



Sistema integral para el análisis de microcuencas (SIAM)

Ignacio Sánchez-Cohen^{1*} (<https://orcid.org/0000-0002-9063-7114>)

Gerardo Esquivel-Arriaga¹ (<https://orcid.org/0000-0002-5043-817X>)

Sergio Iván Jiménez-Jiménez¹ (<https://orcid.org/0000-0001-9776-475X>)

Marco Antonio Inzunza-Ibarra¹ (<https://orcid.org/0000-0002-5122-8377>)

Gabriel Díaz-Padilla² (<https://orcid.org/0000-0002-4763-118X>)

Rafael Alberto Guajardo-Panes² (<https://orcid.org/0000-0002-2755-5546>)

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. Margen derecha Canal de Sacramento km 6.5, Las Huertas, Gómez Palacio, Durango, C. P. 35140, México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro Regional de Investigación Golfo Centro. Carretera Federal Veracruz-Cordoba km 22.5, Paso del Toro, Medellín de Bravo, Veracruz, C. P. 94277, México.

*Autor para correspondencia: ignacio_sanchezcohen@hotmail.com

Resumen

Las microcuencas constituyen unidades para la gestión territorial y ambiental debido a su papel en la conservación de suelos, la restauración forestal, el manejo sostenible de los recursos hídricos y el mantenimiento de la biodiversidad. Sin embargo, su delimitación y caracterización suelen



requerir conocimientos técnicos especializados y el uso de programas complejos, lo que limita su aplicación por parte de usuarios no expertos. El objetivo del presente trabajo fue desarrollar un Sistema Integral para el Análisis de Microcuencas (SIAM) basado en Python, para delimitar, caracterizar y analizar microcuencas hidrográficas mediante una interfaz gráfica intuitiva. El sistema elimina la necesidad de instalar un programa especializado o realizar procesos complejos de preparación de datos; además, permite personalizar los parámetros. El SIAM es una herramienta útil para gestionar proyectos de captación de agua de lluvia, así como estudios de erosión y planificación territorial. La herramienta contribuye a ampliar el acceso a tecnologías de análisis hidrológico y geoespacial, lo que favorece la toma de decisiones en proyectos de manejo, conservación y aprovechamiento sostenible de microcuencas.

Palabras clave: hidrología, microcuencas, delimitación de cuencas, DEM.

Recibido: 20/08/2025

Aceptado: 07/05/2026

Introducción

Las cuencas hidrográficas constituyen unidades naturales de planificación y gestión ambiental, en las que interactúan factores naturales, sociales e institucionales (Aguirre et al., 2021). En este contexto, la hidrología proporciona los fundamentos científicos y técnicos necesarios para comprender la dinámica del ciclo hidrológico, evaluar los procesos que ocurren en las cuencas y sustentar la toma de decisiones relacionadas con la gestión sostenible del agua (Cevallos-Delgado et al., 2024). Asimismo, la información hidrológica es un componente esencial en estudios climáticos (Fong et al., 2025), agrícolas (Hosseini & Bailey, 2024; Xiao et al., 2024), ambientales (Kavka, 2021; Tsegaye et al., 2024), geomorfológicos (Gezahegn & Mengistu, 2025; Sedighi et al., 2021) y de gestión de riesgos (Bashir & Alsalman, 2024), entre otros.



La delimitación de cuencas hidrográficas se puede realizar mediante métodos tradicionales basados en el uso de cartas topográficas o a través de procedimientos automatizados apoyados en modelos digitales de elevación (MDE), técnicas de percepción remota y sistemas de información geográfica (Bashir & Alsalman, 2024; Salvi et al., 2017). Entre las herramientas computacionales de código abierto más utilizadas para el análisis de las cuencas destacan Whitebox (Lindsay, 2005), TauDEM (Tarboton & Mohammed, 2013), GRASS GIS (Neteler et al., 2012), SAGA GIS (Conrad et al., 2015) y WMPA-P (Haag et al., 2020), además de diversas plataformas web orientadas al análisis hidrológico (Arnold et al., 1998; Eastman, 2016; Zhang et al., 2025). No obstante, el uso de estas herramientas suele requerir conocimientos especializados.

Dentro de las cuencas hidrográficas, las microcuencas representan unidades espaciales de menor escala delimitadas por agua que conducen el escurrimiento hacia un punto común de salida (Kumar et al., 2017). Debido a su tamaño, constituyen unidades estratégicas para la planificación territorial, la conservación de suelos, la restauración forestal, el manejo sostenible del agua y la implementación de prácticas de adaptación al cambio climático. Además, desempeñan un papel relevante en la conservación de la biodiversidad, la regulación del microclima y la protección de fuentes hídricas, lo cual influye directamente en el comportamiento hidrológico de las cuencas de mayor jerarquía a las que pertenecen (Anggraini et al., 2025). Sin embargo, a pesar de su importancia, las herramientas orientadas al análisis integral de microcuencas aún son limitadas (Balasubramani et al., 2019; Datta, 1995).

Considerando lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue desarrollar un Sistema Integral para el Análisis de Microcuencas (SIAM) basado en Python, para delimitar, caracterizar y analizar microcuencas hidrográficas mediante una interfaz gráfica intuitiva. La herramienta se diseñó bajo criterios de accesibilidad, eficiencia y facilidad de uso, con el fin de automatizar procedimientos complejos sin requerir licencias especializadas ni conocimientos avanzados de hidrología o de sistemas de información geográfica. El SIAM busca ampliar el acceso a herramientas de análisis hidrológico y fortalecer los procesos de planificación, conservación y gestión sostenible de los recursos hídricos.



