

Artículo | Article

Medición del caudal en el río Los Apantes mediante el modelo de precipitación-escorrentía y campaña de aforos

Flow Measurement in the Los Apantes river using precipitation-runoff and Stream gauging methods

Julio César Moreno-Fortiz^{1,2}

1 Universidad de El Salvador
2  <https://orcid.org/0009-0002-4946-0617>

Correspondencia:  julio.fortiz@ues.edu.sv

Enviado: **19 de agosto de 2025** Aceptado: **26 de noviembre de 2025**

PALABRAS CLAVE

Caudal
aforo
precipitación
escorrentía
hidrometría

RESUMEN

La medición del caudal en cuerpos de agua es una actividad fundamental dentro de los estudios hidrológicos, ya que permite conocer el comportamiento del recurso hídrico en una región específica. El objetivo de esta investigación fue aplicar y comparar dos metodologías para estimar el caudal del río Los Apantes, en el departamento de Ahuachapán, El Salvador. Se utilizó la relación precipitación-escorrentía y una campaña de aforos. La metodología de precipitación-escorrentía se desarrolló mediante el uso del software SAGA GIS, que permitió delimitar la cuenca hidrográfica, identificar las estaciones meteorológicas representativas con polígonos de Thiessen y calcular caudales medios mensuales a partir de registros históricos de precipitación disponibles (1990-2010). A partir de esta información se obtuvo el hidrograma del río. La campaña de aforos consistió en realizar una medición directa en campo utilizando el método de sección-velocidad, con apoyo de equipo especializado como el molinete de cazoletas AA. Las mediciones se realizaron en junio del 2025. Los resultados mostraron coherencia entre ambos métodos, indicando que el uso combinado de ambas metodologías permite obtener estimaciones más confiables del caudal, aplicables tanto a contextos con disponibilidad de datos históricos de precipitaciones como a mediciones puntuales en campo.

KEYWORDS

Streamflow
stream gauging
precipitation
runoff
hydrometry

ABSTRACT

The Flow measurement in water bodies is a fundamental activity in hydrological studies, as it provides insight into the behavior of water resources in a specific region. The objective of this research was to apply and compare two methodologies for estimating the flow of the Los Apantes River in the department of Ahuachapán, El Salvador. The precipitation-runoff relationship and a gauging campaign were used. The precipitation-runoff methodology was developed using SAGA GIS software, which allowed us to delimit the watershed, identify representative weather stations with Thiessen polygons, and calculate average monthly flows from available historical precipitation records (1990-2010). From this information, we obtained the river's hydrograph. The gauging campaign consisted of direct field measurements using the section-velocity method, with the support of specialized equipment such as the AA cup wheel. The measurements were taken in June 2025. The results showed consistency between the two methods, indicating that the combined use of both methodologies allows for more reliable flow estimates, applicable both to contexts with historical precipitation data available and to specific field measurements.



<https://doi.org/prueba.v1i1.654646>

Publicado por la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)

INTRODUCCIÓN

El estudio del comportamiento hidrológico de los cuerpos de agua superficiales es esencial para comprender la dinámica de los recursos hídricos y su adecuada gestión. Una de las variables fundamentales en hidrología es el caudal, el cual permite cuantificar el volumen de agua que circula por un río en un tiempo determinado. Su medición precisa es clave para múltiples aplicaciones como el diseño hidráulico. Toledo et al. (2022) afirman que han empleado métodos como el volumétrico, que consiste en canalizar el flujo hacia un recipiente de volumen conocido y registrar el tiempo de llenado, técnica utilizada en la medición de caudal para el diseño y construcción de una picocentral hidroeléctrica en Ecuador.

Para comprender el aprovechamiento del recurso hídrico con fines energéticos, es necesario primero entender el concepto de energía.

La energía es una propiedad que caracteriza la interacción de los componentes de un sistema físico que tienen la capacidad de realizar un trabajo¹. Es importante señalar que la energía se manifiesta de diferentes formas²; Sin embargo, no se crea de la nada, ya que cuando hablamos de producir energía en realidad nos referimos a su transformación de una energía a otra, ya que la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma. (Pérez Montiel, 2021, p. 208)

Por lo tanto, la energía es un concepto fundamental para entender cómo el agua en movimiento o en reposo puede ser útil para su aprovechamiento.

El potencial hidráulico es la energía disponible en un flujo de agua debido a la combinación de su altura sobre un nivel de referencia (energía potencial) y su velocidad (energía cinética). Para evaluar el potencial hidráulico de un flujo de agua se puede estimar mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$P = \rho * g * Q * H \quad (1)$$

Donde:

P es la potencia [W]

ρ es la densidad del agua [kg/m^3]

g es la aceleración de la gravedad con un valor de 9.81 m/s^2

Q es el caudal del agua [m^3/s]

H es el salto bruto [m]

De este modo, medir con precisión el caudal es fundamental para estimar el potencial energético de los cuerpos de agua. Para ello, es necesario recurrir a la hidrología. La hidrología según Viessman & Lewis (1997):

1 Las tareas de trabajo pueden ser mecánicas, físicas, químicas o eléctricas.

2 Distintos tipos de energía: térmica, química, bioquímica, metabólica, eléctrica, eólica, geotérmica, radiante, acústica, electromagnética, nuclear, entre otras.

Es una ciencia de la Tierra. Abarca la ocurrencia, distribución, movimiento y propiedades del agua de la Tierra. El conocimiento de la hidrología es fundamental para los procesos de toma de decisiones en los que el agua es un componente del sistema en cuestión. (p. 3)

En efecto, una de las bases fundamentales de la hidrología es el entendimiento del ciclo hidrológico. Según el United States Geological Survey (USGS, 2022) el ciclo del agua describe dónde se encuentra el agua en la Tierra y cómo se mueve. El ciclo hidrológico se ilustra objetivamente en la Figura 1.

En consecuencia, la radiación solar provoca la evaporación del agua que posteriormente al precipitar y fluir por la superficie de los terrenos en forma de ríos es capaz de proporcionar un tipo de energía que la conocemos como energía hidráulica. "La energía hidráulica o energía hídrica se obtiene del aprovechamiento de las energías cinética y potencial de la corriente del agua o de los saltos de agua naturales" (Sadhwaní et al., 2024, p. 53). De este modo, la energía hidráulica representa una forma renovable y sostenible de aprovechar el ciclo hidrológico del agua para la generación de energía eléctrica.

Para gestionar de manera eficiente este recurso y optimizar su aprovechamiento energético, resulta fundamental contar con mediciones precisas del caudal. En este contexto, la hidrometría es clave para comprender el comportamiento del agua en los ríos. Según el Instituto Privado de Investigación sobre cambio Climático, "La hidrometría se encarga de medir, registrar, calcular y analizar los volúmenes de agua que circulan en una sección transversal de un río, canal o tubería en la unidad de tiempo." (ICC, 2017, p. 2)

El presente estudio tiene como objetivo aplicar dos metodologías para la medición del caudal, tomando como referencia el río Los Apantes, ubicado en el departamento de Ahuachapán, El Salvador. El análisis busca valorar la utilización y complementariedad de ambos enfoques para la caracterización confiable del recurso hídrico en una cuenca de pequeña escala.

