self.log_output("Campo POUR_VAL agregado al punto de aforo")
327 with arcpy.da.UpdateCursor(punto_aforo, ["POUR_VAL"]) as cursor:
328 for row in cursor:
329 row[0] = 1
330 cursor.updateRow(row)
331 self.log_output("Convirtiendo punto a raster...")
332 point_raster = "point_raster.tif"
333 cellsize = arcpy.Describe(dem).meanCellHeight
334 arcpy.PointToRaster_conversion(punto_aforo, "POUR_VAL", point_raster, "
MOST_FREQUENT", "NONE",
335 cellsize)
336 self.log_output("Ajustando punto de aforo al flujo acumulado...")
337 snap_pour = arcpy.sa.SnapPourPoint(point_raster, flow_accumulation,
snap_distance)
338 snap_pour_point = "snap_aforo.tif"
339 snap_pour.save(snap_pour_point)
340 self.log_output("Delimitando la cuenca...")
341 watershed = "watershed.tif"
342 watershed_result = arcpy.sa.Watershed(flow_dir, snap_pour_point)
343 watershed_result.save(watershed)
344 self.log_output("Extrayendo mediante mascara watershed al dem...")
345 output_path_dem = "ExtractByMask_dem.tif"
346 extract_by_mask = arcpy.sa.ExtractByMask(fill_path, watershed)
347 extract_by_mask.save(output_path_dem)
348 self.log_output("Extrayendo mediante mascara watershed a la direcci n de
flujo...")
349 output_path_dir = "ExtractByMask_dir.tif"
350 extract_by_mask = arcpy.sa.ExtractByMask(flow_direction, watershed)
```

```
351 extract_by_mask.save(output_path_dir)
352 self.log_output("Extrayendo mediante mascara watershed a la acumulaci n
de flujo...")
353 output_path_acu = "ExtractByMask_acu.tif"
354 extract_by_mask = arcpy.sa.ExtractByMask(flow_accumulation, watershed)
355 extract_by_mask.save(output_path_acu)
356 self.log_output("Convirtiendo el DEM a TIN...")
357 output_path_TIN = "RasterTin.tif"
358 arcpy.RasterTin_3d(output_path_dem, output_path_TIN)
359 self.log_output("Convirtiendo cuenca a pol gono...")
360 watershed_polygon = "watershed_polygon.shp"
361 arcpy.RasterToPolygon_conversion(watershed, watershed_polygon, "
NO_SIMPLIFY", "VALUE")
362 self.log_output("Suavizando los bordes del pol gono de la cuenca...")
363 watershed_polygon_smooth = "watershed_polygon_smooth.shp"
364 arcpy.SimplifyPolygon_cartography(
365 watershed_polygon,
366 watershed_polygon_smooth,
367 "BEND_SIMPLIFY",
368 simplify_tolerance
369 )
370 self.log_output("Interpolaci n de la cuenca pol gono con el TIN...")
371 output_path_interp = "InterpolatedWatershed.shp"
372 arcpy.InterpolateShape_3d(output_path_TIN, watershed_polygon,
output_path_interp)
373 self.log_output("obteniendo curvas de nivel de la cuenca...")
374 output_path_curvas = "Contour.shp"
375 arcpy.sa.Contour(output_path_dem, output_path_curvas, contour_interval)
376 self.log_output("Calculando el logaritmo base 10 de la acumulaci n de
flujo...")
377 output_path_log = "log_acu.tif"
378 log_raster = arcpy.sa.Log10(arcpy.sa.Raster(output_path_acu))
379 log_raster.save(output_path_log)
380 self.log_output("Calculando la red h drica con el umbral definido...")
381 output_path_red_raster = "red_hidrica_raster.tif"
382 red_raster = arcpy.sa.Con(arcpy.sa.Raster(output_path_log) >= umbral, 1)
383 red_raster.save(output_path_red_raster)
384 self.log_output("Convertir red h drica a shapefile...")
385 output_path_red_vector = "red_hidrica.shp"
386 arcpy.RasterToPolyline_conversion(output_path_red_raster,
output_path_red_vector, "NODATA", 0, "SIMPLIFY")
387 self.log_output("Calculando el Stream Link de la red...")
388 output_path_stream_link = "stream_link.tif"
389 stream_link = arcpy.sa.StreamLink(output_path_red_raster, output_path_dir)
390 stream_link.save(output_path_stream_link)
391 self.log_output("calculando el stream order de la red...")
392 output_path_stream_order = "stream_order.tif"
393 stream_order = arcpy.sa.StreamOrder(output_path_stream_link,
output_path_dir, "STRAHLER")
394 stream_order.save(output_path_stream_order)
395 self.log_output("Convertir stream order a feature...")
396 output_path_red_order_pol = "red_order_pol.shp"
```

```

397 red_order_pol = arcpy.sa.StreamToFeature(output_path_stream_order,
output_path_dir,
398 output_path_red_order_pol, "simplify")
399 self.log_output("Calculando pendiente de la cuenca...")
400 output_raster_slope = "output_path_slope.tif"
401 output_path_slope = arcpy.sa.Slope(output_path_dem, "PERCENT_RISE", 1)
402 output_path_slope.save(output_raster_slope)
403 self.log_output("Extrayendo valores de pendiente a la cuenca...")
404 output_path_slope_pol = "out_slope_pol.shp"
405 arcpy.InterpolateShape_3d(output_raster_slope, watershed_polygon,
output_path_slope_pol)
406 self.log_output("Calculando estadísticas zonales...")
407 campo_zonal = "Id"
408 table_output = "zonal_stat_tbl.dbf"
409 arcpy.sa.ZonalStatisticsAsTable(
410 output_path_slope_pol, campo_zonal, output_raster_slope,
411 table_output, "NODATA", "ALL"
412 )
413 self.log_output("Leyendo estadísticas zonales...")
414 mean_value = None
415 with arcpy.da.SearchCursor(table_output, ["MEAN"]) as cursor:
416 for row in cursor:
417 mean_value = row[0]
418 break
419 self.log_output("Valor medio de pendiente calculado: {:.2f}".format(
mean_value))
420 self.log_output("PASO 5: Inicia el cálculo de parámetros fisiográficos
....")
421 self.log_output("Verificar si el shapefile existe....")
422 if not arcpy.Exists(watershed_polygon):
423 raise IOError("El shapefile '{watershed_polygon}' no existe.")
424 stream_order_field = "grid_code"
425 length_field = "Lon_may_km"
426 self.log_output("Verifica si el campo de longitud ya existe; si no, lo
agrega....")
427 if length_field not in [f.name for f in arcpy.ListFields(
output_path_red_order_pol)]:
428 arcpy.AddField_management(output_path_red_order_pol, length_field, "DOUBLE
")
429 self.log_output("Obtener el valor máximo de Stream Order....")
430 with arcpy.da.SearchCursor(output_path_red_order_pol, [stream_order_field
]) as cursor:
431 max_stream_order = max(row[0] for row in cursor)
432 self.log_output("El valor máximo de Stream Order es: {:.2f}".format(
max_stream_order))
433 self.log_output("Crear una capa temporal de la feature class para usar
SelectLayerByAttribute....")
434 rivers_layer = "rivers_layer"
435 arcpy.management.MakeFeatureLayer(output_path_red_order_pol, rivers_layer)
436 self.log_output("Seleccionar automáticamente los ríos con el máximo
Stream Order....")
437 expression = "{} = {}".format(stream_order_field, max_stream_order)

```

```

438     arcpy.management.SelectLayerByAttribute(rivers_layer, "NEW_SELECTION",
expression)
439     self.log_output("Calcular la longitud de los r os seleccionados en
kil metros ....")
440     arcpy.management.CalculateField(rivers_layer, length_field, "!SHAPE.length
! / 1000", "PYTHON")
441     self.log_output("Sumar las longitudes de los segmentos seleccionados....")
442     total_length = 0
443     with arcpy.da.SearchCursor(rivers_layer, [length_field]) as cursor:
444         for row in cursor:
445             total_length += row[0]
446     self.log_output("Longitud total del cauce de mayor orden: {:.2f} km".
format(total_length))
447     self.log_output("Asegurar que el campo Length existe, o crearlo si no
est presente....")
448     fields = [f.name for f in arcpy.ListFields(output_path_red_order_pol)]
449     if "Length" not in fields:
450         arcpy.AddField_management(output_path_red_order_pol, "Length", "DOUBLE")
451     self.log_output("Usar un UpdateCursor para calcular la longitud en
kil metros ....")
452     with arcpy.da.UpdateCursor(output_path_red_order_pol, ["Shape@", "Length"
]) as cursor:
453         for row in cursor:
454             row[1] = row[0].length / 1000.0 # Convertir metros a kil metros
455             cursor.updateRow(row)
456         order_lengths = {}
457     self.log_output("Crear un cursor para recorrer la tabla de atributos....")
458     with arcpy.da.SearchCursor(output_path_red_order_pol, ["grid_code", "
Length"]) as cursor:
459         for row in cursor:
460             order = row[0] # El campo que representa el orden de la red
461             length_km = row[1] # La longitud del curso de agua en kil metros
462             if order in order_lengths:
463                 order_lengths[order] += length_km
464             else:
465                 order_lengths[order] = length_km
466     self.log_output("Longitudes totales por orden....")
467     for order in sorted(order_lengths):
468         self.log_output("Orden {0}: {:.2f} kil metros".format(order,
order_lengths[order]))
469     self.log_output("Sumar todas las longitudes....")
470     suma_longitudes = sum(order_lengths.values())
471     self.log_output("Suma total de longitudes: {:.2f} kil metros".format(
suma_longitudes))
472     self.log_output("contamos la cantidad de rios en la cuenca....")
473     count_rivers = int(arcpy.management.GetCount(output_path_red_order_pol)
[0])
474     grid_code = 1 # Cambia el orden que deseas analizar
475     query = "grid_code = {}".format(grid_code) # Cambia Strahler orden seg n
el campo real
476     arcpy.management.MakeFeatureLayer(output_path_red_order_pol, "
filtered_rivers", query)

```



```

477     count_filtered_rivers = int(arcpy.management.GetCount("filtered_rivers")
[0])
478     self.log_output("El número de ríos de orden {} es: {}".format(grid_code,
count_filtered_rivers))
479     arcpy.management.Delete("filtered_rivers")
480     self.log_output("Inicia el cálculo de la longitud total del cauce
principal....")
481     output_flow_length = "Flow_Length.tif"
482     output_flow_l = sa.FlowLength("ExtractByMask_dir.tif", "DOWNSTREAM", "")
483     output_flow_l.save(output_flow_length)
484     self.log_output("conversion a kilometers longitud total del cauce
principal....")
485     outFlowLengthKilometers = output_flow_l / 1000
486     outFlowLengthKilometers.save("FlowLength_km.tif")
487     self.log_output("Calcular las estadísticas del río....")
488     arcpy.CalculateStatistics_management("FlowLength_km.tif")
489     sum_value = arcpy.GetRasterProperties_management("FlowLength_km.tif", "
MAXIMUM")
490     total_length_km = float(sum_value.getOutput(0))
491     self.log_output("La longitud total del cauce principal es: {} km".format(
total_length_km))
492     stream_order_raster = sa.Raster(output_path_stream_order)
493     max_order = int(arcpy.GetRasterProperties_management(stream_order_raster,
"MAXIMUM").getOutput(0))
494     main_river = sa.Con(stream_order_raster == max_order, 1)
495     main_river.save("MainRiver.tif")
496     flow_acc_raster = sa.Raster(output_path_acu) # acumulación de flujo
original
497     flow_acc_main = sa.ExtractByMask(flow_acc_raster, "MainRiver.tif")
498     flow_acc_main.save("Flow_Acc_Main.tif")
499     min_acu = float(arcpy.GetRasterProperties_management(flow_acc_main, "
MINIMUM").getOutput(0))
500     max_acu = float(arcpy.GetRasterProperties_management(flow_acc_main, "
MAXIMUM").getOutput(0))
501     start_point = sa.Con(flow_acc_main == max_acu, 1) # desembocadura
502     start_point.save("StartPoint.tif")
503     end_point = sa.Con(flow_acc_main == min_acu, 1) # nacimiento
504     end_point.save("EndPoint.tif")
505     self.log_output("Convirtiendo los puntos a coordenadas....")
506     arcpy.RasterToPoint_conversion("StartPoint.tif", "StartPoint.shp")
507     arcpy.RasterToPoint_conversion("EndPoint.tif", "EndPoint.shp")
508     self.log_output("Extrayendo cotas del DEM....")
509     arcpy.sa.ExtractValuesToPoints("StartPoint.shp", output_path_dem, "
StartElevation.shp")
510     arcpy.sa.ExtractValuesToPoints("EndPoint.shp", output_path_dem, "
EndElevation.shp")
511     self.log_output("Leer las cotas desde los shapefiles generados....")
512     with arcpy.da.SearchCursor("StartElevation.shp", ["RASTERVALU"]) as cursor
:
513     for row in cursor:
514     start_cota = row[0]
515     with arcpy.da.SearchCursor("EndElevation.shp", ["RASTERVALU"]) as cursor:

```

```

516     for row in cursor:
517         end_cota = row[0]
518         self.log_output("La cota inicial del cauce principal es: {} metros".format(
            (start_cota)))
519         self.log_output("La cota final del cauce principal es: {} metros".format(
            end_cota))
520         resampled_dem = r"in_memory\resampled_dem"
521         arcpy.Resample_management(output_path_dem, resampled_dem, "90", "NEAREST")
522         self.log_output("Calcular estadísticas zonales usando
            ZonalStatisticsAsTable para obtener datos....")
523         temp_table = r"in_memory\temp_table"
524         arcpy.sa.ZonalStatisticsAsTable(watershed_polygon, "ID", output_path_dem,
            temp_table, "NODATA", "ALL")
525         altitud_max = None
526         altitud_min = None
527         altitud_med = None
528         with arcpy.da.SearchCursor(temp_table, ["MAX", "MIN", "MEAN"]) as cursor:
529             for row in cursor:
530                 altitud_max = float(row[0])
531                 altitud_min = float(row[1])
532                 altitud_med = float(row[2])
533                 reclass_rang = round((altitud_max - altitud_min) / 10) # Tamaño de cada
            rango
534                 reclass_ranges = []
535                 for i in range(10): # Generamos 10 rangos
536                     start = altitud_min + i * reclass_rang
537                     end = altitud_min + (i + 1) * reclass_rang
538                     reclass_ranges.append([start, end, i + 1])
539                 reclass_ranges[-1] = [altitud_min + 9 * reclass_rang, altitud_max, 10] #
            ltima clase
540         self.log_output("Reclasificar el DEM....")
541         reclass_dem = sa.Reclassify(sa.Raster(resampled_dem), "Value", sa.
            RemapRange(reclass_ranges), "NODATA")
542         self.log_output("Convertir reclass_dem a polígono....")
543         reclass_dem_pol = r"in_memory\reclass_dem_pol"
544         arcpy.RasterToPolygon_conversion(reclass_dem, reclass_dem_pol, "
            NO_SIMPLIFY", "VALUE")
545         self.log_output("Ejecutar TabulateArea (en memoria)....")
546         temp_output_table = r"in_memory\tabulate_area"
547         arcpy.sa.TabulateArea(watershed_polygon, "ID", reclass_dem, "Value",
            temp_output_table)
548         self.log_output("variables de cálculo....")
549         total_area = 0.0
550         areas_por_clase = []
551         self.log_output("Obtener datos de áreas ...")
552         fields = [f.name for f in arcpy.ListFields(temp_output_table)]
553         with arcpy.da.SearchCursor(temp_output_table, fields) as cursor:
554             for row in cursor:
555                 for i, area in enumerate(row[2:], start=1): # Comienza desde la tercera
            columna
556                     total_area += area
557                 areas_por_clase.append((i, area))

```

```

558 self.log_output("Ordenar por clase (de mayor a menor)...")
559 areas_por_clase.sort(key=lambda x: x[0], reverse=True)
560 self.log_output("Preparar los resultados para exportar...")
561 resultados = []
562 acumulado = 0.0
563 for clase, area in areas_por_clase:
564     intervalo_min = reclass_ranges[clase - 1][0]
565     intervalo_max = reclass_ranges[clase - 1][1]
566     cota_media = (intervalo_min + intervalo_max) / 2.0
567     porcentaje = (area / total_area) * 100
568     acumulado += porcentaje
569     ai = area / 1e6 # rea en km
570     ci = ai * cota_media
571     self.log_output("Aadir los resultados a la lista en el formato exacto
que pediste...")
572     if intervalo_min == altitud_min:
573         intervalo = "<{:0f}".format(intervalo_min)
574     else:
575         intervalo = "{:0f}-{:0f}".format(intervalo_min, intervalo_max)
576     resultados.append([intervalo,
577 u"{:0f}".format(cota_media),
578 u"{:2f}".format(ai),
579 u"{:6f}".format(porcentaje),
580 u"{:6f}".format(acumulado),
581 u"{:1f}".format(ci)])
582 self.log_output("Convertir los resultados a un DataFrame de pandas...")
583 df_resultados = pd.DataFrame(resultados, columns=["Intervalo de clases (
curvas de nivel)",
584 "Cota media (m)",
585 "Area (Km )",
586 "Area/Area Total [%]",
587 "Porcentaje Acumulado",
588 "ai ci"]])
589 excel_file = "resultados_dem.xlsx"
590 self.log_output("Exportar los resultados a Excel usando pandas y openpyxl
...")
591 df_resultados.to_excel(excel_file, index=False, engine='openpyxl')
592 self.log_output("Los resultados han sido exportados a {}".format(
excel_file))
593 sheet_name = "Sheet1$"
594 self.log_output("Verificar si el archivo existe antes de intentar leerlo
...")
595 if os.path.exists(excel_file):
596     try:
597         data = pd.read_excel(excel_file, sheet_name=sheet_name)
598         data.columns = data.columns.str.strip()
599         data.columns = data.columns.str.replace(u'Km\\xb2', 'Km2')
600         data.columns = data.columns.str.lower()
601         if "cota media (m)" in data.columns and "area (km2)" in data.columns:
602             # Convertir a num rico y limpiar datos
603             data["cota media (m)"] = pd.to_numeric(data["cota media (m)"], errors='
coerce')

```

```

604 data["area (km2)"] = pd.to_numeric(data["area (km2)"], errors='coerce')
605 data.dropna(subset=["cota media (m)", "area (km2)"], inplace=True)
606 if not data.empty:
607     data["hi * Si"] = data["cota media (m)"] * data["area (km2)"]
608     Hmed = data["hi * Si"].sum() / data["area (km2)"].sum()
609     self.log_output("Altitud media de la cuenca (Hmed): %.2f msnm" % Hmed)
610 else:
611     self.log_output("Error: No hay datos válidos después de la limpieza.")
612 else:
613     self.log_output("Error: Las columnas necesarias ('Cota media (m)' y 'Area (Km )') no están en la tabla.")
614 except Exception as e:
615     self.log_output("Error al procesar el archivo: {}".format(e))
616 else:
617     self.log_output("Error: El archivo {} no se encuentra en la ruta especificada.".format(excel_file))
618     self.log_output("Calcular atributos geométricos rea y Per metro...")
619     main_length = float(total_length_km)
620     arcpy.AddGeometryAttributes_management(
621         watershed_polygon,
622         "AREA_GEODESIC;PERIMETER_LENGTH",
623         "KILOMETERS",
624         "SQUARE_KILOMETERS"
625     )
626     self.log_output("Leer el rea y el per metro del shapefile...")
627     fields = ["AREA_GEO", "PERIMETER"]
628     area, perimeter = None, None
629     with arcpy.da.SearchCursor(watershed_polygon, fields) as cursor:
630         for row in cursor:
631             area = row[0] # rea en km
632             perimeter = row[1] # Per metro en km
633             self.log_output("Validar que se obtuvieron valores válidos...")
634             if area is None or perimeter is None:
635                 raise ValueError("No se pudieron calcular el rea o el per metro. Verifica los datos del shapefile.")
636             self.log_output("Cálculos de los parámetros fisiográficos...")
637             width = area / main_length # Ancho promedio
638             factor_forma = area / (main_length ** 2) # Factor de forma
639             gravelius = 0.282 * perimeter / (area ** 0.5) # índice de Gravelius
640             term = math.sqrt((perimeter ** 2) / 16.0 - area)
641             Lado_mayor = perimeter / 4.0 + term # lado mayor del rectángulo equivalente
642             Lado_menor = perimeter / 4.0 - term # lado menor del rectángulo equivalente
643             densidad_drenaje = suma_longitudes / area # densidad de drenaje
644             Es = area / (4 * suma_longitudes) # Extensión media de escurrimiento superficial
645             frecuencia_rios = float(count_rivers) / area # frecuencia de rios
646             coef_torr = count_filtered_rivers / area # coeficiente de torrencialidad
647             Altitud_max = end_cota # altitud máxima del cauce principal
648             Altitud_min = start_cota # altitud mínima del cauce principal
649             lc = (Altitud_max - Altitud_min) / (10 * total_length_km) # pendiente

```

```

media del cauce principal
650 altitud_media = Hmed # altitud media de la cuenca
651 Cm = altitud_media / area # coeficiente de masividad
652 Re = 1.128 * (area ** 0.5) / main_length # relacion de elongacion
653 pm = mean_value # pendiente media de la cuenca
654 self.log_output("Crear un DataFrame con los resultados...")
655 parametros = {
656     "Par metro": [
657         " rea ", "Per metro", "Longitud Principal", "Ancho Promedio", "Factor
de Forma",
658         " ndice de Gravelius",
659         "Lado mayor rectangulo equivalente", "Lado menor rectangulo
equivalente", "densidad de drenaje",
660         "Extensi n media de escurrimiento superficial", "frecuencia de rios",
661         "coeficiente de torrencialidad",
662         "altitud maxima del cauce principal", "altitud minima del cauce
principal",
663         "pendiente media del cauce principal",
664         "altitud media de la cuenca", "coeficiente de masividad", "relacion de
elongacion",
665         "pendiente media de la cuenca"
666     ],
667     "Valor": [area, perimeter, main_length, width, factor_forma, gravelius
, Lado_mayor, Lado_menor,
668         desidad_drenaje, Es,
669         frecuencia_rios, coef_torr, Altitud_max, Altitud_min, lc,
altitud_media, Cm, Re, pm],
670     "Unidad": [" km ", "km", "km", "km", "sin unidad", "sin unidad", "km",
"km", "km/km ", " km /Km",
671         "r os/km ", "r os/km ",
672         "msnm", "msnm", "%", "msnm", "m/km ", "sin unidad", "%"]
673 }
674 df = pd.DataFrame(parametros)
675 output_excel = "par metros.xlsx"
676 df.to_excel(output_excel, index=False)
677 self.log_output("Par metros fisiogr ficos calculados y guardados en: {
output_excel}")
678 self.log_output("Limpiando archivos temporales...")
679 temp_files = [
680     "point_raster.tif", "snap_pour.tif",
681     "zonal_stats.dbf", "slope_stats.dbf", "area_by_elevation.dbf"
682 ]
683 for temp_file in temp_files:
684     self.safe_delete(temp_file)
685     arcpy.Delete_management("in_memory")
686     gc.collect()
687 self.log_output("Proceso completado exitosamente!")
688 self.log_output("Tiempo total: {}".format(time.strftime("%H:%M:%S")))
689 self.message_queue.put(('finished', None))
690 except Exception as e:
691     import traceback
692     error_msg = "Error en an lisis: {}\nDetalle: {}".format(str(e), traceback

```