Materiales y métodos

Desarrollo e implementación del sistema

El SIAM se desarrolló en lenguaje Python debido a su amplia disponibilidad de librerías y su fácil manejo (Viduka et al., 2021). La aplicación se diseñó como una herramienta orientada a delimitar, caracterizar y analizar microcuencas a partir de MDE. La arquitectura del sistema integra bibliotecas de código abierto para el procesamiento de datos (Cuadro 1). Para evaluar la funcionalidad del sistema se utilizó un MDE correspondiente a una porción del municipio de Palenque, Chiapas, México, donde se localiza el río Chancalá. No obstante, la aplicación admite información topográfica proveniente de cualquier fuente compatible con formatos geospaciales estándar.

Cuadro 1. Librerías de Python empleadas en el desarrollo e implementación del Sistema Integral para el Análisis de Microcuencas (SIAM).

Librería	Función
<i>pysheds</i>	Procesamiento hidrológico del modelo digital de elevación
<i>rasterio</i>	Lectura y escritura de datos geospaciales (GeoTIFF).
<i>matplotlib</i>	Visualización de mapas y gráficos
<i>tkinter</i>	Creación de interfaz gráfica de usuario
<i>numpy</i> y <i>scipy</i>	Operaciones numéricas y morfológicas eficientes
<i>skimage</i>	Optimización y mejora de la red de drenaje

Delimitación de microcuencas y extracción de la red de drenaje



La delimitación de la microcuenca y su red de drenaje se realizó mediante la librería *pysheds*, especializada en análisis hidrológico sobre datos *raster*. Las características esenciales de esta librería son las siguientes:

1. Extrae redes de drenaje y delimita cuencas hidrográficas de forma eficiente y personalizable. Inicia con la selección de un punto de salida, donde se recibirá el escurrimiento. La librería permite al usuario definir dicho punto mediante un clic interactivo en el MDE o a partir de coordenadas geográficas UTM (*Universal Transverse Mercator*). La aplicación incluye una función de “ajuste al cauce” (*snap-to-river*), la cual asegura la ubicación del punto de salida sobre la red de drenaje.
2. Realiza el preprocesamiento del MDE (relleno de depresiones y resolución de planos) y calcula la dirección y la acumulación del flujo, lo cual garantiza una delineación precisa, incluso en MDE con imperfecciones.
3. Extrae y mejora la red de drenaje. El usuario puede ajustar el umbral de acumulación de las celdas para definir la densidad de la red de drenaje. Un umbral bajo revelará arroyos más pequeños, mientras que uno alto se centrará en los cauces principales.
4. Incorpora algoritmos de morfología matemática (*skimage*) para mejorar la continuidad y la visualización de la red de drenaje. El algoritmo base para obtener la dirección del flujo es el de altura determinística, en donde el flujo se mueve hacia el vecino con mayor pendiente descendente al comparar las alturas en píxeles en el MDE (O’Callaghan & Mark, 1984).

Cálculo de parámetros morfométricos

Una vez delineada la microcuenca, el sistema calcula un conjunto de parámetros morfométricos relacionados con su forma, tamaño y respuesta hidrológica (Melsse et al., 2025; Shekar & Mathew,



2024). Las dimensiones básicas consideradas incluyen el área de la cuenca (A , km²), el perímetro (P , km) el relieve (R , m) y la pendiente media (S), obtenidas a partir de las ecuaciones 1 a 4:

$$A = \sum \text{superficie de la cuenca} \quad (1)$$

$$P = \text{Longitud del contorno de la cuenca} \quad (2)$$

$$R = H_{max} - H_{min} \quad (3)$$

$$S = \frac{R}{Lb} \quad (4)$$

donde H_{max} y H_{min} son la altura máxima y mínima de la cuenca, respectivamente (m) y Lb es la longitud de la cuenca (m).

Asimismo, se determinaron parámetros asociados a la respuesta hidrológica de la cuenca, entre ellos la longitud del cauce principal (Lcp , m) y la pendiente del cauce principal (Sp), obtenidos mediante las ecuaciones 5 y 6:

$$Lcp = \text{Longitud del cauce mayoritario de la cuenca} \quad (5)$$

$$Sp = \frac{Hmax_{cp} - Hmin_{cp}}{Lcp} \quad (6)$$

donde $Hmax_{cp}$ y $Hmin_{cp}$ son la altura máxima y mínima del cauce principal (cp), respectivamente.

La caracterización de la red de drenaje incluyó el cálculo de la longitud total de cauces (Lt) y la densidad de drenaje (Dd), ecuaciones 7 y 8, respectivamente. Este parámetro constituye un indicador de la eficiencia del drenaje y de la capacidad de infiltración del terreno.

$$Lt = \sum_{c=1}^{c=N} Lcc \quad (7)$$

$$Dd = \frac{Lt}{A} \quad (8)$$



donde Lcc es la longitud parcial de cada cauce hasta sumar el total (N).

La forma de la cuenca se evaluó mediante el factor de forma (Ff) y el índice de compacidad (Ic), obtenidos a partir de las ecuaciones 9 y 10, respectivamente. Estos índices permiten inferir la susceptibilidad de la cuenca a generar escurrimientos concentrados y picos de caudal durante eventos de precipitación.

$$Ff = \frac{A}{Lb^2} \quad (9)$$

$$Ic = \frac{0.2821P}{\sqrt{A}} \quad (10)$$

Adicionalmente, se analizó la estructura jerárquica de la red hidrográfica mediante el método de ordenamiento de Strahler. En este sistema, los cauces sin afluente se clasifican como de primer orden y el encuentro de dos cauces del mismo orden genera un cauce de orden superior. Este indicador proporciona información sobre el grado de desarrollo y complejidad geomorfológica de la microcuenca.