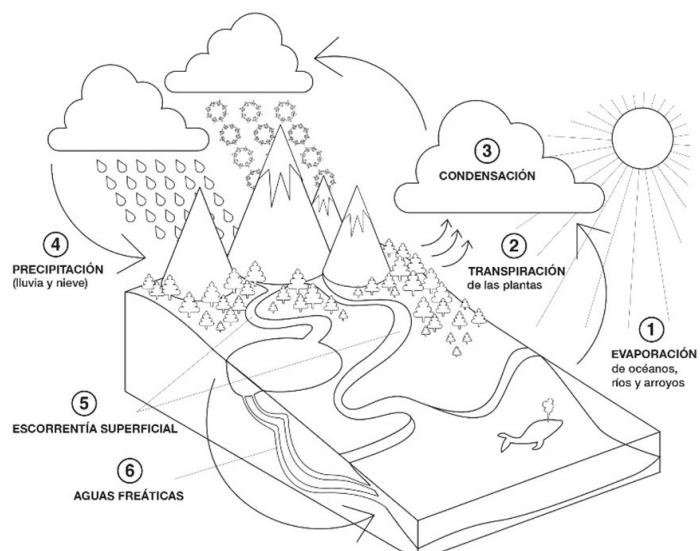
Metodología: Medición del caudal

El estudio se desarrolló sobre la cuenca del río Los Apantes en las coordenadas $13^{\circ}48'14.34''$ latitud Norte y $89^{\circ}50'51.08''$ longitud Oeste a 731 m.s.n.m.

La Figura 2 muestra la ubicación geográfica del punto de medición en un mapa satelital, evidenciando que se sitúa en una zona montañosa, en las proximidades del distrito de Jujutla.

Conocer la ubicación exacta del punto de medición es fundamental, ya que permite evaluar las condiciones de acceso y logística necesarias para el trabajo de campo. Esta información facilita la planificación de rutas, la estimación del tiempo y los recursos requeridos, así como la identificación de posibles limitaciones físicas o ambientales que puedan influir

Figura 1
Ciclo hidrológico del agua



www.nasa.gov

Nota. La figura ilustrativa muestra las principales etapas del ciclo hidrológico. Fuente: NASA (2025).

en la ejecución de las mediciones. Además, las metodologías empleadas exigen el conocimiento preciso del lugar.

Con respecto al clima, tomando de referencia la estación meteorológica de Ahuachapán y los datos presentados en el resumen Climatológico anual 2024 la temperatura máxima promedio registrada fue de 31 °C y la temperatura mínima promedio fue de 18.9 °C, en cuanto a la precipitación anual

Figura 2
Ubicación geográfica del punto de medición en Google Maps



Nota. El punto de medición se sitúa en una zona entre los distritos Concepción de Ataco, Apaneca y Jujutla.

① EVAPORACIÓN

El calor del Sol hace que el agua se evapore de los océanos, lagos y arroyos. La evaporación ocurre cuando el agua líquida en la superficie de la Tierra se transforma en vapor de agua en nuestra atmósfera.

② TRANSPIRACIÓN

El agua de las plantas y los árboles también ingresa a la atmósfera. A esto se le llama transpiración.

③ CONDENSACIÓN

El vapor de agua caliente se eleva a través de la atmósfera terrestre. A medida que el vapor de agua se eleva, el aire fresco de la atmósfera hace que se condense en agua líquida, creando nubes.

④ PRECIPITACIÓN

Cuando una nube se llena de agua líquida, cae del cielo principalmente en forma de lluvia o nieve; esto se conoce como precipitación. La lluvia y la nieve llenan los lagos y arroyos, y el proceso se inicia de nuevo.

⑤ ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

La escorrentía superficial no es más que agua "corriendo" por la superficie de la tierra. La lluvia recorre la superficie de la tierra cuesta abajo debido a la gravedad.

⑥ AGUAS FREÁTICAS

Parte del agua se filtra al suelo como humedad del suelo o agua subterránea.

se tuvo 2656.2 mm de lluvia (MARN, 2025), en general la época lluviosa en El Salvador se da entre los meses de junio a septiembre. Durante las mediciones en junio de 2025 el clima era caluroso y no se presentó lluvias en el lugar.

Otro mapa de utilidad es el generado mediante el software SAGA GIS, el cual presenta la ubicación geográfica del punto de medición estratificado por distritos (Figura 3). Este mapa muestra que el sitio se encuentra en la zona limítrofe entre los distritos de Concepción de Ataco, municipio de Ahuachapán Centro y el distrito de Jujutla, municipio de Ahuachapán Sur.

Las metodologías propuestas tienen como objetivo caracterizar el recurso hídrico en el río Los Apantes, estas se presentan a continuación:

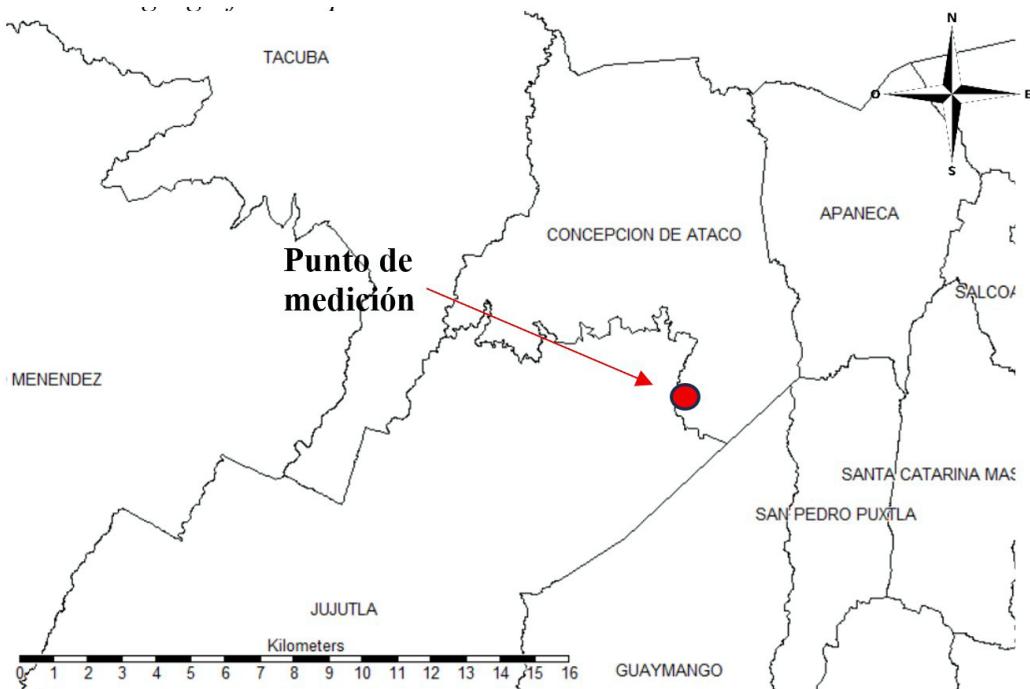
Metodología de la relación precipitación – escorrentía

Esta metodología permite obtener un estimado de los caudales medios mensuales y anuales de una cuenca³ en particular, a partir de la información de la precipitación media de la cuenca. Se basa en la aplicación de factores estimados, que relacionan la lluvia media mensual o anual con las escorrentías generadas. Para este medio es necesario el conocimiento de la ubicación del área de la cuenca de estudio.

3 Cuenca: zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por un sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

Figura 3

Ubicación geográfica del punto de medición en SAGA GIS



Nota. Mapa generado con software SAGA GIS.