```

        .format_exc())
693 self.log_output(error_msg)
694 self.message_queue.put(('error', str(e)))
695 finally:
696     try:
697         arcpy.CheckInExtension("Spatial")
698         arcpy.CheckInExtension("3D")
699     except:
700         pass
701     try:
702         arcpy.Delete_management("in_memory")
703         gc.collect()
704     except:
705         pass
706 if __name__ == "__main__":
707     root = tk.Tk()
708     app = HydrologicalAnalysisGUI(root)
709     root.mainloop()

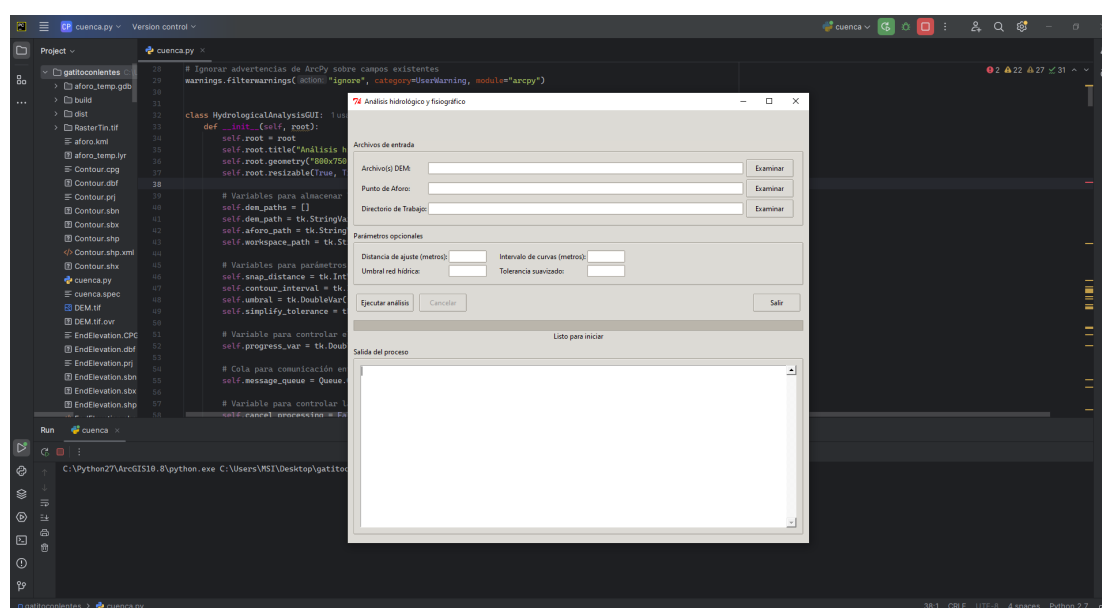
```

3.9.1.4. Interfaz gráfica del programa desarrollado

En esta sección se presenta la interfaz gráfica desarrollada en Python para la delimitación automática de cuencas hidrográficas, diseñada para ofrecer un entorno intuitivo que permite ejecutar todo el proceso de análisis y cálculo de parámetros fisiográficos sin requerir conocimientos avanzados en programación.

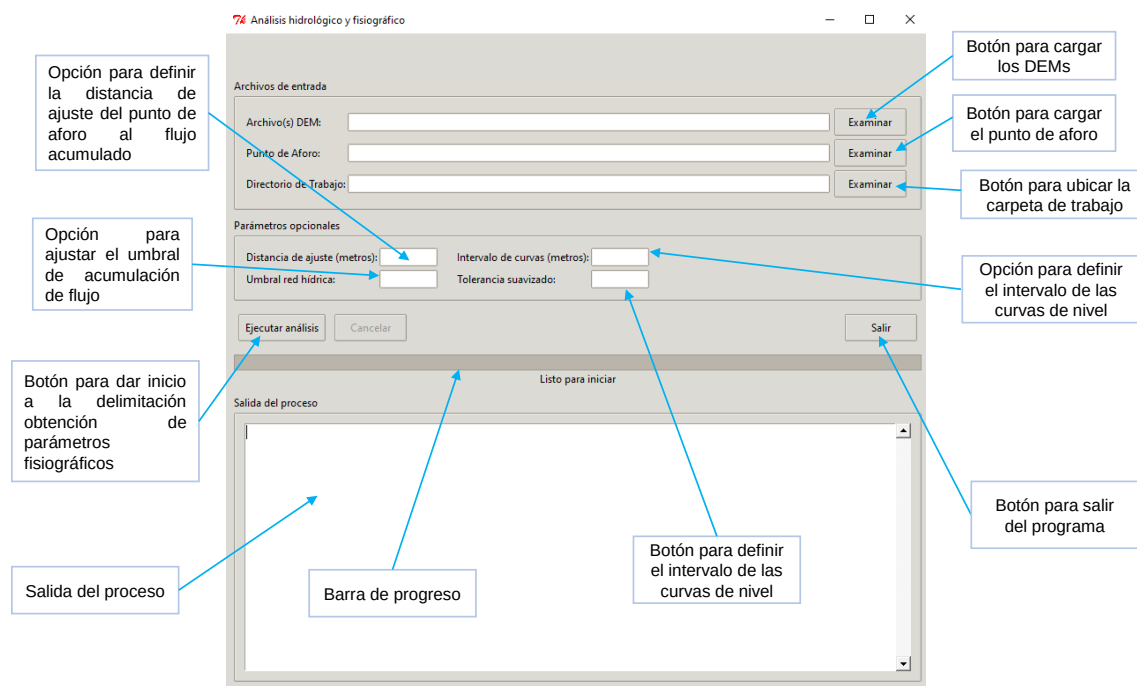
Figura 3.1

Interfaz gráfica desarrollado



Nota: Elaboración propia mediante Python.

Figura 3.2
Funcionamiento de la interfaz gráfica del programa



Nota: Elaboración propia mediante Python.

3.9.1.5. Delimitación y obtención de parámetros fisiográficos

En esta sección de la tesis se llevó a cabo la delimitación de la cuenca hidrográfica Pampas utilizando el programa desarrollado específicamente para este fin. Para ello, se descargó el modelo de elevación digital *ASTER GDEM* con una resolución espacial de 30 metros, lo que permite un equilibrio adecuado entre el detalle topográfico y la eficiencia en el procesamiento de datos. A continuación, los modelos de elevación digital fueron cargados en el programa, el cual realiza de manera automatizada la delimitación de la cuenca y el cálculo de los principales parámetros fisiográficos, tales como el área de la cuenca, la longitud del cauce principal, la pendiente promedio y la densidad de drenaje, entre otros.

Los resultados obtenidos se exportan en formatos compatibles con software SIG, como ArcGIS, así como en archivos de extensión .xls, lo que facilita su análisis, manipulación y comparación con datos de referencia. Esta automatización permite optimizar significativamente el proceso de análisis hidrológico y fisiográfico, reduciendo el tiempo requerido y minimizando posibles errores asociados a procedimientos manuales.

Cabe destacar que los resultados obtenidos mediante el programa desarrollado fueron contrastados con los registros oficiales de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) (2021), encontrando una correspondencia significativa en los principales parámetros fisiográficos de la cuenca Pampas. Esto evidencia la confiabilidad y aplicabilidad del software como herramienta para la automatización del análisis hidrológico y fisiográfico de cuencas, ofreciendo una alternativa eficiente frente a los métodos tradicionales que requieren procesos manuales más laboriosos y propensos a errores.

Modelos de elevación digital utilizados:

Los modelos de elevación digital utilizados corresponde al *ASTER GDEM*, el cual posee una resolución espacial aproximada de 30m, equivalente a un arco-segundo ($\approx 0,00027778^\circ$). Este modelo ofrece cobertura geográfica global, integrando datos procedentes de *NASADEM* y *ASTER*. El sistema de coordenadas empleado es *WGS84*, en formato geográfico (grados decimales), y su formato de archivo es el *GeoTIFF*, ampliamente compatible con los principales software SIG. El tipo de dato corresponde a enteros de 16 bits (*Int16*), con un rango de elevaciones que varía entre -32768 y $+32767m$. Los valores no válidos (*NoData*) se representan mediante el código -32768 . La fuente principal de información es el Radar *SRTM*, que proporciona una base confiable para la generación del modelo. En cuanto a su precisión, el *ASTER GDEM* presenta una exactitud vertical estimada entre 5 y 10m, y una precisión horizontal aproximada de 20 a 30m, lo que lo convierte en una herramienta adecuada para estudios hidrológicos.

Figura 3.3

Modelos de elevación digital utilizados

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
ASTGTM_S13W074_dem.rar	17/09/2025 10:00	Archivo WinRAR	7,123 KB
ASTGTM_S13W074_dem.tif	1/11/2008 22:15	Archivo TIF	25,356 KB
ASTGTM_S13W075_dem.rar	17/09/2025 10:00	Archivo WinRAR	6,696 KB
ASTGTM_S13W075_dem.tif	1/11/2008 21:12	Archivo TIF	25,356 KB
ASTGTM_S13W076_dem.rar	17/09/2025 09:59	Archivo WinRAR	5,445 KB
ASTGTM_S13W076_dem.tif	1/11/2008 22:30	Archivo TIF	25,356 KB
ASTGTM_S14W073_dem.rar	17/09/2025 10:01	Archivo WinRAR	6,332 KB
ASTGTM_S14W073_dem.tif	2/11/2008 00:08	Archivo TIF	25,356 KB
ASTGTM_S14W074_dem.rar	17/09/2025 10:01	Archivo WinRAR	6,465 KB
ASTGTM_S14W074_dem.tif	2/11/2008 00:41	Archivo TIF	25,356 KB
ASTGTM_S14W075_dem.rar	17/09/2025 10:00	Archivo WinRAR	5,253 KB
ASTGTM_S14W075_dem.tif	2/11/2008 03:11	Archivo TIF	25,356 KB
ASTGTM_S14W076_dem.rar	17/09/2025 10:07	Archivo WinRAR	5,543 KB
ASTGTM_S14W076_dem.tif	1/11/2008 16:21	Archivo TIF	25,356 KB
ASTGTM_S15W073_dem.rar	17/09/2025 10:02	Archivo WinRAR	5,250 KB
ASTGTM_S15W073_dem.tif	1/11/2008 19:17	Archivo TIF	25,356 KB
ASTGTM_S15W074_dem.rar	17/09/2025 10:02	Archivo WinRAR	4,975 KB
ASTGTM_S15W074_dem.tif	2/11/2008 02:07	Archivo TIF	25,356 KB
ASTGTM_S15W075_dem.rar	17/09/2025 10:02	Archivo WinRAR	5,034 KB
ASTGTM_S15W075_dem.tif	2/11/2008 04:47	Archivo TIF	25,356 KB
ASTGTM_S16W073_dem.rar	17/09/2025 10:03	Archivo WinRAR	5,234 KB
ASTGTM_S16W073_dem.tif	30/10/2008 09:32	Archivo TIF	25,356 KB
ASTGTM_S16W074_dem.rar	17/09/2025 10:03	Archivo WinRAR	5,152 KB
ASTGTM_S16W074_dem.tif	30/10/2008 09:33	Archivo TIF	25,356 KB
ASTGTM_S16W075_dem.rar	17/09/2025 10:02	Archivo WinRAR	4,326 KB
ASTGTM_S16W075_dem.tif	30/10/2008 09:33	Archivo TIF	25,356 KB

Nota: Los modelos de elevacion digital se obtuvieron de (GEO GPS Perú, 2018).

Proceso de delimitación automática de la cuenca hidrográfica Pampas:

Para la delimitación automática de la cuenca Pampas mediante el programa desarrollado, se inicia cargando los modelos de elevación digital de la zona de estudio mediante el botón **Examinar**. En total se emplearon trece modelos, correspondientes a la cuenca hidrográfica Pampas. Luego, se ubica el punto de aforo en *Google Earth*, se guarda en formato *Keyhole Markup Language* y se carga al programa; también es posible utilizar un archivo *shapelfile* del mismo punto. Finalmente, se selecciona la carpeta de trabajo donde se guardarán los resultados.

En cuanto a los parámetros opcionales, se definen la distancia de ajuste y el radio de búsqueda del punto de aforo, el umbral de acumulación de flujo, el intervalo entre curvas de nivel y la tolerancia de suavizado del contorno de la cuenca hidrográfica. Con todos los valores configurados, se presiona el botón **Ejecutar análisis** para iniciar el proceso.

Figura 3.4

Parámetros de entrada principales al programa.

74 Análisis hidrológico y fisiográfico

Archivos de entrada

Archivo(s) DEM:

Punto de Aforo:

Directorio de Trabajo:

Parámetros opcionales

Distancia de ajuste (metros): Intervalo de curvas (metros):

Umbral red hídrica: Tolerancia suavizado:

Listo para iniciar

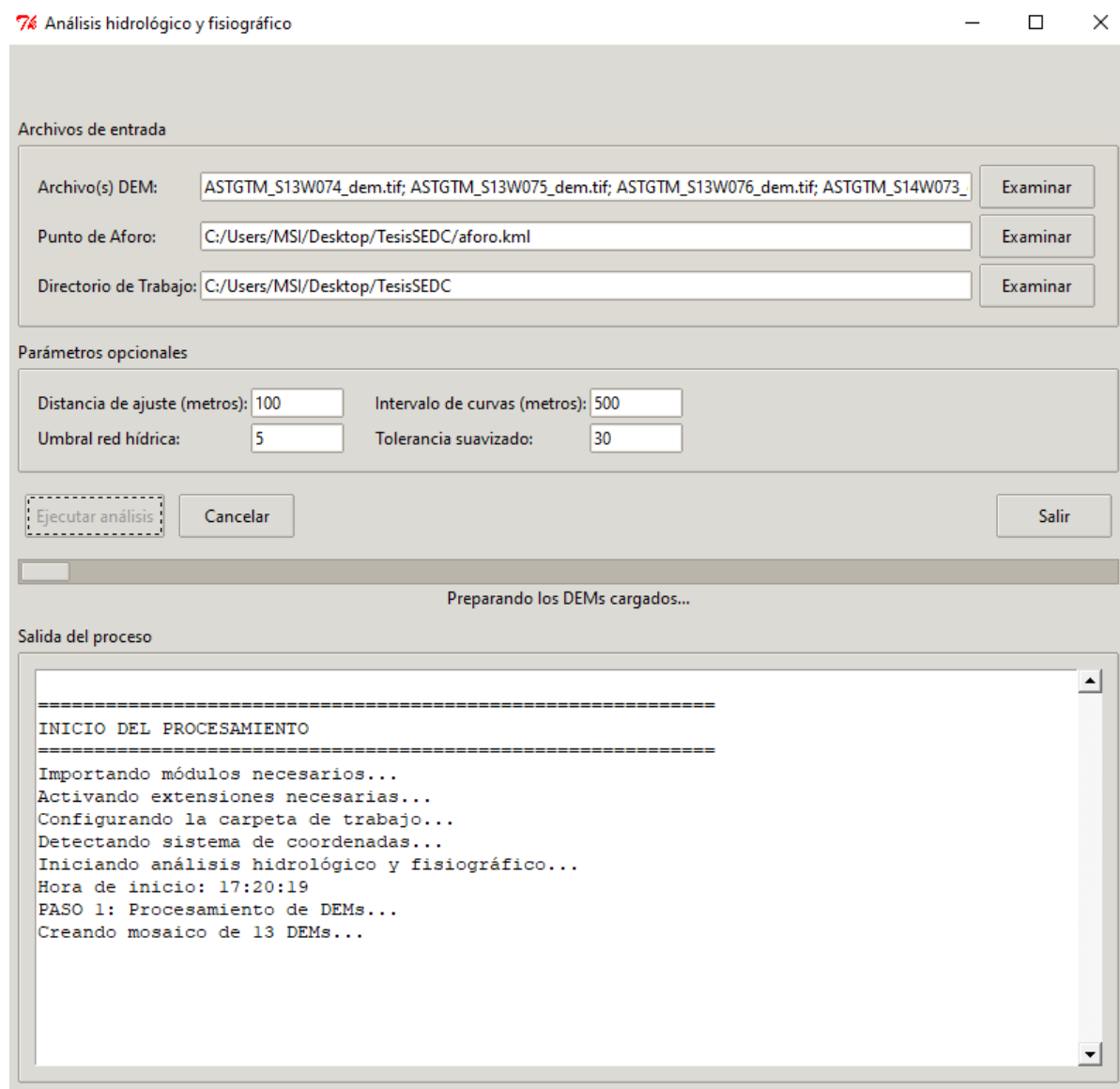
Salida del proceso

Nota. Elaboración propia mediante Python.

Al presionar el botón **Ejecutar análisis**, se da inicio al proceso de delimitación automática de la cuenca Pampas. El programa comienza importando las librerías y módulos de **Python** necesarios, activando las extensiones y dependencias que permiten su correcto funcionamiento, Luego de ello realiza la unión de los trece modelos de elevación digital, re proyecta a coordenadas **UTM** y rellena las depresiones del modelo para obtener una superficie continua. A partir de este modelo, calcula la dirección de flujo y la acumulación de flujo, procesos esenciales para definir la red de drenaje y posteriormente, el programa ajusta el punto de aforo al flujo acumulado más cercano y procede con la delimitación automática de la cuenca hidrográfica Pampas, generando su polígono correspondiente. Finalmente, a partir de esta delimitación, calcula los parámetros fisiográficos, entre ellos los morfométricos, de drenaje, hidrológicos y de relieve, que permiten una caracterización integral de la cuenca hidrográfica Pampas.

Figura 3.5

Proceso de delimitación automática en el programa.

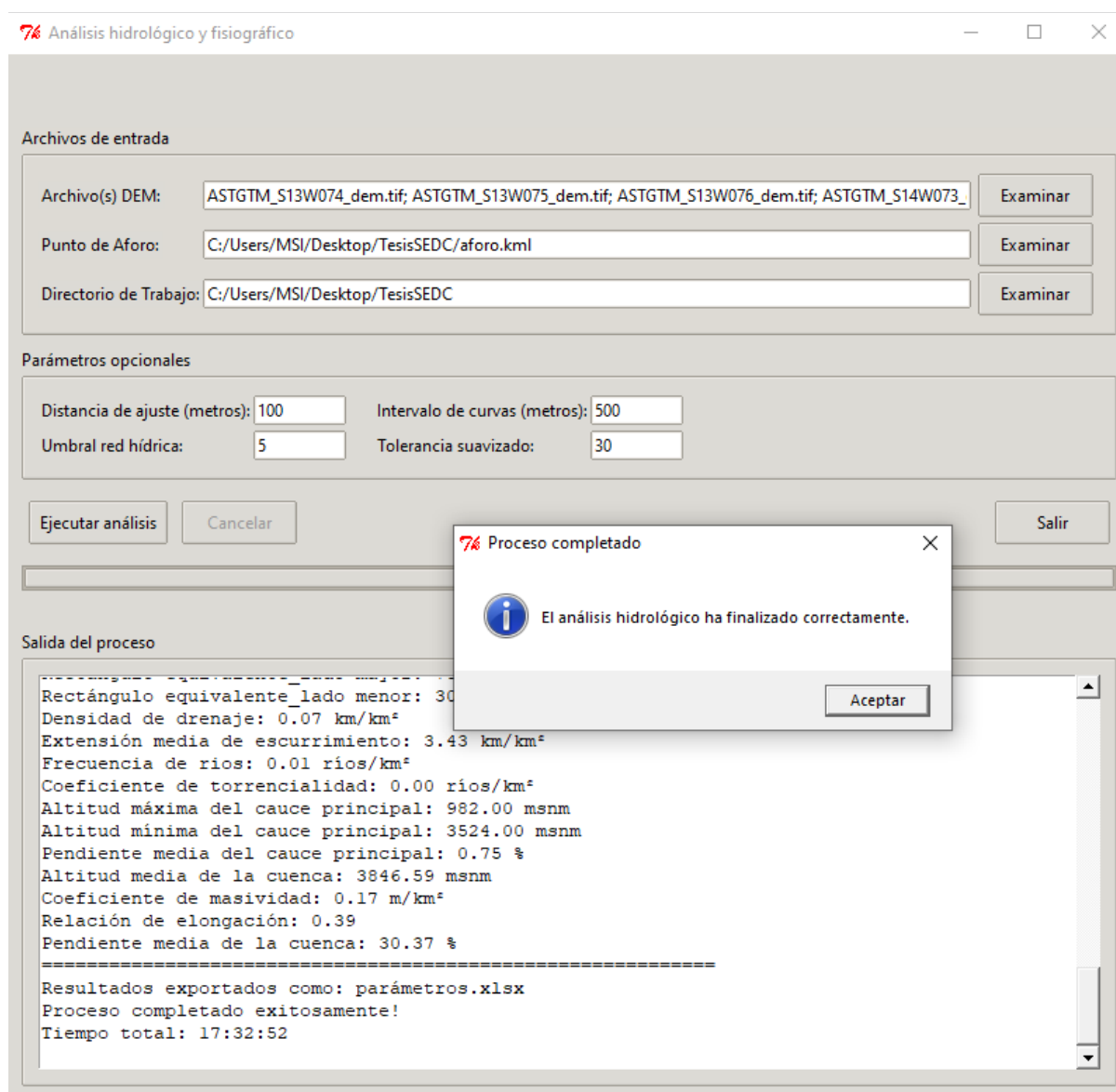


Nota: Elaboración propia mediante Python.

El programa muestra en pantalla los resultados obtenidos en cada etapa del proceso. Una vez completada la delimitación de la cuenca hidrográfica Pampas, se presentan de manera ordenada los principales parámetros fisiográficos. En primer lugar, se visualizan las longitudes totales de los ríos clasificados por orden de jerarquía, seguidas de la longitud total de la red de drenaje, la longitud del cauce principal y las coordenadas de inicio y fin del cauce. Luego parámetros como la altitud media, la curva hipsométrica, el área, el perímetro, el ancho promedio, el factor de forma, el índice de compacidad, el rectángulo equivalente, la densidad de drenaje, la extensión media de escurrimiento, la frecuencia de ríos, el coeficiente de torrencialidad, la pendiente del cauce principal, el coeficiente de masividad, la relación de elongación y la pendiente media de la cuenca. Finalmente, todos los resultados son exportados automáticamente a un archivo en formato Excel, lo que facilita su análisis, interpretación y documentación técnica.

Figura 3.6

Proceso de delimitación finalizado con el programa.



Nota: Elaboración propia mediante Python.

Resultados del proceso de delimitación de la cuenca hidrográfica Pampas

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del proceso de delimitación de la cuenca hidrográfica Pampas, producto del análisis automatizado desarrollado en el programa Python.