Estimación del escurrimiento superficial

El escurrimiento superficial directo se estimó por el método de la curva numérica (CN) desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS, por sus siglas en inglés). Este procedimiento relaciona la precipitación (Pr) con las características del suelo, la cobertura vegetal y las condiciones de humedad antecedente para estimar la lámina de escurrimiento generada durante un evento de lluvia (Hawkins et al., 2009; United States Department of Agriculture [USDA], 1986).



El volumen de escurrimiento (Q) se calculó mediante la ecuación 11, mientras que las abstracciones iniciales (Ia) y la capacidad de retención de humedad del suelo (CR) se determinaron mediante las ecuaciones 12 y 13, respectivamente. El valor de CN se asignó con base en tablas estandarizadas que consideran las características edáficas y la cobertura vegetal de la cuenca (Almeida-da Cunha et al., 2021).

$$Q = \frac{(Pr-0.2CR)^2}{Pr+0.8CR} \quad \text{si } Pr > Ia \quad (11)$$

$$Q = 0 \quad \text{si } Pr < Ia$$

$$Ia = 0.2CR \quad (12)$$

$$CR = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (13)$$

Generación de hidrogramas unitarios

El sistema incorporó un módulo para la generación de hidrogramas sintéticos basado en el hidrograma unitario adimensional del SCS. El tiempo de concentración (Tc) se puede calcular automáticamente mediante la ecuación de Kirpich (ecuación 14) o de manera manual (Kirpich, 1940; Chow et al., 1988).

$$Tc = 0.0195Lcp^{0.77}S^{-0.385} \quad (14)$$

A partir de este parámetro y del tiempo de duración de la tormenta (D) se calculó el tiempo al pico del hidrograma (Tp) mediante la ecuación 15; posteriormente, se determinó el caudal pico (Qp) conforme a la ecuación 16.



$$Tp = Tc + \frac{D}{2} \quad (15)$$

$$Qp = \frac{0.208AQ}{Tp} \quad (16)$$

Simulación del balance hídrico

Como complemento al análisis hidrológico, el SIAM incorporó un módulo de simulación de balance hídrico en formato HTML. El procedimiento consideró un sistema simplificado (no asume percolación profunda ni ascenso capilar), desarrollado en una parcela (punto de control) con entradas (precipitación y escurrimiento) y salidas (evapotranspiración).

El escurrimiento (Q) dirigido hacia el área de cultivo se estimó mediante la ecuación 17, la cual considera la precipitación (Pr), el coeficiente de escurrimiento (CE), y la relación entre el área de siembra y el área de captación o escurrimiento ($RASAE$; Figura 1). Esta relación establece el área de siembra (m o Ha) que habrá por cada área de escurrimiento; por ejemplo, una relación 3:1 implica que hay 3 m o unidades de siembra por cada metro o unidad de escurrimiento. Posteriormente, se obtuvo el contenido de humedad del suelo mediante la ecuación 18, que incorpora la evapotranspiración del cultivo (Eta) calculada con el método de Hargreaves y Samani (1985). El análisis se realizó semanalmente.