Diversos estudios demuestran la importancia de utilizar el método de precipitación-escorriente para modelar la hidrología de cuencas, al integrar variables climáticas, uso del suelo y actividades humanas para mejorar la precisión en la predicción del caudal (United States Geological Survey).

En nuestro estudio estos factores a los que le llamaremos factores de corrección se obtienen por medio del ministerio de medio ambiente y recursos naturales (SNET). El general el procedimiento por seguir se detalla a continuación:

1. Ubicar el punto de medición en Google Maps mediante sus coordenadas geodésicas e identificar el nombre del río.
2. Utilizar un software SIG⁴, uno de ellos es SAGA GIS⁵ para obtener la cuenca del punto de medición mediante los siguientes pasos:
 - a. Crear una tabla con los atributos de latitud y longitud
 - b. Convertir los datos de la tabla en puntos para representarlos en un mapa
 - c. Convertir del tipo de proyección geodésica a la proyección conforme cónica de Lambert utilizada en el país.
 - d. Insertar los puntos de las Estaciones Meteorológi

⁴ Software SIG: Sistema de Información Geográfica, diseñado para capturar, almacenar, manipular y desplegar en todas sus formas a la información geográficamente referenciada.

⁵ Software SAGA: System for Automated Geoscientific Analyses, es un software híbrido multiplataforma de información geográfica de uso libre con soporte de datos vectoriales y de tipo raster.

lógicas⁶ en un mapa departamental en conjunto con el punto de medición, la Figura 4 muestra la ubicación geográfica de estas.

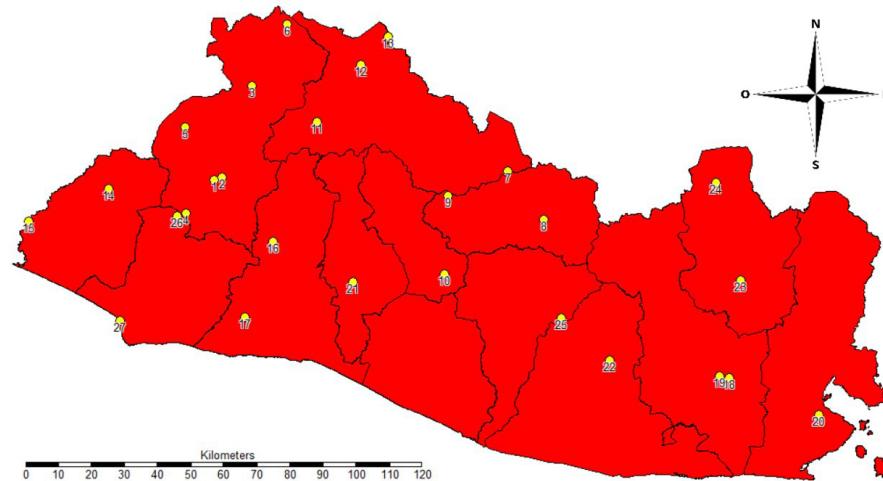
- e. Observando el terreno cercano al punto de medición, esbozar un aproximado de la cuenca a analizar en un mapa ráster, al cual le podemos llamar pre-cuenca.
- f. Rellenar los posibles sumideros artificiales presentes en el modelo digital de elevación mediante la herramienta *Sink Removal* del software SAGA GIS.
- g. Obtener la red de afluentes de la pre-cuenca, con la red de canales en el mapa de trabajo, se debe obtener el terreno que tiene una altura mayor a la del punto de interés a partir del mismo.
- h. Obtener un polígono de una línea de isonivel⁷ para el terreno recortado.
- i. Convertir la línea del paso anterior a un polígono, que será la cuenca del punto de interés.
3. Obtener las propiedades del polígono para finalmente conocer su área.
4. De los mapas creados con el software SAGA GIS (Figura 5), aún hay que considerar que estación meteorológica

⁶ En el momento de iniciar el presente trabajo de investigación se disponía de registros de precipitaciones de 26 estaciones desde el año 1991 al 2010, datos del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN)

⁷ Líneas de isonivel: son líneas trazadas en un mapa que unen puntos de igual altitud sobre el nivel del mar, representando la topografía del terreno y permitiendo visualizar su relieve.

Figura 4

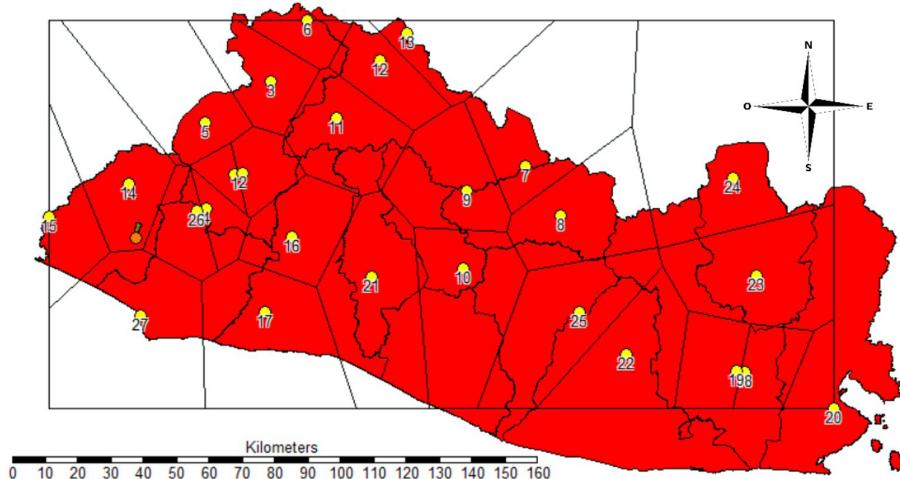
Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas del MARN con registros de precipitación disponibles



Nota. Mapa generado con software SAGA GIS.

Figura 5

Mapa con los polígonos de Thiessen generados a partir de las estaciones meteorológicas disponibles



Nota. Mapa generado con software SAGA GIS.

es la más representativa de la cuenca obtenida. El concepto matemático que permite analizar esto son los polígonos de Thiessen⁸. Hay que seguir los siguientes pasos:

- Generar los Polígonos de Thiessen con los puntos de las estaciones meteorológicas del país disponibles e insertarlos en el mapa de trabajo y observar cuales estaciones afectan a la cuenca de estudio.
- Interceptar los polígonos de Thiessen con la cuenca.
- Obtener las propiedades de cada intercepción individual para conocer el área de cada polígo-

no, en caso la cuenca este dividida por dos o más polígonos de Thiessen.