```
=====
INICIO DEL PROCESAMIENTO
=====

Importando módulos necesarios...
Activando extensiones necesarias...
Configurando la carpeta de trabajo...
Detectando sistema de coordenadas...
Iniciando análisis hidrológico y fisiográfico...
Hora de inicio: 17:20:19
PASO 1: Procesamiento de DEMs...
Creando mosaico de 13 DEMs...
PASO 2: Preparando punto de aforo...
Convirtiendo KML a shapefile...
Buscar el feature class de puntos...
PASO 3: Inicia la delimitación de la cuenca...
Corrigiendo sumideros de DEMs...
Calculando dirección de flujo...
Calculando acumulación de flujo...
Campo POUR_VAL agregado al punto de aforo
Ajustando punto de aforo al flujo acumulado...
Delimitando la cuenca hidrográfica...
Extrayendo mediante mascara watershed al DEMs...
Extrayendo mediante mascara watershed a la dirección de flujo...
Extrayendo mediante mascara watershed a la acumulación de flujo...
Convirtiendo watershed a polígono...
Obteniendo curvas de nivel de la cuenca...
Calculando la red hídrica con el umbral definido...
Convirtiendo red hídrica a shapefile...
Calculando el Stream Link de la red...
Calculando el stream order de la red...
Convirtiendo stream order a feature class...
Calculando pendiente de la cuenca...

=====
CÁLCULO DE PARÁMETROS FISIográficos
=====

Longitudes totales de rios por orden....
Orden 1: 781.32 km
Orden 2: 325.88 km
Orden 3: 257.44 km
Orden 4: 332.36 km
Suma total de longitudes de rios: 1697.01 km
La longitud del cauce principal es: 438.943054199 km
```

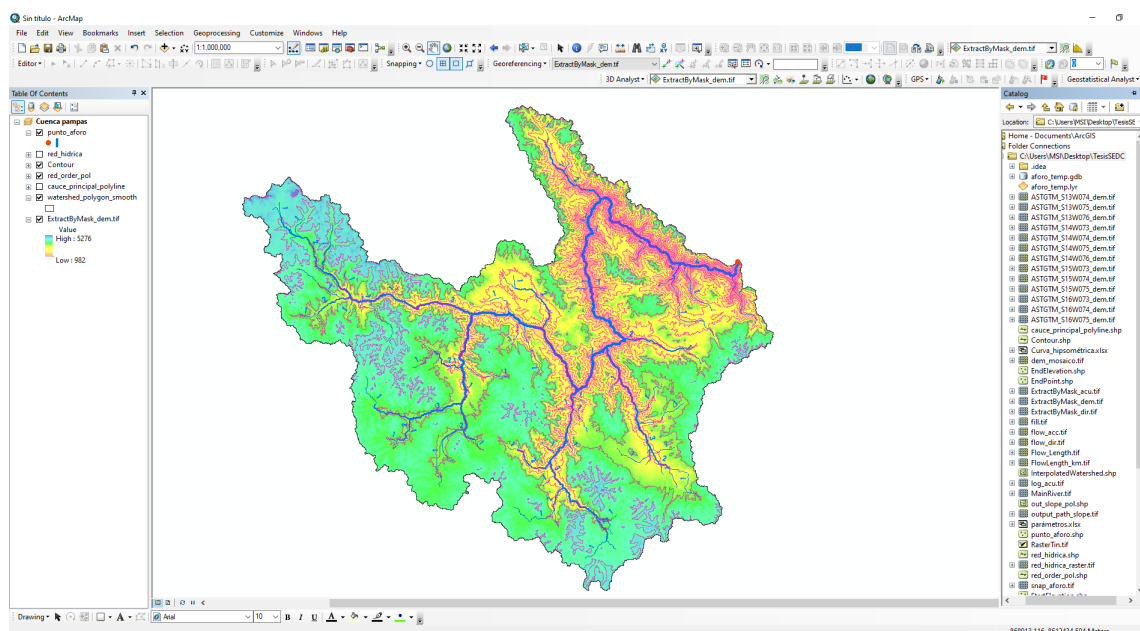
```
Coordenadas del punto de inicio y final del cauce principal...
Punto inicial : E=571507.122058, N=8453098.03748
Punto final : E=693455.957323, N=8515707.60867
Cota punto inicial (nacimiento): 3524.0 msnm
Cota punto final (desembocadura): 982.0 msnm
Calculando estadísticas zonales....
Preparando los resultados de la curva hipsométrica para exportar...
Resultados exportados como: Curva_hipsométrica.xlsx
Altitud media de la cuenca (Hmed): 3846.59 msnm
Area: 23259.78 km2
Perimetro: 1571.15 km
Ancho promedio: 52.99 km
Factor de forma: 0.12
Indice de compacidad: 2.91
Rectángulo equivalente_lado mayor: 754.76 km
Rectángulo equivalente_lado menor: 30.82 km
Densidad de drenaje: 0.07 km/km2
Extensión media de escurrimiento: 3.43 km/km2
Frecuencia de rios: 0.01 ríos/km2
Coeficiente de torrencialidad: 0.00 ríos/km2
Altitud máxima del cauce principal: 982.00 msnm
Altitud mínima del cauce principal: 3524.00 msnm
Pendiente media del cauce principal: 0.75 %
Altitud media de la cuenca: 3846.59 msnm
Coeficiente de masividad: 0.17 m/km2
Relación de elongación: 0.39
Pendiente media de la cuenca: 30.37 %
=====
Resultados exportados como: parámetros.xlsx
Proceso completado exitosamente!
Tiempo total: 17:32:52
```

También se muestran los resultados visuales obtenidos del proceso de delimitación automática de la cuenca hidrográfica Pampas las cuales se representan en el entorno ArcGIS, dado que el programa desarrollado se ejecuta directamente sobre el intérprete de Python integrado en ArcGIS. Esta integración asegura una comunicación eficiente con las herramientas geoespaciales del software, permitiendo la correcta lectura, procesamiento y visualización de los datos raster y vectoriales involucrados.

De esta manera, se garantiza que los resultados generados tales como la red de drenaje, el área de la cuenca, las curvas de nivel y los parámetros morfométricos derivados de ellos sean precisos y consistentes con la topografía real del terreno.

Figura 3.7

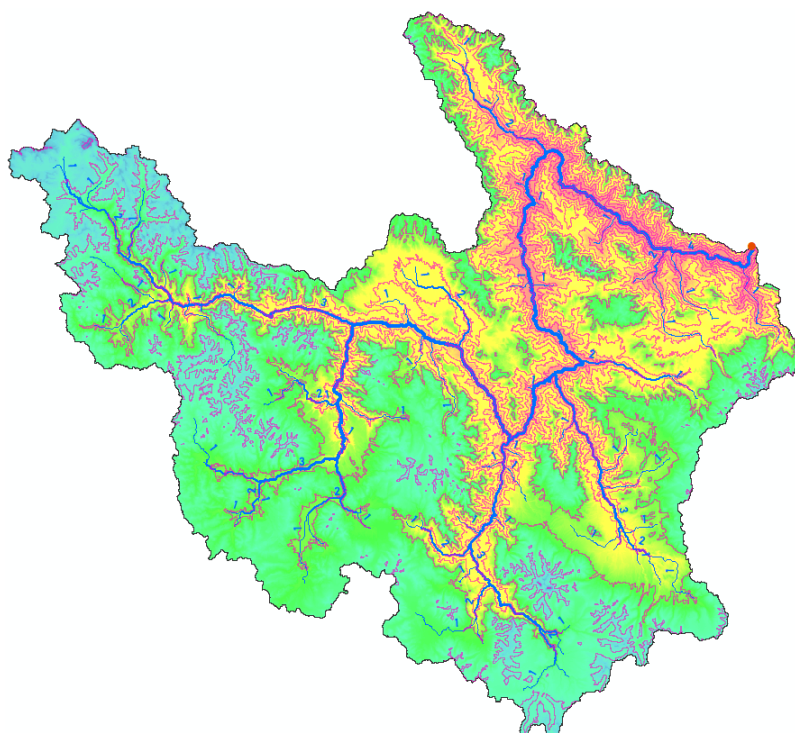
Visualización de la cuenca hidrográfica Pampas delimitada en ArcGIS.



Nota: Elaboración propia mediante Python.

Figura 3.8

Visualización de la cuenca hidrográfica Pampas delimitada.



Nota: Elaboración propia mediante Python.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Análisis de resultados y contrastación de hipótesis

En esta parte de la investigación se procede al análisis e interpretación de los resultados obtenidos, así como a la contrastación de las hipótesis planteadas al inicio del estudio, con el propósito de verificar su validez y evaluar el grado de cumplimiento de los objetivos propuestos.

4.1.1. Primera hipótesis específica

La selección adecuada de los algoritmos y técnicas computacionales para la implementación de una metodología automatizada en `Python` para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos, produce resultados consistentes y confiables.

4.1.2. Contrastación de la primera hipótesis específica

- **Selección de algoritmos y técnicas computacionales**

La selección de algoritmos y técnicas computacionales constituye un aspecto fundamental para garantizar la consistencia y confiabilidad de los resultados obtenidos en la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos. En la presente investigación, se optó por el uso de algoritmos implementados en el módulo `ArcPy` de `ArcGIS`, los cuales han sido ampliamente validados en la literatura científica y en estudios hidrológicos a nivel internacional. Esta elección permite que el programa automatizado desarrollado en `Python` mantenga equivalencia con metodologías reconocidas en geoprocetamiento y análisis hidrológico.

A continuación, se detallan los principales procesos involucrados, que tienen validez implícita:

1. **Delimitación de la cuenca hidrográfica**

Para el proceso de delimitación automática de cuencas se basa en una secuencia lógica de operaciones hidrológicas realizadas sobre el modelo digital de elevación. El script implementado hace uso de las herramientas `Mosaic To New Raster`, `Fill`, `Flow Direction`, `Flow Accumulation`, `Snap Pour Point` y `Watershed`, pertenecientes al entorno de `ArcPy` de `ArcGIS`.

Donde cada una de estas herramientas cumple una función específica dentro de la metodología desarrollada:

- **Mosaic To New Raster:** Se usa para la unión de modelos de elevación digital, cuando se trabaja con varios modelos.
- **Fill:** Se usa para corregir las depresiones del modelo de elevación digital, garantizando la continuidad del flujo superficial.
- **Flow Direction:** Se usa para determinar la dirección del flujo en cada celda de acuerdo al gradiente topográfico.

- **Flow Accumulation:** Se usa para cuantificar la cantidad de flujo que converge en cada celda, identificando zonas de concentración de escorrentía.
- **Snap Pour Point:** Se usa para ajustar el punto de aforo de la cuenca al píxel de mayor acumulación de flujo, evitando errores de localización.
- **Watershed:** Se usa para generar el polígono delimitado de la cuenca a partir del punto de aforo corregido.

2. Obtención de la red hídrica y parámetros hidrológicos

Una vez terminada la delimitación de la cuenca, se procede a la extracción y clasificación de la red de drenaje utilizando las funciones **Stream Network** y **Stream Order**, herramientas ampliamente validadas por la comunidad científica internacional. Estas herramientas permiten generar una red hídrica estructurada de la cuenca, basada en umbrales de acumulación de flujo definidos en función de la resolución del modelo de elevación digital, el ordenamiento de los cauces de la cuenca se realiza mediante el método de **Strahler** que facilita la caracterización jerárquica del sistema fluvial, permitiendo calcular parámetros hidrológicos esenciales como:

- Longitud total del cauce principal y secundarios.
- Pendiente media de los cauces.
- Densidad de drenaje.
- Frecuencia de cauces.

3. Estimación de parámetros fisiográficos

La metodología implementada calcula un conjunto de métricas morfológicas e hidrológicas a través de formulas y métodos ampliamente validadas por la comunidad científica internacional, estos parametros describen cuantitativamente la forma, dimensiones y comportamiento de la cuenca. Entre los parámetros estimados destacan:

- **Área de la cuenca (A):** calculado directamente a partir del polígono delimitado, expresado en kilómetros cuadrados.
- **Perímetro de la cuenca (P):** longitud del contorno de la cuenca, obtenido a partir de su geometría vectorial.
- **Ancho medio de la cuenca (B_m):** relación entre el área y la longitud principal del cauce.
- **Factor de forma de la cuenca (F_f):** indicador de la tendencia de la cuenca a concentrar el escurrimiento, calculado como $F_f = A/L^2$.
- **Índice de compacidad de la cuenca (K_c):** parámetro que mide la similitud de la forma de la cuenca con un círculo, $K_c = 0,28 \times P/\sqrt{A}$.
- **Densidad de drenaje de la cuenca (D_d):** razón entre la longitud total de cauces y el área de la cuenca, expresada en km/km^2 .
- **Coefficiente de torrencialidad de la cuenca (C_t):** indicador del potencial de concentración rápida de escorrentía, calculado como la relación entre la pendiente media y la densidad de drenaje.

4. Técnicas computacionales implementadas

a) Programación orientada a objetos

Clase principal:

```
1         class HydrologicalAnalysisGUI:
2
```

Propósito: Para el estructuramiento del sistema en módulos y encapsular funcionalidades.

Métodos especializados:

```
1         def create_widgets(self)      # Construcción de
    interfaz
2         def run_analysis(self)        # Control de ejecución
3         def execute_analysis(self)    # Lógica de negocio
4         def safe_delete(self)        # Gestión de recursos
5
```

Propósito: Para la separación de responsabilidades y la reutilización del código.

b) Programación concurrente.

Hilos para procesamiento:

```
1         thread = threading.Thread(target=self.execute_analysis
    )
2         thread.daemon = True
3
```

Propósito: Para evitar bloqueo de la interfaz durante operaciones intensivas.

Cola de mensajes:

```
1         self.message_queue = Queue.Queue()
2         self.message_queue.put(('log', message))
3
```

Propósito: Para la comunicación segura entre hilos y prevención de condiciones de carrera.

Procesamiento asíncrono:

```
1         self.root.after(100, self.process_messages)
2
```

Propósito: Para la actualización en tiempo real y sin bloqueos.

c) Gestión de memoria y recursos

Limpieza explícita:

```
1         gc.collect()
2         arcpy.Delete_management("in_memory")
3
```

Propósito: Para prevenir fugas de memoria en procesos largos.

Context managers:

```
1         with arcpy.da.UpdateCursor() as cursor:
2
```

Propósito: Para la liberación automática de los recursos.

Eliminación segura:

```
1         def safe_delete(self, dataset):
2         if arcpy.Exists(dataset):
3             arcpy.Delete_management(dataset)
4
```

Propósito: Para la robustez ante archivos bloqueados.

d) Procesamiento espacial y geomática

Análisis hidrológico:

```
1         flow_dir = arcpy.sa.FlowDirection(fill_path)
2         watershed = arcpy.sa.Watershed(flow_dir, snap_pour)
3
```

Propósito: Para el modelado automático de cuencas y flujos.

Conversiones raster/vector:

```
1         arcpy.RasterToPolygon_conversion()
2         arcpy.RasterToPolyline_conversion()
3
```

Propósito: Para la transformación entre formatos para el análisis.

Análisis de terreno:

```
1         slope = arcpy.sa.Slope(dem, "PERCENT_RISE")
2         contours = arcpy.sa.Contour(dem, interval)
3
```

Propósito: Para el cálculo de pendientes y curvas de nivel.

e) Interfaz gráfica de usuario

Widgets Tkinter:

```
1         ttk.Entry(), ttk.Button(), ttk.Progressbar()
2
```

Propósito: Para una interfaz intuitiva para los usuarios no técnicos.

Gestión de estado:

```
1         self.run_button.config(state=tk.DISABLED)
2         self.cancel_button.config(state=tk.NORMAL)
3
```

Propósito: Para prevenir operaciones inválidas y dar feedback visual.

f) Manejo de archivos y formatos

Procesamiento multi-formato:

```
1         arcpy.KMLToLayer_conversion() # KML a Shapefile
2         arcpy.MosaicToNewRaster_management() # Mosaico DEMs
3
```

Propósito: Para la compatibilidad con diversas fuentes de datos.

Gestión de workspace:

```
1         arcpy.env.workspace = workspace
2         os.makedirs(workspace)
3
```

Propósito: Para la organización de archivos temporales y de resultados.

g) Análisis numérico y estadístico

Cálculos fisiográficos:

```
1         factor_forma = area / (main_length ** 2)
2         gravelius = 0.282 * perimeter / sqrt(area)
3
```

Propósito: Para la caracterización cuantitativa de las cuencas.

Estadísticas zonales:

```
1         arcpy.sa.ZonalStatisticsAsTable(watershed, "ID", dem,
2         table)
2
```

Propósito: Para la extracción de estadísticas por cada zona.

h) Exportación y generación de reportes

Exportación a excel:

```
1         df.to_excel("resultados.xlsx", index=False)
2
```

Propósito: Para los reportes estructurados de los resultados.

Logging detallado:

```
1         self.log_output("PASO 1: Procesamiento de DEMs...")
2
```

Propósito: Para la trazabilidad y documentación automática.

i) Control de errores y robustez

Manejo de Excepciones:

```
1         try:
2             # Operación riesgosa
3         except Exception as e:
4             self.log_output(f"Error: {e}")
5
```

Propósito: Para prevenir caídas y proveer información útil.

Validaciones:

```
1         if len(self.dem_paths) == 0:
2             messagebox.showerror("Error", "Seleccione archivos")
3
```

Propósito: Para guiar al usuario en entradas correctas.

j) Optimización de rendimiento

Procesamiento en memoria:

```
1         resampled_dem = r"in_memory\resampled_dem"  
2
```

Propósito: Para la velocidad en operaciones intermedias.

Configuración ArcGIS:

```
1         arcpy.env.parallelProcessingFactor = "0"  
2         arcpy.env.compression = "LZ77"  
3
```

Propósito: Para optimizar el uso de los recursos y el almacenamiento.

5. Consistencia y confiabilidad de los resultados

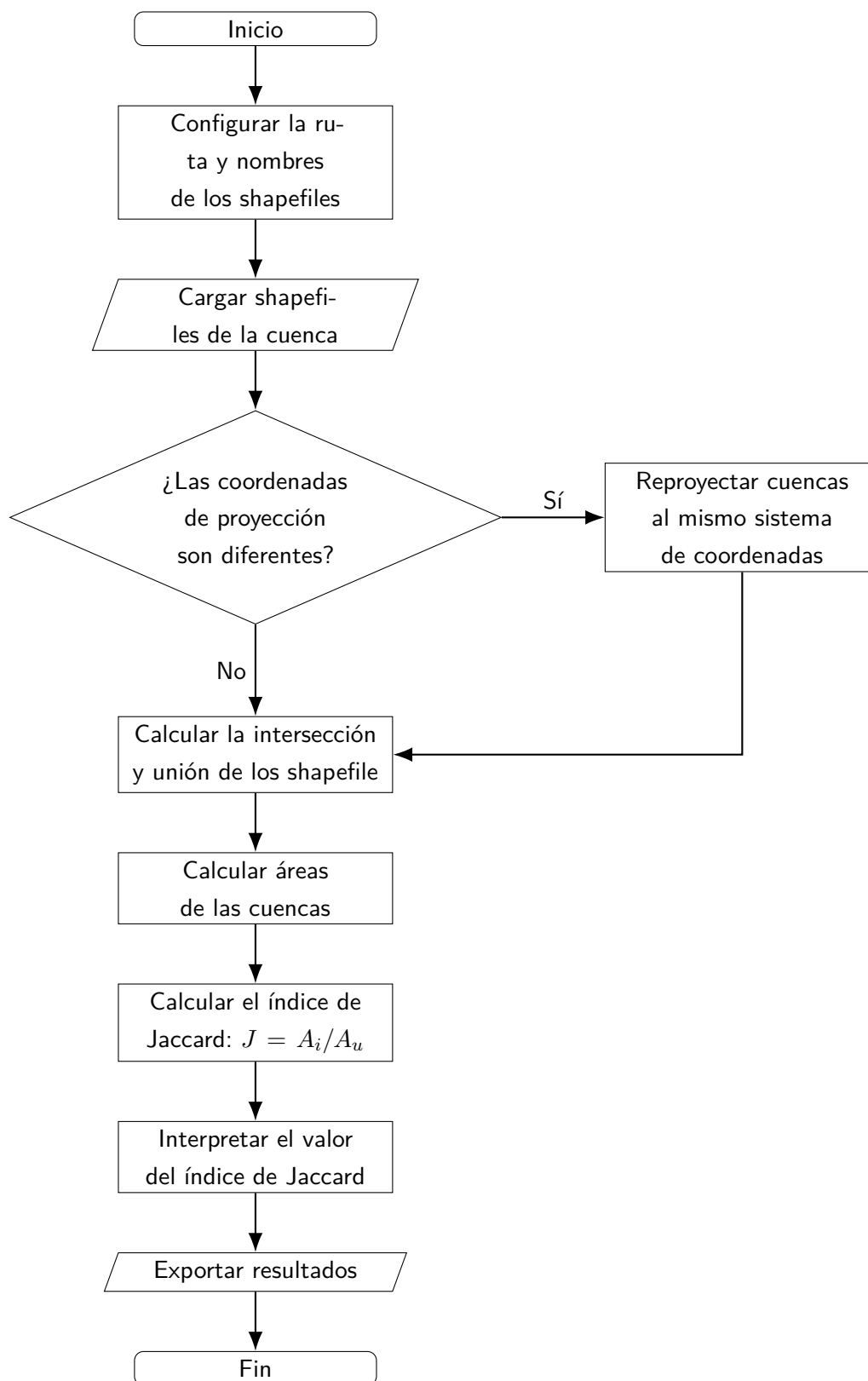
Para evaluar la consistencia y confiabilidad de los resultados obtenidos con la metodología automatizada desarrollado, se realizó una validación comparativa entre el polígono de cuenca obtenido mediante el programa desarrollado en el entorno Python y el shapefile oficial proporcionado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Esta comparación permite determinar el grado de similitud espacial entre ambas delimitaciones, para lo cual se calculó el **índice de Jaccard**, que cuantifica la proporción de superposición entre los dos polígonos respecto a su área total combinada. Un valor elevado de este índice indica una alta correspondencia espacial y, por tanto, una delimitación confiable.

Posterior a ello, se efectuó la **validación estadística** de los parámetros fisiográficos obtenidos (área, perímetro, pendiente media, densidad de drenaje, entre otros), comparando los valores calculados con el programa desarrollado con los datos oficiales publicados por la ANA. Esta verificación numérica permitió evaluar la concordancia entre ambos conjuntos de resultados mediante la diferencia relativa porcentual y el error cuadrático medio (**RMSE**), confirmando así la precisión y consistencia de la metodología implementada.

Cálculo del índice de similitud de jaccard: El cálculo realizó utilizando el lenguaje de programación Python, para lo cual se desarrolló un script del cual se muestra el diagrama de flujo que describe la secuencia lógica de operaciones realizadas. A través de este script, se obtuvo tanto resultados numéricos como resultados visuales, los cuales se muestran a continuación.

Figura 4.1

Diagrama de flujo del script para el cálculo del índice de Jaccard.

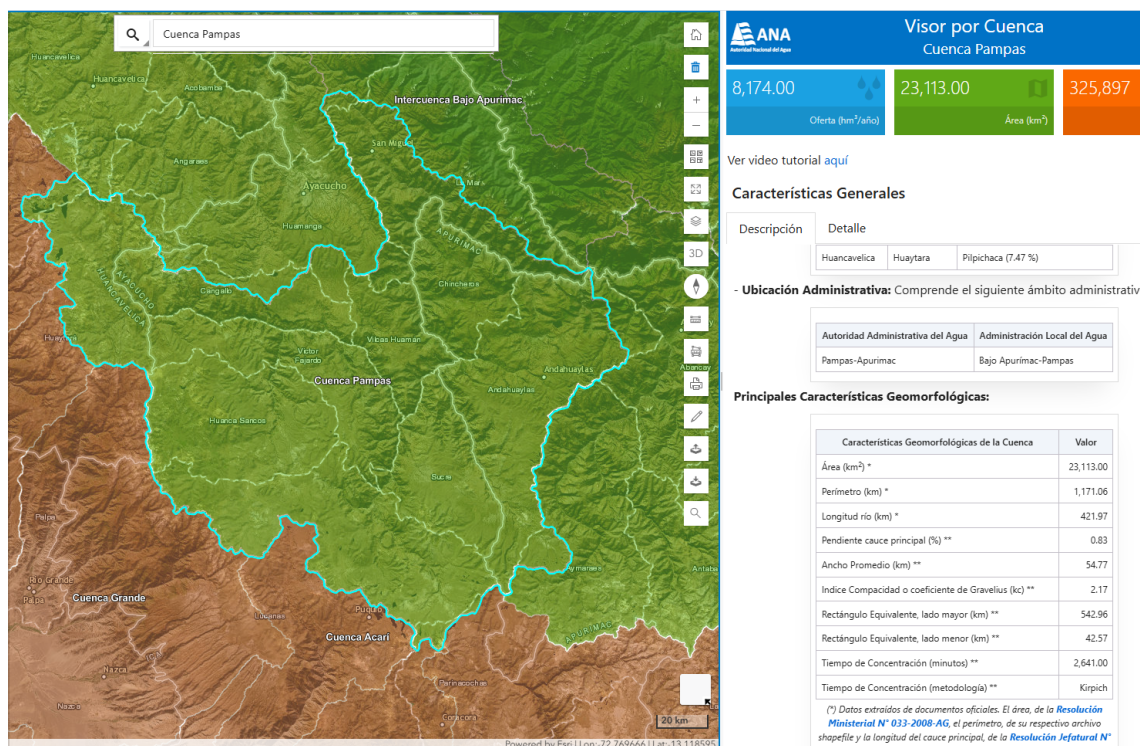


Nota: Elaboración propia mediante L^AT_EX.

Capítulo 4. Resultados

Figura 4.2

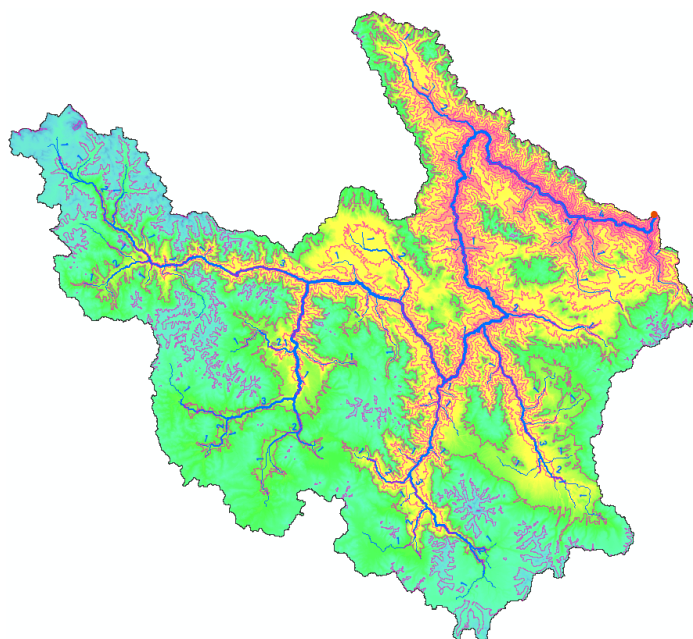
Cuenca Pampas delimitada por la Autoridad Nacional del Agua (ANA).



Nota: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2021).

Figura 4.3

Cuenca Pampas delimitada mediante el programa desarrollado.



Nota: Elaboración propia mediante Python.