$$Q = Pr \times CE \times RASAE \quad (17)$$

$$\Delta\theta = (Pr + Q) - Eta \quad (18)$$

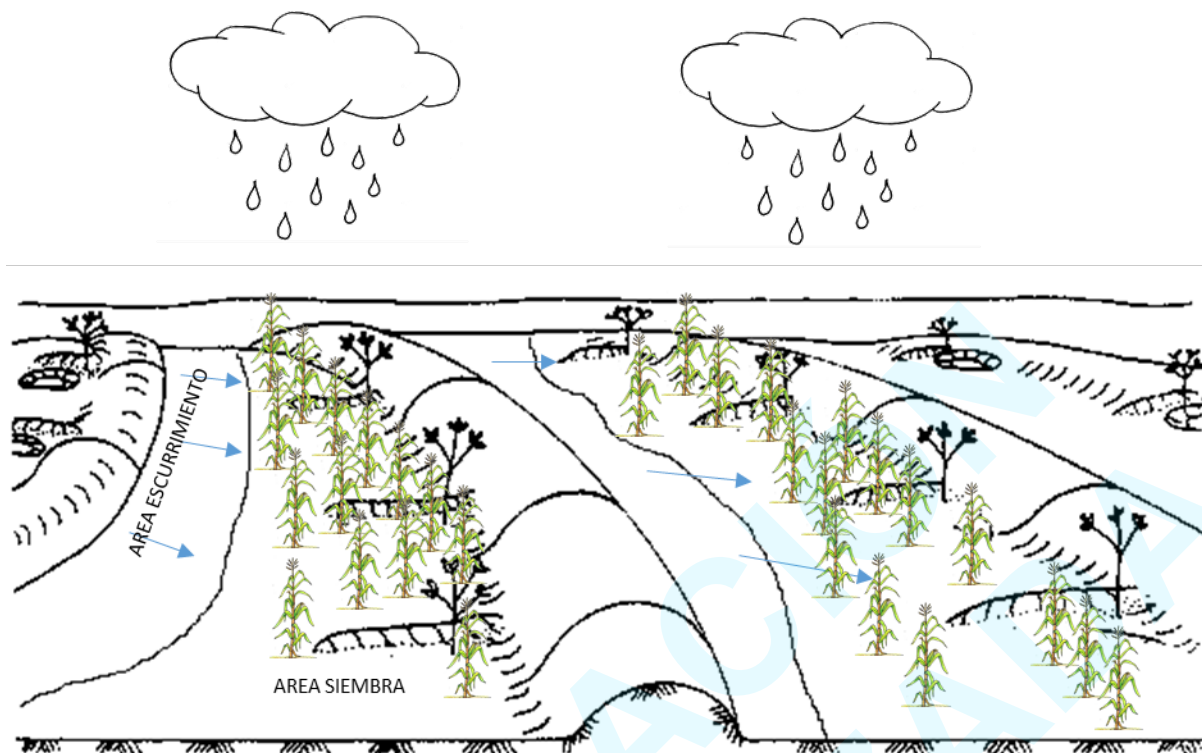


Figura 1. Esquema del sistema de captación de agua utilizado para calcular el balance hídrico del suelo.

Visualización y exportación de resultados

Los resultados generados por el SIAM se presentan mediante mapas interactivos que incluyen el MDE, la red de drenaje, la microcuenca delineada y el punto de salida. Asimismo, la información espacial se puede exportar en formato GeoTIFF y los datos hidrológicos se pueden almacenar en formato CSV para su análisis posterior.

Resultados y discusión

El código fuente del SIAM se encuentra disponible de forma libre en un repositorio público (<https://github.com/Lolabais/DELINEADOR.git>); el ejecutable se puede obtener directamente con los autores. La Figura 2 muestra la interfaz principal del SIAM, en la cual se aprecian los módulos que considera.

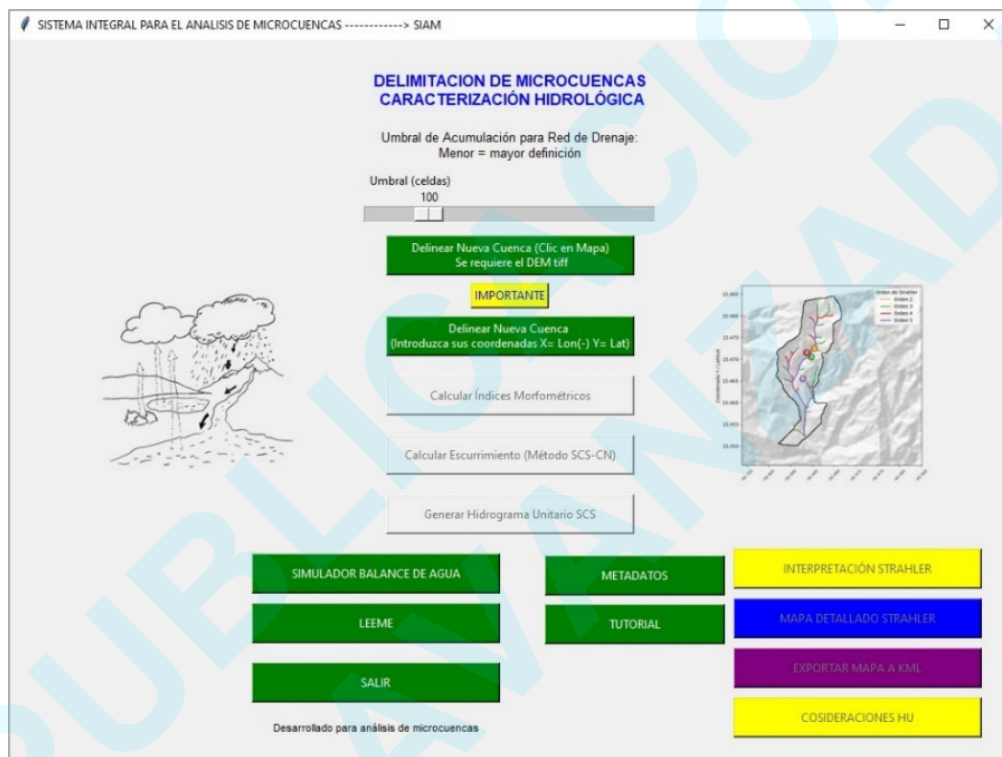


Figura 2. Interfaz principal del Sistema Integral para el Análisis de Microcuencas (SIAM).

El primer botón corresponde a la densidad de drenaje. La barra permite incrementar o reducir este valor; valores bajos generan redes de drenaje más densas. Aunque el valor óptimo depende del tamaño de la cuenca, se observó que un valor cercano a 100 arroja una red de drenaje lo suficientemente densa como para facilitar la selección del punto a partir del cual se delimitará la microcuenca. Para delinear la cuenca, el usuario tiene que proporcionar el MDE (de hasta 10 000 ha) de la microcuenca de interés (Figura 3a). El MDE puede estar en coordenadas geográficas o

proyectadas (UTM), ya que el SIAM realiza las conversiones pertinentes para los cálculos. Una vez seleccionado el punto de aforo, se genera automáticamente la microcuenca con su red de drenaje (Figura 3b). El botón “mapa detallado Strahler” despliega el orden de Strahler de la microcuenca (Figura 3c). Este orden sirve, entre otras cosas, para identificar sitios estratégicos para conservación, monitoreo o infraestructura hidráulica, así como para evaluar vulnerabilidad a inundaciones y delimitar zonas prioritarias para reforestación o control de erosión (Pareta & Pareta, 2024). El mapa se puede exportar como XML para su visualización en Google Earth (Figura 3d).