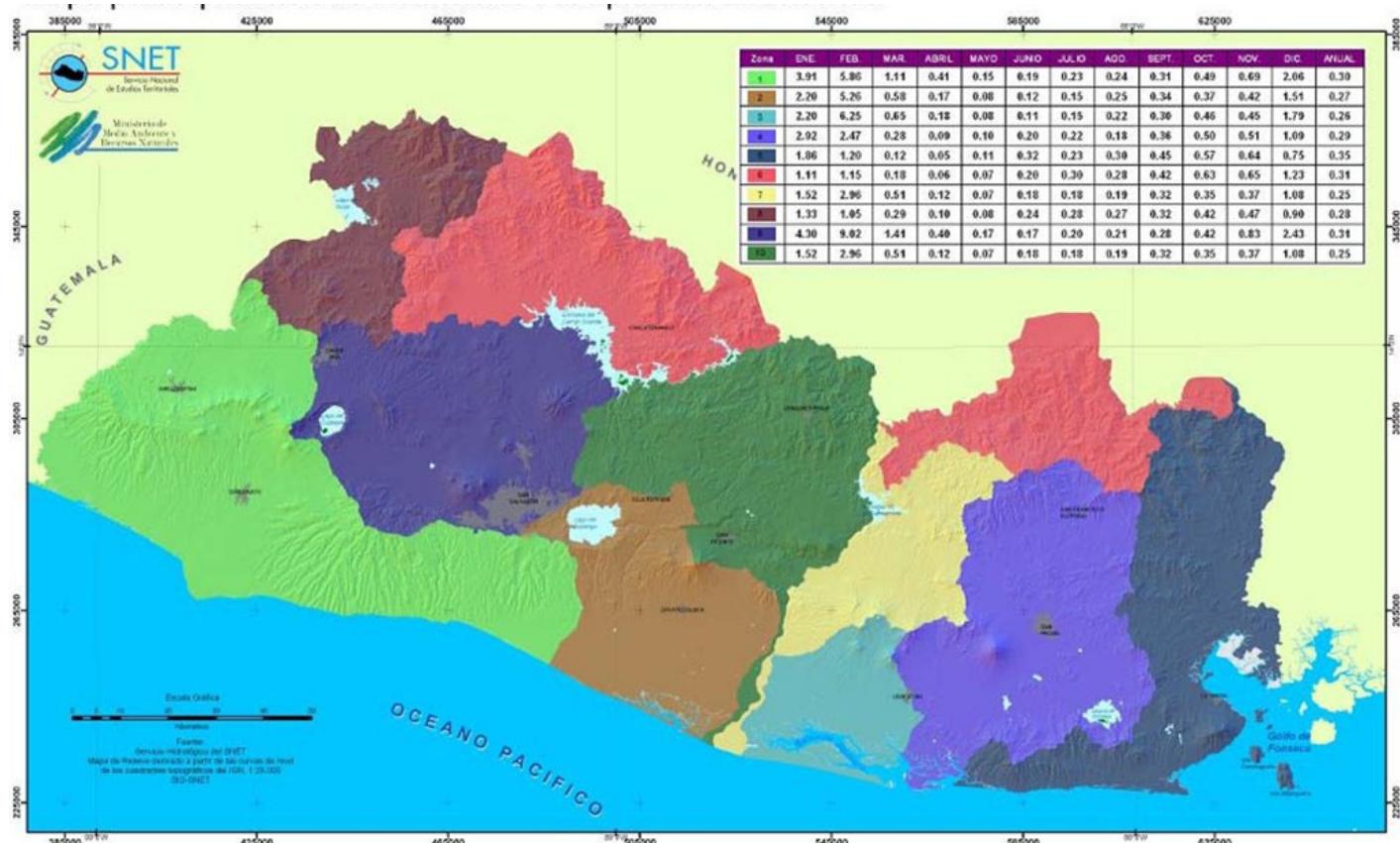
Luego de conocer la información de la cuenca y de las estaciones meteorológicas representativas para su análisis, el siguiente paso definir el grado de representatividad de los datos de precipitación de estas estaciones, siguiendo los siguientes pasos:

- Para la determinación de la escorrentía a partir de los valores de la precipitación mensual, el SNET propuso unos factores que relacionan los dos parámetros. Para ello analizó los datos disponibles, y estableció un mapa en el que se definen las zonas en las que la relación aplicada puede considerarse válida (Figura 6).

8 Polígono de Thiessen: Es una región que delimita el área de influencia más cercana a un punto de muestreo en una distribución espacial.

Figura 6

Factores de corrección del SNET



Nota. La figura muestra las zonas de comportamiento hidrológico simular. Fuente: SNET (2004).

6. Ordenar los datos de precipitación de las estaciones que afectan la cuenca, considerando la lluvia útil mensual (A_i/A_p), donde A_i es el área de influencia de cada estación meteorológica definida anteriormente.
7. Convertir los valores obtenidos de precipitación (mm) a caudal (m^3/s) usando la siguiente expresión:

$$Q_m = \frac{[\text{mm}] \text{de lluvia mensual} \times 1000 \times F. \text{ corrección} \times \text{Área } [\text{km}^2]}{\text{num. de días del mes} \times 86400} \quad (2)$$

8. Realizar una tabla de resultados con los caudales medios mensuales.
9. Realizar el hidrograma.

La Tabla 1 muestra el resumen del procedimiento a seguir y los resultados esperados al aplicar la metodología precipitación-escorrentía.

Metodología de medición por campaña de aforos

Aforar es una operación que involucra la medición de variables como velocidad del agua o profundidad que en su conjunto pueden servir para calcular el caudal. Es importante tomar mediciones en los meses de estiaje⁹ (época de verano)

Tabla 1

Procedimiento y resultados de la metodología precipitación-escorrentía

Procedimiento	Resultado
Generación y cálculo del área de la cuenca del punto de medición	Área de la cuenca en km^2
Determinación de la precipitación media mensual de la cuenca a analizar	Precipitación en mm
Convertir los valores obtenidos de precipitación (mm) a caudal (m^3/s) usando la siguiente expresión:	Caudal medio mensual en $\frac{m^3}{s}$
$Q_m = \frac{[\text{mm}] \text{de lluvia mensual} \times 1000 \times F. \text{ corrección} \times \text{Área } [\text{km}^2]}{\text{num. de días del mes} \times 86400}$	
Realizar una tabla de resultados con los caudales medios mensuales y generar gráfico	Hidrograma

y de lluvias (época de invierno) para conocer caudales mínimos y máximos de un río. Existen diversas metodologías para la realización de aforos, entre los más comunes son el uso de vertederos o secciones de control y los métodos de medida de área transversal y velocidad media.

9 Estiaje: nivel más bajo en ciertas épocas del año.

A continuación, se describirá el método sección-velocidad:

Método de sección-velocidad

Este método es el más usado para aforar corrientes superficiales de agua. Consiste en medir la velocidad en varios puntos de la sección transversal de una corriente (Figura 7). Así mismo, en determinar el área de la sección transversal a través de la medición de profundidades en la sección del río, para después calcular el caudal por medio de la siguiente ecuación:

$$Q=A \cdot V \quad (3)$$

Donde:

Q es el caudal expresado [m^3/s]

A es el área de la sección transversal [m^2]

V es la velocidad dada [m^3/s]

Para la medición directa del caudal se seleccionó el método sección-velocidad, debido a que es una técnica ampliamente utilizada en aforos de corrientes superficiales por su capacidad de integrar tanto la geometría del cauce como la distribución de velocidades en la sección transversal, lo que permite obtener estimaciones confiables del caudal. Este método resulta especialmente adecuado para ríos de pequeño y mediano caudal, como el río Los Apantes, donde la accesibilidad y las dimensiones del cauce permiten realizar mediciones segmentadas de profundidad y velocidad.

Para la determinación puntual de la velocidad del flujo se utilizó un molinete de cazoletas tipo AA, dado que este instrumento es reconocido por su precisión y facilidad de operación en mediciones de campo. Además, su efectividad ha sido documentada en estudios previos realizados en la región, como la evaluación de prefactibilidad para la implementación de una microturbina hidráulica para generación de energía eléctrica en el río Copinula, donde su uso permitió obtener mediciones confiables en condiciones similares (Azucena et al., 2012). De esta manera, la selección del método y del instrumento responde tanto a criterios técnicos como a evidencia disponible para ambientes comparables.