```
Cargando shapefiles de la cuenca Pampas Python y cuenca Pampas ANA...

Sistema de coordenadas usado: EPSG:32718

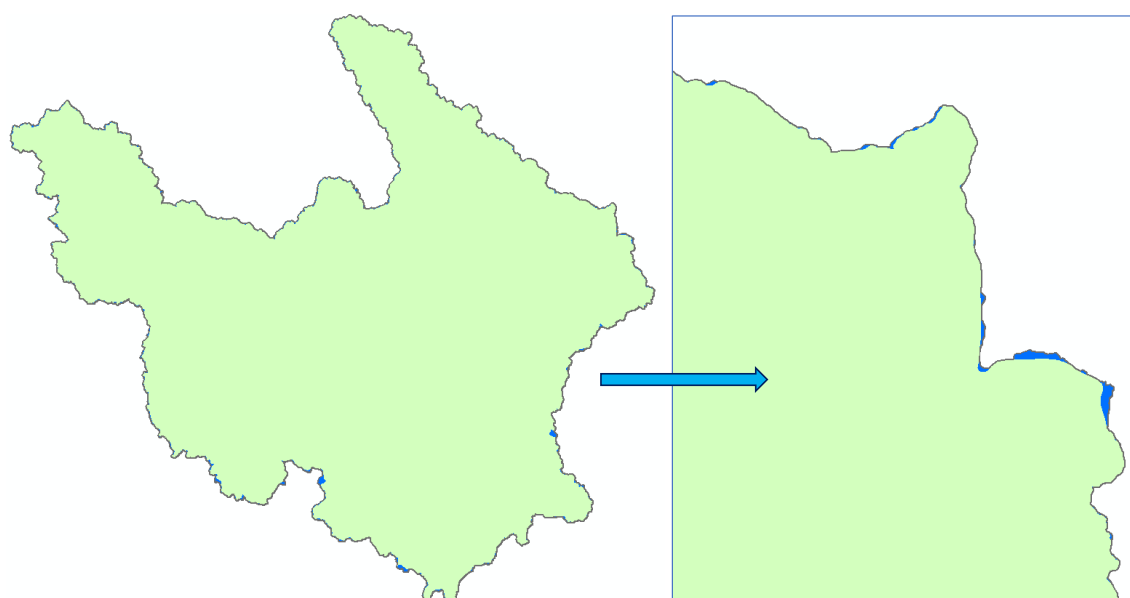
Calculando área de intersección y de unión de las cuencas...

RESULTADOS ESTADÍSTICOS
=====
Área cuenca Pampas Python:          23,236,369,261.48 m2
Área cuenca Pampas ANA:             23,248,850,885.56 m2
Área de intersección:                23,185,753,442.44 m2
Área de unión:                       23,299,466,704.60 m2
Índice de Jaccard (J):  0.9951
Similitud espacial:      99.51 %
=====