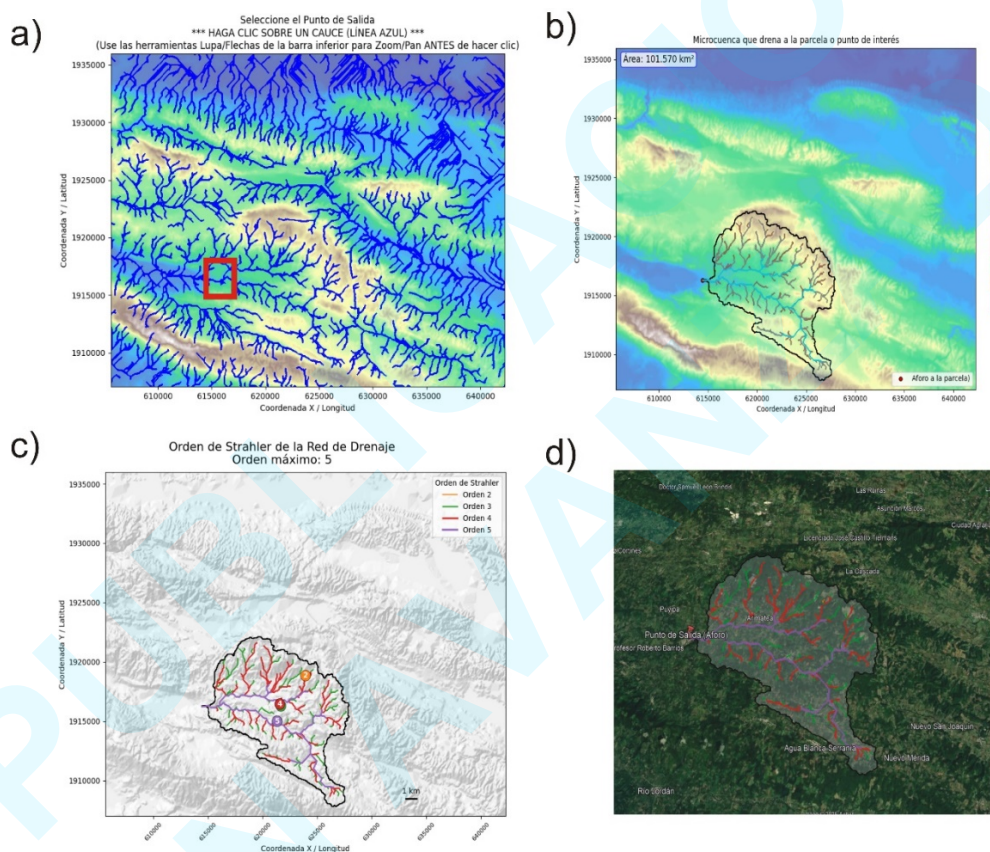


Figura 3. Delimitación y caracterización hidrográfica con el Sistema Integral para el Análisis de Microcuencas (SIAM) de una microcuenca localizada en la cuenca del río Chancalá, Palenque, Chiapas, México: a) red de drenaje del modelo digital de elevación, b) delimitación de la microcuenca, c) clasificación jerárquica de la red de drenaje según el método de Strahler y d) visualización de la microcuenca delimitada en Google Earth.



A diferencia de plataformas geospaciales de propósito general, como QGIS, o de modelos hidrológicos integrales como SWAT, el SIAM concentra en una sola interfaz las etapas fundamentales requeridas para la delimitación y caracterización de microcuencas orientadas a estudios de balance hídrico y a la captación de agua de lluvia, lo que reduce la necesidad de procedimientos intermedios y configuraciones especializadas.

Después de delinear la cuenca, se habilitan los demás botones. El módulo de análisis morfométrico (calcular índices morfométricos) despliega los parámetros morfométricos esenciales para comprender la forma, el tamaño y la respuesta hidrológica de la microcuenca (Figura 4).

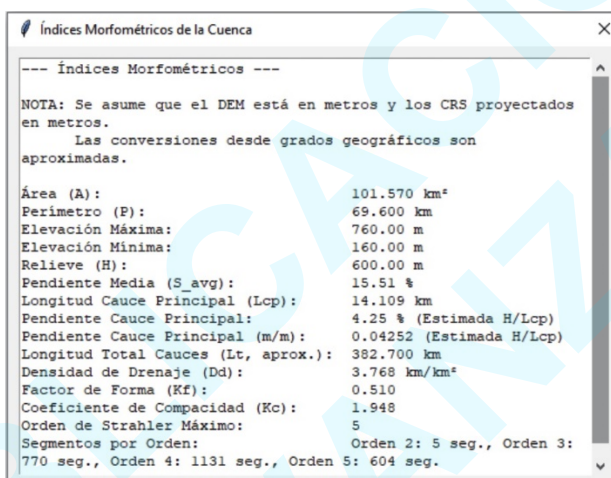


Figura 4. Parámetros morfométricos calculados por el Sistema Integral para el Análisis de Microcuencas (SIAM) para la microcuenca delimitada.

El botón “calcular escurrimiento (método SCS-CN)” muestra una interfaz para introducir la CN de la cuenca (Figura 5a). Este valor puede ser ponderado por área si la cuenca es grande, existen diferencias altitudinales importantes o si los regímenes pluviales son muy diferentes. En esta sección hay un botón de ayuda para identificar la CN de la cuenca de interés (Figura 5b).



a) **Cálculo de Esguimiento - Método SCS-CN**

Cálculo de Esguimiento - Método SCS-CN

Calcula la lámina y volumen de esguimiento directo para una tormenta dada.