El 5 de junio de 2025 se realizó una medición de caudal por vadeo en el río los Apantes. La actividad se llevó a cabo entre las 12:00 y las 13:15 horas, en época de verano. El sitio de medición abarca una sección del río de 1 metro de ancho. A continuación, se presentan los pasos seguidos:

1. Determinación del área de la sección: Este depende de las condiciones del cauce del río. Luego de seleccionar la zona de medición, se debe de colocar dos puntos de referencia procurando que sea perpendicular al flujo del río. Luego hay que dividir el ancho del cauce en tramos y obtener la profundidad al inicio y al final de cada tramo como se muestra en la Figura 8. Con el ancho de cada sección se podrá generar el área por cada tramo

medido de la sección transversal, utilizando la siguiente ecuación:

$$A_{TOTAL} = \frac{a_1+b_1}{2} * L + \frac{a_2+b_2}{2} * L + \frac{a_3+b_3}{2} * L + \frac{a_n+b_n}{2} * L \quad (4)$$

Donde:

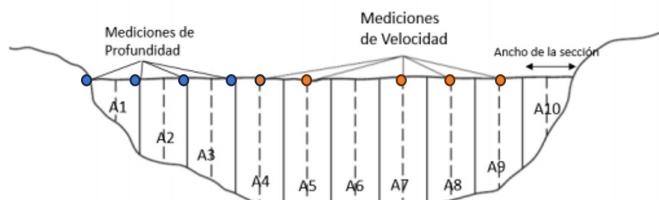
a es la profundidad inicial de cada tramo en metros

b es la profundidad final de cada tramo en metros

L es el ancho de cada sección en metros

Figura 7

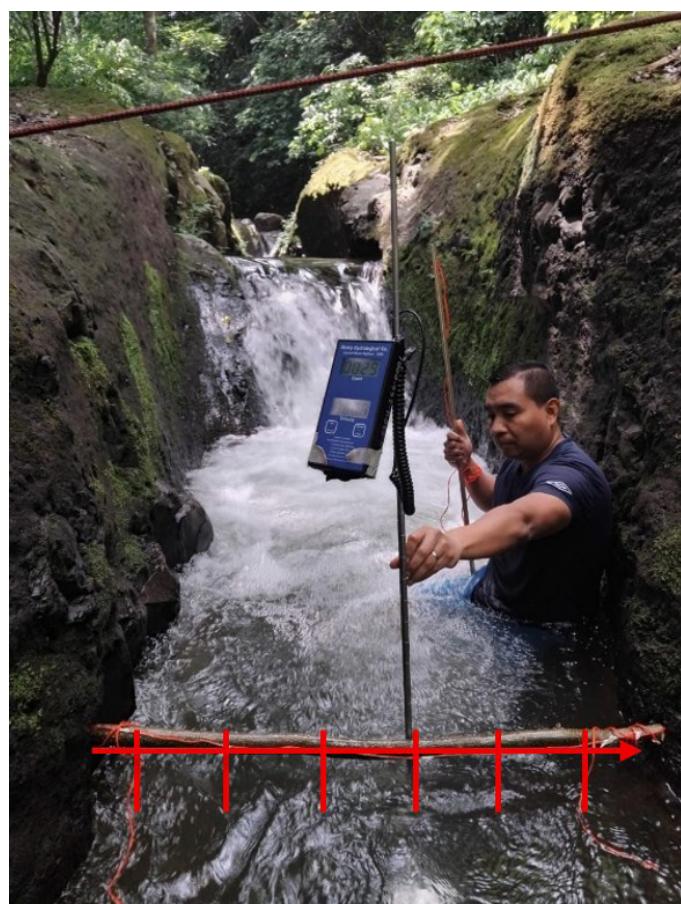
Puntos de medición del método sección-velocidad



Nota. La figura ilustrativa del área transversal del cauce del río. Fuente: ICC (2017).

Figura 8

Puntos de medición del método sección-velocidad



La Figura 9 muestra al personal encargado de realizar la medición junto con el molinete de cazoletas de la marca Ricky Hydrological sumergido, también se puede observar las divisiones (cada 20 cm) y guías de referencia para tomar las mediciones de velocidad y profundidad.

- Determinación de la velocidad por medio de un molinete de cazoletas: La velocidad se realiza con equipo especializado como se muestra en la figura 10. Este es un instrumento hidrométrico reconocido por su precisión, fiabilidad y durabilidad en la medición de las velocidades de corriente en cuerpos de agua. Su diseño incorpora una rueda de cazoletas como se muestra en la figura 10, estas van montadas sobre un eje vertical dentro de un soporte como se ilustra en la figura 11, que gira impulsada por el flujo de agua. Cada rotación se visualizada mediante un contador. El movimiento de rotación de la hélice es más rápido cuanto mayor sea la velocidad de la corriente de agua. El molinete de cazoleta utilizado para realizar las mediciones es del tipo AA current meter y de la marca Ricky Hydrological Co., equipo especializado para este tipo de mediciones.

La velocidad se determina mediante el número de vueltas que la hélice ejerce sumergida en un minuto, esto lo registra en un contador y mediante una ecuación general (que la provee el manual del molinete) se obtiene la velocidad en metros/segundos, la profundidad en la cual se coloco el molinete fue en un 60% de la profundidad total del segmento.

Para calcular la velocidad es necesario utilizar las tablas de calibración en metros por segundo que proporciona el fabricante del molinete de cazoletas mediante el manual de usuario. Esta tabla relaciona el número de revoluciones de la rueda con el tiempo en segundos que dura la medición, en

Figura 10

Molinete de cazoleta montado en su base y con contador digital

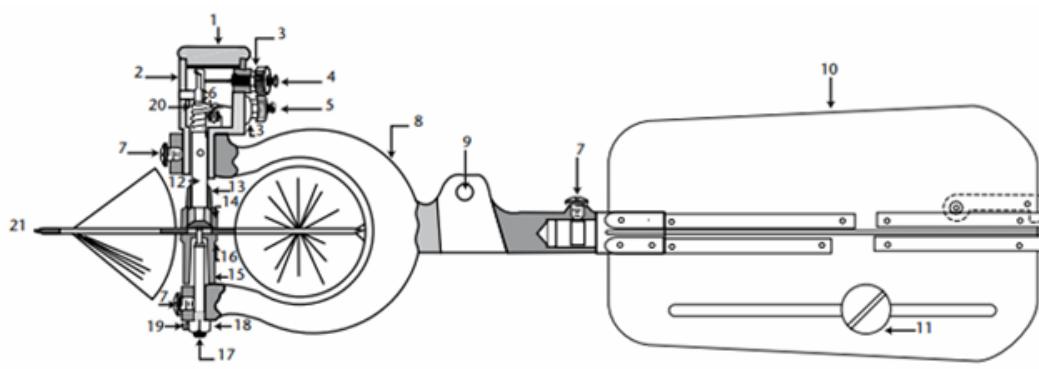


nuestro caso fue de 60 segundos, y posteriormente se obtiene el valor de velocidad de flujo.