INTERPRETACIÓN: Similitud extremadamente alta o casi idéntica.
Guardando archivos de salida...
Archivos 'interseccion.shp' y 'union.shp' creados correctamente.
CONCLUSIÓN:
El índice de Jaccard obtenido (0.9951) indica que las cuencas comparten
aproximadamente el 99.51% de su superficie total, lo que demuestra un alto
grado de consistencia espacial entre ambas delimitaciones.
```

Figura 4.4

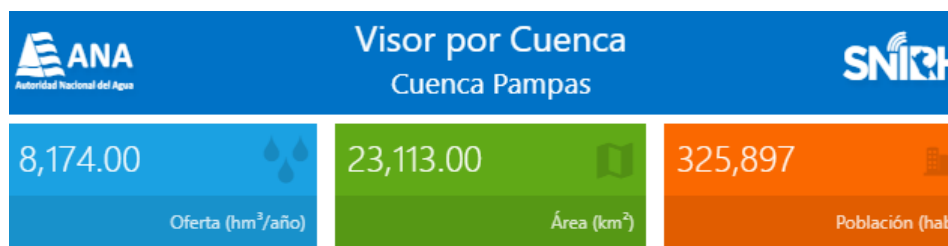
Resultado visual de la similitud de las delimitaciones y del porcentaje de error entre la delimitación de la cuenca con Python y la cuenca obtenido de la Autoridad Nacional del Agua.



Nota: Elaboración propia mediante Python.

Figura 4.5

Principales características geomorfológicas de la cuenca Pampas obtenido de la Autoridad Nacional del Agua (ANA).



Ver video tutorial [aquí](#)

Características Generales

Descripción	Detalle
	Huancavelica Huaytara Pilpichaca (7.47 %)

- **Ubicación Administrativa:** Comprende el siguiente ámbito administrativo:

Autoridad Administrativa del Agua	Administración Local del Agua
Pampas-Apurimac	Bajo Apurímac-Pampas

Principales Características Geomorfológicas:

Características Geomorfológicas de la Cuenca	Valor
Área (km²) *	23,113.00
Perímetro (km) *	1,171.06
Longitud río (km) *	421.97
Pendiente cauce principal (%) **	0.83
Ancho Promedio (km) **	54.77
Índice Compacidad o coeficiente de Gravelius (kc) **	2.17
Rectángulo Equivalente, lado mayor (km) **	542.96
Rectángulo Equivalente, lado menor (km) **	42.57
Tiempo de Concentración (minutos) **	2,641.00
Tiempo de Concentración (metodología) **	Kirpich

(*) Datos extraídos de documentos oficiales. El área, de la **Resolución Ministerial N° 033-2008-AG**, el perímetro, de su respectivo archivo shapefile y la longitud del cauce principal, de la **Resolución Jefatural N°**

Nota: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2021).

Cálculo del error absoluto y error porcentual: El cálculo realizó de manera manual, para lo cual se tomo los parámetros mas importante calculados y de acceso libre en la pagina web de la Autoridad Nacional del Agua de la cuenca Pampas. A través de este cálculo, se obtuvo resultados numéricos, los cuales se muestran a continuación.

Tabla 4.1

Cálculo de errores absolutos y relativos de los resultado obtenidos.

Parámetros	Unidad	Python	ANA	Ea	Er (%)
Área	km ²	23259.77	23113	146.77	0.64 %
Perímetro	km	1571.15	1171.06	400.09	34.17 %
Longitud del cause principal	km	438.94	421.97	16.97	4.02 %
Pendiente del cauce principal	%	0.75	0.83	0.07	9.29 %
Ancho promedio	km	52.99	54.77	1.77	3.25 %
Índice de Gravelius	adim.	2.90	2.17	0.73	33.88 %
Lado mayor rectángulo equivalente	km	754.75	542.96	211.79	39.01 %
Lado menor rectángulo equivalente	km	30.81	42.57	11.75	27.61 %
Tiempo de concentración	min.	2715.71	2641	74.71	2.83 %

Nota: Los errores relativos menores al 5 % como en el área, la longitud del cause principal, ancho promedio y tiempo de concentración indican alta coincidencia entre ambos métodos, pero los errores relativos mayores al 30 % como en el perímetro, índice de Gravelius y lados del rectángulo equivalente sugieren diferencias significativas entre ambos métodos, esto es debido a criterios distintos de delimitación.

4.1.3. Aceptación de la primera hipótesis específica

Los resultados obtenidos permiten aceptar la primera hipótesis específica, que establece que *la selección adecuada de los algoritmos y técnicas computacionales para la implementación de una metodología automatizada en Python para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos, produce resultados consistentes y confiables*, el índice de similitud de Jaccard alcanzó un valor de 0.9951, lo que representa una correspondencia espacial del 99.51 % entre ambas delimitaciones de la cuenca, evidenciando una coincidencia casi perfecta entre los polígonos generados. Asimismo, los errores relativos menores al 5 % en parámetros como el área, la longitud del cauce principal, el ancho promedio y el tiempo de concentración corroboran la precisión y consistencia de la metodología automatizada.

Las diferencias observadas en algunos parámetros geométricos como el perímetro y el índice de Gravelius se atribuyen a variaciones en los criterios de generalización geométrica y resolución espacial entre las fuentes analizadas, y no a deficiencias metodológicas del programa desarrollado. En consecuencia, se confirma la validez y confiabilidad del programa implementado, demostrando que la herramienta automatizada en Python constituye una alternativa eficiente y precisa frente a los métodos tradicionales empleados por la Autoridad Nacional del Agua para la delimitación de cuencas y la estimación de sus parámetros fisiográficos.

4.1.4. Segunda hipótesis específica

La metodología automatizada implementada en Python para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos, presenta una elevada eficiencia computacional.

4.1.5. Contrastación de la segunda hipótesis específica

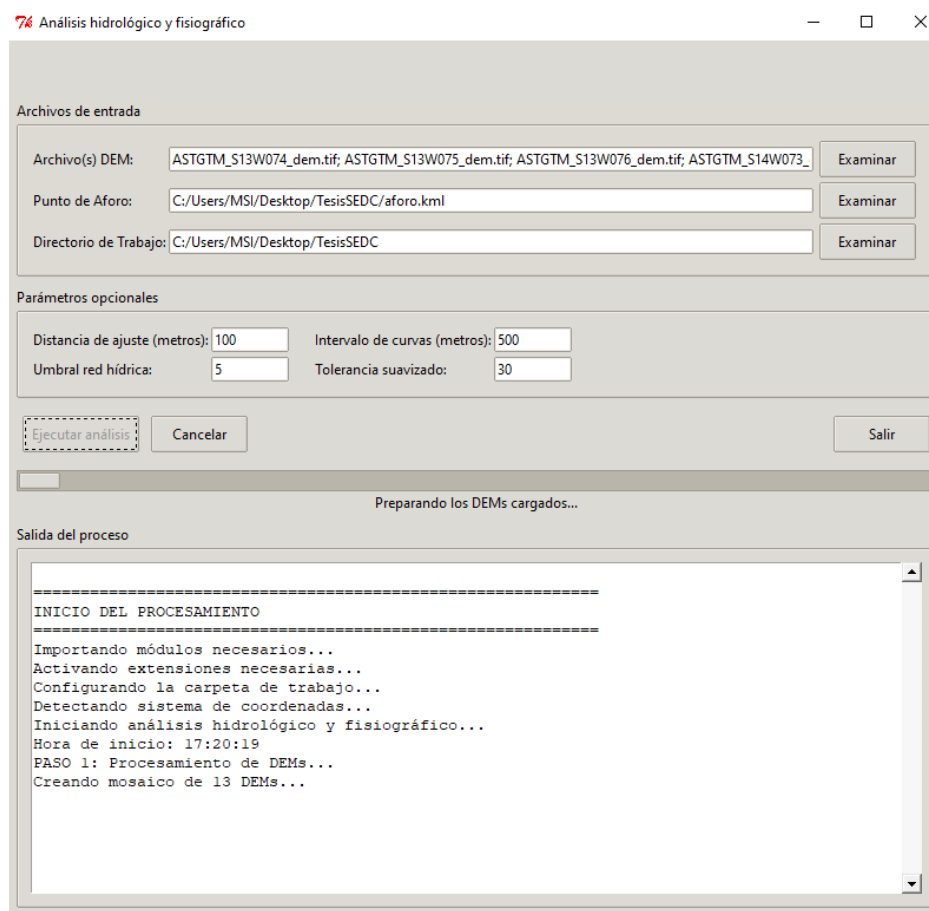
Durante la ejecución del script desarrollado, se observó un tiempo de procesamiento significativamente reducido en comparación con los procedimientos tradicionales-manuales basados en entornos GIS. El programa ejecuta de forma secuencial y automatizada los procesos de llenado de depresiones, generación del modelo de direcciones de flujo, acumulación de flujo, delimitación de la cuenca y cálculo de parámetros fisiográficos, sin requerir intervención manual.

En promedio, la delimitación completa de la cuenca y el cálculo de sus parámetros se realizaron en un tiempo inferior a 10 minutos, empleando un equipo con características estándar (**procesador Intel Core i7 y 32 GB de memoria RAM**). En contraste, los procedimientos manuales equivalentes en software GIS demandan entre 1 hora a más, dependiendo del tamaño del modelo digital de elevación, la resolución espacial utilizada y esta sujeta a errores manuales de cada usuario.

Estos resultados evidencian que la metodología propuesta optimiza el uso de los recursos computacionales, minimiza la interacción del usuario y garantiza la reproducibilidad del proceso. Además, la estructura modular del código permite su ejecución en múltiples cuencas con ligeras adaptaciones configuraciones iniciales, lo que refuerza su versatilidad y escalabilidad.

Figura 4.6

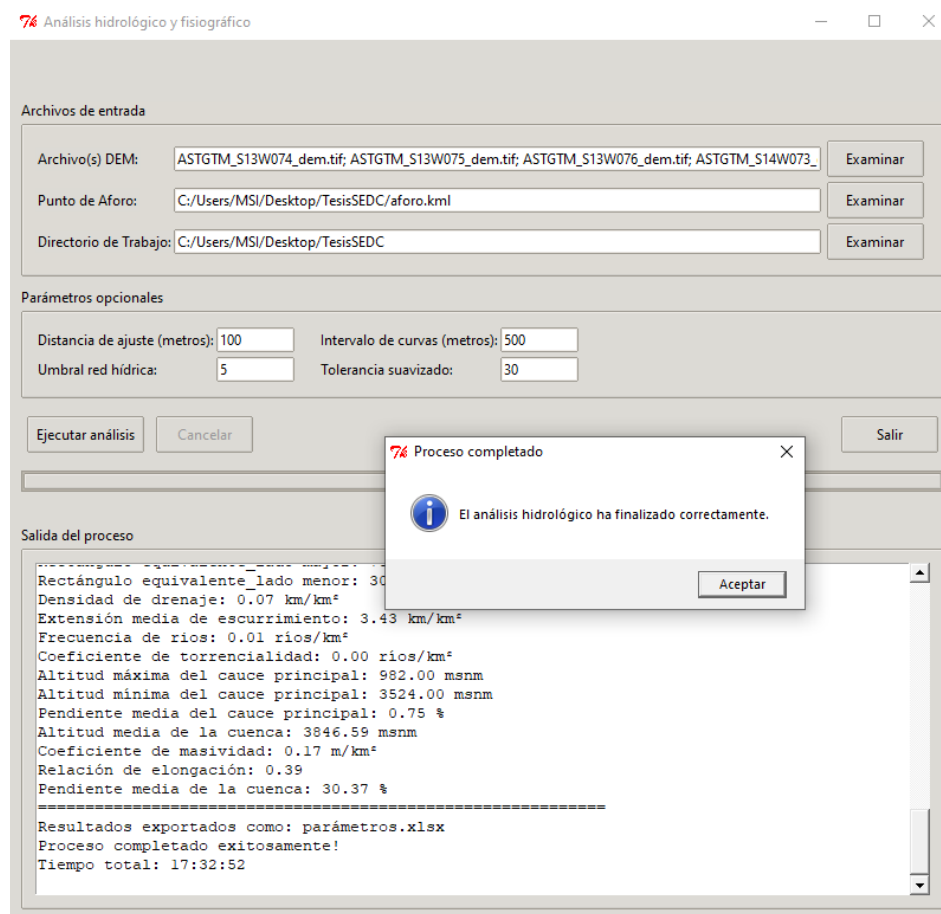
Tiempo de inicio del proceso de delimitación automática en el programa.



Nota: Elaboración propia mediante Python.

Figura 4.7

Tiempo de término del proceso de delimitación automática en el programa.



Nota: Elaboración propia mediante Python.

4.1.6. Aceptación de la segunda hipótesis específica

En consecuencia de los resultados obtenidos anteriormente se acepta la segunda hipótesis específica, ya que demuestra que la metodología desarrollado en **Python** presenta una eficiencia computacional elevada, superando en velocidad y automatización a los métodos convencionales de delimitación de cuencas basados en procesos manuales usando el entorno **GIS**.

4.1.7. Tercera hipótesis específica

El grado de precisión de la metodología automatizada implementada en **Python** para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos es bastante alto.

4.1.8. Contrastación de la tercera hipótesis específica

Para la contrastación de esta hipótesis se comparan los parámetros fisiográficos obtenidos mediante el programa desarrollado en **Python** y los datos oficiales obtenidos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), ya que cada parámetro posee unidades distintas es necesario normalizar estos valores antes de calcular el coeficiente de determinación R^2 .

Tabla 4.2

Comparación de parámetros fisiográficos obtenidos mediante el programa desarrollado en Python y los datos obtenidos de la Autoridad Nacional del Agua.

Parámetro	Python	ANA
Área (km ²)	23259.77768	23113.00
Perímetro (km)	1571.15334	1171.06
Longitud del cauce principal (km)	438.94305	421.97
Pendiente del cauce principal (%)	0.75289	0.83
Ancho promedio (km)	52.99042	54.77000
Índice de Gravelius (sin unidad)	2.90513	2.17
Lado mayor rectángulo equivalente (km)	754.75919	542.96
Lado menor rectángulo equivalente (km)	30.81748	42.57
Tiempo de concentración (min)	2715.71970	2641.00

Nota: Elaboración propia mediante L^AT_EX.

Dado que cada parámetro tiene magnitudes diferentes, si se calculara R^2 directamente, las variables con valores grandes como el área dominarían el resultado global, por ello, se aplican dos métodos de normalización:

- **Normalización Min–Max Scaler:**

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

Transforma los valores a un rango común entre 0 y 1.

- **Estandarización (Z-score):**

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Centra los datos en media cero y desviación estándar igual a 1, donde μ es la media y σ la desviación estándar de la serie.

1. Cálculo de estadísticos de cada serie de datos

Para la serie de valores obtenidos mediante el programa desarrollado en Python:

$$x_{\min}^{(py)} = 0,75289, \quad x_{\max}^{(py)} = 23259,77768, \quad \mu_{py} = 8274,0069, \quad \sigma_{py} = 8282,3287$$

Para la serie de valores obtenidos mediante la Autoridad Nacional del Agua:

$$x_{\min}^{(ana)} = 0,83000, \quad x_{\max}^{(ana)} = 23113,00000, \quad \mu_{ana} = 7976,6198, \quad \sigma_{ana} = 7684,7779$$

2. Normalización Min–Max Scaler para todas las variables

Tabla 4.3

Valores normalizados mediante Min-Max Scaler.

Parámetro	Python	ANA
Área	1.0000	1.0000
Perímetro	0.0675	0.0506
Longitud del cauce principal	0.0188	0.0182
Pendiente del cauce principal	0.0000	0.0000
Ancho promedio	0.0022	0.0023
Índice de Gravelius	0.0001	0.0001
Lado mayor rectángulo equivalente	0.0324	0.0235
Lado menor rectángulo equivalente	0.0013	0.0018
Tiempo de concentración	0.1167	0.1142

Nota: Elaboración propia mediante L^AT_EX.

3. Normalización Z-score para todas las variables

Tabla 4.4

Valores estandarizados mediante Z-score

Parámetro	Python	ANA
Área	2.8076	2.8102
Perímetro	-0.2284	-0.2724
Longitud del cauce principal	-0.3869	-0.3776
Pendiente del cauce principal	-0.4483	-0.4368
Ancho promedio	-0.4410	-0.4292
Índice de Gravelius	-0.4480	-0.4366
Lado mayor rectángulo equivalente	-0.3427	-0.3606
Lado menor rectángulo equivalente	-0.4441	-0.4309
Tiempo de concentración	-0.0682	-0.0659

Nota: Elaboración propia mediante L^AT_EX.

4. Cálculo del coeficiente de determinación R^2

Se calcula el coeficiente de determinación R^2 global considerando los valores completos de cada serie ($y_i = \text{ANA}$, $\hat{y}_i = \text{Python}$):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

Los resultados que se obtienen son:

Método	R^2
Normalización Min–Max Scaler	0.9995639
Estandarización Z-score	0.9996753

4.1.9. Aceptación de la tercera hipótesis específica

Los valores del coeficiente de determinación R^2 obtenidos en los dos métodos de análisis se aproximan a la unidad, lo que evidencia una alta correspondencia entre los resultados calculados mediante el programa desarrollado en **Python** y los valores obtenidos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Ya que, la aplicación de los procedimientos de normalización tanto la transformación **Min–Max Scaler** como la estandarización **Z-score** hace que no varía de manera significativa el valor de R^2 , lo que confirma que las diferencias entre ambos métodos son mínimas y que la relación entre las dos fuentes de datos es altamente consistente.

Pese a que el ajuste global es excelente, se identifican ciertas variables con errores relativos elevados, particularmente el perímetro, el lado mayor y el lado menor del rectángulo equivalente, cuyas discrepancias superan el 30 %. Estas diferencias sugieren la necesidad de una revisión metodológica más detallada para dichas variables.

En conjunto, un coeficiente de determinación de aproximadamente $R^2 = 0,9996$ indica que el 99.96 % de la variabilidad observada en los valores de la Autoridad Nacional del Agua es explicada por los resultados generados por el programa desarrollado mediante **Python**, demostrando una buena precisión en la comparación de ambos conjuntos de datos.

4.1.10. Hipótesis general

La implementación de la metodología automatizada en **Python** reduce significativamente los tiempos de ejecución y el uso de recursos computacionales, manteniendo la precisión, en la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos.

4.1.11. Contrastación de la hipótesis general

Los resultados obtenidos en el desarrollo y validación de las hipótesis específicas permiten contrastar de manera integral la hipótesis general, ya que:

1. En las hipótesis específicas se demostró que los resultados generados por el programa desarrollado en **Python** presenta una alta correspondencia con los obtenidos por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), evidenciada mediante un índice de Jaccard superior al 95 %, los errores relativos menores al 5 % y valores de R^2 próximos a la unidad. Estos indicadores confirman que la metodología propuesta mantiene la precisión de los resultados frente a los métodos tradicionales-manuales implementados en entorno **GIS**.
2. También se verificó que el procesamiento automatizado en **Python** disminuye de manera considerable los tiempos de ejecución respecto al proceso manual en entorno **GIS**. El tiempo total de procesamiento de una cuenca en promedio se redujo en más del 80 % tomando como tiempo base 1 hora para el proceso manual en entorno **GIS**.

3. Así mismo el programa desarrollado emplea estructuras vectorizadas y operaciones basadas en arreglos `NumPy`, minimizando el consumo de memoria `RAM` y evitando la sobrecarga de lectura y escritura en disco. Las pruebas realizadas muestran que el consumo máximo de memoria no supera el 30 % del total disponible durante la ejecución de los módulos principales, lo cual representa una mejora respecto a los procesos realizados en entorno `GIS`, que requieren la carga completa del ráster y generan archivos temporales de gran tamaño.
4. Finalmente, se confirmó que los parámetros fisiográficos estimados (área, perímetro, longitud del cauce principal, pendiente media, coeficiente de compacidad, entre otros) presentan diferencias menores al 3 % respecto a los valores oficiales reportados por la Autoridad Nacional del Agua.

4.1.12. Aceptación de la hipótesis general

En síntesis, la contrastación conjunta de las hipótesis específicas evidencia que la metodología automatizada en Python cumple con los tres criterios fundamentales planteados en la hipótesis general:

1. Mantiene la precisión de los resultados.
2. Reduce los tiempos de ejecución.
3. Optimiza el uso de recursos computacionales.

Por lo tanto, se acepta la hipótesis general planteada, concluyendo que la metodología propuesta constituye una herramienta eficiente y confiable para la delimitación de cuencas y la estimación de parámetros fisiográficos.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones

Las conclusiones de la presente tesis se elaboran en función de los objetivos establecidos y los resultados obtenidos a lo largo de la investigación. Cada objetivo específico fue cumplido satisfactoriamente, lo que permitió alcanzar el objetivo general y obtener hallazgos relevantes que sustentan la validez de las hipótesis formuladas, fortaleciendo así la coherencia y solidez de la tesis.

1. La selección adecuada de los algoritmos y las técnicas computacionales, como las herramientas de ArcPy (Mosaic To New Raster, Fill, Flow Direction, Flow Accumulation, Snap Pour Point y Watershed), junto con los métodos de programación orientada a objetos, concurrente y de gestión de recursos en el lenguaje de programación Python, permitió desarrollar una metodología automatizada que genera resultados consistentes y confiables en la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos. Esto se evidenció mediante el índice de Jaccard de 0.9951 (99.51 % de similitud espacial) y errores relativos menores al 5 % en parámetros clave como el área, la longitud del cauce principal, el ancho promedio y el tiempo de concentración, en comparación con los datos oficiales de la Autoridad Nacional del Agua (ANA).
2. La metodología implementada demostró una elevada eficiencia computacional, reduciendo el tiempo de procesamiento a menos de 15 minutos para la delimitación completa de una cuenca hidrográfica y el cálculo de los parámetros fisiográficos, en contraste con los procesos manuales en entornos GIS que demandan al menos de una hora. Esta optimización se logró mediante el uso de programación concurrente (hilos y colas de mensajes), gestión de memoria (gc.collect()) y eliminación segura de datasets) y configuraciones de ArcGIS para procesamiento en memoria, minimizando el consumo de recursos (menos del 30 % de RAM utilizada) y garantizando reproducibilidad y escalabilidad.
3. El grado de precisión de la metodología automatizada es bastante alto, ya que se determinó un coeficiente de determinación R^2 aproximado de 0.9996 tras normalizaciones mediante los métodos MinMax Scaler y Z-score, lo que indica que el 99.96 % de la variabilidad en los datos de la Autoridad Nacional del Agua es explicada por los resultados generados por el programa desarrollado en Python. Aunque se observaron discrepancias mayores al 30 % en parámetros como el perímetro y el índice de Gravelius, atribuidas a diferencias en los criterios de generalización geométrica y resolución espacial del modelo utilizado, la correspondencia global confirma la precisión y validez del programa.
4. En general, la implementación de la metodología automatizada en el lenguaje de programación Python reduce significativamente los tiempos de ejecución (más del 80 % en comparación con métodos manuales en entorno GIS) y el uso de recursos computacionales,

mientras mantiene la precisión en la delimitación de las cuencas hidrográficas y la estimación de los parámetros fisiográficos. Esto valida feacientemente la hipótesis general y lo posiciona al programa desarrollado como una alternativa eficiente, confiable y accesible frente a los métodos tradicionales-manuales empleados por instituciones como la Autoridad Nacional del Agua, facilitando aplicaciones en estudios posteriores.

5.2. Recomendaciones

1. Se recomienda la integración de funcionalidades adicionales al programa desarrollado, como el soporte para los modelos digitales de elevación de mayor resolución como **LiDAR** y la incorporación de los análisis hidrológicos avanzados, tales como la simulación de flujos en escenarios de cambio climático o la integración con modelos de precipitación-runoff, para ampliar su aplicabilidad en los contextos de gestión de recursos hídricos y la prevención de desastres.
2. Para mejorar la precisión en la obtención de los parámetros con discrepancias elevadas como el perímetro e índice de Gravelius, se sugiere realizar las validaciones adicionales con datos de múltiples de cuencas hidrográficas y fuentes alternativas que puedan existir, ajustando los umbrales de acumulación de flujo y los algoritmos de generalización geométrica, así como la incorporación de técnicas de machine learning para refinar la delimitación automática de cuencas.
3. Se recomienda también extender el programa desarrollado a una versión web o de código abierto sin la dependencia del entorno **ArcGIS**, utilizando **frameworks** como **Flask** o **Django**, para facilitar su acceso a usuarios no técnicos en instituciones gubernamentales o académicas, promoviendo su adopción en países en desarrollo con limitados recursos para software **GIS** de licencia.
4. Finalmente, se recomienda realizar estudios comparativos en cuencas hidrográficas de diferentes tamaños y topografías para evaluar la robustez del programa desarrollado, y colaborar con entidades como la Autoridad Nacional del Agua para estandarizar las metodologías automatizadas, contribuyendo a la actualización de bases de datos nacionales y así al avance en la investigación en el país.

5.3. Trabajos futuros

1. Desarrollar una aplicación web interactiva con **Flask**, **Django** o **Streamlit** que permita a los usuarios no especializados cargar los puntos de aforo y modelos digitales de elevación (**MDE**), y obtener de forma inmediata la delimitación de las cuencas y sus parámetros fisiográficos. Esto facilitaría el acceso a las herramientas hidrológicas en instituciones públicas, gobiernos regionales y gobiernos locales sin licencias de software **GIS**.
2. Ampliar la metodología actual para acoplarla con los modelos hidrológicos como **HEC-HMS**, **SWAT** o modelos basados en machine learning, utilizando los parámetros fisiográficos generados como la entrada. Esto permitiría no solamente caracterizar las cuencas, sino también predecir caudales, evaluar riesgos de inundación y diseñar infraestructura de drenaje de forma automatizada.

3. Ejecutar la metodología automatizada sobre varias cantidades de cuencas en un determinado país, generando una base de datos nacional de los parámetros fisiográficos estandarizados. Este repositorio permitiría estudios de clasificación de cuencas, análisis de vulnerabilidad hídrica, cambio climático o planificación territorial basada en indicadores hidrológicos consistentes y actualizables

BIBLIOGRAFÍA

- Al-Muqdad, S. W., & Merkel, B. J. (2011). Automated Watershed Evaluation of Flat Terrain. *Journal of Water Resource and Protection*, 3(12), 892-903. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2011.312099>
- American National Standards Institute. (1970). *Flowchart Symbols and Their Usage in Information Processing* (inf. téc. N.º ANSI X3.5-1970) (Standard defining flowchart symbols and conventions for information processing). American National Standards Institute. Washington, DC.
- Arias, F. G. (2012). *El proyecto de investigación* (7ª edición). Editorial Episteme, C.A.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2014). *Manual de Hidrología Aplicada*. Ministerio de Agricultura y Riego del Perú (MINAGRI).
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2015). *Gestión integrada de los recursos hídricos en el Perú*. Ministerio de Agricultura y Riego.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2018, marzo). *Optimizarán gestión del agua en 10 cuencas del país* [Gobierno del Perú]. <https://www.gob.pe/institucion/ana/noticias/137074-optimizaran-gestion-del-agua-en-10-cuencas-del-pais>
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2021). *Evaluación Hidrológica de las Principales Cuencas del Perú*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. Lima, Perú.
- Ávalos Álave, E. A. (2020). *Modelización hidrológica semidistribuida en la cuenca del río Huancané – Puno*. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3122032>
- Bai, X., Xie, F., et al. (2022). Rapid Watershed Delineation Using an Automatic Outlet Relocation Algorithm. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/2021WR031129>
- Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press.
- Calder, I. R. (2005). *Blue Revolution: Integrated Land and Water Resource Management*. Earthscan.
- Cardenas, J. (2017). Evaluación morfométrica de cuencas hidrográficas y su influencia en la escorrentía superficial. *Revista Peruana de Hidrología*, 12(3), 45-60.
- Chávez, R. (2019). *Impacto de la erosión hídrica en las cuencas altoandinas: Un análisis morfo-métrico y geoespacial*. Instituto Geofísico del Perú.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- Dixon, B., & Uddameri, V. (2015). Automating Geoprocessing Tasks in GIS. En *GIS and Geocomputation for Water Resource Science and Engineering*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118826171.ch19>
- Esri. (2023). *What is ArcPy?* [ArcGIS Pro Documentation]. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.4/arcpy/get-started/what-is-arcpy-.htm>
- FAO. (2014). *Manejo de cuencas hidrográficas en América Latina* [Consultado el 24 de septiembre de 2025]. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/3/i3780s/i3780s.pdf>