Número de Curva (CN): (1-100)

Precipitación Total (P): (mm)

Lámina Esguimiento (Q): 3.58 mm
Volumen Total: 363828.50 m³
Volumen Total: 0.3638 hm³ (millones de m³)

b) **GUIA PARA LA SELECCIÓN DE LA CURVA NUMÉRICA DE LA CUENCA DE INTERÉS**
PRIMERO IDENTIFIQUE EL TIPO DE CUBIERTA DE LA CUENCA, POSTERIORMENTE EL GRUPO HIDROLÓGICO DEL SUELO AUXILIÁNDOSE DE LA TABLA

CLASIFICACION DE LA CUBIERTA	GRUPO HIDROLÓGICO DEL SUELO			
	A	B	C	D
BOSQUE CADUCIFOLIO	36	60	73	79
BOSQUE SIEMPRE VERDE	30	55	70	77
BOSQUE MIXTO	30	55	70	77
ARBUSTOS (MANGONÉS)	35	56	70	77
PASTIZALES/HERBACEAS	49	69	79	84
PASTURA	49	69	79	84
CULTIVOS ANUALES	62	71	78	81
HUMEDALES (MADERABLES)	45	66	77	83
HUMEDALES (HERBACEAS)	49	69	79	84

LA CURVA NUMÉRICA DEFINE LA CAPACIDAD DEL SUELO PARA TRANSFORMAR LA PRECIPITACION EN ESGUIMIENTO. ESTA DEPENDE DE TRES FACTORES: TIPO DE CUBIERTA, VEGETAL, ESTADO DE ESTA CUBIERTA Y DEL GRUPO HIDROLÓGICO DEL SUELO. EL GRUPO HIDROLÓGICO DEPENDE DE LA TEXTURA Y DE LA CAPACIDAD DE INFILTRAR EL AGUA DE LLUVIA

Grupo hidrológico del suelo	Infiltración cuando están muy húmedos	Características	Textura
A	Rápida	Alta capacidad de infiltración > 76 mm/h	Arenosa
B	Moderada	Capacidad de infiltración 76-38 mm/h	Arenosa-arenosa Franca
C	Lenta	Capacidad de infiltración 38-13 mm/h	Franco-arenosa Franco-arcillosa
D	May Lenta	Capacidad de infiltración < 13 mm/h	Arcillo-arenosa Arcillosa

MIENTRAS MAS ALTO EL VALOR DE LA CURVA NUMÉRICA, MAS SU CAPACIDAD DE PRODUCIR ESGUIMIENTO. SI LA CUENCA PRESENTA ALTA VARIABILIDAD ESPACIAL DE SU ESTADO DE SUPERFICIE, ENTONCES ES PERTINENTE OBTENER UNA CURVA NUMÉRICA PONDERADA POR AREA.

Figura 5. Estimación del esguimiento superficial basada en el método de curva numérica (SCS-CN) por el Sistema Integral para el Análisis de Microcuencas (SIAM) para la microcuenca delimitada: a) interfaz para introducir parámetros hidrológicos y calcular el esguimiento, y b) herramienta de apoyo para seleccionar el valor de CN.

Finalmente, el botón “generar hidrograma unitario” despliega una interfaz con los datos hidrológicos de la microcuenca delineada (Figura 6a). En esta sección se pueden corroborar o modificar los datos para obtener el hidrograma unitario sintético; posteriormente, se puede generar la gráfica del hidrograma (Figura 6b).

a) **Generador de Hidrograma SCS**

Generador de Hidrograma Unitario SCS

Área de la Cuenca (A): 101.570 km²

Este módulo genera un hidrograma sintético basado en el método del Hidrograma Unitario Adimensional del SCS (Soil Conservation Service, ahora NRCS).

Parámetros Clave:

- Tiempo de Concentración (Tc): Tiempo que tarda el agua en viajar desde el punto hidráulicamente más lejano hasta la salida de la cuenca. Se estima con la fórmula de Kirpich si Lcp y S_cauce están disponibles.
- Número de Curva (CN): Representa la capacidad de generación de esguimiento de la cuenca (depende del uso/tipo de suelo y condición hidrológica).
- Precipitación (P) y Duración (D): Características de la tormenta de diseño. La duración afecta el Tiempo al Pico (Tp) y el Caudal Pico (Qp).

El Caudal Pico (Qp) se calcula usando la fórmula del SCS:
 $Qp = (k \cdot A \cdot Q) / Tp$
 Donde:
 - Qp = Caudal Pico (m³/s)
 - k = Factor de conversión de unidades (0.00278 para A en km², Q en mm, Tp en hr)
 - A = Área de la cuenca (km²)
 - Q = Lámina de esguimiento (mm), calculada con P y CN.
 - Tp = Tiempo al Pico (hr), relacionado con la duración (D) y Tc.

Ajuste los parámetros según su estudio hidrológico:

Cálculo del Tiempo de Concentración:

Automático (basado en morfometría)

Basado en longitud del cauce principal manual

Longitud del Cauce Principal: km

Tiempo de Concentración (Tc): (min)

Número de Curva (CN): (1-100)

Precipitación Total (P): (mm)

Duración de Precipitación (D): (horas)

Resultados Calculados:

Lámina Esguimiento (Q): 3.58 mm
 Tiempo al Pico (Tp): 1.529 hr
 Caudal Pico (Qp): 0.661 m³/s

¡IMPORTANTE! Los valores de Tc, CN, P y D son cruciales y deben basarse en estudios hidrológicos específicos para la cuenca y la tormenta de diseño. Los valores iniciales son solo estimaciones.