- Una vez determinada el área transversal y la velocidad media de cada segmento se calcula el caudal por medio de la multiplicación del área de cada segmento y su velocidad, para obtener el caudal parcial. Posterior-

Figura 9

Ensamble de molinete de cazoleta



1	Cap for contact chamber	8	Yoke	16	Pivot bearing
2	Contact chamber	9	Hole for hanger screw	17	Pivot
3	Insulating bushing for contact binding post	10	Tailpiece	18	Pivot adjusting nut
4	Single-contact binding post	11	Balance weight	19	Keeper screw for pivot adjusting nut
5	Penta-contact binding post	12	Shaft	20	Bearing lug
6	Penta gear	13	Bucket-wheel hub	21	Bucket wheel
7	Set screws	14	Bucket-wheel hub nut		
		15	Raising nut		

Nota. La figura muestra los componentes de un molinete de cazoletas. Fuente: National Center for Hydrology and Meteorology (2025)

Figura 11

Resultados tabulados de la velocidad para el molinete de cazoletas AA marca Ricky Hidrology

TIME IN SECS	REVOLUTIONS																	
	3	5	7	10	15	20	25	30	40	50	60	80	100	150	200	250	300	350
40	0.056	0.089	0.123	0.173	0.257	0.341	0.425	0.509	0.677	0.845	1.013	1.349	1.685	2.526	3.366	4.206	5.046	5.886
41	0.055	0.087	0.120	0.169	0.251	0.333	0.415	0.497	0.661	0.825	0.989	1.317	1.645	2.464	3.284	4.103	4.923	5.742
42	0.053	0.085	0.117	0.165	0.245	0.325	0.405	0.485	0.645	0.805	0.965	1.285	1.605	2.406	3.206	4.006	4.806	5.606
43	0.052	0.084	0.115	0.162	0.240	0.318	0.396	0.474	0.631	0.787	0.943	1.256	1.568	2.350	3.131	3.913	4.694	5.475
44	0.051	0.082	0.112	0.158	0.235	0.311	0.387	0.464	0.616	0.769	0.922	1.227	1.533	2.296	3.060	3.824	4.587	5.351
45	0.050	0.080	0.110	0.155	0.229	0.304	0.379	0.453	0.603	0.752	0.901	1.200	1.499	2.246	2.992	3.739	4.486	5.232
46	0.049	0.078	0.108	0.152	0.225	0.298	0.371	0.444	0.590	0.736	0.882	1.174	1.466	2.197	2.927	3.658	4.388	5.119
47	0.048	0.077	0.106	0.148	0.220	0.291	0.363	0.434	0.577	0.720	0.863	1.149	1.435	2.150	2.865	3.580	4.295	5.010
48	0.047	0.075	0.103	0.145	0.215	0.285	0.355	0.425	0.565	0.705	0.845	1.125	1.405	2.105	2.806	3.506	4.206	4.906
49	0.047	0.074	0.101	0.143	0.211	0.280	0.348	0.417	0.554	0.691	0.828	1.103	1.377	2.063	2.748	3.434	4.120	4.806
50	0.046	0.073	0.100	0.140	0.207	0.274	0.341	0.409	0.543	0.677	0.812	1.081	1.349	2.021	2.694	3.366	4.038	4.710
51	0.045	0.071	0.098	0.137	0.203	0.269	0.335	0.401	0.533	0.664	0.796	1.060	1.323	1.982	2.641	3.300	3.959	4.617
52	0.044	0.070	0.096	0.135	0.199	0.264	0.329	0.393	0.522	0.652	0.781	1.039	1.298	1.944	2.590	3.236	3.882	4.529
53	0.043	0.069	0.094	0.132	0.196	0.259	0.322	0.386	0.513	0.639	0.766	1.020	1.273	1.907	2.541	3.175	3.809	4.443
54	0.043	0.068	0.093	0.130	0.192	0.254	0.317	0.379	0.503	0.628	0.752	1.001	1.250	1.872	2.494	3.117	3.739	4.361
55	0.042	0.067	0.091	0.128	0.189	0.250	0.311	0.372	0.494	0.616	0.739	0.983	1.227	1.838	2.449	3.060	3.671	4.282
56	0.041	0.065	0.089	0.125	0.185	0.245	0.305	0.365	0.485	0.605	0.725	0.965	1.205	1.805	2.406	3.006	3.606	4.206
57	0.041	0.064	0.088	0.123	0.182	0.241	0.300	0.359	0.477	0.595	0.713	0.949	1.184	1.774	2.363	2.953	3.542	4.132
58	0.040	0.063	0.087	0.121	0.179	0.237	0.295	0.353	0.469	0.585	0.701	0.932	1.164	1.743	2.323	2.902	3.481	4.061
59	0.040	0.062	0.085	0.119	0.176	0.233	0.290	0.347	0.461	0.575	0.689	0.917	1.144	1.714	2.283	2.853	3.422	3.992
60	0.039	0.061	0.084	0.117	0.173	0.229	0.285	0.341	0.453	0.565	0.677	0.901	1.125	1.685	2.246	2.806	3.366	3.926
61	0.038	0.061	0.083	0.116	0.171	0.226	0.281	0.336	0.446	0.556	0.666	0.887	1.107	1.658	2.209	2.760	3.310	3.861
62	0.038	0.060	0.081	0.114	0.168	0.222	0.276	0.331	0.439	0.547	0.656	0.873	1.089	1.631	2.173	2.715	3.257	3.799
63	0.037	0.059	0.080	0.112	0.165	0.219	0.272	0.325	0.432	0.539	0.645	0.859	1.072	1.605	2.139	2.672	3.206	3.739
64	0.037	0.058	0.079	0.110	0.163	0.215	0.268	0.320	0.425	0.530	0.635	0.845	1.055	1.580	2.105	2.631	3.156	3.681
65	0.036	0.057	0.078	0.109	0.161	0.212	0.264	0.316	0.419	0.522	0.626	0.833	1.039	1.556	2.073	2.590	3.107	3.624
66	0.036	0.056	0.077	0.107	0.158	0.209	0.260	0.311	0.413	0.515	0.616	0.820	1.024	1.533	2.042	2.551	3.060	3.569
67	0.036	0.056	0.076	0.106	0.156	0.206	0.256	0.306	0.407	0.507	0.607	0.808	1.008	1.510	2.011	2.513	3.014	3.516
68	0.035	0.055	0.075	0.104	0.154	0.203	0.252	0.302	0.401	0.500	0.598	0.796	0.994	1.488	1.982	2.476	2.970	3.464
69	0.035	0.054	0.074	0.103	0.152	0.200	0.249	0.298	0.395	0.492	0.590	0.785	0.979	1.466	1.953	2.440	2.927	3.414
70	0.034	0.053	0.073	0.101	0.149	0.197	0.245	0.293	0.389	0.485	0.581	0.773	0.965	1.445	1.925	2.406	2.886	3.366

$$\text{EQUATION: } V = (2.2048 R + 0.0178) \times .3048 \quad (R = \text{Revolutions per second})$$

Nota. La figura muestra la tabla de calibración. Fuente: Rickly Hydrological Co. (2006).

mente se hace la sumatoria de todos los caudales parciales para obtener el caudal total. Se recomienda utilizar la siguiente tabla para el registro de las mediciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El hallazgo principal de este estudio fue que la estimación del caudal del río los Apantes mediante la aplicación de la metodología de precipitación-escorrentía y la campaña de aforos permitió obtener resultados coherentes y complementarios que facilitan una caracterización confiable del recurso hídrico en la cuenca de pequeña escala.