- Foro Peruano para el Agua – GWP Perú. (2008). *Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la GIRH* [Consultado el 24 de septiembre de 2025]. Global Water Partnership Perú.
- Ganti, N. V. P. (2018). *A Development of Travel Time Equation for Overland Flow as Affected by Vegetation* [M.Sc. Thesis]. South Dakota State University [Electronic Theses and Dissertations, Paper 2696]. <https://openprairie.sdstate.edu/etd/2696>
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., & Montealegre Medina, F. A. (2019). *Manejo de cuencas hidrográficas: herramientas de sistemas de información geográfica* [Consultado el 24 de septiembre de 2025]. Universidad Nacional de La Plata. <https://www.libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/book/1290>
- GEO GPS Perú. (2018, agosto). *Descargar imágenes ASTER GDEM (Aster Global Digital Elevation Model)* [Recuperado de GEO GPS Perú]. <https://www.geogpsperu.com/2018/08/descargar-imagenes-aster-gdem-aster.html>
- Gesch, D. B., Oimoen, M. J., Danielson, J. J., & Meyer, D. (2016). Validation of the ASTER Global Digital Elevation Model version 3 over the conterminous United States. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B4*, 143-148. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B4-143-2016>
- Gessler, P. E., Moore, I. D., McKenzie, N. J., & Ryan, P. J. (1995). Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(4), 421-432. <https://doi.org/10.1080/02693799508902053>
- Gidahatari. Evaluación hidrogeoquímica de cuencas andinas con Python - Scipy. En: *En Conferencia sobre Aplicaciones de Python en Hidrología*. Cajamarca, Perú, 2020.
- González, J., Pérez, M., & Rodríguez, L. (2020). *Análisis Espacial y Procesamiento de Datos con Python*. Editorial Académica Española.
- Goulden, T., Hopkinson, C., Jamieson, R., & Sterling, S. (2014). Sensitivity of watershed attributes to spatial resolution and interpolation method of LiDAR DEMs in three distinct landscapes. *Water Resources Research*, 50(3), 1908-1927. <https://doi.org/10.1002/2013WR013846>
- Gravelius, H. (1914). *Flusskunde*. Goschen'sche Verlagshandlung.
- Grimaldi, S., Petroselli, A., Tauro, F., & Porfiri, M. (2012). Time of concentration: a paradox in modern hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 57(2), 217-228. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.644244>
- Han, M., Shen, H., Tolson, B. A., Craig, J. R., Mai, J., Lin, S. G. M., Basu, N. B., & Awol, F. S. (2023). BasinMaker 3.0: A GIS toolbox for distributed watershed delineation of complex lake-river routing networks. *Environmental Modelling and Software*, 165, 105688. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105688>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista, P. L. (2006). *Metodología de la investigación* (4.^a ed.). McGraw-Hill.

- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: A hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275-370.
- Huacani, C. A., Minauro, R. S., & Chuyma, R. C. (2020). *Mitos y realidades de la investigación científica*. Recursos para la investigación.
- Hutton, C., et al. (2016). Most computational hydrology is not reproducible, so is it really science? *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1002/2016WR019285>
- Instituto PACCIELLY. (2024). *Capítulo 5: Delimitación de la investigación* [Documento digital]. <https://www.institutopaccelly.edu.pe>
- Jamal, S., & Ali, A. (2023). A comparative study of automatic drainage network extraction using ASTER GDEM, SRTM DEM and Cartosat-1 DEM in parts of Kosi basin, Bihar, India. *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering & Architecture*, 14(1), 45-52. <https://doi.org/10.1007/s43995-023-00014-4>
- Khalid, Z., Maulud, K., et al. (2021). Comparison of Watershed Delineation Accuracy using Open Source DEM Data in Large Area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 767, 012029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/767/1/012029>
- Kirpich, Z. P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10, 362.
- Leopold, L. B., Wolman, M. G., & Miller, J. P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. W. H. Freeman; Company.
- Li, J., Zhu, A., Burt, J., et al. (2014). Watershed modeling using Arc Hydro based on DEMs: a case study in Jackpine watershed. *Ecological Processes*, 3(11). <https://doi.org/10.1186/2193-2697-3-11>
- Llamas, M. R. (1993). *Fundamentos de hidrología de superficie* [Consultado el 24 de septiembre de 2025]. Ediciones Mundi-Prensa.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic Information Science and Systems* (4th). John Wiley & Sons.
- Maidment, D. R. (2002). *Arc Hydro: GIS for Water Resources*. ESRI Press.
- Martínez, J., & López, R. (2010). *Hidrología aplicada: fundamentos y técnicas*. Editorial Limusa.
- MasterGIS. (2025). MasterGIS - Plataforma de formación en Sistemas de Información Geográfica [Accedido: 31 de agosto de 2025].
- McKinney, W. (2018). *Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython* (2.^a ed.). O'Reilly Media. <https://www.oreilly.com/library/view/python-for-data/9781491957653/>
- Melton, M. A. (1957). An analysis of the relations among elements of climate, surface properties, and geomorphology. *Technical Report, Columbia University, Department of Geology*, 11, 1-102.
- Ministerio del Ambiente del Perú. (2015). Cuencas hidrográficas: bases conceptuales [Consultado el 24 de septiembre de 2025]. https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/cuencas_hidrograficas_bases.pdf
- Montoya, E. (2021). Análisis comparativo de métodos SIG para la delimitación automática de cuencas hidrográficas en el Perú. *Revista de Geociencias Aplicadas*, 8(1), 22-35.

- Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, A. R. (1991). Digital Terrain Modelling: A Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3-30. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- Nardini, A., Yépez, S., Mazzorana, B., Ulloa, H., Bejarano, M. D., & Laraque, A. (2020). A Systematic, Automated Approach for River Segmentation Tested on the Magdalena River (Colombia) and the Baker River (Chile). *Water*, 12(10), 2827. <https://doi.org/10.3390/w12102827>
- Núñez, V., Peralta, C. M., Marcuzzi, J. J., Gutiérrez, M. D., & otros. (1999). *Evaluación y Ordenación de la Cuenca Hídrica de Finca Las Costas y de la Evolución de la Calidad del Agua (Provincia de Salta), Argentina* (Technical Report N.º ESP/FM/97/010/AGR 94/025). Dirección Provincial de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Provincia de Salta; Universidad de Alcalá de Henares; Aguas de Salta S.A. Salta, Argentina.
- O'Callaghan, J. F., & Mark, D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28(3), 323-344.
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. Editorial de la Universidad de Alcalá.
- Oré, T. (2024, octubre). *La gestión responsable del agua en Perú: un desafío urgente ante la crisis hídrica* [INTE-PUCP]. <https://inte.pucp.edu.pe/noticias-y-eventos/noticias/la-gestion-responsable-del-agua-en-peru-un-desafio-urgente-ante-la-crisis-hidrica/>
- Paredes, M. (2022). *Modelos de estimación de parámetros fisiográficos en cuencas hidrográficas: Aplicación en la región andina del Perú*. Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga.
- Patton, P. C., & Baker, V. R. (1976). Morphometry and Floods in Small Drainage Basins Subject to Diverse Hydrogeomorphic Controls. *Water Resources Research*, 12(5), 941-952. <https://doi.org/10.1029/WR012i005p00941>
- Pike, R. J., & Wilson, S. E. (1971). Elevation-Relief Ratio, Hypsometric Integral, and Land Surface Characteristics. *Geological Society of America Bulletin*, 82(4), 1079-1084. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1971\)82\[1079:ERRHIA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1971)82[1079:ERRHIA]2.0.CO;2)
- Pimienta, J. (2017). *Instrumentación didáctica: diseño y evaluación de instrumentos para la educación*. Pearson Educación.
- Python Software Foundation. (2024). Python Programming Language [Último acceso: marzo 2025].
- Ramachandran, P. (2017). Automating Scientific Simulations with AutomAN. *Proceedings of the 16th Python in Science Conference (SciPy 2017)*, 107-113. <https://conference.scipy.org/proceedings/scipy2017/ramachandran.html>
- Rathore, A. K., Khan, S., & Verma, P. K. (2021). Integrated Python and GIS approach for geomorphometric investigation of Man River Basin, Western Madhya Pradesh, India. *Applied Computing and Geosciences*, 11, 100064. <https://doi.org/10.1016/j.acags.2021.100064>
- Reddy, G. P. O., Kumar, N., Sahu, N., & Singh, S. K. (2018). Evaluation of automatic drainage extraction thresholds using ASTER GDEM and Cartosat-1 DEM: A case study from basaltic terrain of Central India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 21(3), 293-300. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.04.001>

- Richard J. Chorley, D. E. S., Stanley A. Schumm. (1984). *Geomorphology* (1st). Methuen & Co. Ltd.
- Roa Lobo, J., & Kamp, U. (2007). Modelos de elevación digital (MED) a partir de sistemas satelitales. Una introducción y análisis comparativo en la cordillera de Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 48(1), 11-28.
- Roberto Hernández Sampieri. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta edición). McGraw-Hill.
- Salgado Reyes, N. (2024). Automatización de tareas en sistemas de información: implementación de sistemas inteligentes para la automatización de tareas repetitivas y procesos rutinarios en entornos de sistemas de información. *FIPCAEC*, 9(1). <https://doi.org/10.23857/fipcaec.v9i1.935>
- Schumm, S. A. (1956). Evolution of Drainage Systems and Slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, 67(5), 597-646. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)
- Silva, C. (2008). *Evaluación del comportamiento hidrológico de cuencas en zonas áridas y semiáridas del Perú*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Sociedad Geográfica de Lima. (2011). *¿Qué es cuenca hidrológica?* [Cartilla técnica]. Foro Peruano para el Agua – Global Water Partnership South America. <https://www.sociedadgeograficalima.org.pe>
- Sørensen, R., Zinko, U., & Seibert, J. (2006). On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(1), 101-112. <https://doi.org/10.5194/hess-10-101-2006>
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union*, 38(6), 913-920. <https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. En V. T. Chow (Ed.), *Handbook of Applied Hydrology* (pp. 4-39-4-76). McGraw-Hill.
- Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2), 309-319. <https://doi.org/10.1029/96WR03137>
- Tupsakhare, S. (2019). Automating Tasks with Python [Accedido el 3 de octubre de 2025]. *Towards Data Science*. <https://towardsdatascience.com/automating-tasks-with-python-3c2d3d5c7d5d>
- Vidić, N. (2021). Analiza tačnosti ASTER GDEM v3 digitalnog modela terena. *Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu*, 36(08), 1440-1443. <https://doi.org/10.24867/13KG03Vidic>
- Wilson, J. P., & Gallant, J. C. (2012). *Terrain Analysis: Principles and Applications*. John Wiley & Sons.
- Wu, Z., Hu, X., Chen, X., et al. (2023). The Effect of Multi-Source DEM Accuracy on the Optimal Catchment Area Threshold. *Water*, 15(1), 209. <https://doi.org/10.3390/w15010209>
- Xie, H., Zhu, Q., Wang, C., et al. (2022). Rapid Watershed Delineation Using an Automatic Outlet Relocation Algorithm. *Water Resources Research*, 58(5). <https://doi.org/10.1029/2021WR031129>

Bibliografía

Xie, J., Liu, X., Bai, P., & Liu, C. (2022). Rapid watershed delineation using an Automatic Outlet Relocation (AOR) algorithm. *Water Resources Research*, 58(4), e2021WR031129. <https://doi.org/10.1029/2021WR031129>

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Acumulación de flujo: Proceso hidrológico que representa el número total de celdas que descargan en una celda determinada dentro de un modelo digital de elevación.

Algoritmo D8: Algoritmo hidrológico utilizado en sistemas de información geográfica para calcular la dirección del flujo de agua en un modelo digital de elevación .

D-infinity: Algoritmo avanzado que permite el flujo en direcciones continuas (no discretas), distribuyendo el escurrimiento entre dos celdas adyacentes.

Altitud máxima, media y mínima: Valores extremos y promedio de elevación presentes dentro de la cuenca hidrográfica, expresados en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.).

Ancho promedio de cuenca: Relación entre el área total de la cuenca y la longitud del cauce principal. Indica si una cuenca es alargada o compacta.

Área de drenaje: Superficie proyectada horizontalmente de una cuenca hidrográfica, delimitada por la línea divisoria de aguas.

ArcPy: Módulo de Python orientado al geoprocesamiento en ArcGIS.

ASTER GDEM: Modelo digital de elevación global generado a partir de imágenes estereoscópicas del sensor ASTER a bordo del satélite Terra.

Razón de bifurcación: Relación entre el número de cauces de un orden dado y el número de cauces del orden inmediatamente superior.

Cauce principal:] Río o quebrada de mayor jerarquía en una cuenca, que recibe el aporte de todos los afluentes y conduce el escurrimiento hacia el punto de salida.

Coeficiente de compacidad: Índice que compara el perímetro de una cuenca con el de un círculo de igual área.

Coeficiente de torrencialidad: Relación entre la pendiente media de la cuenca y su densidad de drenaje.

Curva hipsométrica Gráfico que representa la distribución del área de una cuenca en función de la altitud.

Delimitación de cuencas hidrográficas: Procedimiento mediante el cual se determinan y trazan los límites geográficos de un área de drenaje, es decir, el territorio donde las precipitaciones pluviales, la escorrentía superficial y los flujos subterráneos convergen hacia un mismo punto de salida, denominado desfogue.

Densidad de drenaje: Relación entre la longitud total de los cauces y el área de la cuenca (km/km^2).

Digital Elevation Model: Modelo digital que representa la elevación del terreno desnudo (sin vegetación ni construcciones).

Depresión: Celda o grupo de celdas en un MDE con altitudes más bajas que sus vecinas, que impiden el flujo continuo del agua.

Desfogue: Punto de salida de una cuenca, donde se concentra todo el escurrimiento.

Divisoria de aguas: Línea topográfica que separa una cuenca de otra.

Dirección de flujo: Vector que indica hacia dónde fluye el agua en cada celda del MDE.

Eficiencia computacional: Capacidad de un algoritmo o sistema para realizar tareas con bajo consumo de tiempo y recursos (CPU, RAM).

Error absoluto: Diferencia aritmética entre un valor estimado y un valor de referencia.

Error relativo: Error absoluto expresado como porcentaje del valor de referencia.

Extensión media de escurrimiento superficial: Distancia promedio que recorre una gota de lluvia sobre la superficie antes de entrar a un cauce.

Factor de forma: Relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de la longitud del cauce principal.

Frecuencia de drenaje: Número de cauces por unidad de área (ríos/km²).

Geoprocesamiento: Conjunto de operaciones analíticas aplicadas a datos geoespaciales para transformarlos, extraer información o generar nuevos productos.

Índice de Jaccard: Medida de similitud espacial entre dos polígonos donde los valores cercanos a 1 indican alta coincidencia.

Índice de sinuosidad: Relación entre la longitud real del cauce y la distancia en línea recta entre su nacimiento y desembocadura.

Método de Strahler: Sistema de jerarquización de cauces donde solo la confluencia de dos cauces del mismo orden genera un cauce de orden superior.

Parámetros fisiográficos: Conjunto de variables cuantitativas que describen la morfometría, relieve, drenaje e hidrología de una cuenca.

Parámetros morfométricos: Subconjunto de parámetros fisiográficos que describen la geometría de la cuenca.

Pendiente media de la cuenca: Inclinación promedio del terreno, calculada a partir del MDE.

Perímetro de la cuenca: Longitud total de la línea divisoria de aguas.

Programación concurrente: Técnica que permite ejecutar múltiples procesos simultáneamente (mediante hilos o *threads*), evitando bloqueos en la interfaz gráfica durante cálculos intensivos.

Rectángulo equivalente: Rectángulo con igual área y perímetro que la cuenca real.

Relieve relativo: Diferencia entre la altitud máxima y mínima dentro de una cuenca.

Snap Pour Point: Herramienta que ajusta el punto de desfogue definido por el usuario al píxel de mayor acumulación de flujo cercano, asegurando precisión en la delimitación.

Stream Order: Clasificación jerárquica de los cauces según su posición en la red de drenaje, generalmente usando el método de Strahler.

Tiempo de concentración: Tiempo que tarda una gota de lluvia en viajar desde el punto más alejado de la cuenca hasta el desfogue.

Watershed: Herramienta de ArcGIS que, a partir de un raster de dirección de flujo y un punto de salida, identifica todas las celdas que drenan hacia ese punto, generando la cuenca hidrográfica.

LISTA DE ACRÓNIMOS

- ANA:** Autoridad Nacional del Agua.
- ArcPy:** ArcGIS Python Library.
- ASTER:** Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer.
- ASTER GDEM:** ASTER Global Digital Elevation Model.
- D8:** Deterministic Eight-neighbor Method.
- D:** Deterministic Infinity Method.
- DEM:** Digital Elevation Model.
- GIS:** Geographic Information System.
- GUI:** Graphical User Interface.
- IoU:** Intersection over Union.
- LiDAR:** Light Detection and Ranging.
- MDE:** Modelo Digital de Elevación.
- MDS:** Modelo Digital de Superficie.
- MDT:** Modelo Digital del Terreno.
- NASA:** National Aeronautics and Space Administration.
- NRCS:** Natural Resources Conservation Service (EE.UU.).
- RAM:** Random Access Memory.
- RMSE:** Root Mean Square Error.
- R^2 :** Coeficiente de determinación.
- SAR:** Synthetic Aperture Radar.
- SIG:** Sistema de Información Geográfica.
- SRTM:** Shuttle Radar Topography Mission.
- Tc:** Tiempo de concentración.
- UTM:** Universal Transverse Mercator.
- WGS84:** World Geodetic System 1984.

LISTA DE SÍMBOLOS

- A : Área de la cuenca hidrográfica (km^2).
- A_i : Área de intersección entre dos delimitaciones (m^2).
- A_u : Área de unión entre dos delimitaciones (m^2).
- B_p : Ancho promedio de la cuenca (km).
- C : Coeficiente de escorrentía (adimensional).
- C_m : Coeficiente de masividad (m/km^2).
- C_t : Coeficiente de torrencialidad (ríos/ km^2).
- D_d : Densidad de drenaje (km/km^2).
- E_a : Error absoluto (según parámetro).
- E_r : Error relativo (%).
- E_s : Extensión media de escurrimiento superficial (km^2/km).
- F_d : Frecuencia de drenaje (ríos/ km^2).
- F_f : Factor de forma (adimensional).
- $FA(i, j)$: Acumulación de flujo en la celda (i,j) (número de celdas).
- f : Flujo asignado a una celda receptora (–).
- H : Desnivel altitudinal (diferencia entre cota máxima y mínima) (m).
- H_{max} : Altitud máxima de la cuenca (m s.n.m.).
- H_{med} : Altitud media de la cuenca (m s.n.m.).
- H_{min} : Altitud mínima de la cuenca (m s.n.m.).
- i : Intensidad de lluvia de diseño (mm/h).
- I_s : Índice de sinuosidad (adimensional).
- $J(A, B)$: Índice de Jaccard entre dos polígonos A y B (adimensional).
- K_c : Coeficiente de compacidad (índice de Gravelius) (adimensional).
- L : Longitud del cauce principal (km).
- L_c : Longitud real del cauce principal (km).

Bibliografía

L_r : Distancia en línea recta entre nacimiento y desembocadura (km).

L_t : Longitud total de todos los cauces en la red de drenaje (km).

n : Coeficiente de rugosidad de Manning ($s/m^{1/3}$).

N : Número total de cauces en la cuenca (número).

N_u : Número de cauces de orden u (número).

N_{u+1} : Número de cauces de orden $u+1$ (número).

P : Perímetro de la cuenca hidrográfica (km).

R^2 : Coeficiente de determinación (adimensional).

R_b : Razón de bifurcación (adimensional).

R_c : Razón de circularidad (adimensional).

R_e : Relación de elongación (adimensional).

R_n : Índice de rugosidad (adimensional).

R_r : Relieve relativo (m).

$RMSE$: Raíz del error cuadrático medio (según parámetro).

S : Pendiente media de la cuenca o del cauce (% o m/m).

T_c : Tiempo de concentración (minutos).

x' : Valor normalizado (MinMax Scaler) (adimensional).

z : Valor estandarizado (Z-score) (adimensional).

Δd : Distancia horizontal entre celdas vecinas (m).

Δz : Diferencia de elevación entre celdas vecinas (m).

μ : Media aritmética de una serie de datos (según parámetro).

$\Omega(i, j)$: Conjunto de celdas vecinas que drenan hacia (i, j) (–).

σ : Desviación estándar de una serie de datos (según parámetro).

θ : Ángulo de dirección de flujo (en algoritmo D) (grados).

Anexo 01

**"CUENCA HIDROGRÁFICA PAMPAS DELIMITADA POR LA
AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA"**

Aprueban Metodología de Codificación de Unidades Geográficas de Pfafstetter, Memoria Descriptiva y el Plano de Delimitación y Codificación de las Unidades Hidrográficas del Perú

RESOLUCIÓN MINISTERIAL
N° 033-2008-AG

Lima, 5 de enero de 2008

VISTO:

El Informe N° 001-2007-INRENA-IRH-DIRHI/SIG de la Dirección de Recursos Hídricos del Instituto Nacional de Recursos Naturales - INRENA y el Informe N° 005-2007-AG-OGAJ; y,

CONSIDERANDO:

Que, el inciso e) del artículo 2° del Decreto Ley N° 17752 - Ley General de Aguas, señala como uno de los deberes del Estado, en cuanto a los recursos hídricos, realizar y mantener actualizados los estudios hidrológicos, hidrobiológicos, hidrogeológicos, meteorológicos, y demás que fuesen necesarios en las cuencas hidrográficas del territorio nacional;

Que, la cuenca hidrográfica es la unidad territorial más adecuada para la planificación y gestión de los recursos naturales en general y de los recursos hídricos en particular;

Que, el inciso g) del artículo 5° del Reglamento de Organización y Funciones del INRENA, aprobado por Decreto Supremo N° 002-2003-AG, señala como una de las funciones del Instituto Nacional de Recursos Naturales - INRENA, proponer lineamientos de política y normas en materia de manejo de cuencas;

Que, mediante Informe Técnico N° 001-2007-INRENA-IRH-DIRHI/SIG, la Dirección de Recursos Hídricos de la Intendencia de Recursos Hídricos del Instituto Nacional de Recursos Naturales - INRENA, solicita aprobar oficialmente la Metodología de Codificación de Unidades Geográficas de Pfafstetter, Memoria Descriptiva y Plano de Delimitación y Codificación de Unidades Hidrográficas del Perú, elaborado con una cartografía base a escala 1:250,000, utilizando la Metodología creada en Brasil por Otto Pfafstetter y difundida como el Sistema de Codificación Estándar Internacional por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS);

Que, la delimitación y codificación de las unidades hidrográficas del Perú, constituyen la referencia cartográfica básica para desarrollar procesos de ordenamiento de cuencas hidrográficas del país, tales como la determinación, codificación de los cursos y cuerpos de agua: ríos, lagos, lagunas y embalses, estudios hidrológicos, estudios de ordenamiento territorial, entre otros;

Que, en consecuencia, es necesario aprobar la Metodología de Codificación de Unidades Geográficas de Pfafstetter, Memoria Descriptiva y el Plano de Delimitación y Codificación de las Unidades Hidrográficas del Perú; y,

De conformidad con el artículo 7° de la Ley Orgánica del Ministerio de Agricultura, Decreto Ley N° 25902 y el Reglamento de Organización y Funciones del Ministerio de Agricultura, aprobado por Decreto Supremo N° 017-2001-AG;

SE RESUELVE:

Artículo 1°.- Aprobar la Metodología de Codificación de Unidades Geográficas de Pfafstetter, Memoria Descriptiva y el Plano de Delimitación y Codificación de las Unidades Hidrográficas del Perú, elaborados por la Intendencia de Recursos Hídricos del Instituto Nacional de Recursos Naturales - INRENA, que rubricados por el Titular de dicha Intendencia, forman parte integrante de la presente Resolución.