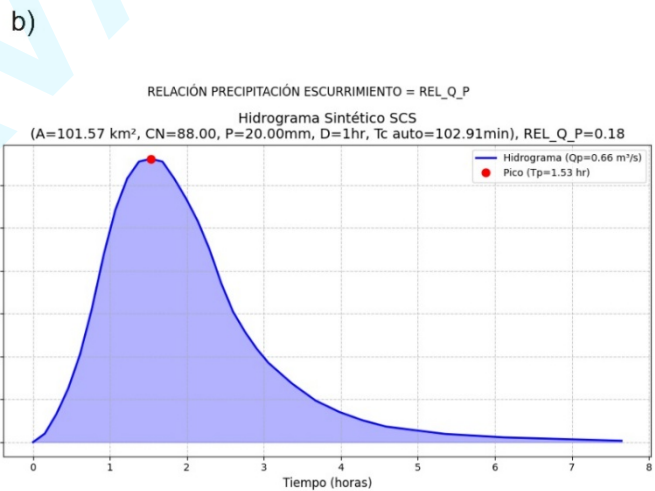




Figura 6. Hidrograma unitario sintético generado por el Sistema Integral para el Análisis de Microcuencas (SIAM) para la microcuenca delimitada a partir de sus características morfométricas e hidrológicas.

Ventajas, limitaciones, aplicaciones y consideraciones

Una de las principales fortalezas del SIAM es su carácter gratuito y de código abierto, lo que elimina las barreras económicas asociadas al uso de un programa especializado. Además, ofrece un flujo de trabajo completo, desde la delimitación hasta el análisis hidrológico, en una sola aplicación, lo que permite automatizar tareas. La aplicación incluye el botón “léeme”, el cual proporciona instrucciones detalladas sobre su uso, así como consejos para la selección del umbral de acumulación y la interacción con los mapas.

La herramienta presenta un alto potencial para aplicaciones relacionadas con la planificación de sistemas de captación de agua de lluvia, el diseño de obras hidráulicas de pequeña escala, los estudios de impacto ambiental, la evaluación de procesos erosivos, y los programas de conservación de suelos y agua. Asimismo, constituye un recurso útil para actividades de docencia y capacitación en hidrología aplicada.

No obstante, la precisión de los resultados depende de la calidad del MDE utilizado como dato de entrada. Aunque la aplicación puede procesar cuencas de mayor extensión, su desempeño resulta más eficiente en áreas menores a 10 000 ha, donde se mantiene un equilibrio entre el detalle espacial, la estabilidad de los cálculos hidrológicos y los requerimientos computacionales (Maidment, 2002). Para cuencas muy grandes, el procesamiento puede ser lento o requerir recursos computacionales significativos. Asimismo, el SIAM asume que las unidades de elevación del MDE se encuentran en metros. Si bien el sistema incorpora rutinas automáticas para la conversión de coordenadas geográficas, las estimaciones son aproximadas.



Conclusiones

El SIAM integra en una sola plataforma la delimitación de microcuencas, el análisis morfométrico, la estimación de escurrimiento superficial, la generación de hidrogramas unitarios y la simulación del balance hídrico. Su desarrollo en Python y el uso de librerías de código abierto favorecen la accesibilidad y automatización de procedimientos hidrológicos que tradicionalmente requieren múltiples herramientas especializadas. Asimismo, el módulo de balance hídrico amplía su utilidad para aplicaciones relacionadas con la captación de agua de lluvia, la conservación de suelos y agua, y la gestión de recursos hídricos a escala local.

Referencias

- Aguirre, M. A., Buitrago-Bermúdez, O., & Bolaños-Tróchez, F. V. (2021). Mecanismos de coordinación en la planificación de cuencas hidrográficas en Colombia: el caso del río Dagua. *Sociedad y Economía*, 43, e1019207. <https://doi.org/10.25100/sye.v0i43.9207>
- Almeida-da Cunha, Z., Beskow, S., Martim-de Moura, M., Caldeira-Beskow, T. L., & Rogério-de Mello, C. (2021). Adequacy of methodologies for determining SCS/CN in a watershed with characteristics of the Pampa biome. *Revista Ambiente & Água*, 16(4), e2723. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2715>
- Anggraini, E., Yulastuti, N., & Budihardjo, M. A. (2025). Morphometric analysis in developing soil and water conservation of microwatershed. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1438, 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1438/1/012001>
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>



- Balasubramani, K., Gomathi, M., Bhaskaran, G., & Kumaraswamy, K. (2019). GIS-based spatial multi-criteria approach for characterization and prioritization of micro-watersheds: a case study of semi-arid watershed, South India. *Applied Geomatics*, *11*, 289–307. <https://doi.org/10.1007/s12518-019-00261-y>
- Bashir, B., & Als Salman, A. (2024). Morphometric characterization and dual analysis for flash flood hazard assessment of Wadi Al-Lith watershed, Saudi Arabia. *Water*, *16*(22), 3333. <https://doi.org/10.3390/w16223333>
- Cevallos-Delgado, W. L., Zambrano-Zambrano, M. F., Cedeño-Menéndez, J. A., & Moreira-Alava, A. A. (2024). Importancia de la hidrología en el manejo de cuencas hidrográficas. *Dominio de las Ciencias*, *10*(2), 1295–1310. <https://doi.org/10.23857/dc.v10i2.3879>
- Chow, V., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill. https://ponce.sdsu.edu/Applied_Hydrology_Chow_1988.pdf
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., & Bohner, J. (2015). System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, *8*(7), 1991–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
- Datta, S. (1995). A decision support system for micro-watershed management in India. *Journal of the Operational Research Society*, *46*(5), 592–603. <https://doi.org/10.1057/jors.1995.85>
- Eastman, J. R. (2016). *TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling System: Manual*. Clark Labs, Clark University.
- Fong, P., Shrestha, R. R., Liu, Y., & Valipour, R. (2025). Climate change impacts on hydrology and phosphorus loads under projected global warming levels for the Lake of the Woods watershed. *Journal of Great Lakes Research*, *51*(5), 102636. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2025.102636>
- Gezahegn, R., & Mengistu, F. (2025). Morphometric and land use land cover analysis for the management of water resources in Guder sub-basin, Ethiopia. *Applied Water Science*, *15*, 18. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02325-w>