Figura 12

Formato sugerido para registro de datos de medición por campaña de aforo

Mediciones de campaña de aforo					
Punto de medición	Distancia del punto inicial (m)	Profundidad (m)	Vueltas por minuto	Velocidad (m/s)	Caudal parcial (m³/s)
1					
2					
3					
4					
5					

Resultados de la metodología de la relación precipitación - escorrentía

Mediante el software SAGA GIS se delimitó la cuenca hidrográfica con un área total de 5.49 km². En la Figura 13 se presenta un mapa departamental donde se muestra geográficamente la cuenca hidrológica del punto de medición.

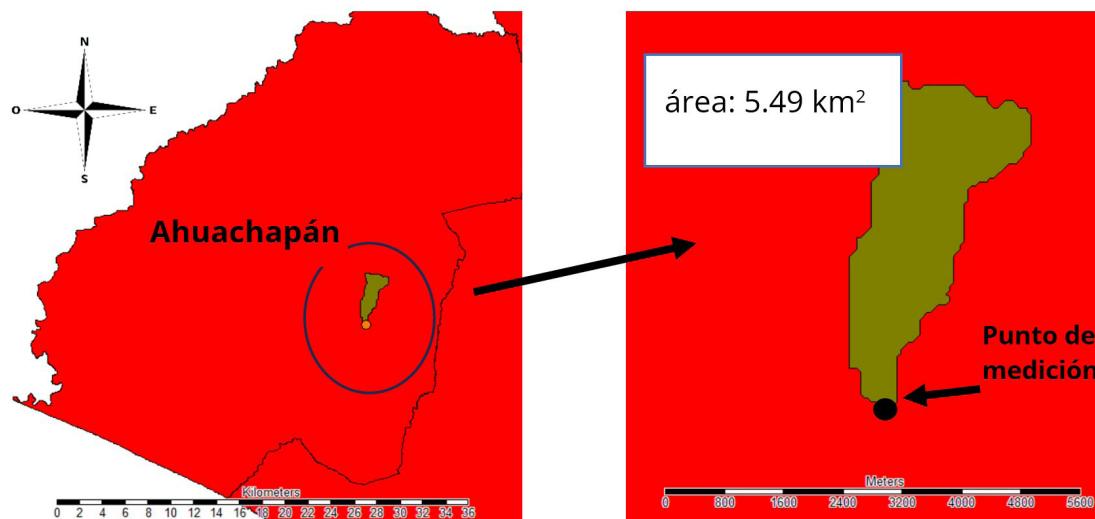
Los polígonos de Thiessen indicaron que la estación meteorológica más representativa para la cuenca fue la estación de Ahuachapán ubicada en el municipio de Ahuachapán Centro (Figura 14).

El análisis de las zonas de comportamiento hidrológico, según el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), situó a la cuenca completamente en la zona 1, para la cual se aplicó los factores de corrección específicos (Figura 15).

La Tabla 2 presenta los caudales mensuales estimados en el punto de medición. El hidrograma correspondiente se muestra en la Figura 16 donde se destaca un comportamiento estacional típico, con los valores más altos entre junio y octubre, coincidiendo con la temporada lluviosa.

Figura 13

Cuenca del punto de medición



Nota. Mapa generado mediante el Software SAGA GIS.

Figura 14

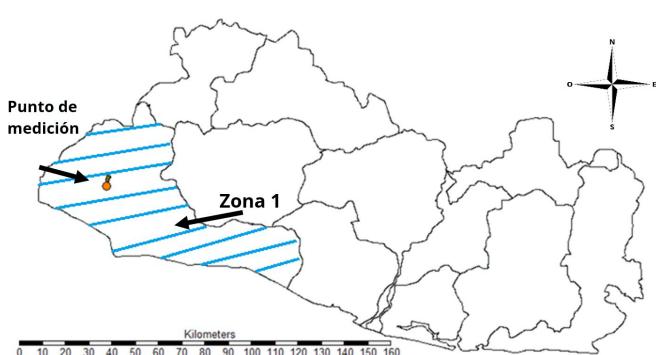
polígono de Thiessen y Cuenca



Nota. Mapa generado mediante el Software SAGA GIS.

Figura 15

Mapa de factor de corrección del SNET de la cuenca de estudio



Nota. Mapa generado mediante el Software SAGA GIS.

Tabla 2

Caudal medio mensual

Mes	Q (m^3/s)
Enero	0.0096
Febrero	0.0186
Marzo	0.0081
Abril	0.0276
Mayo	0.0466
Junio	0.1132
Julio	0.1331
Agosto	0.1363
Septiembre	0.2242
Octubre	0.1521
Noviembre	0.0603
Diciembre	0.0342

Resultados de la campaña de aforos

La campaña de medición directa se realizó mediante el método de vadeo, dividiendo el cauce en seis secciones transversales como se puede observar en la Figura 17. Las mediciones incluyeron profundidad, velocidad mediante el molinete de cazoletas y área transversal en cada sección. La Tabla 3 muestra los resultados individuales por sección, con un caudal total estimado de 0.1678 .

Se observó que las zonas con mayor profundidad y velocidad contribuyeron más significativamente al caudal total.

Figura 16

Hidrograma de la cuenca del río Los Apantes



Figura 17

Secciones transversales del punto de medición de 1 metro de ancho

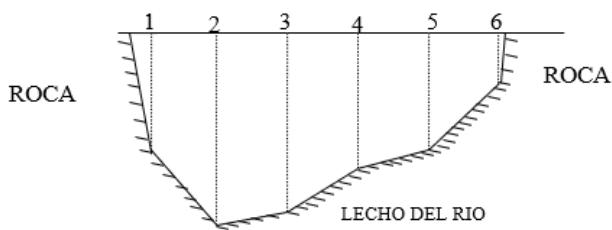


Tabla 3

Resultados de campaña de aforo por vadeo

Punto de medición	Distancia del punto inicial (m)	Profundidad (m)	rev/min	rev/seg	Velocidad (m/s)	área transversal (m²)	Caudal parcial (m³/s)
1	0	0.60	-	-	-	-	-
2	0.20	0.68	29	0.483	0.33	0.128	0.04224
3	0.40	0.66	16	0.267	0.185	0.134	0.02479
4	0.60	0.64	18	0.3	0.207	0.13	0.02691
5	0.80	0.60	21	0.35	0.24	0.124	0.02976
6	1	0.45	37	0.6167	0.42	0.105	0.0441
Caudal total (m³/s)							0.1678

DISCUSIÓN

La estimación del caudal del río Los Apantes mediante la aplicación de la metodología de precipitación-escorrentía permitió obtener información clave para la caracterización del recurso hídrico.

Este método requiere integrar variables climáticas, uso del suelo y otros factores que influyen en la escorrentía para mejorar la precisión de las estimaciones (USGS, 2023). En nuestro estudio, estos elementos se consideraron mediante la evaluación de la ubicación de la cuenca y la aplicación de factores de corrección, lo que permitió generar un hidrograma representativo del comportamiento estacional del río y contrastarlo con el promedio de lluvia mensual presentado por el ministerio de medio ambiente y Recursos Naturales (MARN, 2025). El análisis del hidrograma muestra cómo la integración de datos históricos de precipitación posibilita una caracterización hidrológica detallada. Asimismo, el patrón estacional observado refleja la relación directa entre precipitación y escorrentía, respaldando los principios hidrológicos sobre la dinámica de los cuerpos de agua superficiales (Viessman & Lewis, 1997).