Artículo 2°.- Disponer que la Metodología, Memoria y el Plano aprobados en el artículo precedente sean publicados en la página web del Instituto Nacional de Recursos Naturales - INRENA para uso del público en general, teniéndose como referencia obligatoria en todos los procesos de ordenamiento de Cuencas Hidrográficas,

así como en los procedimientos administrativos en materia de aguas a que se refiere la Ley General de Aguas - Decreto Ley N° 17752, sus Reglamentos, normas complementarias y modificatorias.

Regístrese, comuníquese y publíquese.

ISMAEL BENAVIDES FERREYROS
Ministro de Agricultura

152895-2

COMERCIO EXTERIOR Y TURISMO

Autorizan viaje de representante del Ministerio a Indonesia para participar en evento a realizarse en el marco de la Primera Reunión del Consejo Consultivo Empresarial de APEC

RESOLUCIÓN SUPREMA
N° 006-2008-MINCETUR

Lima, 16 de enero de 2008

CONSIDERANDO:

Que, del 21 al 23 de enero de 2008, se llevará a cabo en la ciudad de Yakarta, Indonesia, la Reunión de los Altos Funcionarios del Foro de Cooperación Económica del Asia Pacífico (APEC) con los miembros del Consejo Consultivo Empresarial (ABAC) del APEC, con el objeto de hacer seguimiento a las discusiones sobre la Integración Económica Regional en el Foro APEC y al trabajo del ABAC, dentro del marco de las actividades preparatorias para la Cumbre 2008, a realizarse en el Perú;

Que, la participación del Perú en dicha reunión tiene por objeto, entre otros, (i) lograr que los intereses nacionales se vean reflejados en los temas relacionados a la integración económica regional, así como en los estudios relacionados a los Acuerdos de Libre Comercio (FTAs) y los Acuerdos Regionales de Comercio (RTAs) y su vinculación con el cumplimiento de las Metas de Bogor (Indonesia); (ii) lograr respecto a la organización del APEC 2008 en el Perú, que el tema se incluya en la discusión y los acuerdos que se adopten y (iii) contribuir en la definición de las características de la Reunión de Ministros de Comercio, la Reunión Conjunta de Ministros de Comercio y Relaciones Exteriores y la Reunión de Líderes de APEC 2007;

Que, asimismo, la agenda de la Reunión ABAC está directamente relacionada con las labores del Comité de Comercio e Inversión de APEC (CTI), en la cual el MINCETUR es el representante del Perú;

Que, el MINCETUR ejerce la representación del Perú ante el APEC y a través del Viceministerio de Comercio Exterior, programa y ejecuta acciones concernientes a la agenda comercial de los diferentes esquemas de integración y del APEC; por tal razón, el Viceministro de Comercio Exterior ha solicitado que se autorice el viaje del señor Julio José Chan Sánchez, Director de APEC de la Dirección Nacional de Asuntos Multilaterales y Negociaciones Comerciales Internacionales del Viceministerio de Comercio Exterior, para que participe en representación del MINCETUR en la reunión antes mencionada;

Que, de acuerdo con la Ley N° 29142, Ley de Presupuesto del Sector Público para el Año Fiscal 2008, están prohibidos los viajes al exterior con cargo a recursos públicos, con algunas excepciones, entre ellas, los viajes que se efectúan en el marco de los acuerdos de negociación de tratados comerciales de importancia para el Perú;

De conformidad con la Ley N° 29142 antes citada, la Ley N° 27790, de Organización y Funciones del Ministerio de Comercio Exterior y Turismo - MINCETUR, la Ley N° 27619, que regula la autorización de viajes al exterior de los servidores y funcionarios públicos, y sus modificatorias y el Decreto Supremo N° 047-2002-PCM;



RESOLUCIÓN JEFATURAL N° 056 -2018-ANA

Lima, 13 FEB. 2018

CONSIDERANDO:

Que, el artículo 73 de la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos concordado con el artículo 106 de su Reglamento, aprobado por Decreto Supremo N° 001-2010-AG, establece que la Autoridad Nacional del Agua, clasifica los cuerpos de agua en función a sus características naturales y a los usos que se destinan, tomando como base la implementación progresiva de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el Agua (ECA-Agua) que apruebe el Ministerio del Ambiente, de acuerdo con los usos actuales y potenciales al que se destina el agua;

Que, en base a la normatividad expedida por el Ministerio del Ambiente, con Resolución Jefatural N° 202-2010-ANA se aprueba la clasificación de cuerpos de agua superficiales y marino - costeros, según relación contenida en el Anexo N° 1, que contempla: i) la Clasificación de cuerpos de agua superficiales, ríos, lagos y lagunas, ii) Clasificación de cuerpos de agua superficiales lenticos y zonas protegidas; y iii) Clasificación de cuerpos marino - costeros;

Que, con Resolución Jefatural N° 030-2016-ANA se aprueba la clasificación del cuerpo de agua marino - costero, dejando sin efecto legal la clasificación aprobada con el Anexo N° 1 de la Resolución Jefatural N° 202-2010-ANA, en el extremo de la clasificación marino - costero, dejando subsistente la clasificación de cuerpos de agua superficiales;

Que, posteriormente con Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM se aprueban los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, en el cual se indica que la Autoridad Nacional del Agua, es la encargada de asignar a cada cuerpo natural de agua, categorías, atendiendo a sus condiciones naturales o niveles de fondo, según el marco normativo vigente;

Que, en ese sentido, con Resolución Jefatural N° 270-2017-ANA se prepublicó la propuesta de "Clasificación de los Cuerpos de Agua Continentales Superficiales", habiéndose recibido los aportes y sugerencias respectivas por parte de entidades públicas, privadas y ciudadanos en general;

Que, la Dirección de Calidad y Evaluación de Recursos Hídricos a través del Informe Técnico N° 002-2018-ANA-DCERH/AGITN concluye que la clasificación de cuerpos de agua constituye una herramienta de uso obligatorio por personas naturales o jurídicas del territorio nacional, que como resultado de sus actividades generen agua residuales domésticas, municipales, industriales o agrícolas; cuyos vertimientos tratados serán descargados a un cuerpo natural de agua, por lo que se recomienda su aprobación;

Que, la Oficina de Asesoría Jurídica con Informe Legal N° 095-2018-ANA-OAJ, opina que la Clasificación de los Cuerpos de Agua Continentales Superficiales propuesta debe ser aprobada;

Que, la propuesta de clasificación tiene como finalidad contribuir a la conservación y protección de la calidad de los cuerpos de agua superficiales continentales considerando los usos presentes y potenciales, en concordancia con los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua, en consecuencia, resulta necesario aprobar la Clasificación propuesta y dejar sin efecto la clasificación aprobada mediante Resolución Jefatural N° 202-2010-ANA;



Con los vistos de la Secretaría General, la Dirección de Calidad y Evaluación de Recursos Hídricos y la Oficina de Asesoría Jurídica, y de conformidad con lo previsto en el numeral q) del artículo 12 del Reglamento de Organización y Funciones de la Autoridad Nacional del Agua, aprobado por Decreto Supremo N° 018-2017-MINAGRI;

SE RESUELVE:

Artículo 1.- Aprobar la Clasificación de los Cuerpos de Agua Continentales Superficiales

Aprobar la Clasificación de Cuerpos de Agua Continentales Superficiales, conforme al Anexo que forma parte integrante de la presente resolución.

Artículo 2.- Aplicación de la Clasificación de Cuerpos de Agua a los Instrumentos de Gestión Ambiental aprobados

Los Instrumentos de Gestión Ambiental aprobados que hayan considerado la Clasificación de Cuerpos de Agua aprobada mediante la Resolución Jefatural N° 202-2010-ANA, se adecuarán a la Clasificación aprobada mediante la presente resolución, en la próxima modificación o actualización del Instrumento de Gestión Ambiental respectivo, según corresponda, de conformidad a la Primera Disposición Complementaria Final del Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM.

Artículo 3.- Adecuación de Instrumentos de Gestión Ambiental en evaluación

Los titulares que antes de la fecha de entrada en vigencia de la presente norma, hayan iniciado un procedimiento administrativo para la aprobación del instrumento de gestión ambiental y/o plan integral ante la autoridad competente, tomarán en consideración la Clasificación de Cuerpos de Agua aprobada mediante Resolución Jefatural N° 202-2010-ANA..

Luego de aprobado el instrumento de gestión ambiental por la autoridad competente, los titulares deberán considerar lo establecido en el Artículo 2 precedente, a efectos de aplicar la Clasificación de Cuerpos de Agua aprobada mediante la presente Resolución.

Artículo 4.- Aplicación de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua en cuerpos naturales de agua no categorizados

En tanto, esta Autoridad no haya asignado una categoría a un determinado cuerpo natural de agua a través del procedimiento de clasificación, se aplica la categoría del recurso hídrico al que este tributa, previo análisis de esta Autoridad, conforme a lo previsto en la Tercera Disposición Complementaria Transitoria del Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM.

Artículo 5.- Publicación

Disponer la publicación de la presente Resolución en el diario oficial El Peruano y del Anexo aprobado en el Artículo 1 en la página web institucional: www.ana.gob.pe

Artículo 6.- Derogación

Deróguese la Resolución Jefatural N° 202-2010-ANA.

Regístrese, comuníquese y publíquese,



ABELARDO DE LA TORRE VILLANUEVA

Jefe

Autoridad Nacional del Agua



CURSO DE AGUA					UNIDAD HIDROGRÁFICA		
Nº	Código Curso	Nombre	Categoría	Longitud (km)	Código UH	Nombre	
994	499696	Río Conocancha	Categoría 4	26,95	4996	Cuenca Mantaro	
995	499697	Río Mantaro	Categoría 3	55,84	4996	Cuenca Mantaro	
996	499698	Río San Juan	Categoría 3	37,96	4996	Cuenca Mantaro	
997	499698	Río San Juan	Categoría 4	17,34	4996	Cuenca Mantaro	
998	499699	Río Mantaro	Categoría 4	56,81	4996	Cuenca Mantaro	
999	49971	Río Apurímac	Categoría 3	21,84	4997	Intercuenca Bajo Apurímac	
1000	49972	Río Chuimacota	Categoría 3	51,92	4997	Intercuenca Bajo Apurímac	
1001	49973	Río Apurímac	Categoría 3	19,56	4997	Intercuenca Bajo Apurímac	
1002	49974	Río Piene	Categoría 3	65,89	4997	Intercuenca Bajo Apurímac	
1003	49975	Río Apurímac	Categoría 3	50,82	4997	Intercuenca Bajo Apurímac	
1004	49976	Río Chunchubamba	Categoría 3	46,13	4997	Intercuenca Bajo Apurímac	
1005	49977	Río Apurímac	Categoría 3	57,31	4997	Intercuenca Bajo Apurímac	
1006	49978	Río Pampaconas	Categoría 3	50,38	4997	Intercuenca Bajo Apurímac	
1007	49979	Río Apurímac	Categoría 3	59,11	4997	Intercuenca Bajo Apurímac	
1008	49981	Río Pampas	Categoría 3	98,21	4998	Cuenca Pampas	
1009	49982	Río Torobamba	Categoría 3	60,44	4998	Cuenca Pampas	
1010	49983	Río Pampas	Categoría 3	96,98	4998	Cuenca Pampas	
1011	49984	Río Chicha	Categoría 3	114,07	4998	Cuenca Pampas	
1012	49985	Río Pampas	Categoría 3	28,85	4998	Cuenca Pampas	
1013	49986	Río Sondondo	Categoría 3	123,37	4998	Cuenca Pampas	
1014	49987	Río Pampas	Categoría 3	74,05	4998	Cuenca Pampas	
1015	49988	Río Pampas	Categoría 3	120,44	4998	Cuenca Pampas	
1016	49988	Río Pampas	Categoría 4	26,24	4998	Cuenca Pampas	
1017	49989	Río Caracha	Categoría 3	130,73	4998	Cuenca Pampas	
1018	49991	Río Apurímac	Categoría 3	10,32	4999	Intercuenca Alto Apurímac	
1019	49992	Río Pachachaca	Categoría 3	222,30	4999	Intercuenca Alto Apurímac	
1020	49993	Río Apurímac	Categoría 3	117,98	4999	Intercuenca Alto Apurímac	
1021	49994	Río Vilcabamba	Categoría 3	154,25	4999	Intercuenca Alto Apurímac	
1022	49995	Río Apurímac	Categoría 3	44,58	4999	Intercuenca Alto Apurímac	
1023	49996	Río Santo Tomás	Categoría 3	160,26	4999	Intercuenca Alto Apurímac	
1024	49997	Río Apurímac	Categoría 3	30,00	4999	Intercuenca Alto Apurímac	
1025	49998	Río Velille	Categoría 3	195,57	4999	Intercuenca Alto Apurímac	
1026	499991	Río Apurímac	Categoría 3	59,21	4999	Intercuenca Alto Apurímac	
1027	499992	Río Livitaca	Categoría 3	61,75	4999	Intercuenca Alto Apurímac	
1028	499993	Río Apurímac	Categoría 3	95,68	4999	Intercuenca Alto Apurímac	
1029	499994	Río Salado	Categoría 3	124,65	4999	Intercuenca Alto Apurímac	
1030	499995	Río Apurímac	Categoría 4	7,27	4999	Intercuenca Alto Apurímac	
1031	499996	Río Oquero	Categoría 4	54,61	4999	Intercuenca Alto Apurímac	
1032	499997	Río Apurímac	Categoría 4	22,27	4999	Intercuenca Alto Apurímac	
1033	499998	Quebrada Tarucuyo	Categoría 4	63,99	4999	Intercuenca Alto Apurímac	
1034	499999	Río Apurímac	Categoría 4	92,38	4999	Intercuenca Alto Apurímac	
1035	49941	Río Urubamba	Categoría 4	44,86	4994	Cuenca Urubamba	



CURSO DE AGUA					UNIDAD HIDROGRÁFICA		
Nº	Código Curso	Nombre	Categoría	Longitud (km)	Código UH	Nombre	
1207	0182	Río Ventilla	Categoría 3	56,55	018	Cuenca Pucará	
1208	0183	Río Ayaviri	Categoría 3	30,95	018	Cuenca Pucará	
1209	0183	Río Ayaviri	Categoría 1A2	18,73	018	Cuenca Pucará	
1210	0184	Río Umachiri	Categoría 1A2	55,27	018	Cuenca Pucará	
1211	0185	Río Ayaviri	Categoría 1A2	6,08	018	Cuenca Pucará	
1212	0186	Río Santa Rosa	Categoría 3	88,27	018	Cuenca Pucará	
1213	0187	Río Ayaviri	Categoría 1A2	0,28	018	Cuenca Pucará	
1214	0188	Río Chuncapamayo	Categoría 3	59,09	018	Cuenca Pucará	
1215	0189	Río Llallimayo	Categoría 3	87,49	018	Cuenca Pucará	
1216	0191	Río Azángaro	Categoría 3	70,26	019	Cuenca Azángaro	
1217	0192	Río Quilcamayo	Categoría 3	60,20	019	Cuenca Azángaro	
1218	0193	Río Azángaro	Categoría 3	25,09	019	Cuenca Azángaro	
1219	0194	Río Grande	Categoría 3	149,25	019	Cuenca Azángaro	
1220	0195	Río Crucero	Categoría 3	74,64	019	Cuenca Azángaro	
1221	0196	Río Antauta	Categoría 3	39,60	019	Cuenca Azángaro	
1222	0197	Río Crucero	Categoría 3	2,88	019	Cuenca Azángaro	
1223	0198	Río Ajoyani	Categoría 3	35,47	019	Cuenca Azángaro	
1224	0199	Río Crucero	Categoría 3	140,40	019	Cuenca Azángaro	

Tabla N° 2. Cuerpos de agua lenticos clasificados a nivel nacional

CUERPO DE AGUA				UNIDAD HIDROGRÁFICA	
Nº	Cuerpo de Agua	CATEGORÍA	Área (km²)	Código UH	Nombre
1225	Laguna Suches	Categoría 4	14,99	1316	Cuenca Locumba
1226	Laguna Pasto Grande	Categoría 4	51,90	1318	Cuenca Tambo
1227	Laguna Loriscota	Categoría 4	32,82	1318	Cuenca Tambo
1228	Laguna Salinas	Categoría 4	61,65	132	Cuenca Quilca - Vitor - Chili
1229	Represa El Frayle	Categoría 4	10,97	132	Cuenca Quilca - Vitor - Chili
1230	Laguna Parinacohas	Categoría 4	67,39	136	Cuenca Ocoña
1231	Pantano de Villa	Categoría 4	2,60	1375539	Intercuenca 1375539
1232	Pantano de Villa	Categoría 4	0,14	1375539	Intercuenca 1375539
1233	Represa Gallito Ciego	Categoría 1A2	11,99	13774	Cuenca Jequetepeque
1234	Represa Tinajones	Categoría 3	14,53	13776	Cuenca Chancay-Lambayeque
1235	Represa San Lorenzo	Categoría 3	10,87	138	Cuenca Chira
1236	Represa Poechos	Categoría 1A2	95,22	138	Cuenca Chira
1237	Laguna Caballococha	Categoría 4	11,04	4977	Intercuenca 4977
1238	Laguna Rimachi	Categoría 4	26,61	4986	Cuenca Pastaza
1239	Laguna Piripiri / Huama	Categoría 4	10,20	49913	Intercuenca 49913
1240	Laguna Carocurahuayte	Categoría 4	12,82	49913	Intercuenca 49913
1241	Laguna Yarinacocha	Categoría 4	12,85	49917	Intercuenca 49917
1242	Laguna Imiria	Categoría 4	35,26	49918	Cuenca Tamaya
1243	Laguna Chica	Categoría 4	32,54	49918	Cuenca Tamaya



CUERPO DE AGUA				UNIDAD HIDROGRÁFICA	
Nº	Cuerpo de Agua	CATEGORÍA	Área (km²)	Código UH	Nombre
1244	Laguna Pomacanchi	Categoría 4	21,63	4994	Cuenca Urubamba
1245	Laguna Sibinacocha	Categoría 4	24,93	4994	Cuenca Urubamba
1246	Laguna Langui Layo	Categoría 4	54,08	4994	Cuenca Urubamba
1247	Lago Junín / Chinchaycocha	Categoría 4	268,40	4996	Cuenca Mantaro
1248	Laguna Punrun	Categoría 4	24,25	4996	Cuenca Mantaro
1249	Laguna San Antonio	Categoría 1A1	0,09	4996	Cuenca Mantaro
1250	Laguna Huascacocha	Categoría 3	1,03	4996	Cuenca Mantaro
1251	Laguna Huacracocha	Categoría 4	1,40	4996	Cuenca Mantaro
1252	Laguna Orcococha	Categoría 4	13,94	4998	Cuenca Pampas
1253	Laguna Choclococha	Categoría 4	16,25	4998	Cuenca Pampas
1254	Laguna Vilacota	Categoría 4	11,53	0144	Cuenca Mauri
1255	Laguna Blanca	Categoría 4	19,67	0148	Cuenca Ushusuma
1256	Laguna Río Callaccame	Categoría 4	16,76	0156	Cuenca Callaccame
1257	Laguna Suches	Categoría 4	13,74	0172	Cuenca Suches
1258	Laguna Umayo	Categoría 4	28,42	0174	Cuenca Ilpa
1259	Laguna Lagunillas	Categoría 4	25,39	0176	Cuenca Coata
1260	Laguna Ananta	Categoría 4	11,94	0176	Cuenca Coata
1261	Laguna Sara Cocha	Categoría 4	12,97	0176	Cuenca Coata
1262	Lago De Arapa	Categoría 4	131,96	0179	Intercuenca Ramis
1263	Laguna Titihue	Categoría 4	17,21	0179	Intercuenca Ramis
1264	Lago Titicaca	Categoría 4	5207,67	01	Lago Titicaca
*	**Todas las lagunas, salvo otra indicación de la ANA	Categoría 4			



Anexo 02

**"PARÁMETROS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA PAMPAS
OBTENIDOS CON PYTHON"**

DATOS OBTENIDOS PARA LA CURVA HIPSOMÉTRICA					
Intervalo de clases (curvas de nivel)	Cota media (m)	Área (Km ²)	Área/Área Total [%]	Porcentaje Acumulado	ai ci
4843-5276	5060	98.43	0.423371	0.423406	498012.7
4414-4843	4628	3098.77	13.328395	13.751802	14342649.5
3985-4414	4200	9210.75	39.617210	53.369011	38680557.2
3556-3985	3770	4916.03	21.144775	74.513787	18535882.4
3127-3556	3342	2776.13	11.940663	86.454449	9276435.7
2698-3127	2912	1584.53	6.815367	93.269816	4614943.9
2269-2698	2484	884.20	3.803096	97.072912	2195900.8
1840-2269	2054	453.23	1.949418	99.022330	931155.7
1411-1840	1626	190.53	0.819498	99.841828	309703.6
<982	1196	36.77	0.158172	100.000000	44000.1

PARÁMETROS FISIOGRAFICOS		
Parámetro	Unidad	Valor
Área	km ²	23259.76647
Perímetro	km	1571.15334
Longitud Principal	km	438.8819275
Ancho Promedio	km	52.99777688
Factor de Forma	sin unidad	0.120756344
Índice de Gravelius	sin unidad	2.905126221
Lado mayor rectángulo equivalente	km	754.7592034
Lado menor rectángulo equivalente	km	30.81746651
densidad de drenaje	km/km ²	0.239544531
Extensión media de escurrimiento superficial	km ² /Km	1.043647287
frecuencia de ríos	ríos/km ²	0.061178602
coeficiente de torrencialidad	ríos/km ²	0.030610797
altitud máxima del cauce principal	msnm	982
altitud mínima del cauce principal	msnm	2290
pendiente media del cauce principal	%	0.603086015
altitud media de la cuenca	msnm	3846.590352
coeficiente de masividad	m/km ²	0.165375278
relación de elongación	sin unidad	0.391980152
pendiente media de la cuenca	%	30.36897428

Anexo 03

**"MANUAL DE USO DEL PROGRAMA DESARROLLADO PARA
DELIMITACIÓN DE CUENCAS EN PYTHON"**



MANUAL PARA LA DELIMITACIÓN AUTOMÁTIZADA DE CUENCAS EN PYTHON

INTRODUCCIÓN:

Este manual muestra la metodología automatizada en Python para la delimitación de cuencas y el cálculo de parámetros fisiográficos requiere un entorno de desarrollo adecuado. Para este propósito se utiliza PyCharm, un IDE especializado en Python que optimiza la organización del código, la ejecución de scripts y la gestión de librerías empleadas en el procesamiento geoespacial.

PROGRAMAS AUXILIARES NECESARIOS:

- Google Earth: Para ubicar el punto de aforo y exportarlo en formato KML.
- ArcGIS (10.3 o superior): para la gestión y visualización de datos ráster y vectoriales, así como la integración con el intérprete de Python.
- PyCharm: entorno de desarrollo para ejecutar el programa.

CARACTERÍSTICAS RECOMENDADAS DEL EQUIPO:

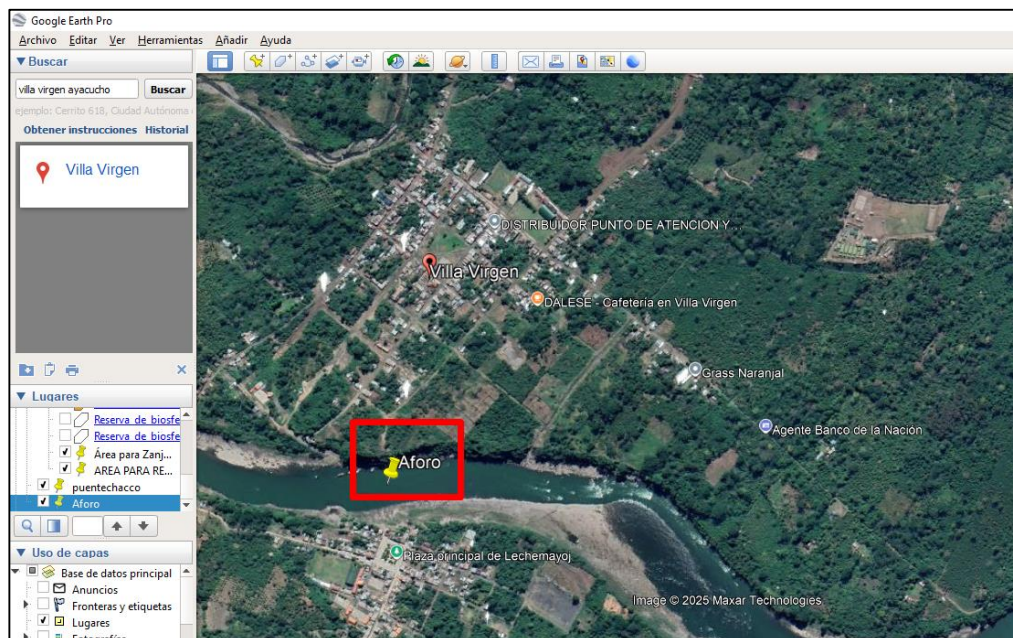
- CPU: Intel Core i7/i9, para un procesamiento eficiente de modelos de elevación y operaciones hidrológicas.
- RAM: 16 GB como mínimo, con recomendación de 64 GB para un manejo fluido de grandes volúmenes de información geoespacial.
- Almacenamiento: Unidad SSD de 256 GB o superior, que garantiza tiempos de lectura y escritura óptimos en archivos DEM y capas SIG.
- Sistema Operativo: Windows 10/11 de 64 bits

El programa puede presentar variaciones en su desempeño dependiendo del tamaño y resolución del DEM empleado. Cuanto mayor sea el archivo ráster, mayor será la demanda de memoria RAM y recursos del sistema, lo que puede limitar la velocidad o la completitud del proceso, presentando restricciones operativas.

PROCEDIMIENTO PARA LA DELIMITACIÓN AUTOMATIZADA DE CUENCAS:

1. Preparación del punto de aforo:

En Google Earth se ubica el punto de aforo correspondiente al lugar donde se desea obtener la cuenca. Este punto debe exportarse en formato KML o SHP, y posteriormente guardarse en una carpeta de trabajo destinada al proyecto.

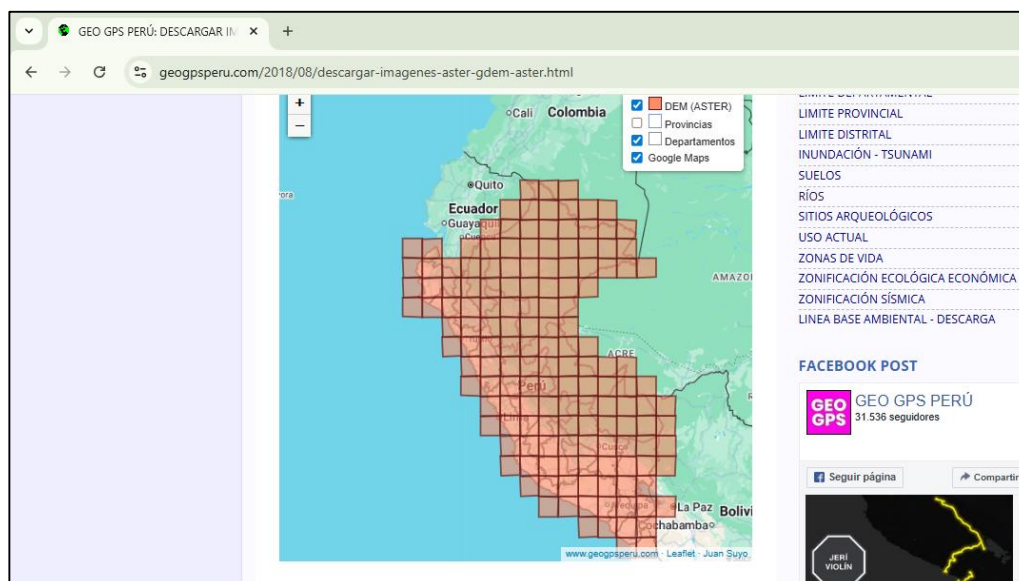


2. Descarga de los modelos digitales de elevación (DEM)

Se descargan los archivos ASTER GDEM, con resolución espacial de 30 metros, lo cual proporciona un equilibrio adecuado entre detalle topográfico y eficiencia de procesamiento.

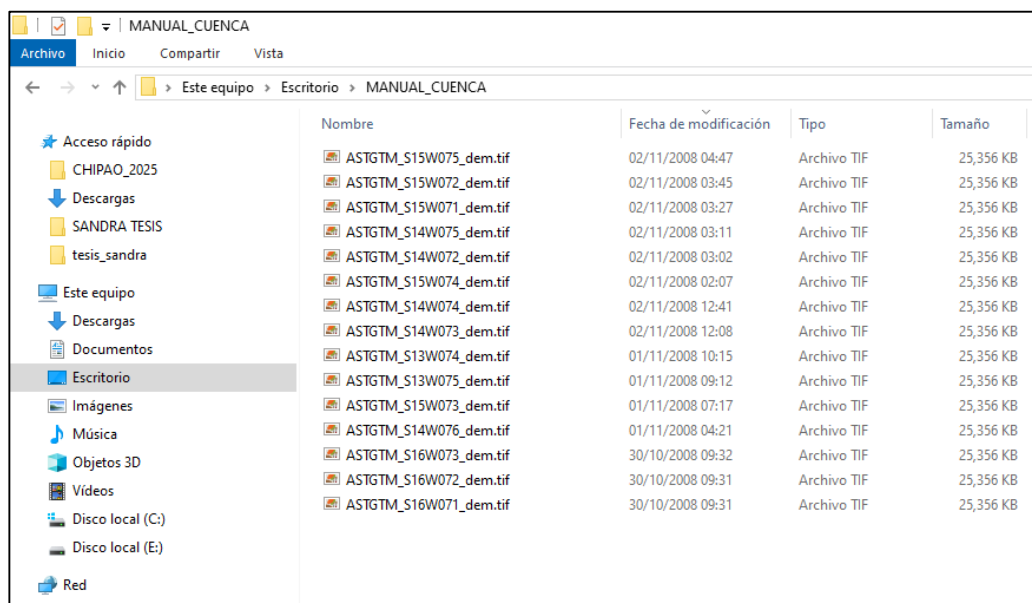
Los DEM pueden obtenerse desde:

<https://www.geogpsperu.com/2018/08/descargar-imagenes-aster-gdem-aster.html>





Es necesario descargar todos los mosaicos DEM que cubran completamente el área donde se ubica la cuenca de estudio.

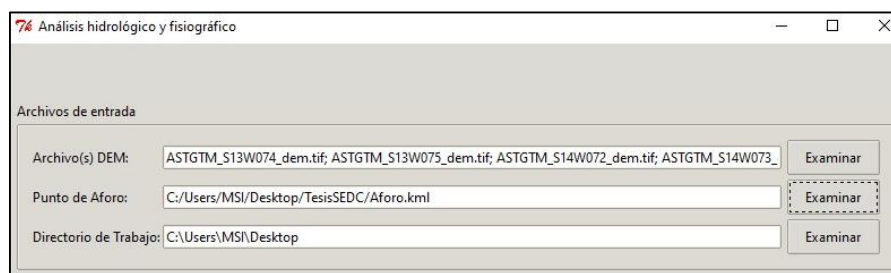


3. Carga de archivos en el programa

Con los datos preparados, se abre el programa y, en la sección Archivos de entrada, se cargan:

- Los modelos de elevación digital correspondientes a la zona de estudio.
- El punto de aforo en formato KML o SHP.

Ambos se seleccionan mediante el botón “Examinar”.



4. Configuración de parámetros opcionales

La interfaz del programa permite ajustar parámetros complementarios para optimizar la delimitación de la cuenca.

4.1. Distancia de ajuste (metros)

Define el radio de búsqueda alrededor del punto de aforo para reubicarlo automáticamente sobre el cauce más cercano. Garantizando que el punto coincida con un curso de agua real.

Recomendación: valores mayores a 150 m.



4.2. Umbral de acumulación de flujo

Controla la cantidad mínima de agua acumulada necesaria para que el programa identifique un punto como un cauce.

- Cuencas menores a 10 000 km²: valores recomendados 1–3
- Cuencas mayores a 10 000 km²: valores mayores a 3

Umbrales bajos generan redes de drenaje más densas y detalladas; umbrales altos producen líneas de flujo más simplificadas.

4.3. Intervalo entre curvas de nivel

Define el grado de detalle del relieve representado en la cuenca.

- Cuencas menores a 10 000 km²: valores entre 50–100 m
- Cuencas mayores a 10 000 km²: valores mayores a 100 m

Intervalos menores generan curvas más frecuentes y límites más precisos; intervalos mayores simplifican la topografía.

4.4. Tolerancia de suavizado

Ajusta el nivel de suavizado aplicado a los bordes de la cuenca, evitando líneas irregulares o dentadas.

El rango de valores va de 0 a 100, donde 0 corresponde a contornos sin suavizar y 100 a un suavizado máximo.

7% Análisis hidrológico y fisiográfico

Archivos de entrada

Archivo(s) DEM: ASTGTM_S13W074_dem.tif; ASTGTM_S13W075_dem.tif; ASTGTM_S14W072_dem.tif; ASTGTM_S14W073_ Examinar

Punto de Aforo: C:/Users/MSI/Desktop/TesisSED/Aforo.kml Examinar

Directorio de Trabajo: C:/Users/MSI/Desktop Examinar

Parámetros opcionales

Distancia de ajuste (metros): 200 Intervalo de curvas (metros): 200

Umbral red hídrica: 5 Tolerancia suavizado: 30

Ejecutar análisis Cancelar Salir

Listo para iniciar

Salida del proceso



5. Ejecución del análisis

Una vez configurados todos los parámetros, se presiona el botón “Ejecutar análisis”.

El programa procesará automáticamente los DEM, reubicará el punto de aforo si es necesario, delimitará la cuenca y calculará los parámetros fisiográficos correspondientes.

Análisis hidrológico y fisiográfico

Archivos de entrada

Archivo(s) DEM: ASTGTM_S13W074_dem.tif; ASTGTM_S13W075_dem.tif; ASTGTM_S14W072_dem.tif; ASTGTM_S14W073_ Examinar

Punto de Aforo: C:/Users/MSI/Desktop/TesisSEDC/Aforo.kml Examinar

Directorio de Trabajo: C:/Users/MSI/Desktop/TesisSEDC Examinar

Parámetros opcionales

Distancia de ajuste (metros): 200 Intervalo de curvas (metros): 200

Umbral red hídrica: 5 Tolerancia suavizado: 30

Ejecutar análisis Cancelar Salir

Proceso completado

Salida del proceso