- Haag, S., Schwartz, D., Shakibajahromi, B., Campagna, M., & Shokoufandeh, A. (2020). A fast algorithm to delineate watershed boundaries for simple geometries. *Environmental Modelling & Software*, *134*, 104842. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104842>
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, *1*(2), 96-99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Hawkins, R. H., Ward, T. J., Woodward, D. E., & Van Mullem, J. A. (2009). *Curve number hydrology: State of the practice*. American Society of Civil Engineers. <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/55128/1/410.pdf>
- Hosseini, P., & Bailey, R. T. (2024). Mutual impact of salinity and climate change on crop production water footprint in a semi-arid agricultural watershed: Application of SWAT-MODFLOW-Salt. *Science of the Total Environment*, *955*, 176973. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176973>
- Kavka, P. (2021). Spatial delimitation of small headwater catchments and their classification in terms of runoff risks. *Water*, *13*(23), 3458. <https://doi.org/10.3390/w13233458>
- Kirpich, Z. P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, *10*(6), 362.
- Kumar, A., Bhardwaj, A., Kumar, P., & Padaliya, H. (2017). Delineation of micro-watershed using geo-spatial techniques. *Suresh Gyan Vihar University International Journal of Environment, Science and Technology*, *3*(2), 14–34. <https://www.gyanvihar.org/researchjournals/envtvol3issue1/DELINEATION%20OF%20MICRO-WATERSHED%20USING%20GEO-SPATIAL%20TECHNIQUES.pdf>
- Lindsay, J. B. (2005). The Terrain Analysis System: a tool for hydro-geomorphic applications. *Hydrological Processes*, *19*(5), 1123–1130. <https://doi.org/10.1002/hyp.5818>
- Maidment, D. R. (2002). *Arc Hydro: GIS for water resources*. ESRI Press.
- Melsse, D. W., Tegegne, M. A., Mekonnen, Y. A., & Bihon, Y. T. (2025). Morphometric analysis for understanding river basin hydrology: a case of gelda watershed, Tana Sub-Basin, Ethiopia. *Applied Water Science*, *15*, 171. <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02526-x>



- Neteler, M., Bowman, M. H., Landa, M., & Metz, M. (2012). Grass GIS: a multi-purpose open source GIS. *Environmental Modelling & Software*, 31, 124–130. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.11.014>
- 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), 328–344. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0)
- Pareta, K., & Pareta, U. (2024). Evaluation of stream ordering systems in the context of topography and open-source data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 49(12), 3806–3821. <https://doi.org/10.1002/esp.5938>
- Salvi, S. S., Mukhopadhyay, S., Ranade, S. D., & Rajagopalan, A. (2017). Morphometric analysis of river drainage basin/watershed using GIS and RS: A review. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 5, 503–508. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33633.63847>
- Sedighi, F., Darvishan, A. K., & Zare, M. R. (2021). Effect of watershed geomorphological characteristics on sediment redistribution. *Geomorphology*, 375, 107559. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107559>
- Shekar, P. R., & Mathew, A. (2024). Morphometric analysis of watersheds: a comprehensive review of data sources, quality, and geospatial techniques. *Watershed Ecology and the Environment*, 6, 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.wsee.2023.12.001>
- Tarboton, D. G., & Mohammed, I. N. (2013). *TauDEM 5.1 quick start guide to using the TauDEM ArcGIS toolbox*. Utah State University
- Tsegaye, L., Degu, M., Mekonnen, M. & Gashaw, T. (2024). Soil erosion and sediment export analysis for watershed management options in Fakisi watershed of the Abbay basin of Ethiopia. *Environmental Challenges*, 15, 100948. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100948>
- United States Department of Agriculture (USDA). (1986). *Urban hydrology for small watersheds*. USDA. <https://www.nrc.gov/docs/ML1421/ML14219A437.pdf>



- Viduka, D., Kraguljac, V., & Licina, B. (2021). A comparative analysis of the benefits of Python and Java for beginners. *Quaestus Multidisciplinary Research Journal*, 19, 318–327. <http://www.quaestus.ro/wp-content/uploads/2012/03/Dejan-Viduka.pdf>
- Xiao, H., Jiang, M., Su, R., Luo, Y., Jiang, Y., & Hu, R. (2024). Fertilization intensities at the buffer zones of ponds regulate nitrogen and phosphorus pollution in an agricultural watershed. *Water Research*, 250, 121033. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.121033>
- Zhang, B., Liu, J., Zhang, B., Xiao, D., & Chen, M. (2025). A web-based tool for watershed delineation considering lakes and reservoirs. *Environmental Modelling & Software*, 183, 106232. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106232>

PUBLICACIÓN
EN AVANZADA