La campaña de aforos permitió determinar un caudal del río Los Apantes en el mes de junio, empleando el método de sección-velocidad y equipos especializados como el molinete de cazoletas.

Esta metodología se fundamenta en los principios de la hidrometría, que buscan medir, registrar y analizar los volúmenes de agua que circulan en una sección transversal de un río (ICC, 2017), lo que justifica la elección de una sección de un metro de ancho para realizar las mediciones en campo. Nuestras mediciones consideran las profundidades y velocidades en segmentos específicos del cauce, lo que permite calcular el caudal parcial de cada tramo y sumarlo para obtener el caudal total; sin embargo, esta aproximación no contempla factores que podrían influir en ríos de mayor ancho, ni optimiza la ubicación de los puntos de medición para diferentes profundidades (ICC, 2017).

En este estudio busca mostrar la aplicación de dos metodologías complementarias para medir el caudal, más no comparar los resultados de cada método. Para futuras investigaciones, se recomienda explorar la correlación entre ambos enfoques y analizar posibles fuentes de error, como la calibración de los instrumentos o la necesidad de ampliar los registros históricos de precipitación para mejorar la estimación del caudal.

CONCLUSIONES

El presente estudio permitió demostrar la aplicabilidad y complementariedad de dos metodologías técnicas para la medición del caudal en el río Los Apantes: la relación precipitación-escorrentía y la campaña de aforo por el método de sección-velocidad. Ambas técnicas proporcionaron estimaciones coherentes del comportamiento hidrológico del sitio de estudio, evidenciando que su uso conjunto constituye una herramienta confiable para la caracterización del recurso hídrico.

La metodología de precipitación-escorrentía, apoyada en el procesamiento espacial con el software SAGA GIS y el uso de herramientas como polígonos de Thiessen, permitió delimitar la cuenca de interés y calcular los caudales medios mensuales a partir de registros históricos de precipitación. Esta aproximación es útil cuando se dispone de datos de estaciones meteorológicas cercanas al punto de medición y un conocimiento detallado de la cuenca, además de ofrecer una visión de largo plazo del comportamiento hidrológico. El caudal obtenido por este método para el mes de junio fue de 0.1132 m³/s o 113.2 /s.

Por su parte, la campaña de aforos por vadeo, realizada mediante el método de sección-velocidad, proporcionó datos puntuales y directos del caudal instantáneo en campo. El uso del molinete de cazoletas y la segmentación transversal del

cauce permitieron calcular un caudal total de 0.1678 m³/s o 167.8 /s, representativo de las condiciones en época seca.

En conjunto, los resultados demuestran que ambas metodologías son complementarias: la primera aporta una visión general y temporalmente amplia del régimen de escorrentía, mientras que la segunda permite mediciones precisas en condiciones específicas. Su aplicación combinada fortalece los estudios hidrológicos y la gestión sostenible del recurso hídrico.

CONFLICTO DE INTERESES

El autor declara que no existe ningún conflicto de intereses.

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela de ingeniería mecánica (EIM-UES), por brindar el espacio y las facilidades necesarias para el desarrollo de esta investigación, así como a la Escuela de Ingeniería Química y alimentos (EIQIA-UES), por el préstamo del equipamiento requerido para la toma de datos. Se reconoce el apoyo y acompañamiento del Ing. Teodoro Ramírez durante el trabajo de campo. Asimismo, se agradece de forma especial a los docentes de la Escuela de ingeniería Mecánica: MSc. e Ing. Salomón Torres, MSc. e Ing. Antonio Lue, Ing. Francisco Zuleta y MSc. e Ing. Tomas Amaya, por su participación activa en la ejecución de las mediciones. Finalmente, se extiende un agradecimiento a los representantes del proyecto: Ingra. Blanca Arévalo de Gil, Ing. Arístides Arévalo y Sr. Ramiro Bojórquez, por facilitar la realización de las mediciones.

REFERENCIAS

- Administración nacional de aeronáutica y el espacio , Space Place. (2025, 4 de julio). *El ciclo del agua*. https://spaceplace.nasa.gov/coloring-pages/en/Water_Cycle_Espanol.pdf.
- Azucena, C., Blanco, E. y Castro, R. (2012). *Estudio preliminar a la prefactibilidad de implementar una microturbina hidráulica para generación de energía eléctrica en río copinula, municipio de Jujutla, Ahuachapán*. [Tesis de maestría no publicada, Universidad Don Bosco, San Salvador, El Salvador, C.A.]. Archivo digital. <http://hdl.handle.net/11715/924>
- ICC. (2017). *Manual de mediciones de caudales*. <https://icc.org.gt/wp-content/uploads/2023/03/064.pdf>
- MARN. (2025). *Resumen Climatológico anual 2024*. <https://www.snet.gob.sv/UserFiles/meteorologia/climatologico/Resumen2024.pdf>
- NASA. (2025). *El ciclo del agua*. NASA. <https://ciencia.nasa.gov/wp-content/uploads/sites/2/2024/01/water-cycle-05-03-20-espanol.pdf>
- National Center for hydrology and meteorology [NCHM]. (2025). *Operational Manual for Hydrological Instrumentation*. [https://www.nchm.gov.bt/attachment/ck-finder/userfiles/files/PR-HWRSD-02%20\(Hydrological%20Instrumentation\).pdf](https://www.nchm.gov.bt/attachment/ck-finder/userfiles/files/PR-HWRSD-02%20(Hydrological%20Instrumentation).pdf)
- Pérez Montiel, H. (Ed.). (2021). *Física 2 (2da Ed.)*. Editorial Patria, S.A. DE C.V.
- Sadhwani, J., Vaswani, J. y Santiago, D. (2024). *Sistemas de producción de energías. Enfoque práctico*. Delta Publicaciones Universitarias, S.L.
- Ricky Hydrological Co. (2006). Precision Hydrological Tool for Water Current Measurement. https://www.forestry-suppliers.com/Documents/786_msds.pdf?srsltid=AfmBOoptPd6naUEmzGRfO7XigFdy4DhhhVys7xo6lQemN8ImpyzZRwdW
- Servicio nacional de estudios territoriales [SNET]. (2004). *Regionalización de caudales máximos y medios en El Salvador*. <https://www.snet.gob.sv/Hidrologia/caudales.pdf>
- Toledo, J., Granda, D. y Uchuary, A. (2022). Diseño y construcción de una picocentral hidroeléctrica para la finca "la esperanza" – cantón Zamora". *South Florida Journal of Development, volumen(3)*, 5425. <https://doi.org/10.46932/sfjdv3n4-106>
- United States Geological Survey . (2022). *The Water Cycle*. <https://www.usgs.gov/media/files/el-ciclo-del-agua-folleto-85x11-pdf-water-cycle-spanish-handout-85x11-inch-pdf>
- USGS. (2023). Application of the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) to Simulate the Streamflows and Water Balance of the Red River Basin, 1980-2016. *Scientific Investigations Report 2022-5105*. <https://doi.org/10.3133/sir20225105>
- Viessman, W., & Lewis, G. (1997). *Introduction to hydrology*. Prentice Hall PTR.