```
=====
CÁLCULO DE PARÁMETROS FISIográficos
=====
Longitudes totales de rios por orden....
Orden 1: 2052.15 kilómetros
Orden 2: 915.89 kilómetros
Orden 3: 608.16 kilómetros
Orden 4: 628.58 kilómetros
Orden 5: 243.60 kilómetros
Suma total de longitudes de rios: 4448.38 kilómetros
La longitud del cauce principal es: 564.336547852 km
Coordenadas del punto de inicio y final del cauce principal...
Punto inicial : E=809403.009184, N=8474425.91001
Punto final : E=661016.896692, N=8561596.22408
Cota punto inicial (nacimiento): 2278.0 m
Cota punto final (desembocadura): 722.0 m
Calculando coordenadas geocéntricas...
```

6. Resultados y exportación

Al finalizar el análisis, todos los parámetros fisiográficos (área, perímetro, longitud del cauce, pendiente media, entre otros) se exportan automáticamente a un archivo en formato Excel, ubicado en la carpeta de trabajo definida por el usuario.



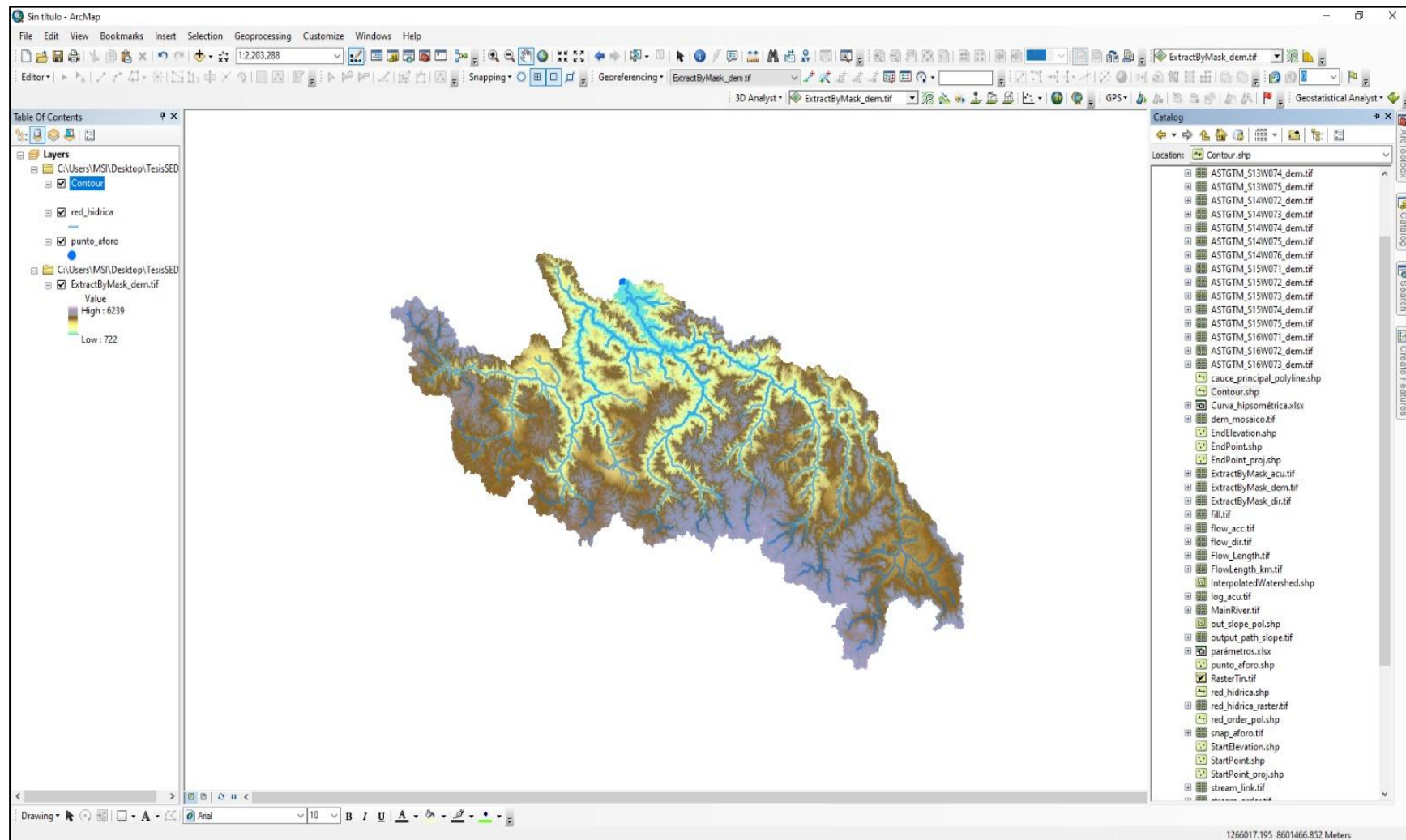
Archivo Inicio Compartir Vista				
Este equipo > Disco local (E:) > tesis_sandra > TesisSEDC				
Acceso rápido	Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
CHIPAO_2025	red_order_pol.shp	09/10/2025 12:50	AutoCAD Shape S...	498 KB
Descargas	StartElevation.shp	09/10/2025 12:55	AutoCAD Shape S...	1 KB
SANDRA TESIS	StartPoint.shp	09/10/2025 12:55	AutoCAD Shape S...	1 KB
tesis_sandra	watershed_polygon.shp	09/10/2025 12:56	AutoCAD Shape S...	487 KB
Este equipo	watershed_polygon_smooth.shp	09/10/2025 12:48	AutoCAD Shape S...	487 KB
Descargas	watershed_polygon_smooth_Pnt.shp	09/10/2025 12:48	AutoCAD Shape S...	1 KB
Documentos	Curva_hipsométrica.xlsx	09/10/2025 12:56	Hoja de cálculo d...	6 KB
Escritorio	parámetros.xlsx	09/10/2025 12:56	Hoja de cálculo d...	6 KB
Imágenes	resultados_dem.xlsx	09/10/2025 07:09	Hoja de cálculo d...	6 KB
Objetos 3D	watershed.ico	07/10/2025 11:58	Icono	119 KB
Videos	aforo.kml	19/09/2025 11:02	KML	2 KB
Disco local (C:)	cauce_principal_polyline.shp.xml	09/10/2025 12:55	Microsoft Edge H...	1 KB
Disco local (E:)	Contour.shp.xml	09/10/2025 12:48	Microsoft Edge H...	1 KB
Red	EndElevation.shp.xml	09/10/2025 12:55	Microsoft Edge H...	1 KB
	EndPoint.shp.xml	09/10/2025 12:55	Microsoft Edge H...	6 KB
	EndPoint.tif.aux.xml	08/10/2025 03:47	Microsoft Edge H...	1 KB
	EndPoint_all.shp.xml	19/09/2025 11:55	Microsoft Edge H...	1 KB
	ExtractByMask_acu.tif.aux.xml	09/10/2025 12:47	Microsoft Edge H...	2 KB
	ExtractByMask_acu.tif.xml	09/10/2025 12:47	Microsoft Edge H...	1 KB
	ExtractByMask_dem.tif.aux.xml	18/11/2025 01:41	Microsoft Edge H...	141 KB
	ExtractByMask_dem.tif.xml	09/10/2025 12:47	Microsoft Edge H...	1 KB
	ExtractByMask_dir.tif.aux.xml	09/10/2025 12:47	Microsoft Edge H...	2 KB
	ExtractByMask_dir.tif.xml	09/10/2025 12:47	Microsoft Edge H...	1 KB
	fill.tif.aux.xml	09/10/2025 12:44	Microsoft Edge H...	36 KB
	fill.tif.xml	09/10/2025 12:44	Microsoft Edge H...	1 KB
	flow_acc.tif.aux.xml	09/10/2025 12:46	Microsoft Edge H...	2 KB
	flow_acc.tif.xml	09/10/2025 12:46	Microsoft Edge H...	1 KB
	Flow_Acc_Main.tif.aux.xml	08/10/2025 03:47	Microsoft Edge H...	2 KB

7. Visualización en ArcGIS

La delimitación automática de la cuenca se representa directamente en el entorno de ArcGIS, dado que el programa se ejecuta sobre el intérprete de Python integrado en ArcGIS.

Esta integración permite:

- Lectura eficiente de datos ráster y vectoriales.
- Ejecución de algoritmos hidrológicos dentro del entorno GIS.
- Visualización inmediata del polígono de cuenca y la red de drenaje generada.



Anexo 04

"MATRIZ DE CONSISTENCIA"

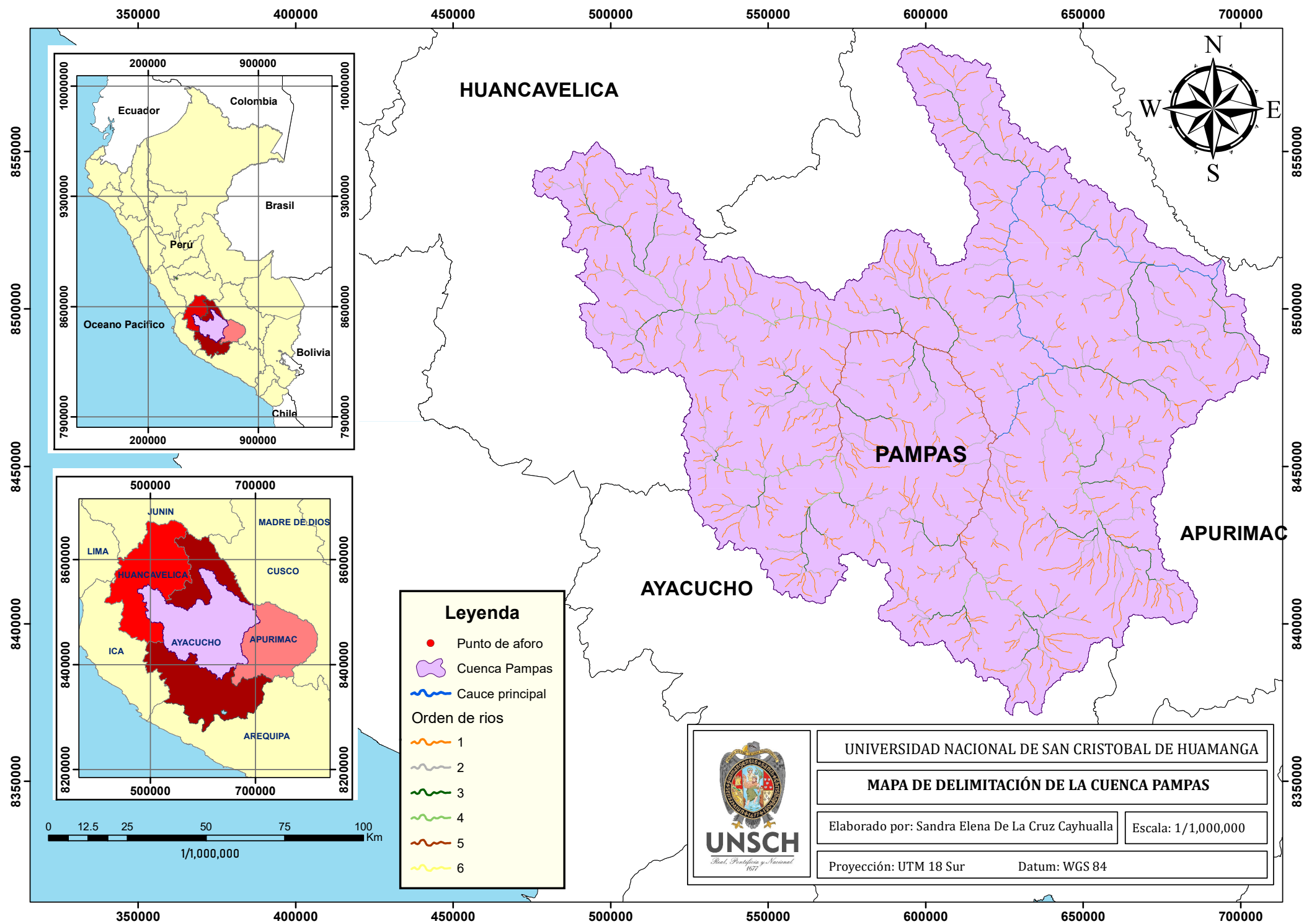
Implementación de una metodología automatizada en Python para la delimitación de cuencas y la estimación de parámetros fisiográficos, Ayacucho 2025

MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	Poblacion y Muestra
¿Cómo implementar una metodología automatizada en Python para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos?	Implementar una metodología automatizada en Python para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos	La implementación de la metodología automatizada en Python reduce significativamente los tiempos de ejecución y el uso de recursos computacionales, manteniendo la precisión, en la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos.	Metodología automatizada en Python (independiente)	Algoritmos y técnicas computacionales.	*-Número de algoritmos utilizados. *-Tipo de algoritmos utilizados *-Porcentaje de automatización alcanzado en comparación con métodos tradicionales.	Poblacion: La población de estudio está conformada por la cuenca Pampas.
Problemas Específicos:	Objetivos Específicos:	Hipótesis específicas		Librerías y herramientas de Python.	*-Lista de librerías utilizadas. *-Versatilidad de las herramientas empleadas.	
¿Cuáles son los algoritmos y técnicas computacionales adecuadas para la implementación de una metodología automatizada en Python para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos?	Seleccionar los algoritmos y técnicas computacionales adecuadas para la implementación de una metodología automatizada en Python para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos.	La selección adecuada de los algoritmos y técnicas computacionales para la implementación de una metodología automatizada en Python para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos, produce resultados consistentes y confiables.		Eficiencia computacional.	*-Tiempo de procesamiento por tarea *-Uso de memoria RAM durante la ejecución. *-Requisitos mínimos de hardware para ejecutar la metodología.	
¿Cuál es la eficiencia computacional de la metodología automatizada implementada en Python para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos?	Determinar la eficiencia computacional de la metodología automatizada implementada en Python para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos.	La metodología automatizada implementada en Python para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos, presenta una elevada eficiencia computacional.	Precisión y eficiencia en la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos (dependiente)	Precisión en la delimitación de cuencas hidrográficas.	*-Índice de Jaccard *-Error relativo en la extensión de la cuenca.	Muestra: La muestra de estudio está conformada por la cuenca Pampas
¿Cuál es el grado de precisión y eficiencia de la metodología automatizada implementada en Python para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos, en comparación con los métodos tradicionales?	Determinar el grado de precisión y eficiencia de la metodología automatizada implementada en Python para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos, en comparación con los métodos tradicionales.	El grado de precisión y eficiencia de la metodología automatizada implementada en Python para la delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos, en comparación con los métodos tradicionales, es muy alto.		Precisión en la estimación de parámetros fisiográficos.	*-Error absoluto medio (MAE) en la estimación de los parámetros *-Coeficiente de determinación (R²) entre los valores estimados y los valores reales. *-Desviación estándar de los errores en los parámetros estimados.	
				Eficiencia en el proceso de delimitación de cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros fisiográficos.	*-Tiempo total de ejecución para completar la delimitación y cálculo de parámetros. *-Reducción porcentual del tiempo en comparación con métodos tradicionales.	

Anexo 05

"MAPA DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA PAMPAS"





ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 066-2025-FIMGC

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA CIVIL

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga de la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **RESOLUCIÓN DECANAL N° 498-2025-FIMGC-D**, a los **dieciocho días del mes de diciembre de 2025**, siendo las **10:00 a.m.**, reunidos en el **Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil**, bajo la presidencia del **Mg. Ing. Edmundo CANCHARI GUTIERREZ** y los miembros: **MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CÁRDENAS**; **Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO** y **Ing. Edward LEON PALACIOS**, actuando como secretario docente el **Ing. Saúl Walter RETAMOZO FERNANDEZ**, para proceder a la sustentación de tesis para optar el **Título Profesional de Ingeniera Civil**, del bachiller:

SANDRA ELENA DE LA CRUZ CAYHUALLA

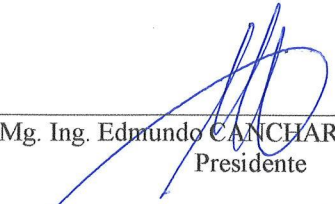
Quien presentó la tesis denominada:

Implementación de una metodología automatizada en Python para la delimitación de cuencas y la estimación de parámetros fisiográficos, Ayacucho 2025

Los señores miembros del jurado, luego de expuesta la tesis y absueltas las preguntas, deliberaron y declararon:

Aprobado con Diecisiete (17)

Siendo las **12:00 p.m.** del día **18 de diciembre de 2025**, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad con lo actuado, los miembros del jurado firman al pie del presente.


Mg. Ing. Edmundo CANCHARI GUTIERREZ
Presidente


Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO
Miembro


Ing. Edward LEON PALACIOS
Miembro


MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CÁRDENAS
Miembro - Asesor


Ing. Saúl Walter RETAMOZO FERNANDEZ
Secretario docente de la FIMGC



CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA N° 032-2025-FIMGC/ASIH

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado con el software Turnitin, de la Escuela Profesional de **Ingeniería Civil** de la **Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil**; en cumplimiento a la **Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSH-CU**, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga y **Resolución Decanal N° 697-2024-FIMGC-UNSH-D**, dejo constancia de originalidad de trabajo de investigación, que el/la Sr./Srta.

Apellidos y Nombres : Sandra Elena DE LA CRUZ CAYHUALLA
Escuela Profesional : INGENIERÍA CIVIL
Título de la Tesis : Implementación de una metodología automatizada en Python para la delimitación de cuencas y la estimación de parámetros fisiográficos, Ayacucho 2025
Evaluación de la Originalidad : 10 % Índice de Similitud
Identificador de la entrega : 2852104449

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

En señal de conformidad y verificación se firma la presente constancia

Ayacucho, 31 de diciembre del 2025



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil

Mg. Ing. Alex Sander IRCANAUPA HUAMANT
Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado
Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil

Implementación de una metodología automatizada en Python para la delimitación de cuencas y la estimación de parámetros fisiográficos, Ayacucho 2025

por Sandra Elena DE LA CRUZ CAYHUALLA

Fecha de entrega: 31-dic-2025 04:08p. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2852104449

Nombre del archivo: Tesis_Sandra_Elena_Delacruz_Cayhualla.pdf (20.14M)

Total de palabras: 46677

Total de caracteres: 273775

Implementación de una metodología automatizada en Python para la delimitación de cuencas y la estimación de parámetros fisiográficos, Ayacucho 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%	11%	8%	5%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga	1%
	Trabajo del estudiante	
2	hdl.handle.net	1%
	Fuente de Internet	
3	repositorioacademico.upc.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
4	Submitted to American University of the Middle East	<1%
	Trabajo del estudiante	
5	Submitted to espam	<1%
	Trabajo del estudiante	
6	Submitted to Universidad TecMilenio	<1%
	Trabajo del estudiante	
7	www.slideshare.net	<1%
	Fuente de Internet	

8	Submitted to Universidad Católica Boliviana "San Pablo"	<1 %
	Trabajo del estudiante	
9	issuu.com	<1 %
	Fuente de Internet	
10	Submitted to UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR_MOODLE	<1 %
	Trabajo del estudiante	
11	Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC	<1 %
	Trabajo del estudiante	
12	ri.conicet.gov.ar	<1 %
	Fuente de Internet	
13	www.geoinformatics.upol.cz	<1 %
	Fuente de Internet	
14	JCI INGENIERIA & SERVICIOS AMBIENTALES S.A.C.. "Quinto ITS de la Unidad Minera Carahuacra-IGA0012824", R.D. N° 00113-2020-SENACE-PE/DEAR, 2021	<1 %
	Publicación	
15	livrosdeamor.com.br	<1 %
	Fuente de Internet	
16	rei.iteso.mx	<1 %
	Fuente de Internet	
17	hub.openingdesign.com	
	Fuente de Internet	

<1 %

18

repositorio.urp.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

19

vbook.pub

Fuente de Internet

<1 %

20

Submitted to Universidad Andina del Cusco

Trabajo del estudiante

<1 %

21

ruidera.uclm.es

Fuente de Internet

<1 %

22

programtalk.com

Fuente de Internet

<1 %

23

"XIX reunión nacional SELPER-México: Memorias", Universidad Nacional Autonoma de Mexico, 2011

Publicación

<1 %

24

dspace.utpl.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

25

BISA INGENIERIA DE PROYECTOS S.A.. "Plan de Cierre de Minas Detallado para la Cantera Azul-IGA0014145", R.D. N° 352-2016-PRODUCE/DVMYPE-I/DIGGAM, 2021

Publicación

<1 %

26

sedici.unlp.edu.ar

Fuente de Internet

<1 %

27	repositorio.umsa.bo Fuente de Internet	<1 %
28	repository.udistrital.edu.co Fuente de Internet	<1 %
29	repositorio.ucp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
30	Garcia, Sandra G. "A real-time flood forecasting and simulation system based on GIS and DEM: Analysis of sensitivity to scale factors", Proquest, 20111108 Publicación	<1 %
31	repositorio.ana.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
32	eprints.ucm.es Fuente de Internet	<1 %
33	dokumen.tips Fuente de Internet	<1 %
34	huru.unsj.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
35	tienecarajo.fun Fuente de Internet	<1 %
36	documentop.com Fuente de Internet	<1 %
37	sired.udenar.edu.co Fuente de Internet	

<1 %

38

Submitted to Universidad Popular del
César,UPC

Trabajo del estudiante

<1 %

39

www.puertosycostas.com

Fuente de Internet

<1 %

40

www.uncuyo.edu.ar

Fuente de Internet

<1 %

41

dspace.ups.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

42

Submitted to Open University

Trabajo del estudiante

<1 %

43

Submitted to Universidad Católica de
Colombia

Trabajo del estudiante

<1 %

44

manglar.uninorte.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

45

Submitted to Universidad Popular del
Cesar,UPC

Trabajo del estudiante

<1 %

46

www.alcaldiasoacha.gov.co

Fuente de Internet

<1 %

47

www.readbag.com

Fuente de Internet

<1 %

48 JUAN JOSÉ MONTOYA MONSALVE. "Desarrollo de un modelo conceptual de producción, transporte y depósito de sedimentos.", Universitat Politecnica de Valencia, 2008
Publicación <1 %

49 de.slideshare.net
Fuente de Internet <1 %

50 es.slideshare.net
Fuente de Internet <1 %

51 s3.amazonaws.com
Fuente de Internet <1 %

52 www.aicm.com.mx
Fuente de Internet <1 %

53 www.ana.gob.pe
Fuente de Internet <1 %

54 rid.unrn.edu.ar
Fuente de Internet <1 %

55 trampa-eras-nombre.fun
Fuente de Internet <1 %

56 www.aguaquito.gob.ec
Fuente de Internet <1 %

57 Submitted to CSU, San Diego State University
Trabajo del estudiante <1 %

58 oa.upm.es
Fuente de Internet

<1 %

59

repositorio.unap.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

60

Submitted to CTI Education Group

Trabajo del estudiante

<1 %

61

Submitted to Universidad Continental

Trabajo del estudiante

<1 %

62

Submitted to Universidad Pablo de Olavide

Trabajo del estudiante

<1 %

63

rdi.uncoma.edu.ar

Fuente de Internet

<1 %

64

repositorio.usfq.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

< 30 words

Excluir bibliografía

Activo